



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ELEKTROMANYETİK VE MEKANİK
AÇIDAN RADAR ANTENİ
MALZEMELERİNİN OPTİMİZASYONU

Öğrencinin Adı SOYADI : Ali KONYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali KONYA tarafından hazırlanan “Elektromanyetik Ve Mekanik Açıdan Radar Anteni Malzemelerinin Optimizasyonu” adlı tez çalışması 26/10/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Sinan Gültekin

Danışman

Prof. Dr. Mehmet Gavgalı

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Özgür Dündar

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Ali KONYA

26/10/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTROMANYETİK VE MEKANİK AÇIDAN RADAR ANTENİ MALZEMELERİNİN OPTİMİZASYONU

Ali KONYA

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

2022, 34 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Mehmet GAVGALI
Doç. Dr. Sinan GÜLTEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR

Double Ridge Horn (DRH) Antenleri

Ultra High Frequency (UHF) L ve S bandında çalışan DRH antenleri bir çok radar uygulamasında kullanılmaktadır. Bu kapsamda DRH antenlerinin alüminyum, bakır ve çelik malzemelerinin elektromanyetik ve mekanik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Elektromanyetik açıdan DRH antenlerinin belirli frekanslardaki ışıma örüntüsü ve bant boyunca geri dönüş kaybı (S11) parametresi analiz edilmiştir. Mekanik açıdan DRH antenlerine yapısal ve modal analizler gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Anten, DRH, Elektromanyetik analiz, Modal analiz, Radar, Yapısal analiz

ABSTRACT

MS THESIS

**ELECTROMAGNETIC AND MECHANICAL OPTIMIZATION OF RADAR
ANTENNA MATERIALS**

Ali KONYA

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL
ENGINEERING**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet GAVGALI

2022, 34 Pages

Jury

**Prof. Dr. Mehmet GAVGALI
Doç. Dr. Sinan GÜLTEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Özgür DÜNDAR**

Double Ridge Horn (DRH) Antennas

Ultra High Frequency (UHF) DRH antennas operating in L and S bands are used in many radar applications. In this context, electromagnetic and mechanical analyzes of aluminum, copper and steel materials of DRH antennas were carried out.

From the electromagnetic point of view, the radiation pattern at certain frequencies and the return loss (S11) along the band parameter of DRH antennas were analyzed. Structural and modal analyzes were performed on the DRH antennas from a mechanical point of view.

Keywords: Antenna, DRH, Electromagnetic analysis, Modal analysis, Radar, Structural analysis

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans Tez çalışmamın başlangıç aşamasından tamamlanmasına kadar her türlü desteği ve yardımı esirgemeyen tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet GAVGALI hocama minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarında yardımlarını esirgemeyerek yol gösteren ve kaynak desteğinde bulunarak bu tezin tamamlanmasında yaptığı katkılardan dolayı Dr. Öğr. Üyesi Özgür Dündar hocama en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasının yapılabilmesi için gerekli analiz koşullarını sağlayıp, teçhizat desteği hususunda her türlü desteğini esirgemeyen Konrad Savunma Mühendislik ailesine teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince manevi desteklerini esirgemeyen annem, babam, eşime ve tez yazım döneminde dünyaya teşrif ederek bizleri sevince boğan oğlum Ali Bey'e atfediyorum.

Ali KONYA
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Anten Nedir.....	1
1.1.1. Anten Çeşitleri ve Kullanım Alanları.....	1
1.1.1.1. İnce Tel Antenler.....	2
1.1.1.2. Açıklık (Ağız)Antenler	2
1.1.1.3. Dizi Antenler.....	3
1.1.1.4. Yansıtıcı Antenler	4
1.1.1.5. Mercek Antenler.....	4
1.1.1.6. Mikroşerit Antenler.....	5
1.1.1.7. Nano Antenler.....	6
1.1.2. Antenlerden Beklenen Özellikler	8
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	9
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	11
3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Mekanik ve Elektriksel Özellikleri	11
3.1.1. Alüminyum Alaşımı	11
3.1.2. Bakır.....	12
3.1.3. Çelik.....	12
3.2. Yapısal Analizler	13
3.2.1. Alüminyum 6061 Alaşımı Yapısal Analizi	14
3.2.2. Bakır Alaşımı Yapısal Analizi.....	14
3.2.3. Çelik St-37-2 (EN S235JR) Alaşımı Yapısal Analizi.....	15
3.3. Modal Analizler	16
3.3.1. Alüminyum 6061 Alaşımı Modal Analizi	17
3.3.2. Bakır Modal Analizi	18
3.3.3. Çelik St-37-2 (EN S235JR) Alaşımı Modal Analizi.....	18
3.4. Elektromanyetik Analizler.....	19
3.4.1. Alüminyum 6061 Alaşımı Elektromanyetik Analizler.....	20

3.4.2. Bakır Alaşımı Elektromanyetik Analizleri.....	23
3.4.3. Çelik St-37-2 Alaşımı Elektromanyetik Analizleri.....	27
3.5. Alüminyum 6061 Alaşımı Anten üretimi.....	29
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	31
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	33
6. KAYNAKLAR.....	35
ÖZGEÇMİŞ.....	36



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. İletken Telden Yapılmış Antenler.....	2
Şekil 1.2. Açıklık Antenler.....	3
Şekil 1.3. Bazı Anten Dizisi Örnekleri.....	3
Şekil 1.4 Yansıtıcı Antenler.....	4
Şekil 1.5. Mercek Antenler.....	5
Şekil 1.6. Nano Malzemeler.....	7
Şekil 1.7. Boyutlarına Göre Nano Malzemeler.....	7
Şekil 3.1. Radar Anteni Sınır Koşulları ve Teknik Resmi	13
Şekil 3.2. Alüminyum Alaşımı Statik Simülasyonu.....	14
Şekil 3.3. Bakır Alaşımı Statik Simülasyonu.....	15
Şekil 3.4. Çelik Alaşımı Statik Simülasyonu.....	16
Şekil 3.5. Alüminyum Alaşımı Modal Analiz Verileri.....	17
Şekil 3.6. Bakır Alaşımı Modal Analiz Verileri.....	18
Şekil 3.7 Çelik Alaşımı Modal Analiz Verileri.....	19
Şekil 3.8. Temel Anten Tasarımına İlişkin Detaylar.....	20
Şekil 3.9. Antende Kullanılacak Muhtemel Malzemelere İlişkin Detaylar.....	20
Şekil 3.10. S11 değerinin Frekansa Bağlı Genlik Grafiği.....	21
Şekil 3.11. 300 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	22
Şekil 3.12. 1600 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	22
Şekil 3.13. 3000 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	23
Şekil 3.14. S11 değerinin Frekansa Bağlı Genlik Grafiği.....	24
Şekil 3.15. 300 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	25
Şekil 3.16. 1600 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	26
Şekil 3.17. 3000 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	26
Şekil 3.18. S11 değerinin Frekansa Bağlı Genlik Grafiği.....	27
Şekil 3.19. 300 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	28
Şekil 3.20. 1600 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	28
Şekil 3.21. 3000 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü.....	29
Şekil 3.22. Anten Teknik Resmi.....	30
Şekil 3.23. SMM Cihazındaki Anten Ölçü Kontrolü.....	30
Şekil 5.1. Anten S ₁₁ Parametresi Ölçüm Düzenegi	34
Şekil 5.2. Network Analizör işe Ölçülen S ₁₁ Parametre Sonucu.....	34

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri (Isıl işlem T651).....	12
Çizelge 3.2. Alüminyum 6061 alaşımının kimyasal analiz özellikleri.....	12
Çizelge 3.3. Bakır alaşımının mekanik özellikleri.....	12
Çizelge 3.4. St-37-2 çelik alaşımının mekanik özellikleri.....	13
Çizelge 3.5. St-37-2 çelik alaşımının kimyasal analiz özellikleri.....	13
Çizelge 4.1. Statik analiz sonucu maksimum deformasyonlar.....	31
Çizelge 4.2. Statik analiz sonucu maksimum deformasyonlar.....	31
Çizelge 4.3. 300 MHz'deki yayının verimliliği, toplam verimlilik ve kazanç değeri.....	32
Çizelge 4.4. 3000 MHz'deki yayının verimliliği, toplam verimlilik ve kazanç değeri...	32

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

M	: Metre
GHz	: Gigahertz
dB	: Desibel
mm	: Milimetre
nm	: Nonometre
Ω	: Ohm
GPa	: Giga Paskal
MPa	: Mega Paskal
G	: Gram
cm ³	: Santimetre Küp
°C	: Derece Santigrat
Kg	: kilogram
F	: kuvvet
mm ²	: Milimetre Kare
N	: Newton
Hz	: Hertz
MHz	: Megahertz
ϵ_r	: Dielektrik Sabiti

Kısaltmalar

DRH	: Double Ridge Horn
Em	: Elektromanyetik
RF	: Radyo Frekansı
CST	: Computer Simulation Technology
ANSYS	: Analysis Systems
S11	: Geri Dönüş Kaybı
VSWR	: Durağan Dalga Oranı
YNR	: Yere Nüfuz Eden Radar
FDTD	: Finite Difference Time Domain
MŞA	: Mikroşerit Anten
PTFE	: Politetrafloretilen

1. GİRİŞ

Radar antenlerinden beklenen yüksek mukavemet, yüksek verim ve uygun maliyet göz önünde bulundurularak, kullanılacak malzeme materyallerinin yapısal analiz, modal analiz ve elektromanyetik analizlerinin yapılarak kullanım yerlerine göre malzeme tayini yapılmasıdır.

