



A Novel GNSS antenna design for automotive shark fin antenna module

Olçay Yigit*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Ege University, 06570, İzmir, Türkiye

Highlights:

- A novel end-fire antenna design is proposed
- Gain of 2 dBi and an axial ratio of 3 dB across the frequency band achieved
- Wideband impedance matching while maintaining a low axial ratio achieved

Keywords:

- Navigation systems,
- Circularly polarized antennas,
- Wideband satellite antennas

Article Info:

Research Article
Received: 07.10.2024
Accepted: 07.09.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1562624

Acknowledgement:

The authors would like to express their sincere appreciation to Lamp 83 Company for their valuable contribution to the technical measurements of classroom illumination and the evaluation of luminaires

Correspondence:

Author: Olçay Yigit
e-mail: olcyygt@gmail.com
phone: +90 553 101 4844

Graphical/Tabular Abstract

In this study, an end-fire antenna was designed in a fishbone (herringbone) shape. The design draws inspiration from Vivaldi-type antennas, which are also end-fire and linearly polarized. A transmission line model is employed for antenna analysis, and electromagnetic analyze tool is used to examine current direction and distribution in radiation analysis. To achieve circular polarization, two parallel plates were employed in this design. In the realized model (Figure A), the plates are placed 20 mm apart and positioned in parallel. Each plate includes a quarter-circular metallic section, and they are electrically connected via a conductor to realize the intended contact between them. A novel end-fire antenna design is proposed, demonstrating a gain of 2 dBi and an axial ratio of 3 dB across the frequency band, with radiation analysis illustrated through graphical representations.

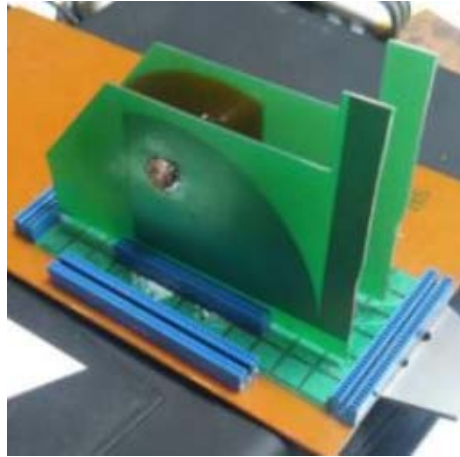


Figure A. Prototype of the Antenna

Purpose:

This study presents the design of a Global Navigation Satellite System (GNSS) antenna module integrated into a shark-fin-type antenna commonly used in the automotive industry. In addition, methods reported in the literature were presented, and the approach for achieving circular polarization was analyzed.

Theory and Methods:

A transmission line model is employed for antenna analysis, and electromagnetic analyze tool is used to examine current direction and distribution in radiation analysis. Circular polarization was achieved using Vivaldi antennas connected in opposite directions. The use of circularly polarized signals in satellite communication and the presence of multiple satellite navigation systems necessitate a wide operating frequency range, complicating the design and prompting the development of new techniques.

Results:

A novel end-fire antenna design is proposed, demonstrating a gain of 2 dBi and an axial ratio of 3 dB across the frequency band, with radiation analysis illustrated through graphical representations.

Conclusion:

To achieve wideband impedance matching while maintaining a low axial ratio, existing designs are reviewed and compared. By utilizing the wideband characteristic of the Vivaldi antenna, a wideband circularly polarized antenna was achieved using two antennas connected in opposite orientations.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Balık sırtı otomotiv anten modülü için uydudan küresel konumlama sistemi anteni tasarımı

Olca Yigit *

Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, İzmir, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Uçtan ışımalı yeni bir anten tasarlanmıştır
- 2 dBic kazanç ve 3 dB eksenel oran bant boyunca elde edilmiştir
- Geniş bantta eksenel oran değeri düşük olarak empedans uyumu sağlanmıştır

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.10.2024

Kabul: 07.09.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1562624

Anahtar Kelimeler:

Navigasyon sistemleri,
dairese polarize antenler,
geniş bantlı uyd antenleri

ÖZ

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan balıksırtı tipi anten modülü için küresel konumlama anteni tasarımı sunulmuş ve literatürdeki uydudan navigasyon sistemleri için tasarlanmış antenlerin elektriksel performansları ile birlikte boyutları analiz edilmiş, tasarımdaki performans artırıcı teknikler kıyaslanmıştır. Anten analizlerinde teknikleri destekleyen bilimsel yöntemlerden genel olarak kullanılan iletim hattı modeline göre yorumlama yapılmış ve anten radyasyon analizinde kullanılan tekniklerden akım yönü ve dağılımı için elektromanyetik analiz yazılımı kullanılmıştır. Uydu haberleşmesinin dairese polarize sinyaller ile olması ve birden çok uydu navigasyon sistemi olduğundan genel olarak çalışılan frekans aralığının geniş olması tasarımları zorlaştırmış ve yeni teknikler geliştirmeye öncülük etmiştir. Özellikle geniş bantta giriş empedansı uyarlanırken aynı zamanda eksenel oran değerinin küçük olması için literatür çalışmalarında bulunan tasarımlar incelenmiş ve karşılaştırma yapılarak yorumlanmıştır. En son olarak yeni bir anten tasarımı önerilmiş ve radyasyon analizi grafiklerle gösterilmiştir. Bu yeni öneride uçtan ışımalı anten tipinde bir anten sunulmuştur. Frekans boyunca anten kazancı 2 dBic, eksenel oran değeri 3dB'dir.

A Novel GNSS antenna design for automotive shark fin antenna module

H I G H L I G H T S

- A novel end-fire antenna design is proposed
- Gain of 2 dBic and an axial ratio of 3 dB across the frequency band achieved
- Wideband impedance matching while maintaining a low axial ratio achieved

Article Info

Research Article

Received: 07.10.2024

Accepted: 07.09.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1562624

Keywords:

Navigation systems,
circularly polarized antennas,
wideband satellite antennas

ABSTRACT

This study presents the design of a Global Navigation Satellite System (GNSS) antenna module integrated into a shark-fin-type antenna commonly used in the automotive industry. It analyzes the electrical performance and dimensions of existing GNSS antennas in the literature, comparing performance-enhancing techniques. A transmission line model is employed for antenna analysis, and electromagnetic analysis tool is used to examine current direction and distribution in radiation analysis. The use of circularly polarized signals in satellite communication and the presence of multiple satellite navigation systems necessitate a wide operating frequency range, complicating the design and prompting the development of new techniques. To achieve wideband impedance matching while maintaining a low axial ratio, existing designs are reviewed and compared. A novel end-fire antenna design is proposed, demonstrating a gain of 2 dBic and an axial ratio of 3 dB across the frequency band, with radiation analysis illustrated through graphical representations.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde teknolojinin değişmesi ile mekanik ve elektronik sistemleri uzaktan yönetmenin yanı sıra bu cihazların belli sınırlar dahilinde kendi kendilerine karar verip işlem yapmalarına imkan sağlanmıştır. Kendi kendine karar verme ya da akıllı bir sistemden gelecek harici bir komuta ihtiyaç duymaksızın işlem yapabilme özelliği en yaygın olarak ulaşımında kullanılmıştır. Mecburen sistemin kendi konumunu, hedef konumunu ve güzergah üzerindeki yol durumunu bilmesi gerektiğinden, anlık bilgi sağlayan navigasyon sistemleri bunun için kullanılmış ve uydudan navigasyon sistemleri sayesinde daha uzak mesafeler için daha doğru bilgi temin edilmeye çalışılmıştır.

Uydu navigasyon sistemleri, Küresel konumlama sistemleri (GPS), GLONASS, GALİLEO, ve BEi-Dou olarak sıralanabilir. Bu sistemlerin kendine özgü çalışma frekansı ve bilgiyi iletmek için modülasyon teknikleri bulunuyor. Haberleşmenin uydudan olması ve sinyalin dairesel polarize olması tüm sistemler için ortaktır [1]. Uydu navigasyon sistemi 3 kısımdan oluşur bunlar uydu, alıcı(kullanıcı) ve doğrulama sağlayan yer birimidir. Konum bilgisi uydudan gelen moduleli sinyalin alıcı tarafından işlenerek konum, zaman, hız gibi bilgileri edinmesi ile olur. Uydu bilgilerinin doğruluğu yer birimi ile kontrol edilir. Yer birimi uydu verilerini yenileyerek sapmaları düzeltir.