1.1. Anten Nedir

Antenler verici ve / veya alıcı olmak üzere uzayda yayılması istenen radyo dalgalarını bir metal üzerinde elektrik akımına çeviren ara yüzlerdir. Elektrik İletiminde, bir radyo vericisi tarafından anten terminaline elektrik akımı sağlanır ve anten akımdan gelen enerjiyi elektromanyetik dalgaya çevirir. Alıcı anten ise uygulanan bir elektrik akımı üretmek için iletimde yapıldığı üzere benzer bir şekilde elektrik akımı sağlanır ve gelen elektromanyetik (em) dalga terminaline alınmış olur. Bir antenin görevi, bir elektromanyetik alandan enerji almak veya bir yüksek frekans üreticinin ürettiği enerjiyi elektromanyetik dalgalar halinde yayınlamaktır. Anteni uzaydan gelen dalgalar ile uzaya yollanan dalgaların arasında bir ara yüz olarak düşünebiliriz (Erdoğan, 1993).

İlk anten 1888'de Alman fizikçi Heinrich Hertz tarafından James Clerk Maxwell'in elektromanyetik teorisi tarafından tahmin edilen dalgaların varlığını kanıtlamak için öncü deneylerinde inşa edildi. Hertz, hem iletmek hemde almak için parabolik reflektörlerin odak noktasına dipol antenler yerleştirdi. 1895'ten itibaren Guglielmo Marconi, uzun mesafeli kablosuz telgraf için pratik antenler geliştirmeye başladı ve bunun için nobel ödülü kazandı (Erdoğan, 1993).

1.1.1. Anten Çeşitleri ve Kullanım Alanları

Antenler;

- Uzay endüstrisi (Uydu görüntüleme sistemleri)
- Kablosuz haberleşme alanı (Bluetooth, WLAN, Wİ-Fİ)
- Askeri telsiz ve donanım (Füze sistemleri, akıllı silah uygulamaları)
- GPS ve GSM uygulamaları

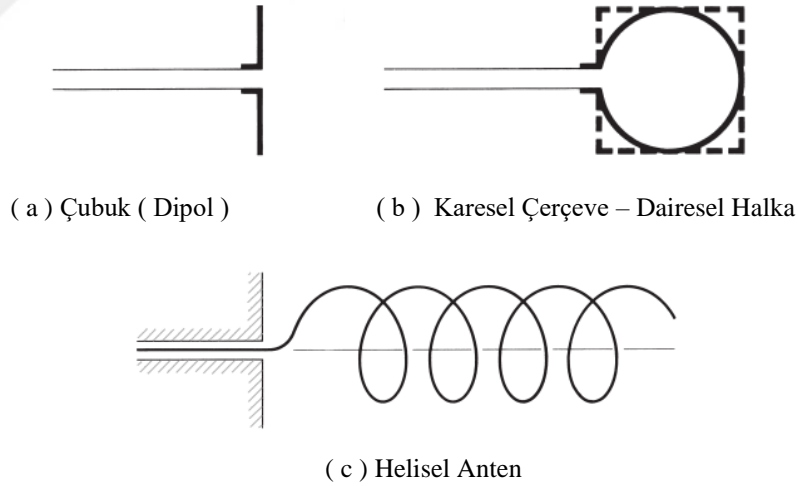
Belirtildiği gibi, havacılık ve savunma sanayi başta olmak üzere iletişim vb. birçok alanda kullanılmaktadır.

Anten çeşitleri; Uygulama sahasına, çalışma frekansına, geometrilerine, kullanılacak ortamın şartlarına göre farklı farklı anten çeşitleri bulunmaktadır. Bunları başlıca aşağıdaki gibi sınıflandırabiliriz (Erdoğan, 1993).

- a. İnce Tel Antenler
- b. Açıklık (Ağız)Antenler
- c. Dizi Antenler
- d. Yansıtıcı Antenle
- e. Mercek Antenler
- f. Mikroşerit Antenler (MŞA)
- g. Nano Antenler

1.1.1.1. İnce Tel Antenler

Bu tür antenlerin oldukça geniş kullanım alanları vardır. Bunlar otomobillerde, binalarda, gemilerde, uçaklarda, uzay araçlarında vb kullanılırlar. Yapıları iletken çubuk, çerçeve (dikdörtgen, kare veya dairesel) veya helis biçimli olabilir. Şekil 1.1'de bu antenler görülmektedir (Erdoğan, 1993).

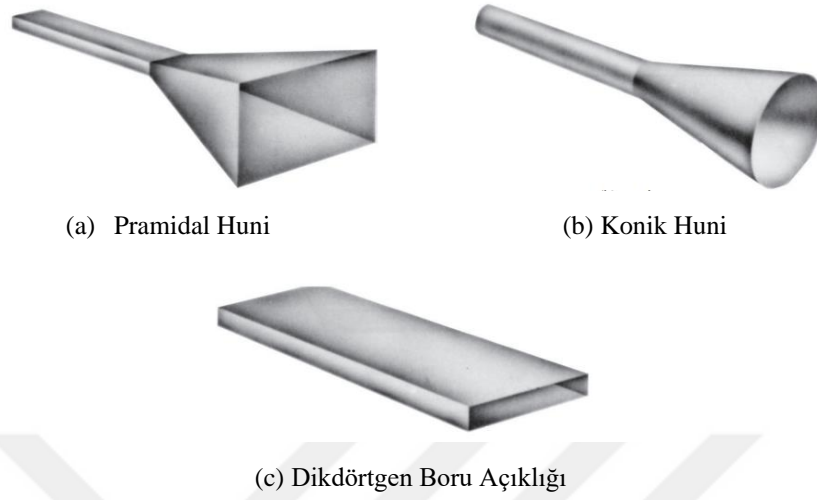


Şekil 1.1. İletken Telden Yapılmış Antenler: (a) Çubuk, (b) Karesel Çerçeve, (c) Helisel Anten (Erdoğan, 1993)

1.1.1.2. Açıklık (Ağız)Antenler

Açıklık (Ağız)Antenler, daha yüksek sıcaklıklarda kullanılırlar. Uçaklarda ve uzay araçlarında gövdeye kolaylıkla monte edilebilirler. Dış koşullardan korunmak için

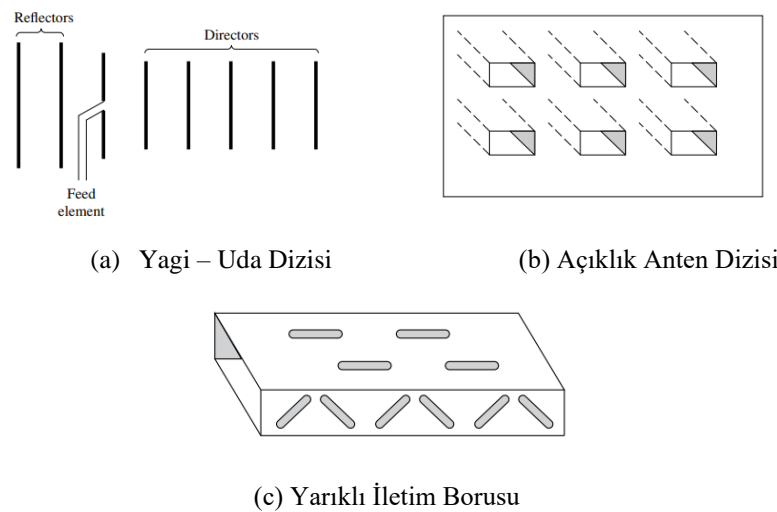
yalıtkanla kaplanabilirler. Şekil 1.2’de Açık anten örnekleri görülmektedir (Erdoğan, 1993).



Şekil 1.2. Açıklık Antenler: (a) Pramidial Huni, (b) Konik Huni, (c) Dikdörtgen Boru Açıklığı (Erdoğan, 1993)

1.1.1.3. Dizi Antenler

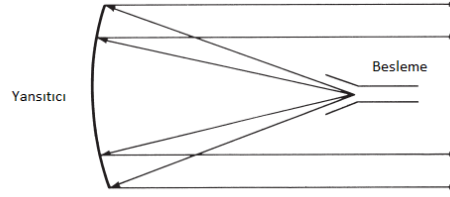
Bazen istenen ışınım örnekleri tek bir antenle elde edilemez. Böyle durumlarda birden çok antenden oluşmuş anten dizileri kullanılır. Dizi antenlerde enerjinin bazı doğrultulara daha çok yönlendirilmesi, bazı doğrultularda ise sıfır olması sağlanabilir. Bunun için antenlerin diziliş biçimi ve besleme durumunun uygun olması gerekir. Şekil 1.3’te bu anten örnekleri görülmektedir (Erdoğan, 1993).



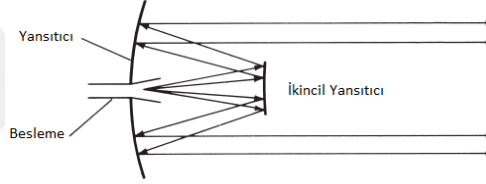
Şekil 1.3. Bazı Anten Dizisi Örnekleri: (a) Yagi – Uda Dizisi, (b) Açıklık Anten Dizisi, (c) Yarıkli İletim Borusu (Erdoğan, 1993)

1.1.1.4. Yansıtıcı Antenler

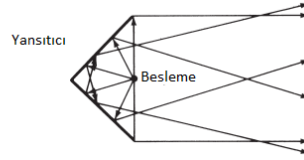
Işınlanan Elektro Manyetik Enerjiyi yönlendirmede ve çok büyük uzaklıklara iletmede kullanılan bir anten türü de yansıtıcı antenlerdir. Bunlardan en çok kullanılanlar parabolik ve köşeli yansıtıcılarıdır. Açıklık çapı 305 m. kadar olan bu tür antenler yapılmıştır. Milyonlarca km uzaklıktaki işaretler ancak bu yoldan alınabilmektedir. Şekil 1.4'te bu anten örnekleri görülmektedir (Erdoğan, 1993).



(a) Önden Beslemeli Parabolik Anten



(b) Kaskad Beslemeli Parabolik Yansıtıcı



(c) Köşeli Yansıtıcı

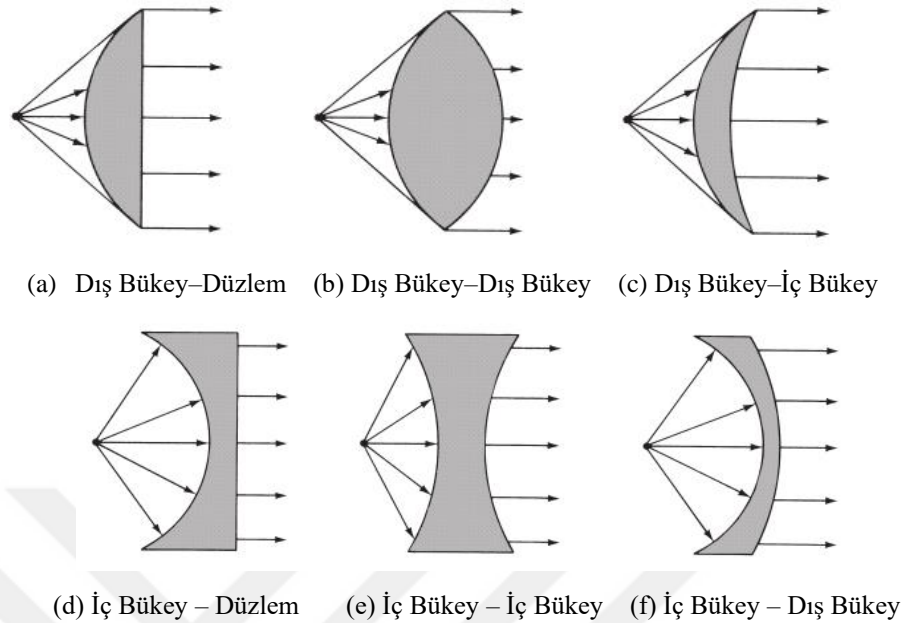
Şekil 1.4 Yansıtıcı Antenler: (a) Önden Beslemeli Parabolik Anten, (b) Kaskad Beslemeli Parabolik Yansıtıcı, (c) Köşeli Yansıtıcı (Erdoğan, 1993)

1.1.1.5. Mercek Antenler

Mercek antenler ıraksayan bir ışın demetinden koşut ışınlı bir demet elde etmek için kullanılırlar. Kullanılan malzeme ve merceklerin geometrik biçimleri uygun seçilerek, ıraksayan ışınlar düzlem dalgalara dönüştürülür. Çoğu kez parabolik antenlerle aynı uygulama alanlarında kullanılırlar. Alçak frekanslarda boyutları ve ağırlıkları oldukça fazla olur. Bu antenler kullanıldıkları malzemeye veya geometrik biçimlerine göre sınıflandırılırlar.

İdeal bir anten, vericiden aldığı tüm gücü istenen doğrultuya veya doğrultulara yayan antendir. Ancak, uygulamada bunu tam olarak gerçekleştirmek olanaksızdır. İstenen

özellikleri belirli bir ölçüde sağlayabilmek için, özel amaçlı değişik türde antenler seçilir. Şekil 1.5'te bu tür anten örnekleri görülmektedir (Erdoğan, 1993).



Şekil 1.5. Mercek Antenler: (a) Dış Bükey-Düzlem, (b) Dış Bükey-Dış Bükey, (c) Dış Bükey-İç Bükey, (d) İç Bükey-Düzlem, (e) İç Bükey-İç Bükey, (f) İç Bükey-Dış Bükey (Erdoğan, 1993)

1.1.1.6. Mikroşerit Antenler (MŞA)

Uygun bir dielektrik taban seçimi mikroşerit anten tasarımında yapılacak olan ilk adımdır. Anten performansı yönünden fiziksel olarak en büyük hacmi kaplayan dielektrik tabanın boyutları ve elektriksel özellikleri oldukça önemlidir. Dielektrik tabanın ince yapılı ve esnek olması, mikroşerit antenlerin montaj kolaylığını sağlayarak mekanik olarak destek veren bir iletim hattının parçası olarak işlev görür. Aynı zamanda dielektrik taban antenin rezonans frekansı ve diğer elektriksel özelliklerini dielektrik geçirgenliği ve taban kalınlığı itibarıyla de belirler (Sainati, 1996).

Araştırmacılar mikroşerit antenin performansını etkileyen en önemli parametrelerin dielektrik malzemenin dielektrik sabiti ve üretici firmaların bu dielektrik için belirlediği tolerans değerleri olduğunu görmüşlerdir. Bu yüzden tasarımlarda dielektrik sabiti kesin olarak bilinen malzemeler tercih edilir (Dündar, 2018).

Araştırmacılar mikroşerit antenin performansını etkileyen en önemli parametrelerin taban malzemesinin dielektrik sabiti ve kalınlığı olduğunu görmüşlerdir. Bu yüzden tasarımlarda tercih edilecek olan malzemelerin dielektrik sabitinin ve kalınlığının kesin olarak bilinmesine dikkat edilmesi gerekir (Dündar, 2018).

Piyasada kullanılan çok sayıda mikroşerit anten taban malzemesi vardır. Bunların dielektrik sabiti 1,7 ila 25 arasında değişmektedir (Traut, 1980; Olyphant Jr ve Nowicki, 1980). Ancak anten performansının yüksek olabilmesi için dielektrik sabiti ϵ_r 'nin 3'den küçük seçilmesi istenir (Balanis 1982). Kayıp tanjant ($\tan\delta$) değeri ise 0.0001 ile 0.004 aralığındadır (Traut, 1980). En yaygın olarak kullanılan taban malzemesi Politetrafloretillen (PTFE)'dir. Tasarımlarda yüksek dielektrik sabiti kullanma gereksinimi duyulması halinde ise dielektrik sabiti 9.7 ila 10.3 arasında değişen alimuna seramik tabanlı malzemeler tercih edilmektedir. Ticari bir malzeme olarak yaygın biçimde kullanılan K_6098 Teflon/Cam kompositi ($\epsilon_r= 2.5$), RT/Duroid 5880 PTFE ($\epsilon_r= 2.2$) ve Epsilam-10 Seramik dolgulu Teflondur.

Bir mikroşerit antende kullanılacak olan taban malzemesi, ışıma yapan yamaya mekanik yönden destek olması ve yama ile toprak düzlemi arasında olması gereken yalıtkanlık temel görevidir. ϵ_r değerinin yüksek olduğu taban malzemesiyle, yüklemeye etkisine bağlı olarak ışıma yapan yama boyutu da küçülebilir. Ancak anten hacminin küçülmesi bant genişliğinin de küçülmesi demektir. Genel olarak bant genişliğinin artırılması için taban kalınlığının daha yüksek olması tercih edilmektedir.

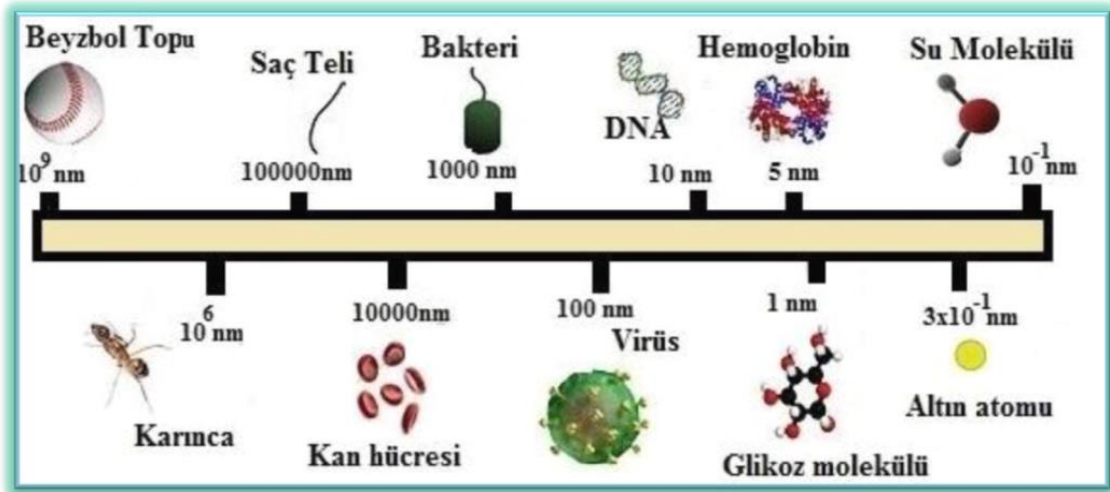
Mikroşerit anten tasarımları için taban malzemesi belirlenirken istenilen yama boyutu, bant genişliği, ısıl kararlılık, kayıplar, maliyet vs. etmenlerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Balanis 1982).