Konum bilgisi için tek bir uydudan gelen sinyal yeterli olmaz, alıcıya ulaşan uydu sinyalleri küresel şekilde yarıçap bilgisi verir. 4 kürenin kesişimi sayesinde konum ve yükseklik bilgisi noktasal olarak elde edildiği için en az 4 uydu sinyali sayesinde konum belirleme işlemi yapılmış olur. Bu nedenle antenlerin geniş ışıma hüzmesine sahip olması önemlidir [2].

Uydu haberleşmesinde birden çok sistem olması ve sivil- askeri uygulamalar ayrı olduğu için geniş bantlı, sinyaller dairesel polarize olduğundan kayıpları minimuma indirmek için dairesel polarize bir antene ihtiyaç duyulmuştur. İyonosfer tabakası adından da anlaşılacağı üzere iyon yüklü bir tabaka olup elektromanyetik etkileşimlerin sık olduğu bir yerdir. Sinyalin dairesel polarize olması iletim sırasında iletim yönüne dik her yöne elektrik alan bileşeni olduğu için etkilenme tüm bileşenlerde gerçekleşir ve bileşke etkileşim olabildiğince az olur. Böylece uydu sinyalleri iyonosfer tabakasından geçerken etkilenmesi azaltılmıştır.

Anten tasarımında ise geniş bantlı antenlere örnek olarak papyon tipi antenler, sarmal antenler, parazitik antenler, yarıklı antenler, kuplaj beslemeli antenler ve katmanlı antenler gösterilebilir. Burada papyon tipi antenler genellikle birbirinden farklı uzunluktaki dipol antenleri içerdiği için, sarmal antenler farklı uzunlukta iç içe dairesel antenler içerdiği için, parazitik antenler antenin etrafında bulunan iletken sayesinde sistemin empedansını geniş bir frekansa yaydığı için, yarıklı anten radyasyon yapan iletkenin üzerinde kapasitif etki ile birlikte elektriksel uzunluğu değiştiren yüzler bulundurduğu için, kuplaj beslemeli antenler besleme noktasından sonra yüzey üzerinde oluşturulan adacık bulundurduğu için ve son olarak katmanlı antenler her bir katmanda farklı rezonans antenleri içerdiği için geniş bant antenler olarak sıklıkla kullanılır.

Navigasyon antenleri genellikle uydu navigasyon sisteminde alıcı ünitesi olan yeryüzündeki kullanıcıların kullandığı alıcı ünitelerdir. 20 000 km mesafeden gelen uydu sinyalleri -130 dBm gücünde yeryüzüne ulaşır. Miliwatt seviyelerinde bile olmayan bu sinyal gücü için yüksek güçlü antenlere ihtiyaç duyulmaz. Genellikle gökyüzünün büyük bölümünü görece şekilde yani yarım güç ışıma açısının 90 dereceden fazla olduğu ve kazanç değerinin pozitif değerde olduğu

anten tipleri kullanılır. Bu anten tipleri için yama anten en iyi seçenektir. Horn anten, helisel anten tipleri de alıcı ünitesinde kullanılabilir ama kullanıcının taşınabilir cihaz ihtiyacına verimli olarak cevap vermez.

Literatüre göre, paralel iki iletken boyunca hareket eden elektronların karşılıklı etkileşimi sonucu boşlukta bir elektrik alan oluşur. Bu olay Faraday yasasının oluşmasına neden olmuştur. Bu elektrik alan iletkenler paralel oldukları sürece iletkenlerin uzandığı doğrultuya dik olarak hareket ederler. Paralellik bozulup bir birlerinden uzaklaştıkça elektrik alan kavisli bir yapıya dönüşüp, genişleyerek sistemden uzaklaşmaya başlar. Ayrıca iletken hatlar üzerindeki elektronlar salınım hareketi yapıyorlarsa, elektromanyetik dalga oluşmuş olur. Bu genişleme küresel koordinatlarda daha iyi açıklanabilir ve uzaklığın karesiyle ters orantılı olarak birim başına düşen şiddet azalır. Bunun nedeni genişleme küresel olduğu için genişleme küresinin yüzey alanı uzaklığın karesiyle doğru orantılı olmasındandır. Bu iletken üzerindeki elektronların hareketi ivmeli olduğunda ise elektromanyetik dalga oluşmuş olur. Çünkü elektronun zaman içerisindeki konum değişikliği oluşturduğu elektrik alanı da zamanda içinde değişmeye zorunlu kılar ve böylece dalga oluşmuş olur [3-5].

Literatürde bahsedilen antenler simülasyon ortamında tasarlanıp analiz edildikten sonra gerçekleştirilmiştir. Gerçeklenen antenler yansız (Anechoic Chamber) oda içerisinde ölçülmüştür [6-9]. Anten ölçüm parametreleri geri dönüş kaybı, kazanç, yönlülük, verim, açılal ışıma oranı, polarizasyon, eksenel oran parametreleridir [10-11]. Geri dönüş kaybı antenin giriş empedansı hakkında bilgi verir. Ölçüm cihazlarının portları 50 ohm olduğu için bu değer ne kadar küçük ise anten empedansı o kadar 50 ohma yakın demektir [12-14]. Kazanç değeri yansız oda da açığa bağlı vericiden gelen sinyalleri ne kadar aldığına bağlı olarak değişir. Bu ölçümde kazanç değeri bilinen referans anten kullanılır ve ölçümler kıyaslanır alınan sinyal gücüne göre kazanç değeri hesaplanır. Yönlülük tamamen açığa bağlı ışıma yoğunluğu ile ilgilidir. Bu ölçüm için küresel koordinatlarda tüm açılarda ya da belli açı aralıklarında alınan sinyal gücü ölçülür ve grafiğe aktarılır [15-18]. Polarizasyon ise ışıma doğrultusunda hangi yönlerde elektrik alan değişimleri olduğunu gösterir. Şöyle ki doğrusal polarizasyon bir doğrultuda gerçekleşen elektrik alan değişimlerini ifade eder, dairesel polarizasyon ise farklı koordinatlarda faz farklı bir ışıma olduğunu gösterir [19-23]. Eksenel oran ise birbirine dik koordinatlardaki ışıma büyüklüğü farkıdır. Bu fark ne kadar az ise o kadar anten dairesel polarize demektir [24-25]. Literatürde de bu parametreler ölçülmüş ve başka referanslar ile kıyaslanmıştır.

Yama anten tasarımı yapılan çalışmada dairesel polarize özelliği geniş banda yaymak için besleme noktasını radyasyon yapan yüzey üzerinde dairesel bir yarık ortasına yerleştirmiş ve parazitik elemanı yarıklı hale getirmiştir. Besleme etrafındaki yarık radyasyon yapan yüzeyde kapasitif etki oluşturmuş, kalite faktörünü düşürmüş ve böylece giriş empedans geniş bantta uyumlu hale gelmiştir [26]. Geleneksel olarak kullanılan bir yama anten bulunan çalışmada [27] performansı artırması açısından köşelere farklı büyüklüklerde topraklanmış ve yarıklarla radyatörden ayrılmış dairesel yamalar eklenmiştir. Bu farklı büyüklükteki dairesel yamalar anten radyasyonunda faz farklı bileşenlere neden olmuş ve dairesel polarize anten elde edilmiştir.

[26] ve [27]'de kapasitif etki oluşturan yarıklar bulunmaktadır. İletim hattı modeline eklenecek kapasitör elemanı [26]'da besleme kaynağının çıkışına yakinken, [27]'de kaynağın negatif girişine yakındır. Her iki sistemde de seri olarak anten empedansına kapasitör eklenmiştir.

[28]'de Navigasyon bantlarında çalışan manyetoelektrik anten örneği verilmiştir. Anten kavite içerisine yerleştirilmiştir. Anten doğrusal polarize olmasına rağmen boyutları oldukça küçük ve kazancı yüksektir. Bu nedenle dairesel polarize sinyalleri yarı gücünde alabilse de yeterli alışı kabiliyetine sahiptir.

[29]'da yarıklı bir yama ve düzgün olmayan toprak yüzey ile oluşturulmuş bir anten gösterilmiştir. Bu anten navigasyon bantları olan L1 L2 ve L5 bantlarını küçük ve kullanışlı boyutlarıyla kapsadığı için yenilikçidir. Sıradan yama antenin radyasyon yapan kısmı ile toprak kısmında bulunan yarıklar rezonans frekansı ayarlamak için yeterli olmuştur.