1.1.1.7. Nano Antenler

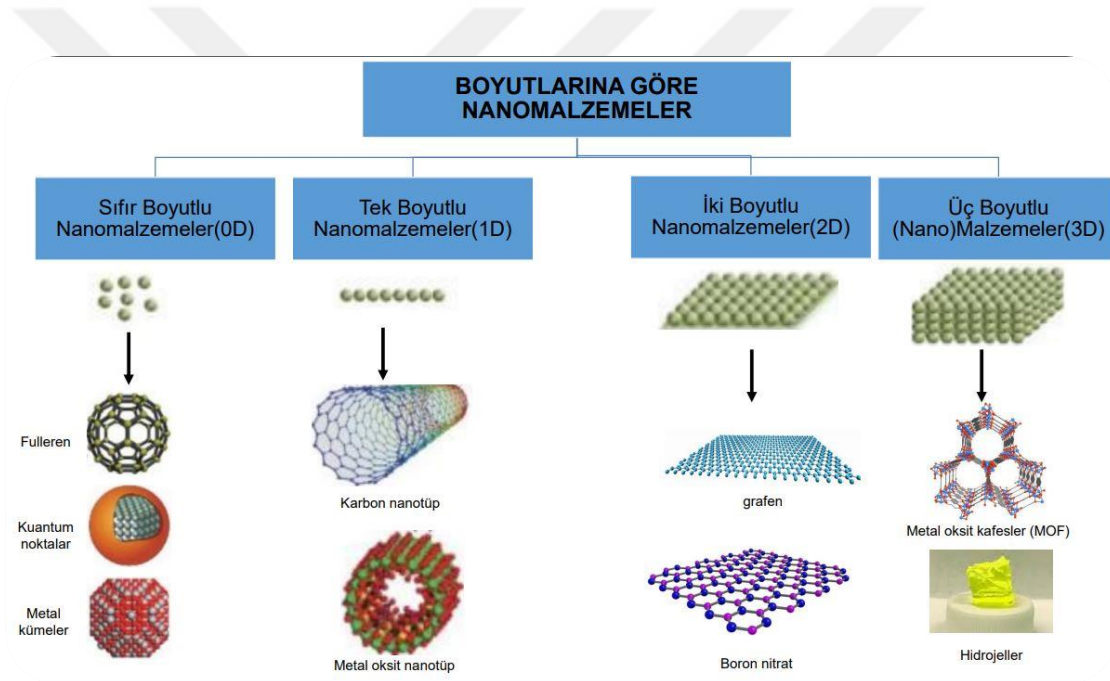
Nano yapılar, atomsal ve 100 nm'den daha küçük nano boyuttaki sistemleri ifade eder ve mekanik, fiziksel, kimyasal ve termal süreçlerin biri veya birden fazlası bir arada kullanılarak elde edilirler.

En az bir boyutu 100 nm'den küçük olan ya da bu küçük malzemelerin bir araya gelmesiyle oluşan malzemelere nanomalzemeler denir. Sağlık, çevre gibi bazı alanlarda bu aralık 0.3 nm ile 300 nm arasında değişiklik gösterebilmektedir.

Bir nanometre yaklaşık olarak altı karbon atomunun genişliği ya da on su molekülü büyüklüğündedir. Nano malzemeler Şekil 1.6 ve Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Nano Malzemeler



Şekil 1.7. Boyutlarına Göre Nanomalzemeler

Metamalzemeler, doğada bulunan diğer maddelerin aksine elektromanyetik dalgaları bükebilen laboratuvar yapımı malzemelerdir. Bunların özelliğine göre, bu tür malzemelerin, ışık kırılma negatif yönü olarak bilinen bir özellik olan zıt yönde bükülmeleridir. Nano ölçekli yapıyı simüle etmek ve inşa etmek için bilgisayarların yardımıyla farklı tipte meta malzemeler oluşturulduğundan, daha fazla metamalzaman uygulaması gerçekleştirilir (Shelby, R.A., Smith, D.R. ve Schultz, S.,2001).

Bu malzemelerin kavramı, doğada atomlar ve moleküller ile etkileşimlerden etkilenen elektromanyetik dalgalara dayanmaktadır. Mikroskopik bir ölçekte, bu

dalgaların davranışını etkileyecek şekilde normal malzemeler gibi davranmayacakları şekilde spesifik malzemeler değiştirilebilir. Çeşitli uygulamalarda elektromanyetik dalgaları manipüle etmeyi mümkün kılan bir ışık dalga boyunun büyüklüğünün bir kısmını yarattı.

1.1.2. Antenlerden Beklenen Özellikler

Kullanılan cihazlar, platformlar ve bütçeler küçüldükçe daha küçük, daha hafif antenlere olan talepte beraberinde artmaktadır. Tüketici pazarından havacılık ve savunmaya geçiş için teknolojilerin seçilmesi için üç ana hedef mevcuttur.

Sağlamlık: Anten malzemeleri, fiziksel veya radyo frekansı (RF) bozulması olmadan titreşime, mekanik şoka, sıcaklık değişimi sıcaklığa ve aşırı hava koşullarına dayanmalıdır. “Kullanılıp atılan” tüketici cihazlarındaki antenlerin aksine, on yıllarca dayanmaları gerekmektedir.

Düşük Kayıp: Enerjinin, ısıyı artıran ve hassasiyeti azaltan kayıplar olmadan verimli bir şekilde iletilmesi ve alınması gerektiğinden, düşük kayıplı metalizasyon ve alt tabakalar gereklidir. Metalizasyon yöntemi ile anten yüzeyleri çinko alüminyum veya bunların alaşımları ile kaplanarak korozyon direnci artırılarak daha uzun kullanım ömrü sağlanmaktadır.

Uygun Maliyet: Buradaki ana amaç, tekrarlanabilir hassasiyetle, kusur veya yeniden işleme olmadan hacimli üretime izin veren malzemeler ve süreçlerdir. Daha yüksek düzeyde bileşen entegrasyonu, parça sayılarını ve kurulum sürelerini azaltabilir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bir radar anten yapısının titreşim karakteristiği topolojik optimizasyon tekniği kullanılarak optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışması antenin yapısal titreşimlerinin antenin fonksiyonel performansı üzerindeki ters etkilerini minimize etmek amaçlı gerçekleştirilmiştir. Radar anten yapısının detay tasarımı kritik doğal frekanslar maksimize edilecek şekilde optimizasyon sonuçları doğrultusunda değiştirilmiştir (Baran, Özgen, & Cigeroğlu, 2010).

Bu antenler uygulama gereksinimlerine göre çalışma frekanslarını, analog yönlendiriciliklerini, huzmelerini ve polarizasyonlarını değiştirme özelliğine sahiptirler. Hem insan izleme hem de görüntüleme uygulamalarında, radar sistemi dar bir huzmeye sahip olmalı ve huzme hızla farklı yönleri tarayabilmelidir. Bu nedenle huzme kontrolü, takip, tespit, arama gibi temel radar işlevleri kritik öneme sahiptir. Huzme kontrollü sistemler, karmaşık ve yüksek maliyete yol açan kontrol edilebilir elemanlara sahip büyük anten dizilerinin kullanılmasını gerektirirler. Bu çalışmada karmaşıklığın ve maliyetin giderilmesi için yürüyen dalga anten modeli incelenmiştir. Yürüyen dalga anten modeli standart mikroşerit dizi modeline dayanmaktadır. Yürüyen dalga modeli radar yapılarında, dizi elemanlarına uygulanan frekans artımının kontrolü ile huzme hareketi; açı, menzil ve zaman eksenlerinde kontrol edilebilir ve bu sayede arama, tespit ve takip gibi temel radar fonksiyonları yerine getirilebilir. Yine aynı şekilde frekans artımının kontrolü ile huzme genişliği ve menzil çözünürlüğü gibi radar performans parametreleri optimize edilebilir. Bu çalışma kapsamında 9.4 GHz ile 10.8 GHz frekansları arasında çalışan frekans değişimine bağlı olarak ana huzme yönlendiriciliğine sahip yürüyen dalga anten modeli tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan antenin kazancı 8 dB ile 13 dB arasında değişmektedir. Ana huzme açısı 0° ile 270° arasında yönlendirilebilmektedir (Belen & Mahouti, 2018).

Bistatik radar modellerinden ileri saçılım radar uygulamasına yönelik 1x8 elemanlı mikroşerit dizi antenin tasarımı ve benzetim sonuçları sunulmuştur. Dizi antenin çalışma frekansı 4 GHz'dir. Taban malzemesi olarak dielektrik sabiti 3.55, taban malzemenin kalınlığı 1.52 mm, bakır kalınlığı 0.035 mm olan Rogers 4003C malzemesi seçilmiştir. CST Microwave programı kullanılarak elde edilen 1x1, 1x2, 1x4 ve 1x8 dizi antenlerin kazancı, durağan dalga oranı (VSWR), S11 parametre değerleri, bant genişlikleri, ışına örüntüleri, anten ve ışına verimlilikleri, yan kulak seviyeleri ve yarı güç huzme genişlikleri karşılaştırılmıştır (İpekoğlu & Saraydemir, 2016).

Yere Nüfuz Eden Radar (YNR) önemli bir uzaktan algılama yöntemi olup, yerin altını ve içinde yer alan nesnelere ile beton blokların ve asfalt zeminlerin içlerini görüntülemek amacıyla kullanılır. YNR ile yer altını görüntüleme prensibi, yer altına gönderilen elektromanyetik sinyallerin, belirli katman, yüzey ya da nesnelere çarparak geri yansıyan kısımlarının toplanarak, bu sinyallerin işlenmesine dayanır. İşlenen bu sinyallerle hedeflerin boyutları, geometrik şekilleri, bulunduğu mesafeleri ve bulunduğu ortamın su yoğunluğu tespit edilebilir. Sistem performansı ortamın (asfalt, beton, toprak vs.) elektriksel kaybı ve gömülü cismin saçılma karakteristiği dikkate alınarak hesaplanan frekans bandı, anten kazancı, verici gücü, dinamik aralık gibi temel anten ve radar parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle sistemin amacına göre YNR için kullanılacak antenin parametreleri hesaplanır ve bu analize göre tasarım gerçekleştirilir.

YNR sistemleri; verici anten, alıcı anten, işlemci birimi ve görüntüleme birimlerinden oluşmaktadır. Hakan Şengül (2018), hazırlanmış olduğu bu tezde YNR sistemleri için kullanılacak bir anten türü olan Mikroşerit Vivaldi anten tasarımından bahsedilmektedir. FR-4 malzemesi kullanılarak tasarlanan antenin sistem performansının artırılması için çeşitli yöntemler anlatılmaktadır. Tasarlanan antenin yan kulakçık seviyelerinin düşürülmesi amacıyla 8'li mikroşerit anten dizisi tasarlanmıştır. 3 GHz'deki yan kulakçık seviyelerinde önemli bir azalma gözlenmesinin yanında, sistemin kazancı da artmıştır. Anten dizisinin geri yönlü ışımalarının azaltılması amacıyla bir yansıtıcı plaka tasarlanmıştır. Tasarlanan bu yansıtıcı plaka ile birlikte antenin geri dönüş kayıpları (S_{11}) azalmış ve ön-arka ışımaya oranı 4-14 dB seviyelerine ulaşmıştır (Şengül, 2018).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, kullanılan malzemelerin mekanik ve elektriksel özellikleri, malzeme türlerine göre radar antenlerinin yapısal ve modal analizlerinin ANSYS (Analysis Systems) ortamında analiz edilmesi ve elektromanyetik analizlerinin CST (Computer Simulation Technology) ortamındaki sonuçları yer almaktadır.

Kullanılabilecek En iletken malzemenin maliyet açısından tercih edilmemesinin akabinde kullanılacak bazı malzemeler korozyona uğrama gibi problemle karşı karşıya gelebilmekte, kimi zaman uzay gibi kullanım alanlarına göre yüksek sıcaklık farkı olan bölgelerde özelliklerini kaybettikleri için kullanım alanlarına göre malzeme tayini en önemli unsur olmaktadır. Radar Antenlerinin analizleri yapılarak malzeme optimizasyonu yapılacaktır.

3.1. Çalışmada Kullanılan Malzemelerin Mekanik ve Elektriksel Özellikleri

Bu bölümde, analizlerde antende kullanılan alüminyum, bakır, çelik alaşımlarına ve ara yüzlerde kullanılan polietilene ait mekaniksel ve elektriksel özellikleri yer almaktadır.

3.1.1. Alüminyum Alaşımı

Alüminyum gümüş renkte sünek bir alaşım olup, oksidasyona karşı üstün direnci ile pek çok çeşitli kullanım alanına sahiptir. Endüstrilerin pek çok kolunda milyonlarca ürünün yapımında kullanılan alüminyum, hafif olmasına rağmen elastikiyetinin vermiş olduğu darbelere karşı dayanıklılığı ve sahip olduğu iletkenlik özelliği ile anten kullanımında tercih sebebi olmaktadır.

Genellikle 70XX veya 60XX serileri talaşlı imalata uygun olup, maliyet yönünden ekonomikliği ve MIL-STD-810G'ye (Çevre Koşul Testleri: Şok-Titreşim, Sıcaklık, Yağmurlama, Nem, Mantar vs.) oldukça iyi dayanım göstermesiyle tercih edilmektedir. Burada alüminyum alaşımlarından elektrik direnci 0.00000399Ω olan 6061 serisini ele alınacaktır. Alüminyum 6061 alaşımına ait mekanik ve kimyasal özellikler Çizelge 3.1 ve Çizelge 3.2'de paylaşılmıştır (Matweb, n.d.).

Çizelge 3.1. Alüminyum 6061 alaşımının mekanik özellikleri (Isıl işlem T651) (Matweb, n.d.)

Mekanik Özellikler	
Elastiklik Modülü (GPa)	69
Akma Dayanımı (Mpa)	240
Çekme Dayanımı (Mpa)	275
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7
Poisson Oranı	0,33

Çizelge 3.2. Alüminyum 6061 alaşımının kimyasal analiz özellikleri (Matweb, n.d.)

Elementler (%)							
Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn
0,42	0,71	0,15	0,19	0,026	0,36	1,03	0,16

3.1.2. Bakır

Bakır kırmızı ve kahverengi görünümlü bir metaldir. Özellikleri arasında yüksek elektrik ve ısı iletkenliği bulunmaktadır. Atmosferik ortamlarda dayanıklı bir metal türü olan bakırın mukavemeti oldukça düşüktür. Ayrıca döküm ve kaynak kabiliyeti de iyi değildir. Fakat soğuk şekillendirme yöntemleri ile şekillendirilebilir. Bunun sebebi yüzey merkezli kübik kristal bir yapıya sahip olmasıdır. Elektriği en iyi ileten element gümüştür. Gümüştten sonra ise bakır gelmektedir. Bu sebep ile endüstriyel olarak çok önemli bir elementtir. Burada elektrik direnci $1,7 \times 10^{-6} \Omega$ olan soğuk çekilmiş bakır ele alınacaktır. Soğuk çekilmiş bakıra ait mekanik özellikler Çizelge 3.3'te paylaşılmıştır (Matweb, n.d.).

Çizelge 3.3. Bakır alaşımının mekanik özellikleri (Matweb, n.d.)

Mekanik Özellikler	
Elastiklik Modülü (GPa)	110
Akma Dayanımı (Mpa)	333
Çekme Dayanımı (Mpa)	344
Yoğunluk (g/cm ³)	8,96
Poisson Oranı	0,36

3.1.3. Çelik

Demir oranı, içerdiği diğer elementlerinden daha fazla olan, çoğunlukla %2'den daha az karbon içeren alaşımlara çelik denir.

St 37 çeliği, çelik konstrüksiyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılan DIN 17100 standardına göre belirlenmiş çekme dayanımı 37 kgf/mm² olan yapı çeliğidir. Başındaki "St" ifadesi Almanca çelik anlamındaki "Stahl" kelimesinden kısaltılmıştır.

İçerisinde önemsiz miktarda Mn, Si, P, N ve O gibi, çelik üretim yöntemlerinden gelen elementler bulunduran demir karbon alaşımları sanayide en çok kullanılan malzemelerden birisini teşkil eder. Burada demir alaşımlarından elektrik direnci

$17 \times 10^{-6} \Omega$ olan St-37-2 (S235JR) serisini ele alınacaktır. St-37-2 alaşımına ait mekanik ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de verildi (Matweb, n.d.).

Çizelge 3.4. St-37-2 çelik alaşımının mekanik özellikleri (Matweb, n.d.)

Mekanik Özellikler	
Elastiklik Modülü (GPa)	200
Akma Dayanımı (Mpa)	224
Çekme Dayanımı (Mpa)	340
Poisson Oranı	0,29

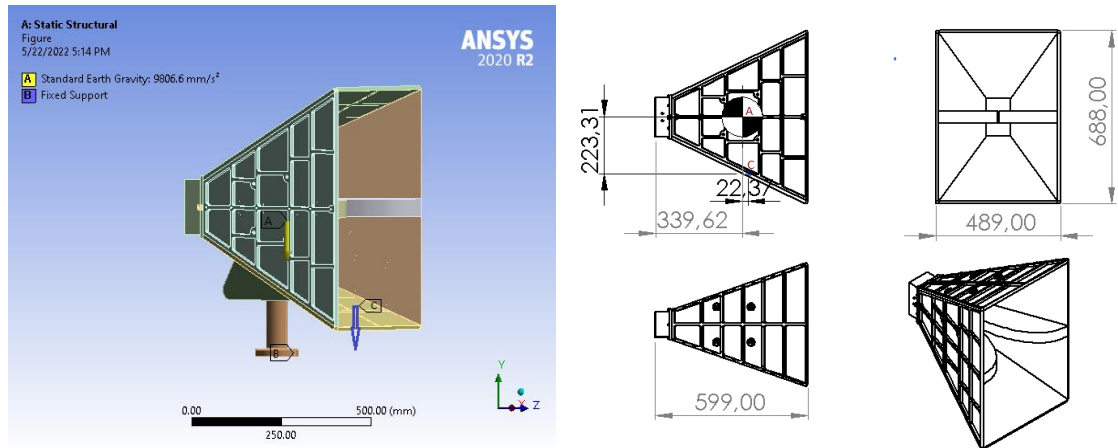
Çizelge 3.5. St-37-2 çelik alaşımının kimyasal analiz özellikleri (Matweb, n.d.)

Elementler (%)					
C	Fe	Mn	N	P	S
≤0.2	≥98.3	≤1.4	≤0.009	≤0.045	≤0.045

3.2. Yapısal Analizler

Bu bölümde, ara yüzlere polietilen, radar antenine ise farklı tür malzemeler tayin edildi ve ANSYS (Analysis Systems) ortamında statik analizi sonuçları elde edildi.

Statik simülasyon kapsamında cismin sınır koşul değerleri belirlenmiş olup, B noktasındaki polietilen ara yüzden sabit mesnetlenmiş ve antenin farklı materyallerden alınmış yapısı göz önünde bulundurularak A noktasındaki geometrik ortasından yerçekimi ve dış etkenlerden meydana gelebilecek kuvvetlere istinaden C noktasından y yönünde -300 N yayılı yük uygulandı. (Şekil 3.1)

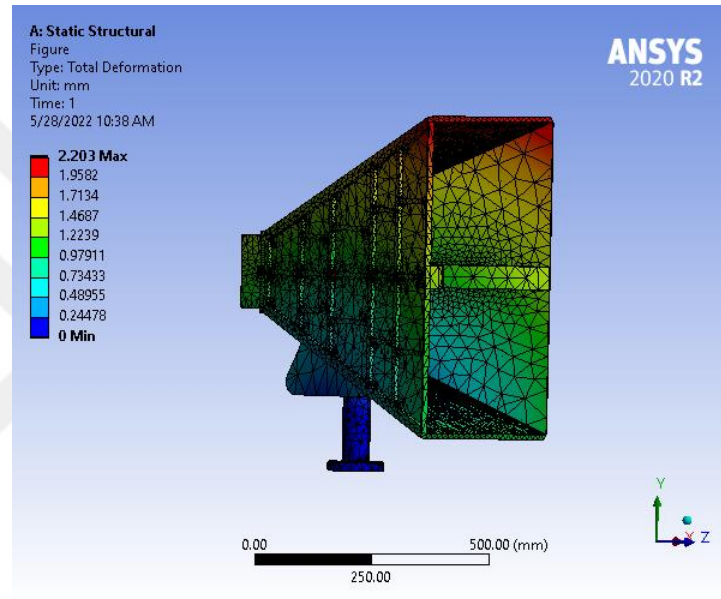


Şekil 3.1. Radar Anteni Sınır Koşulları ve Teknik Resmi

3.2.1. Alüminyum 6061 Alaşımı Yapısal Analizi

Radar antenine alüminyum alaşımı tayin edildi ve ANSYS ortamında statik analiz sonuçları bulundu.