[30]'da sarmal şerit besleme kullanılarak prizma şeklinde yarıklı heliks şeklinde geniş eksenel oran bant genişliğine sahip bir anten gösterilmiştir. Anten üzerindeki yarıklar genelde kapasitif etki oluşturacağı düşünülse de bu tasarımda sinyalin iletim yolu artırarak induktif etkinin artmasına sebep olmuştur. Bu nedenle daha kısa tasarlanmış antenin kapasitif giriş empedansı induktif etki sayesinde gerçel değer almıştır.

[31]'de anten kavite içerisine konularak kazancı artırılmıştır, döngüsel radyatör ise navigasyon frekansına rezonansa getirilmiş ve hibrit besleme ağı sayesinde dairesel polarize olmuştur. Kavite sayesinde antenin yönlülüğünü azaltan etrafa saçılan ve arkasında saçılan dalgalar yönlendirilmek istenilen açıya yönlendirilir. Antenin altına denk gelen yansıtıcı yüzey radyasyon kazancına direk etki yaparken, yanlarındaki duvarlar görüntü teorisine göre antenin görüntülerinin oluşmasına neden olur ve bu görüntüler ile birlikte kazancı artırması beklenir. Görüntülerin kazanca katkısının olması için duvar ile anten arasındaki mesafe doğru ayarlanmalıdır. Antenlerden yayılan sinyaller farklı fazlarda üst üste binerse kazanç düşmesi yaşanır. Bu nedenle anten tabanında bulunan yansıtıcı da dahil olmak üzere tüm uzaklıkların dalga boyunun dörtte biri kadar olması idealdir. Burada temel prensip birbirinden faz farklı iki besleme hattı sayesinde, birbirine dik koordinatlarda faz farklı bir sinyal oluşturarak dairesel polarize elde etmektir.

[34]'deki şekilde parazit elemanlar daha çok rezonans frekansını ve kazancı etkileyen faktörlerdir. Parazitik sayesinde empedans uyumu yapmak kolaylaşır. Parazitik eleman radyatör ile arasında kapasitif etki oluşturur ve bu kapasitif etki antenin kapasitif etkisine paralel olduğu için toplam giriş kapasitansı değerini artırır ve anteni daha küçük frekanslarda rezonansa girmesini sağlar.

[35]'de her bir anten iki besleme sayesinde dairesel polarize hale getirilmiştir. Dizi ise parabolik bir yüzeye yerleştirilerek ışıma hızı genişletilmiştir. Anten dizisi elemanlarının yüzeye değil de kavisli bir yüzey üzerine oturtulması 2 konuyu dikkat edilmesi gerektirir. Altında buluna yansıtıcı yüzeyin radyatöre uzaklığı ne kadar değişiyor ve yüzeyde eğrilik nedeniyle anten arkasına giden sinyal hangi açı ile nereye gidiyor. Bu sistemde de görüntü teorisindeki gibi antenlerin oluşturduğu elektrik alanlar görüntüleri le birlikte ele alınır. Elektrik alanın büyüklüğü ve yönü görüntü anteninde elektrik alan ve yönünü belirler ve uzak lan ışımasında radyasyon şekli belirlenir.

[36]'da doğrusal polarize bir anten olan karesel anten deseni değiştirilerek dairesel polarize anten olmuştur. Burada deseni yama üzerinde akımları yönlendirip faz farkı oluşturacak şekilde yapmak anten polarizasyonunu dairesel hale getirmiştir. Elektromanyetik dalga polarizasyonları akımın kaynağı olan anten yüzeyleri ile değiştirilebilir. İletken yüzey üzerine homojen dağılan akım doğrusal polarize radyasyon yayarken, birbirine dik iki doğru belirleyip bu

doğruların biri kısaltıldığında 90 derece faz farklı iki sinyal elde edilmiş olur. Bu sayede dairesel polarize sinyal elde edilir.

[37]'de geniş bant özelliği olan papyon tipi anten gösterilmiştir. Burada dairesel polarize olması için 2 tane papyon tipi anten birbirine dik olarak yerleştirilmiştir ve besleme ağı ile faz farkı verilmiştir. [38]'de ise yarıklar ve besleme noktası sayesinde anten dairesel polarize hale gelmiştir. Burada önemli olan yarıkların akımı yönlendirerek koordinatlar arasında faz farkı oluşturmaktır.

[39]'daki yama anten köşelerinden kırılarak iki koordinat arasında faz farkı oluşturulmuştur. Bu sayede dairesel polarize anten elde edilmiştir. Ortasındaki boşluk ve altındaki yükseklik sayesinde bant genişliği dağılmaya çalışılmıştır. [40]'daki antende ise sarmal anten benzer bir yapı kullanılmıştır. Burada kavisli hatlar ardışık şekilde sıralanmış ve besleme hattı sayesinde faz farkı olarak beslenmiştir. Böylece ideal dairesel polarize anten elde edilmeye çalışılmıştır [40].

[41]'de köşeleri kırılan anten üzerine yarıklı konularak navigasyon anteni yapılmaya çalışılmıştır. Aynı şekilde anten üzerindeki akım dağılımı görülmektedir. Yarıklı etrafında akım yoğunluğunun arttığı gözlenmiştir. Bu nedenle yarıklı farklı frekanslarda radyasyona neden olmuştur. [42]'de ise faz farklı bir besleme hattı oluşturularak geleneksel kare yama anteni tasarlanmıştır. Tasarımda bulunan yarıklar anten empedansını ve eksenel oran bant genişliğini düzenlemek için kullanılmıştır. Burada yamanın boyutları rezonans frekansını etkilerken besleme ağındaki faz farklı kollar sayesinde radyasyon dairesel polarize olmuştur. Bazı çalışmalarda bu faz farkı 2 kol ile sağlanırken burada 4 kol ile eksenel oran iyice düşürülmüştür.

Ön cam 30 derece açıyla eğik olduğu için burada anten radyasyonunu 30 derece kayması sağlanmıştır [43]. Tasarlanan anten eğimli bir yüzeye yerleşeceği için radyasyonu bu eğimi karşılayan bir yöndedir. Anten radyasyon yönünü değiştiren en önemli etki anten haricinde bulunan yansıtıcılar ya da anten desenindeki kapasitif etki yapan yarıklardır. Sağdaki anten ise 4 kollu Arşimet sarmal antenidir. Sarmal anten döngüsel yapıda olması ve uzun hatta sahip olması nedeniyle geniş bantlı antenler sınıfındadır. Anten tabanı radyatör ile arasındaki boşluk nedeniyle bant sınırlamasına nedne olur. Bu nedenle bu aralık doğru belirlenip gerekli frekans aralığında çalışması sağlanır. Anten tabanında bulunan boğumlar sayesinde kazanç artırılmış ve anten küçülmüştür [44]. Bu boğumlar antenin farklı yerlerine denk gelmektedir. Sarmal anten yarıçapı boyunca ışıma yapan bir antendir. Yani merkezden dışarıya doğru düşen frekanslarda ışıma yapar. Şekilde görüldüğü üzere dalga boyu arttığı için dışa doğru hava boşluğunun artması sağlanmıştır.

[45]'te dairesel polarize olması ve geniş bantlı olması nedeniyle sık kullanılan bir anten tipi sunulmuştur. Burada papyon tipi anten kıvrılarak kollar arası 90 derece açı olacak şekilde yerleştirilmiş ve bir yay vasıtasıyla besleme noktasından itibaren iki kol 90 derece faz farklı beslenmiştir. Papyon şekli doğrusal antenler içinde geniş bantı sağlamak için kullanılan bir anten şeklidir. Papyon şekli anten besleme noktasında anten uçlarına farklı uzunluklarda akım yolları oluşmasına neden olur. Bu farklı boylar farklı frekanslarda radyasyona yapar ve birleşiminde geniş bantlı sinyal oluşmuş olur. Bu anten tasarımında ise geniş bantlı anteni kıvrarak faz farkı verme sayesinde geniş bantlı dairesel bir anten sunulmuştur. Teorik olarak incelendiğinde iki kol arasında buluna iki kolu birbirine bağlayan ve 90 derece faz farkı veren dairesel halka merkez frekans dalga boyunun dörtte biri uzunlukta olarak belirlenmiştir. İletim hattı teorisine göre, iletken hat bir yalıtkan üzerinde ise uzunluk yalıtkanlık katsayısı ile ters orantılı olarak değişir. Hattın kalınlığı ise bağlantının empedansını belirleyen bir parametredir. Bu sa yede ideal kalınlık ve uzunluk bulununca tasarım yapılmış oluyor.