Statik simülasyon kapsamında cisim polietilen ara yüzden sabitlenerek, yerçekimi ivmesinin ve dış kuvvetlerin uygulandığı göz önünde bulundurularak statik analizi yapıldı ve maksimum deformasyonu Şekil 3.2’de görüldüğü gibi bulunmuştur. Cismin maksimum deformasyonunun mesnet noktasına en uzak bölge olan uç kısımlarda 2.20 mm olarak bulundu ve kırmızı renkte belirtildi.

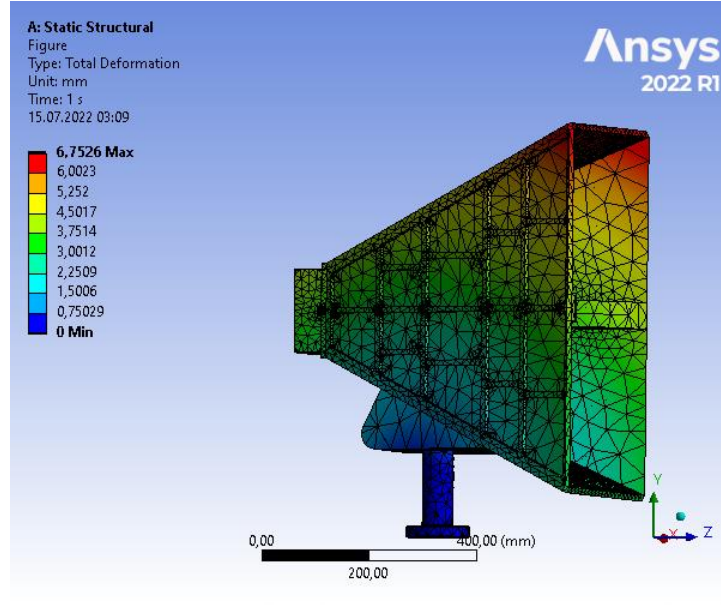


Şekil 3.2. Alüminyum Alaşımı Statik Simülasyonu

3.2.2. Bakır Alaşımı Yapısal Analizi

Radar antenine malzeme olarak bakır tayin edildi ve ANSYS ortamında statik analizi sonuçları bulundu.

Statik simülasyon kapsamında cisim polietilen ara yüzden sabitlenerek, yerçekimi ivmesinin ve dış kuvvetlerin uygulandığı göz önünde bulundurularak statik analizi yapıldı ve maksimum deformasyonu Şekil 3.3’te görüldüğü gibi bulundu. Cisimde maksimum deformasyonunun mesnet noktasına en uzak bölge olan uç kısımlarda 6.75 mm olarak bulundu ve kırmızı renkte belirtildi.

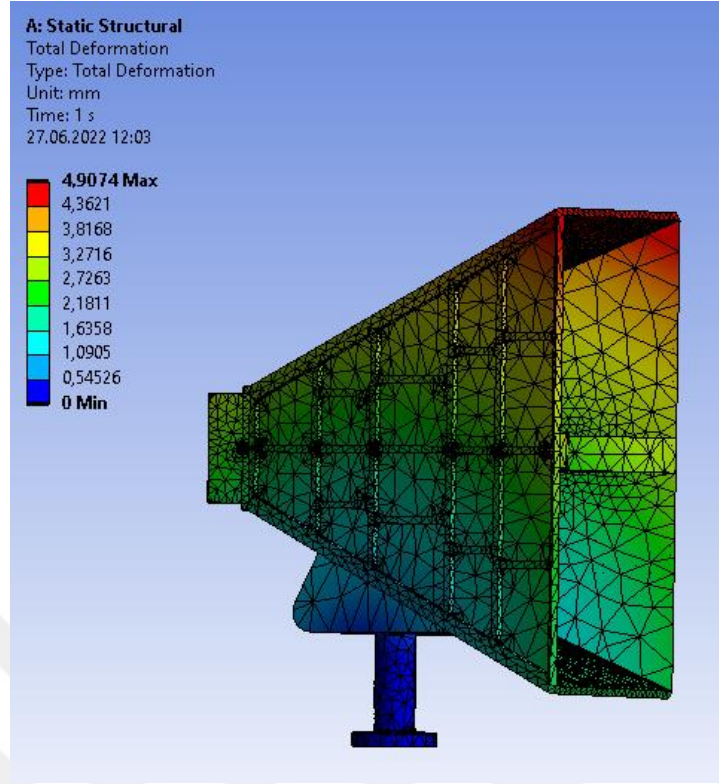


Şekil 3.3. Bakır Alaşımı Statik Simülasyonu

3.2.3. Çelik St-37-2 (EN S235JR) Alaşımı Yapısal Analizi

Radar anteni için seçilen St-37-2 (EN S235JR) Çelik alaşımı için ANSYS statik analizi gerçekleştirildi.

Statik simülasyon kapsamında cisim polietilen ara yüzden sabitlenerek, yerçekimi ivmesinin ve dış kuvvetlerin uygulandığı göz önünde bulundurularak statik analizi yapıldı ve maksimum deformasyonu Şekil 3.4’de görüldüğü gibi bulundu. Cismin maksimum deformasyonunun mesnet noktasına en uzak bölge olan uç kısımlarda 4.91 mm olarak bulundu ve kırmızı renkte belirtildi.



Şekil 3.4. Çelik Alaşımı Statik Simülasyonu

3.3. Modal Analizler

Bu bölümde, ara yüzlere polietilen, radar antenine ise farklı tür malzemeler tayin edilmiş ve ANSYS ortamında modal analizi sonuçları bulunmuştur.

Titreşim hareketi, yapının denge konumu etrafında tekrarlanan hareketi olarak tanımlanabilir. Dinamik yükler etkisi altında çalışan sistemlerde de tekrarlı bir hareket olan titreşim hareketi meydana gelmektedir. Mekanik titreşimler mühendislik yapılarının çoğunda önemli problemlere neden olabilmektedir. Uzun süreli titreşimler makine elemanının yorulmasına neden olabileceği gibi özellikle 20 Hz'e kadar olan düşük frekans yüksek genlikteki titreşimler hasar ve kırılmalara neden olabilmektedir. Bu nedenle endüstride kullanılan birçok yapı elemanının dinamik yükler etkisi altında nasıl bir davranış gösterdiği, sistemin güvenli bir şekilde çalışması ve performansı açısından oldukça önemlidir (Hüseyinoğlu & Abut, 2019).

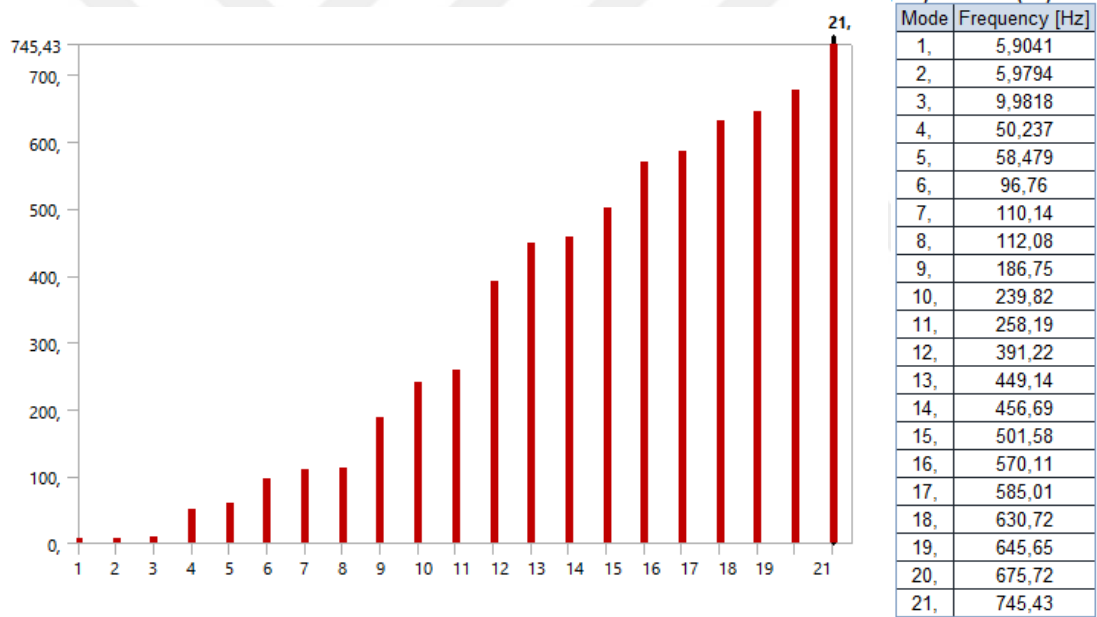
Statik simülasyon kapsamında cismin sınır koşul değerleri belirlenmiş olup, B noktasındaki polietilen ara yüzden sabit mesnetlenmiş ve Antenin farklı materyallerden alınmış yapısı göz önünde bulundurularak A noktasındaki geometrik ortasından yerçekimi ve dış etkenlerden meydana gelebilecek kuvvetlere istinaden C noktasından y yönünde -300 N yayılı yük uygulanmıştır. Statik analiz için belirtilen sınır koşullar

çerçevesinde radar anteni modal analize tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

3.3.1. Alüminyum 6061 Alaşımı Modal Analizi

Radar antenine alüminyum alaşımı tayin edilmiş ve ANSYS ortamında modal analizi sonuçları bulundu.

Cismin sınır koşul değerleri belirlenmiş olup, B noktasındaki polietilen ara yüzden sabit mesnetlenmiş ve Antenin farklı materyallerden alınmış yapısı göz önünde bulundurularak A noktasındaki geometrik ortasından yerçekimi ve dış etkenlerden meydana gelebilecek kuvvetlere istinaden C noktasından y yönünde -300 N yayılı yük uygulanmıştır. (Şekil 3.1) Statik analiz için belirtilen sınır koşullar çerçevesinde radar anteni modal analize tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. (Şekil 3.5)



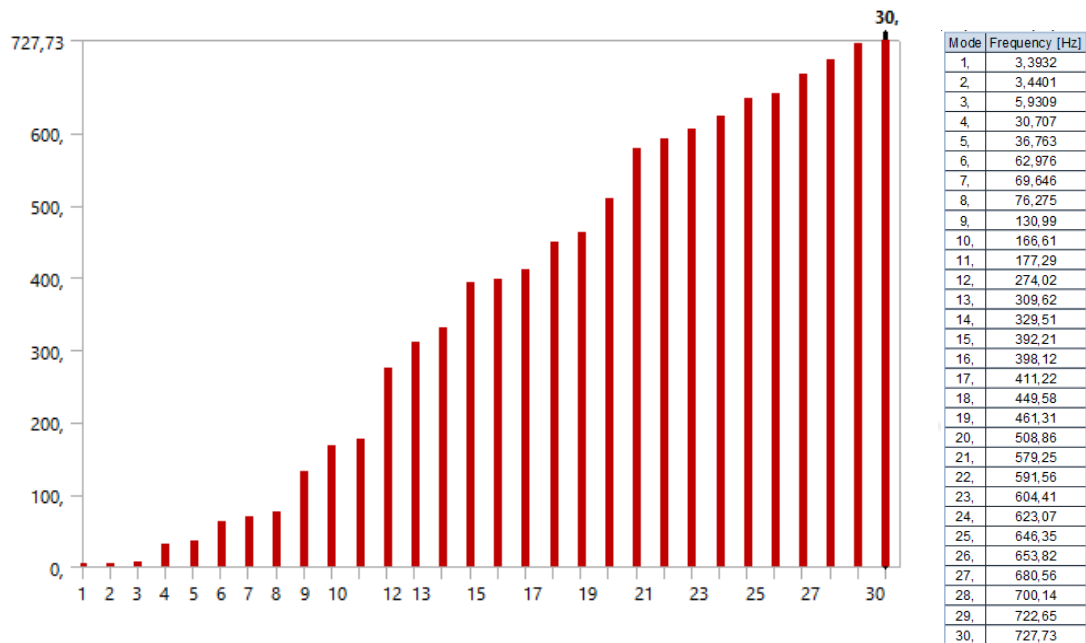
Şekil 3.5. Alüminyum Alaşımı Modal Analiz Verileri

MIL-STD-810G standardı baz alınarak 750 Hz'e kadar simülasyon yapılmış olup toplamda 21 adet farklı t anına ait mod bulunmuştur. Bulunan modlardan en düşüğü 5.9 Hz ve en büyüğü ise 745.4 Hz olduğu elde edilmiştir. Bu kapsamda 8. moda kadar (112 Hz.) görece olarak yapının stres ve deformasyona bağlı etkileşim göstermediği anlaşılmıştır.

3.3.2. Bakır (Soğuk Çekilmiş) Modal Analizi

Radar antenine bakır elementi tayin edilmiş ve ANSYS ortamında modal analizi sonuçları bulunmuştur.

Cismin sınır koşul değerleri belirlenmiş olup, B noktasındaki polietilen ara yüzden sabit mesnetlenmiş ve Antenin farklı meteryallerden alınmış yapısı göz önünde bulundurularak A noktasındaki geometrik ortasından yerçekimi ve dış etkenlerden meydana gelebilecek kuvvetlere istinaden C noktasından y yönünde -300 N yayılı yük uygulanmıştır. (Şekil 3.1) Statik analiz için belirtilen sınır koşullar çerçevesinde radar anteni modal analize tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. (Şekil 3.6)



Şekil 3.6. Bakır Alaşımı Modal Analiz Verileri

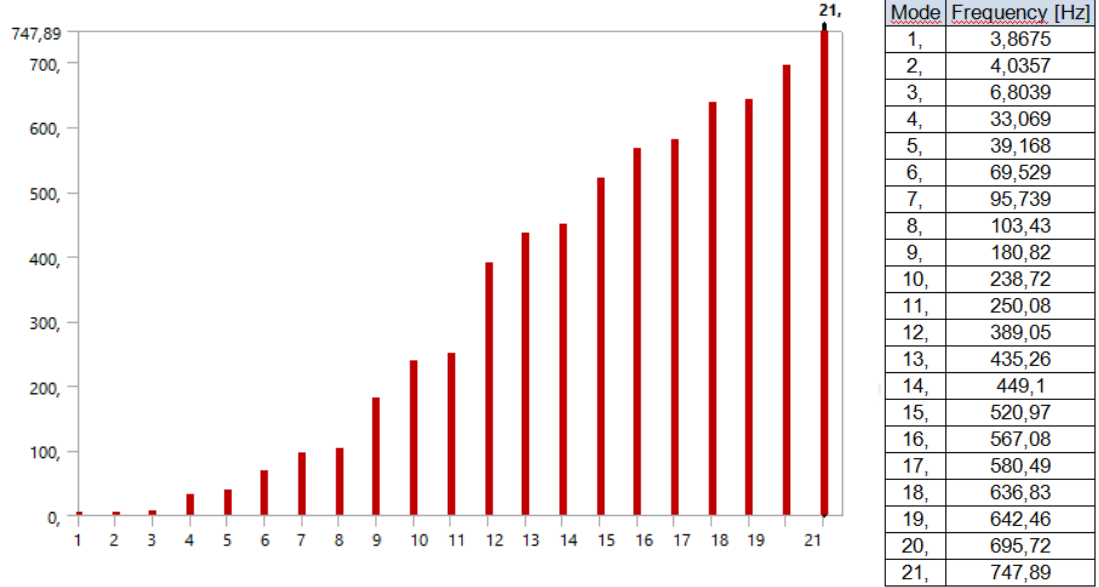
MIL-STD-810G standardı baz alınarak 750 Hz'e kadar simülasyon yapılmış olup toplamda 30 adet farklı mod bulunmuştur. Bulunan modlardan en düşüğü 3.4 Hz ve en büyüğü ise 727.7 Hz olduğu elde edilmiştir. Bu kapsamda 8. moda kadar (76.3 Hz.) görece olarak yapının stres ve deformasyona bağlı etkileşim göstermediği anlaşılmıştır.

3.3.3. Çelik St-37-2 (EN S235JR) Alaşımı Modal Analizi

Radar antenine çelik alaşımı tayin edilmiş ve ANSYS ortamında modal analizi sonuçları bulunmuştur.

Cismin sınır koşul değerleri belirlenmiş olup, B noktasındaki polietilen ara yüzden sabit mesnetlenmiş ve Antenin farklı materyallerden alınmış yapısı göz önünde

bulundurularak A noktasındaki geometrik ortasından yerçekimi ve dış etkenlerden meydana gelebilecek kuvvetlere istinaden C noktasından y yönünde -300 N yayılı yük uygulanmıştır. (Şekil 3.1) Statik analiz için belirtilen sınır koşullar çerçevesinde radar anteni modal analize tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. (Şekil 3.7)



Şekil 3.7 Çelik Alaşımı Modal Analiz Verileri

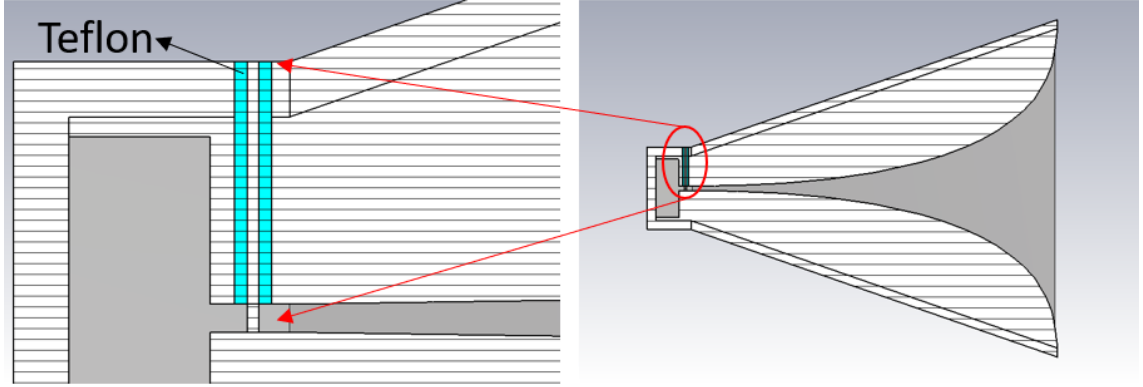
MIL-STD-810G standardı baz alınarak 750 Hz'e kadar simülasyon yapılmış olup toplamda 21 adet farklı t anına ait mod bulunmuştur. Bulunan modlardan en düşüğü 3.9 Hz ve en büyüğü ise 747.9 Hz olduğu elde edilmiştir. Bu kapsamda 8. moda kadar (103.4 Hz.) görece olarak yapının stres ve deformasyona bağlı etkileşim göstermediği anlaşılmıştır.