[46]'da mikroşerit hatlar ile helisel anten tasarlanmıştır. Burada helisel anten uçtan ışımalı bir antendir. Küçük boyutlarda ve geniş bantta dairesel polarize anten özelliği gösterir. 2 paralel FR4 kart ile teller ile birbirine bağlanarak kart üzerindeki zikzaklı hatlar ile birlikte helisel bir yapı elde edilmiştir. [40]'da geleneksel dairesel bir anten ve faz farkı sağlamak amacıyla 90 derece yer farklı çatallı besleme hattı kullanılmıştır. Besleme hatları uzunluğuna bağlı olarak küçük frekans aralığında faz farkı sağlarken bu çalışmada besleme hattı üzerine parazitik u şeklinde yarıklı bir katman daha konularak kapasitif etki sayesinde bu bant genişliği artırılmış hatta 2 bantta çalışan anten elde edilmiştir. [41]'de navigasyon bantlarını kapsayan 3 ayrı frekans aralığında rezonansa giren bir yama anten tasarlanmıştır. Daha sonra bu rezonans frekanslarda dairesel polarize olması için besleme hattını sıralı bir şekilde faz farklı bir sistem olarak tasarlayıp, kompakt bir anten tasarımı sunulmuştur [42-44]. [45]'te sarmal yapıda 4 ayrı mikroşerit hat birbirini takip eden dairesel bir düzen içerisinde yerleştirilmiştir. Tek bir besleme girişi ve 4 ayrı çıkışı olan bir anahtarlama sistemi sayesinde dairesel polarize geniş bantlı bir anten üretilmiştir. Burada anahtarlama sistemi antenin radyasyon yönünü değiştirebilmek için yapılmıştır. Radyasyon yönünü değiştirmek karıştırmaya karşı korunaklı sistemler için sıkça kullanılan bir yöntemdir. [46]'da anten köşelerine topraklanmış parazitik yapılar konmuştur. Bu sayede navigasyon bantlarında rezonansa giren anten dairesel polarize özelliğine sahip olmuştur. Burada tüm parazitik elemanlar aynı boyutlardadır. Sadece anten geometrisi değiştirilerek faz farkı elde edilmeye çalışılmıştır. Dairesel polarize sinyallerin prensibi birbirine dik koordinatlardaki radyasyonların arasında 90 derece faz farkı olmasıdır. [47]'de ön cama yerleştirilebilecek bir anten tasarımı gösterilmiştir. Burada antenin alt taşı ön cam olarak kabul edilmiş ve tasarım boyutları ona göre hazırlanmıştır. [48] ve [49]'da UKS(GPS) bandında yama anten tasarlanmıştır. Bu yama antenler ile 4 elemanlı bir dizi oluşturulmuştur. Toprak yüzeyde oluşturulan deformasyon sayesinde antenler arasında izolasyon artmıştır. Bu deformasyon ise metal yüzey üzerine yalıtkan malzemelerden oluşan yapılar eklenmiştir. Bu yapılar antenler arasında bulunarak yansımaları engellemiş ve böylece izolasyon artmıştır. [50]'de ise anten performansını artırmak için toprak yüzey olarak yapay manyetik yüzey kullanılmıştır. Yapay manyetik yüzeyler genellikle yüksek yüzey empedans gösterdiği için radyasyon ve yansıtıcı arasındaki boşluk azaltılır. Ayrıca etrafa yansımalar bu yüzey sayesinde engellenir. [51]'de ise yıldız şeklinde bir anten tasarlanmıştır. Yıldız şeklinde olması farklı frekanslarda rezonansa girmesini sağlamış ve navigasyon bantları için bu özellik kullanılmıştır.

Bu çalışmada uçtan ışımalı bir anten sunulmuştur. Balık sırtı şekline uygun olması ve yüksek performans göstermesi nedeniyle uçtan ışıma yapan Vivaldi antene benzeyen bir yapı oluşturulmuştur.

2. Deneyisel Metot (Experimental Method)

Anten tasarımı, elektromanyetik teorisini, elektriksel parametrelerinden dolayı malzeme bilgisini, şekilden dolayı geometri bilgisini ve tecrübesini gerektirir. Elektromanyetik teori, atom modelindeki elektron başka bir deyişle negatif elektriksel yüklerin kendisine ve etrafına etkisini zamana ve konuma bağlı olarak anlatmaya çalışır. Atom modeli ile birlikte malzemeleri sınıflandırmak ve bunların elektriksel özelliklerini analiz etmek bu teorinin nasıl çalıştığını deneysel olarak gözlemlemek mümkündür. Malzemenin elektriksel özellikleri yanı sıra geometrisi de bu deneyi etkileyen faktörler arasındadır. Şeklin geometrik değişimleri malzemenin elektriksel özelliklerinin 3 boyutlu uzayda etkilerini değiştirebilen en büyük etmenler arasındadır. Teori-geometri-malzeme üçlüsünü içeren denklemler anten tasarım ve analiz için yeterli olabilmektedir. Bunun için Maxwell denklemleri olarak adlandırılan, geçmişten günümüze kadar keşfedilmiş elektromanyetik

olayı açıklayan denklemler ile birlikte manyetik alan ile elektrik alan arasındaki bağıntıda eksik olan terimin bulunması ile oluşturulmuş denklemler kümesi kullanılmaktadır.

2.1. Malzemeler ve Hazırlama Teknikleri (Materials and Preparation Techniques)

Anten tasarımlarında radyasyon yapan iletken yalıtkan bir malzeme üzerine yerleştirilir. Bu malzeme sayesinde anten daha sert ve dayanıklı olur ve aynı zamanda malzemenin yalıtkanlık katsayısına bağlı olarak radyasyon iletkenin boyutları küçülür. Gerçekleme amacıyla kullanılan malzemeler FR2-3-4, Rogers, Taconic, seramik malzemeler piyasada bulunur. Bu malzemelerin kalınlıkları milimetre mertebelerinde olup yalıtkanlık katsayıları ise yaklaşık olarak 2 ile 9 arasındadır. Seramik gibi malzemeler ise çok büyük yalıtkanlık katsayısına sahip olabilirler, 30 gibi. Genel anlamda bu malzemeler üzerinde 35 mikron kalınlığında bakır katmanlar bulunur ve bu katmanlar kazınarak ya da bakır oksit ile çözünerek anten şekli ortaya çıkarılır [5].

İki tarafı bakır olan yalıtkan malzemeler fiber kazıma, mil ile kazıma veya oksitleyerek çıkarma işlemlerine tabi tutularak anten deseni oluşturulur. En yaygın olanlarında mil ile kazıma ve kimyasal oksitleme ile desen oluşturma gibi yöntemlerde genelde 100 mikrometre hassasiyet olabilir. Yani herhangi bir hattın kalınlığı veya iki iletken ada arasındaki uzaklık en az 100 mikrometre kadar olabilir. Ayrıca anten besleme hatlarında veya anten tasarımlarında RF hattının olduğu yerlerde özellikle keskin köşeler tercih edilmez. Daha çok kavisli veya kesikli köşeler tercih edilir. Keskin köşelerde yük birikme ya da kuplaj sorunu olduğundan tercih edilmez. Bu sorunlar beklenmedik yansımalar, radyasyona, iç karışıklığa, iletilen veri bozukluğuna neden olur.

2.2. Geometri (Geometry)

Genel olarak yama antenler bir yüzey üzerindeki bakır katmanın şekillenmesiyle oluştuğu için 2 boyutlu olarak düşünülebilir. Bu iki boyutlu yüzey antenler, dikdörtgen, kare, daire, üçgen, sarmal şekillerde olup üzerlerinde bulunan kesik, yarı ve benzeri çeşitli desenler ile istenilen performans yakalanmaya çalışılır. Böyle tasarımlarda fiziksel boyutlar ile elektriksel boyutlar farklılık gösterir. Sinyal dalga boyu iletkenin iletkenlik katsayısı ve üzerinde bulunduğu yalıtkanın yalıtkanlık katsayısı ile değişkenlik gösterir ve elektromanyetik olayda boyutlar dalga boyu ile bağımlıdır. Ayrıca üzerinde bulunan desenler akımın yönünü ve büyüklüğünü değiştirdiği için radyasyonu büyük ölçüde etkiler. İndükleme ve kuplaj etkisi oluşturarak antenin rezonans frekansını değiştirebilir veya çoğaltabilir.

$$W = \frac{c}{2f\sqrt{\epsilon_r + 1}} \quad (1)$$

W anten genişliği, c ışık hızı, f anten çalışma frekansı, ϵ_r bağlı elektrik geçirgenlik katsayısı (Eş. 1),

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(\sqrt{1 + 12(h_s/W)} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\Delta L = h_s(0.412) \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} + \frac{W/h_s + 0.264}{W/h_s + 0.8} \left(\sqrt{1 + 12(h_s/W)} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (4)$$

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (5)$$

Antenin topraklama yüzeyi ve yönlü hale getirmek için kullanılan yansıtıcı yüzeyi olarak kullanılan iletken yüzeyin genişliğini ve uzunluğu W_g ve L_g olarak gösterilir (Eş. 6, Eş. 7).

$$W_g = 6h_s + W \quad (6)$$

$$L_g = 6h_s + L \quad (7)$$

Yama anten kenardan beslendiği için akım dağılımına bakıldığında sağa ve sola doğru yönelen akımlar sayesinde iki adet monopoller anten dizisi olarak düşünülürse ve bu monopollerin uzunluğu dalga boyunun dörtte biri olduğu için toplamda uzunluk yani W dalga boyunun yarısı olmalı burada altında bir yalıtkan olduğu için bağıl katsayısının karekökü kadar bu uzunluk azalır (Eş. 4). Elektromanyetik dalganın bulunduğu ortam homojen bir yapı değildir. Radyasyon yapan parça hava ortamında bulunan bölgeleri, yalıtkanla etkileşen bölgeleri ve topraklama sistemine yakın olduğu için arasındaki etkileşimi göz önüne alınmalıdır. Bu nedenle yalıtkanlık katsayısı, genişlik ve en gibi parametrelerde etkinlik değeri hesaplanır (Eş. 2, Eş. 3, Eş. 4). Yalnız iletkenin her tarafında bu yalıtkan olmayıp sadece altında olduğu için bu etki de belli oranda azalacaktır (Eş. 1). Denkelemin çarpanı olan $C/2f$ ise dalga boyunu yarısına tekabül ediyor (Eş. 1). İkinci terim çok küçük olduğu için yalnızca bağıl katsayı +1 /2 terimi kullanılmıştır (Eş. 2).

$$r_1 = \alpha(\Phi) + r_0 \quad (8)$$

r_1 sarmal antenin yarıçapı, α büyüme hızı(mm/rad) , Φ dönme açısı (rad), r_0 sarmalın başlangıçtaki yarıçapı olmak üzere sarmal bir anten Eş. 8 ile ifade edilebilir ve sayısal sonuçlara ulaşılabilir [8]. Örneğin r_0 iç yarıçapı sarmal antenin yüksek frekanstaki rezonans frekansını, r_1 ise düşük frekanstaki rezonans frekansını belirler. α büyüme hızı anten empedansını sarmalın kolları arasındaki uzaklığı belirlediği için etkiler. Büyüme hızı çok olduğunda sarmalın dairesel polarize olma özelliği azalır, kolun elektriksel uzunluğu azaldığı için geniş bantta radyasyon yapamaz. Büyüme hızı çok küçük olduğunda ise sarmal antende kollar arası uzaklık azaldığı için anten giriş empedansı kapasitif olur, sarmal özelliğinden kaynaklı geniş bant özelliği yüzeysel yama antene benzediği için kaybolur ve dairesel polarize anten olmaz. Büyüme hızı iyi optimize edilmelidir. Kuplaj etkisi ile sarmal sayısı ve yarıçapı antenin istenilen özelliği taşıması için denge içinde olmalı.

2.3. Anten Tasarımları (Designs of Antennas)

Literatür Taraması sonucunda araştırılan bazı makaleler ile sunulan antenin performans değerleri Tablo 1’de verilmiştir. Sunulan antenin kazancı diğer antenlerden 1-2 dB kadar küçük olmasına karşın tüm bantlarda kararlı bir değerde olması ve araç üzeri anten modülleri için kullanışlı bir şekilde olması öne çıkan avantajlarıdır.

3. Anten Tasarımı (Design of Antenna)

Antenler ışıma yönüne göre de gruplara ayrılır. En blirgin özelliktekiler enine ışımalı (broadside) ve uçtan ışımalı (endfire) anten tipleridir. Enine ışımalı antenler besleme düzlemine normal yönde ışıma yaparken uçtan ışımalı antenler ise besleme düzlemine dik yönde ışıma yapar. Uçtan ışımalı antenler boyuna uzarken, enine ışımalı antenler yüzeye yakın enli antenlerdir. Bu çalışmada balıksırtı şekline uygun olması nedeniyle uçtan ışımalı anten tasarlanmıştır. Anten tasarımı Vivaldi tipi antenlerden esinlenerek yapılmıştır. Vivaldi tipi antenler de uçtan ışımalı antenler grubunda bir antendir yalnız doğrusal polarize bir antendir. Dairesel polarize olması için bu tasarımda iki paralel plaka kullanılmıştır.

Şekil 1’de simülasyon ortamında tasarlanmış uçtan ışımalı anten görülmektedir. Üzerinde çeyrek dairesel metal bulunan plakalar birbirine 20 mm uzaklıkta paralel olarak yerleştirilmiş ve bir iletken sayesinde birbirine teması gerçekleşmiştir.

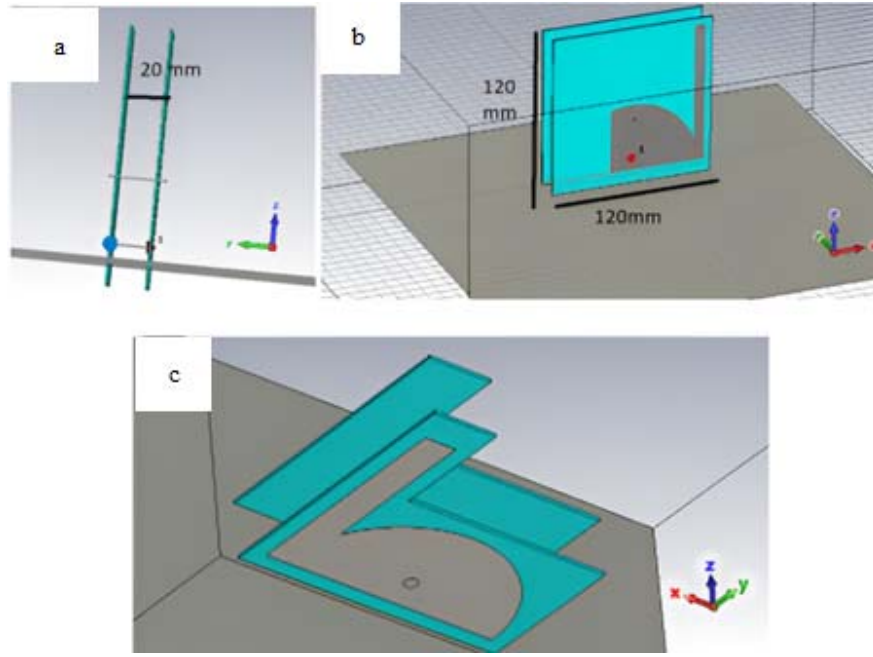
Vivaldi tipi anten tasarımı çalışılan frekans aralığı, kullanılan malzeme özelliği boyutları etkilemektedir. Genellikle bu anten tiplerinde besleme yarığa yakın yerde olur. Ayrıca hat kalınlıkları 50 ohm olması için optimize edilir.

Tasarımda ise iki adet Vivaldi anten aralarına boşluk bırakılarak birleştirilmiştir. Bu sayede antene dairesel polarize özelliği kazanmıştır. Çünkü bir yönde polarize olan anten, enine genişleyerek diğer yönde de radyasyon yapması sağlanmıştır.

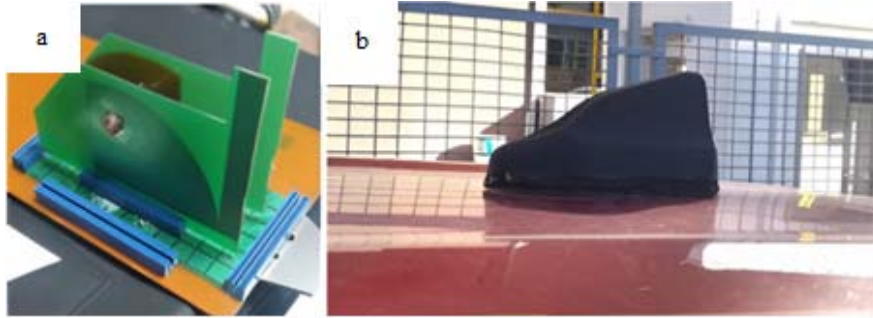
Tasarımda iki anten birleştirilerek tek yerden besleme noktası seçildiği için empedans uyumunu sağlamak için antenlerin her biri 100 ohm giriş empedansına sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Antenler birbirine paralel bağlandığı için tüm sistem 50 ohm giriş empedansına inmiştir.

Tablo 1. Literatür Anten parametre değerleri (Values of Antenna Parameters at Literature)

Anten Ref No	Çalışma Frekansı	Kazanç	Eksenel oran	Empedans bant genişliği	Avantaj/Dezavantaj
12	L1-L5 band	5 dBic	<3 dB	L1-L5 band	Esneklik
14	L1-L5 band	5 dBic	< 3dB	L1-L5 band	Kavite içerisinde kompakt
16	L1-L5 band	5.5 dBic	< 3dB	L1-L5 band	Yarım küre üzerinde anten dizisi kullanılarak 1 tüm üst yarım kürede ışıma yapmaktadır.
17	L1 band	7.6 dBic	< 3dB	L1 band	Yapının ortasına eklenen ek iletken sayesinde performans artırılmıştır.
Sunulan Tasarım	Navigasyon Tüm band (1.164GHz-1.610 GHz)	4 dBic	< 3dB	Navigasyon bandı (1.164 GHz-1.610 GHz)	Uçtan ışımalı anten tipi kullanılarak endüstriyel formda tasarım gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Anten tasarımı simülasyon ortamında gösterimi a) yan görünüm b) ön görünüm c) üst görünüm
(Presentation of antenna design in simulation a) side view b) front view c) top view)



Şekil 2. a) Üretilen Uçtan ışımalı anteni b) prototipin araç üstü görünümü
(a) Prototype of Endfire Antenna b) Scene of Antenna at the top of the vehicle)

Antenin polarizasyonunu belirlemek için ölçülmesi gereken en temel parametrelerden birisi eksenel oran değeridir. Bu değerin birbirine çok yakın olması farklı açılarda da aynı sinyali yayıldığını gösterir. Bu ölçüm sonucunda eksenel oran değeri 3 dB ve altında değerdendir.

Şekilde 2’de prototipi hazır hale getirilmiş anten bulunmaktadır. Simülasyon ortamında hazırlandığı üzere FR4 malzeme üzerine gerçekleştirilmiş radyatörler birbirine bağlanarak anten oluşturulmuştur.

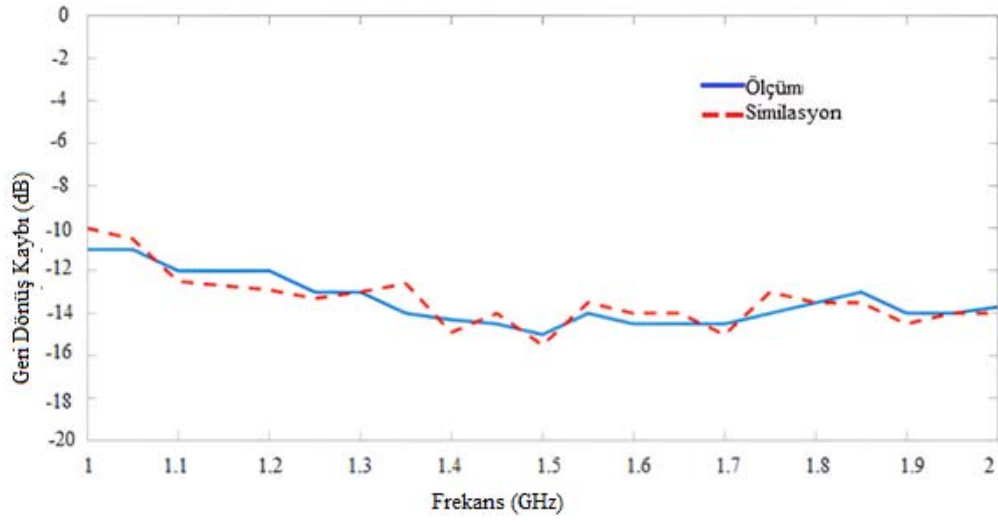
4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Simülasyonlar yazılım ortamında nümerik yöntemler ile çözülmüştür. Analiz programı içerisindeki ayarlar kısmında simülasyon frekans aralığı 1-2 GHz, yapıyı bölümlere ayıran mesh sayısı 15 ve analiz yöntemi olarak zaman aralığı seçilmiştir.

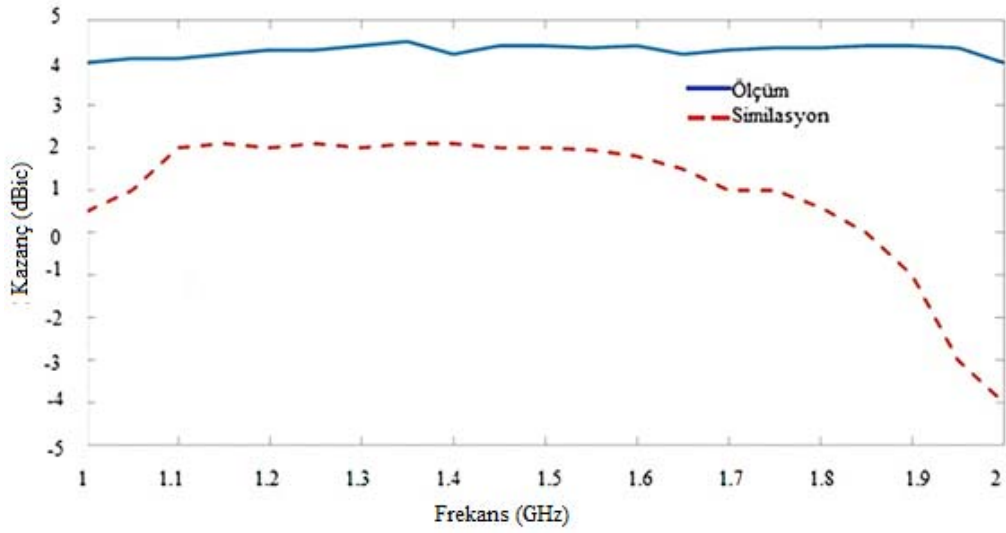
Şekil 3’te antenin giriş portundaki geri dönüş kaybı değerleri verilmiştir. Bu grafiğe göre GNSS bandı boyunca anten geri dönüş kaybı -10 dB altındadır. Geri dönüş kaybı değeri ile birlikte belirlenen parametreler durağan dalga oranı ve giriş empedans değerleridir.

Alınan sonuçlara göre empedans değerinin 50 Ohm yakın olduğu anlaşılmıştır ve durağan dalga oranı ise 1.4 civarındadır. Durağan dalga oranı giriş portunda gelen sinyal ile giden sinyal üst üste binmesiyle oluşan sinyalin tepe noktalarının maksimum ve minimum değerleri arasındaki orandır. Yani oluşan sinyal tek büyüklüğe sahip salınım yapan bir sinyal değildir. Tepe noktaları arasında büyüklük değerleri değişebilmektedir. Bunun nedeni ise yansımış olan 180 derece faz farklı sinyal ile giden sinyal büyüklükleri birbirinden farklı olduğu için üst üste binip toplandığında deve hörgücü gibi bir şekil elde edilmektedir. Bu hörgüç şeklindeki sinyalin tepe noktaları büyüklükleri arasındaki oran ise yansıyan sinyalin oranı hakkında bilgi vermektedir.

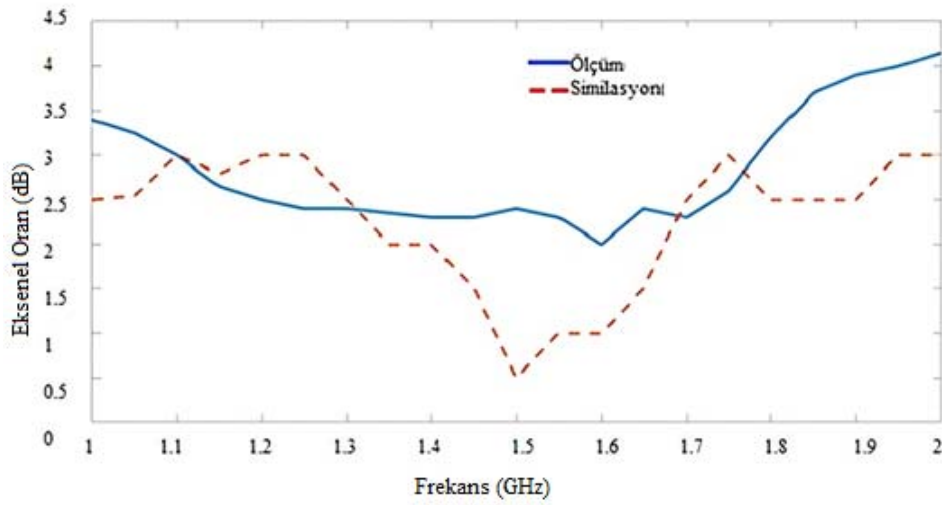
Şekil 4’te simülasyon ortamında tasarlanmış antenin kazanç grafiği görülmektedir. Grafiğe göre bant boyunca kazanç değişimleri büyük oranda görülmemektedir. Bant boyunca düzgün dağılmış bir kazanç değeri vardır. Simülasyon ile ölçüm arasında 2 dB’den fazla fark vardır. Simülasyonda yansıtıcı bölge dar bir alan seçilmişken, ölçümlerde yansıtıcı araç tavanıdır. Araç tavanının geniş olması kazancı artıran etkenlerden biridir.



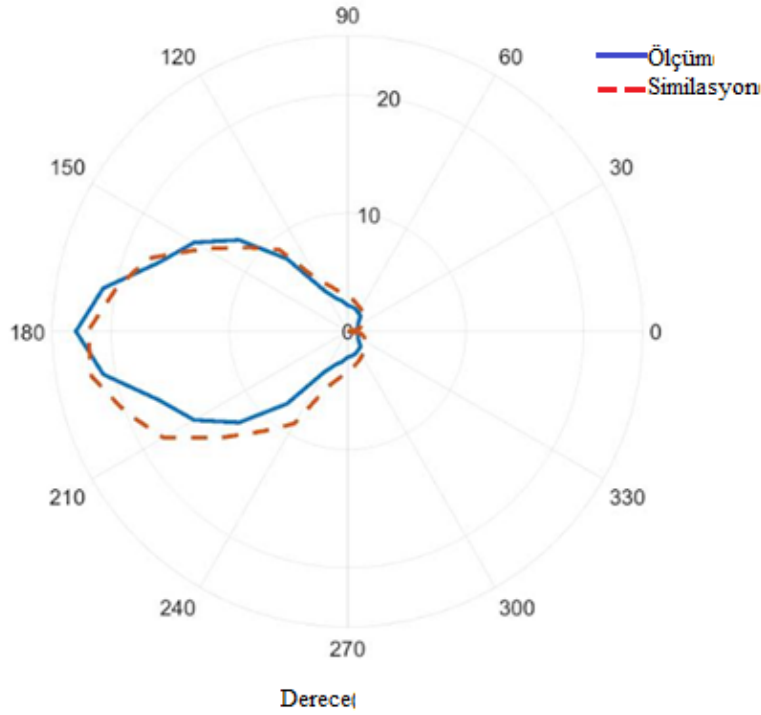
Şekil 3. Geri Dönüş kaybı Frekans grafiği (Graph of Return Loss versus Frequency)



Şekil 4. Kazanç Frekans grafiği (Graph of Gain versus Frequency)



Şekil 5. Eksenel Oran Frekans grafiği (Graph of Axial Ratio versus Frequency)



Şekil 6. Işıma Deseni polar grafiği (Radiation pattern polar graphic)

Navigasyon bandı 1.1-1.6GHz frekans aralığında anten kazancı 4.1 dBic ile 4.5 dBic arasında değişmektedir. Kazanç değerlerinde maksimum ile minimum değer arasında 0.4 dB olması ve kazanç değerinin 4.3 dBic etrafında olması anten performansının navigasyon alıcılarında kullanılabilirliği bakımından iyi olduğunu gösterir. Yönlü bir antenden alınabilen kazançlar 5 ile 8 dBic aralığında olabiliyor. Bu değerler anten boyutları ve tasarım isteklerine göre büyük farklar gösterir. Bu çalışmada balık sırtı denilen modülün içine yerleştirilmesi için verilen alan dar olduğu için tasarıma göre yüksek kazanç elde edilmiştir.

Antenin polarizasyonunu belirlemek için ölçülmesi gereken en temel parametrelerden birisi eksenel olan değeridir. Bu değer birbirine çok yakın olması farklı açılarda da aynı sinyali yayıldığını gösterir. Bu ölçüm sonucunda eksenel oran değeri 3 dB ve altında değerde olduğu görülmüştür.

Şekil 5'te verilen değerler antenin polarizasyon özelliği hakkında bilgi verir. Eksenel oran değerinin 3 dB civarında olmasından dolayı anten dairesel polarize bir antendir. Eksenel oran birbirine dik iki koordinatta antenin radyasyon şiddetleri arasındaki farktır. Tasarlanan anten uçtan ışımalı tipte olduğu için anten ışıma açısı geleneksel antenlerden dardır. Şekil 6'da görüldüğü üzere antenin 1575 MHz'de ışıma açısı 60 derecedir. Eksenel oran 1575 MHz'de tüm açılarda ölçülmüştür. Dairesel polarize özelliği gösterdiği kabul edilen değer 40 derece içerisinde ölçülmüştür.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Tasarlanan anten balıksırtı tipi araç antenleri için hazırlanmış plastik kutulara kolaylıkla yerleştirilebilecek boyutlardadır. Antenin uçtan ışıma tipinde olması enine 20 mm ve boyuna 120 mm boyutlarda olması modül içerisinde bulunan Wi-Fi, GSM gibi antenler ile arasında izolasyonu kolaylaştırmıştır. Aynı zamanda araç üzerinde yer tasarrufu sağlayarak başka haberleşme sistemleri antenlerinin yerleştirilmesine imkan sağlamıştır. Tasarlanan anten GNSS bandı

boyunca (1.164-1.610 GHz) dairesel polarize olup kazanç değeri 2 dBic üzerindedir. Ayrıca giriş geri dönüş kaybı -10 dB'nin altında olup 50 ohm kablo ve alıcı girişlerine uyumludur.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Ünvvar Elektronik A.Ş. ve Tubitak Proje No:7170734 ile desteklenmiştir. Test ve ölçümler sırasında yardımcı olan meslektaşım Muhammed Sözer'e teşekkür ederim.

Kaynaklar (References)

1. Senov H. M., Bolgov Y. V. and Yurchenko N. V., Receiving and Decoding Receiver Information of Global Satellite Navigation System, 2020 International Conference Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies (IT&QM&IS), Yaroslavl, Russia ,408-410. 2020,
2. Bhardwaj S. C., Shekhar S., Vidyarthi A. and Prakash R., Satellite Navigation and Sources of Errors in Positioning: A Review, 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication & Materials (ICACCM), Dehradun, India 43-50, 2020.
3. Balanis C. A., Antenna Theory Analysis and Design, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
4. Stutzman, W.L. and Thiele, G.A., Antenna Theory and Design. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, 2012.
5. Alqadami A. S. M. and Jamlos M. F., Effect of a flexible polymer dielectric and magneto-dielectric composite substrates in antenna array, 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Hobart, TAS, Australia, 1-4, 2015
6. Shah Sadman A., A. M. and Hossam-E-Haider M., Design and Performance Analysis of a Slotted Microstrip Patch Antenna for Different GNSS Frequencies, IEEE 7th International Conference on Engineering Technologies and Applied Sciences (ICETAS), 1-6, Kuala Lumpur, Malaysia, 2020.
7. Zhao Q., Zhu Q., Yang P., Zhang Z., Luo X. and Yan Z., An Antenna Design of GNSS Terminal on B3 Frequency, 2023 2nd International Conference on Big Data, Information and Computer Network (BDICN), 130-133, 2023.

8. Nakano H., Nogami K., Arai S., Mimaki H., and Yamauchi J., A spiral antenna backed by a conducting plane reflector, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 34, 6791–796, 1986.
9. Nasimuddin and X. Qing, A Single-feed Compact Wideband Circularly Polarized Antenna for INMARSAT/GNSS Applications, 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 1-4, 2020.
10. Nasimuddin and Chia M., Dual-Polarized/Dual-Band Antenna with Compact Size for GNSS and 5G NR Applications, 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Madrid, Spain, 1-5, 2022.
11. Causse A., Bernard L., Collardey S. and Sharaiha A., Small Conformal Cavity-Backed Magnetolectric Antenna for GNSS Bands, 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Madrid, Spain, 1-5, 2022.
12. Savarkar O., Nhayade S. and Rathod K., Design and Development of Geodetic Grade Antenna for GNSS & NavIC Application, 2023 IEEE Wireless Antenna and Microwave Symposium (WAMS), Ahmedabad, India, 1-6, 2023.
13. Yuan J., Qiu K. and Chen Z., A Compact Helix Antenna With Wide Axial Ratio Bandwidth Using a Spiral Microstrip Coupling Feedline for GNSS Applications, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20 (4), 433-437, 2021.
14. Che J.K., C. C. Chen and J. F. Locke, A Compact Cavity-Backed Tri-Band Antenna Design for Flush Mount GNSS (L1/L5) and SDARS Operations," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20 (5), 638-642, 2021.
15. Sharma D., Sharma D. K., Kulshrestha S. and Mahajan M. B., "High Gain Wideband Dual Circularly Polarized Microstrip Patch Antenna for GNSS Reflectometry," 2023 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference (MAPCON), Ahmedabad, 1-5, 2023.
16. Boulos F., Elmarissi W. and Caizzone S., A GNSS Conformal Antenna Achieving Hemispherical Coverage in L1/L5 Band, 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1-4, 2022.
17. Han T.-Y., Sim C. Y. D. and Chen C.Y., A Circularly Polarized Meander Loop Antenna Design for GNSS Application, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 20 (12), 2235-2239, 2021.
18. Ghaffarian S., Honari M., Mirzavand R. And Mousavi P., Ellectrically Very Small GNSS Antenna, 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 703-704, 2020
19. Sheikh R. A., Mirza H., Al-Hadi A. A. Jack Soh P. and Sabapathy T., Right Hand Circularly Polarized (RHCP) Dual Band Flexible GNSS Antenna, 2023 IEEE International Symposium On Antennas And Propagation (ISAP), 1-2, 2023
20. Nikam A. and Patil R., Design of Circularly Polarized Antenna for Vehicular GNSS Application, 2023 Second International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT), 01-04, 2023.
21. Zhong Z. P. and Zhang X., A Travelling-Wave-Fed Slot Spiral Antenna With Wide Axial-Ratio Bandwidth and Beamwidth for GNSS Applications, in *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, 2, 578-584, 2021.
22. Cui J., Zhang A. and Chen X., An Omnidirectional Multiband Antenna for Railway Application, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19 (1), 54-58, 2020.
23. Chen J., Jin C., Zhang B. and Shen Z., Combined Triangle Quarter-Wavelength Patches and Their Application to High-Gain CP Antenna, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19 (1), 104-108, 2020.
24. Gharaati A., Ghaffarian M. S. and Mirzavand R., Transparent Wideband Circularly Polarized GNSS Antenna for Vehicular Applications, in *IEEE Access*, 9, 130185-130198, 2021.
25. Guo L., Zhang P., Zeng F., Zhang Z. and Zhang C., A Novel Four-Arm Planar Spiral Antenna for GNSS Application, in *IEEE Access*, 9, 168899-168906, 2021.
26. Chen Y., Li G., Liu P., Bian L. and Yi B., Wideband, circularly polarized, crossed, bowtie dipole antenna for navigation satellite system, 2017 IEEE 2nd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2649-2652, 2017.
27. Wong K. L., A Compact and Broadband Microstrip Antennas, 1 st ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
28. Boontamchaury P., Supreeyattitkul N., Teerasuttakorn N. and Wongsakulphasatch P., A High-Gain Circularly Polarized Patch Antenna Using a Circular Ring Reflector for GNSS, 2020 XXXIIIrd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science, 1-4, 2020.
29. Chen C. C., Huang Z.-W., Jheng, K. H. Lin Z.D., C.Y. Sim D. and H.-Chen D., Coplanar Antenna Design for GNSS and WiFi Applications, 2020 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (iWEM), 1-2, 2020.
30. Sharma S. B., Ugle A. and Parikh K., A Novel U-slot Aperture Coupled Annular-Ring Microstrip Patch Antenna for Multiband GNSS Applications, 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1-3, 2020.
31. Zhang Y., Li X., Yang L. and Gong S., Dual-Band Circularly Polarized AnnularRing Microstrip Antenna for GNSS Applications, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 12, 615-618, 2013.
32. Xu R., Gao S. S., Li J., Wei K. and Luo Q., A Reconfigurable DualBand DualCircularly Polarized Antenna for Vehicle Global Navigation Satellite System Application, in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (10), 11857-11867, 2020.
33. Caizzone S., Tripathi V. and Hehenberger S., Investigating GNSS Multipath in Aeronautic Applications Through Antenna Installed Performance, 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 1-5, 2021.
34. Wei J., Liao S., Xue Q. and Che W., A Lightweight Low-Profile GNSS Antenna Based on Wideband Multipath Mitigation Strategy, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22 (9), 2150-2154, 2023.
35. Kiris O., A Vibration Resistant GNSS Antenna with Reduced Size and Weight for Wideband Satellite Applications, 2020. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting, 1841-1842, 2020.
36. Yacoub A. and Aloï D. N., Low-Profile Automotive Antenna Systems for MIMO 5G and L1/L5 GNSS Communications, 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Madrid, Spain, 1-4, 2022.
37. Luo Y., Huang L. and Yu X., A Combined GNSS Antenna with Multipath Mitigation Strategy, 2023 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC), 1-3, 2023.
38. Hynes C. G. and Vaughan R. G., Conical Monopole Antenna With Integrated Tunable Notch Filters, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 19 (12), 2398-2402, 2020.
39. Kaufmann T. and Julien O., Automotive GNSS Antenna Platform-Induced Group Delay Biases on GPS L1 signals, 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 1-5, 2021.
40. Jović, S. M. Clénet and Y. A. M.M., Novel Wideband Antenna for GNSS and Satellite Communications, 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 1-5, 2020.
41. Li X., Ma R., Cai H., Pan Y. M. and Zhang X. Y., High-Gain Dual-Band Aperture-Shared CP Patch Antenna With Wide AR Beamwidth for Satellite Navigation System, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 22 (8), 1888-1891, 2023.
42. Jia T., Yang J., Zhang Y., Jiang W. and Zheng Y., A Wide-Beam 3D-Fractal Hilbert GNSS Antenna, 2021 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS), 1-3. Nanjing, China, 2021.
43. Causse A., L. Bernard, A. Sharaiha and S. Collardey, Small CP Cavity-Backed Magneto-Electric Antenna with parasitic elements for GNSS Applications, 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Dusseldorf, Germany, 1-5, 2021.
44. Wu X., Li L. and Zhang X., Use of CDF Functions for Evaluating GNSS Antennas Radiation Performance, 2021 Cross Strait Radio Science and Wireless Technology Conference (CSRSWTC), Shenzhen, China, 19-20, 2021.
45. Zhou Y., T. Jiang, Li H. and Chen F., A 5G MIMO Multiband Low-Profile Antenna Design for Automotive Shark-Fin Systems, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 23, 5, 1588-1592, 2024.
46. Beer S., Adamiuk G. and Zwick T., Novel Antenna Concept for Compact Millimeter-Wave Automotive Radar Sensors, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 8, 771-774, 2009.
47. Low L., Langley R., Breden R. and Callaghan P., Hidden Automotive Antenna Performance and Simulation, in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 54 (12), 3707-3712, 2006.

48. Mariottini F., Albani M., Toniolo E., Amatori D. and Maci S., Design of a Compact GPS and SDARS Integrated Antenna for Automotive Applications, in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 9,405-408, 2010.
49. Dogusgen Erbas C., Dual-band and dual-mode annular ring microstrip patch antenna with slots for GSM-1800 and GPS operations, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 38 (1), 547-556, 2023.
50. Alsath M. G. N. and Kanagasabai M., Compact UWB Monopole Antenna for Automotive Communications, in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 63 (9), 4204-4208, 2015.
51. Aziz I., Liao W.-C., Aliakbari H. and Simon W., Compact and Low Cost Linear Antenna Array for Millimeter Wave Automotive Radar Applications, 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 1-4, 2020.