3.4. Elektromanyetik Analizler

Elektromanyetik analizler kapsamında Computer Simulation Technology (CST) benzetim aracı kullanılmış olup Finite Difference Time Domain (FDTD) metodu ile analizler gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik analizlerin başlangıç evresinde antene ilişkin antenin elektromanyetik modeli ortaya konulmuş ve topolojisinin amaca uygun olup olmadığı değerlendirilmiştir. Antenin çalışma frekansına ilişkin geri dönüş kaybı (S_{11}) ve çalışmış olduğu frekanslardaki 3B ışınma örüntüleri incelenmiştir. Ayrıca analizler kapsamında 3B modeller kullanılmıştır.

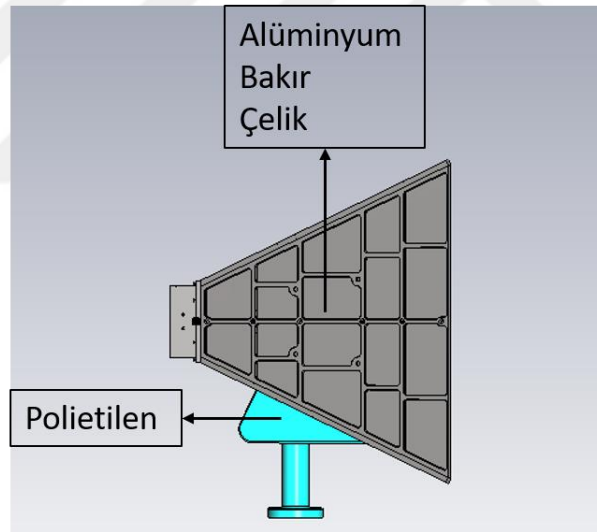
Başlangıç evresinde antenin hava ile empedansının uyumlu olması için "ridge" kısmına bir eğim fonksiyonu atanmış olup besleme kısmında ise 50 ohm ile uyumlu olması için

“teflon” içerikli silindirik bir besleme devresi dizayn edilmiştir. Buna ilişkin temel anten tasarım detayları (Şekil 3.8) verilmiştir.



Şekil 3.8. Temel Anten Tasarımına İlişkin Detaylar

Antende kullanılması muhtemel malzemelerle benzetimler gerçekleştirilmiş olup bu malzemeler alüminyum, bakır, çelik ve anteni taşıyacak olan polietilen (Şekil 3.9) konumları verilmiştir.

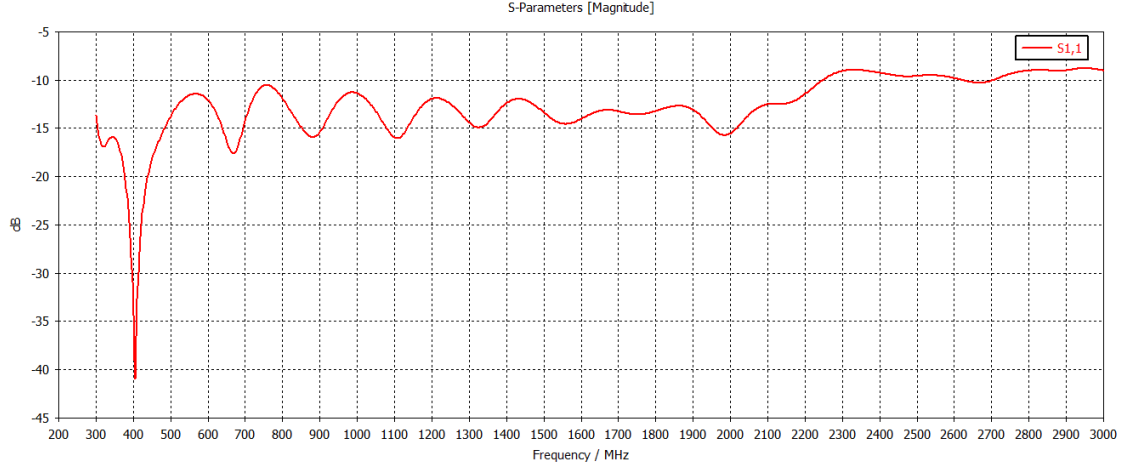


Şekil 3.9. Antende Kullanılacak Muhtemel Malzemelere İlişkin Detaylar

Bu malzemelerle elde edilen S_{11} ve 3B anten örüntüsü sonuçları her bir malzemeye ilişkin alt başlıklar altında detaylı olarak verilecektir.

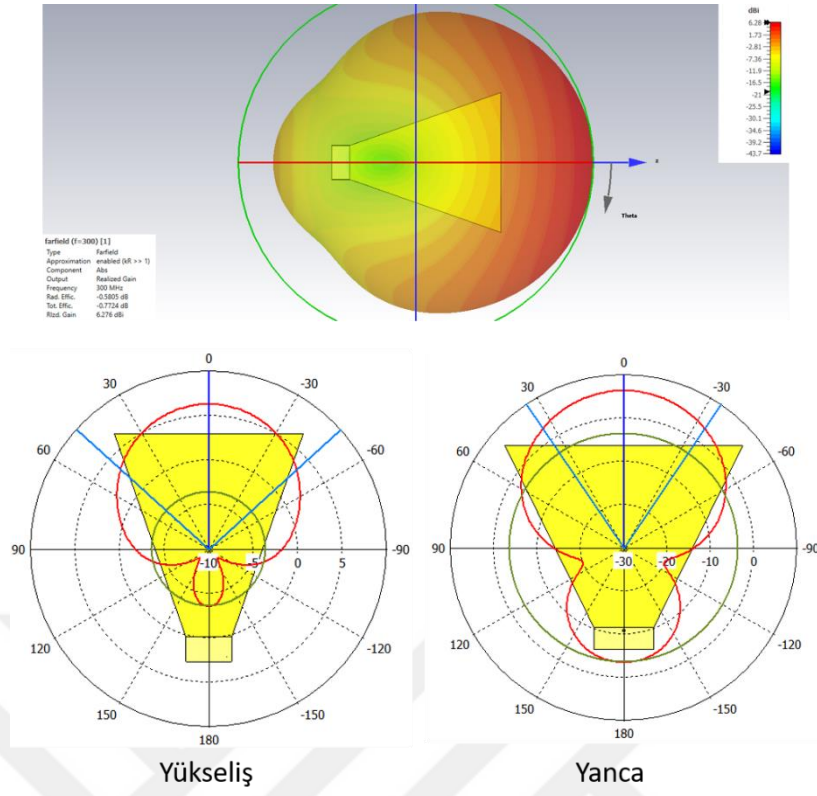
3.4.1. Alüminyum 6061 Alaşımı Elektromanyetik Analizleri

Alüminyum malzeme ile elde edilen S_{11} ve 3B ışınma örüntüsü analiz sonuçları, Şekil 3.10’da S_{11} sonucuna yer verilmiştir.

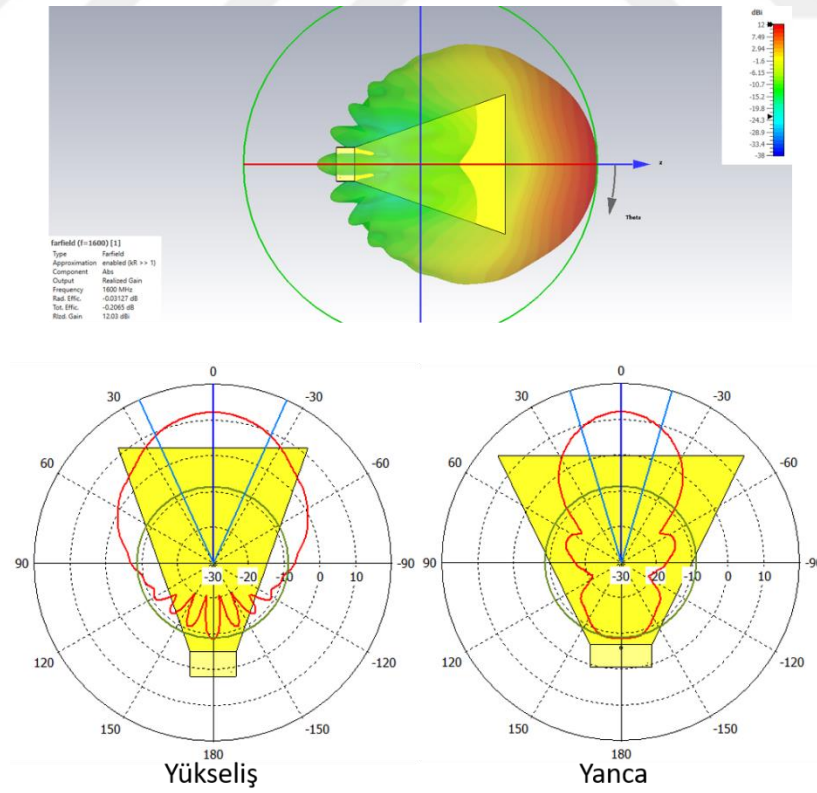


Şekil 3.10. S₁₁ değerinin Frekansa Bağlı Genlik Grafiği

Bu sonuç kapsamında S₁₁ değerinin 400 MHz frekansında -41 dB'e ulaştığı, band genişliği için ~-10 dB'den daha düşük olduğu bölgelere bakılacak olursa antenin çalışma frekans aralığının 300-3000 MHz frekanslarında oldukça geniş bir band aralığında olduğu, antenin yayılım verimliliğinin -0,7724 dB, kazancının ise 16,84 dBi en iyi sonuçlar olduğu görülmüştür. Bu çalışma frekans aralığında 300 MHz, 1600 MHz ve 3000 MHz'deki ışıma örüntülerine ilişkin sonuçlar elde edilmiştir. 300 MHz'deki 3B'lu ışıma örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.11) verilmiştir. 3B ışıma örüntüsünün oldukça düzgün yayılım gösterdiği görülmüştür.



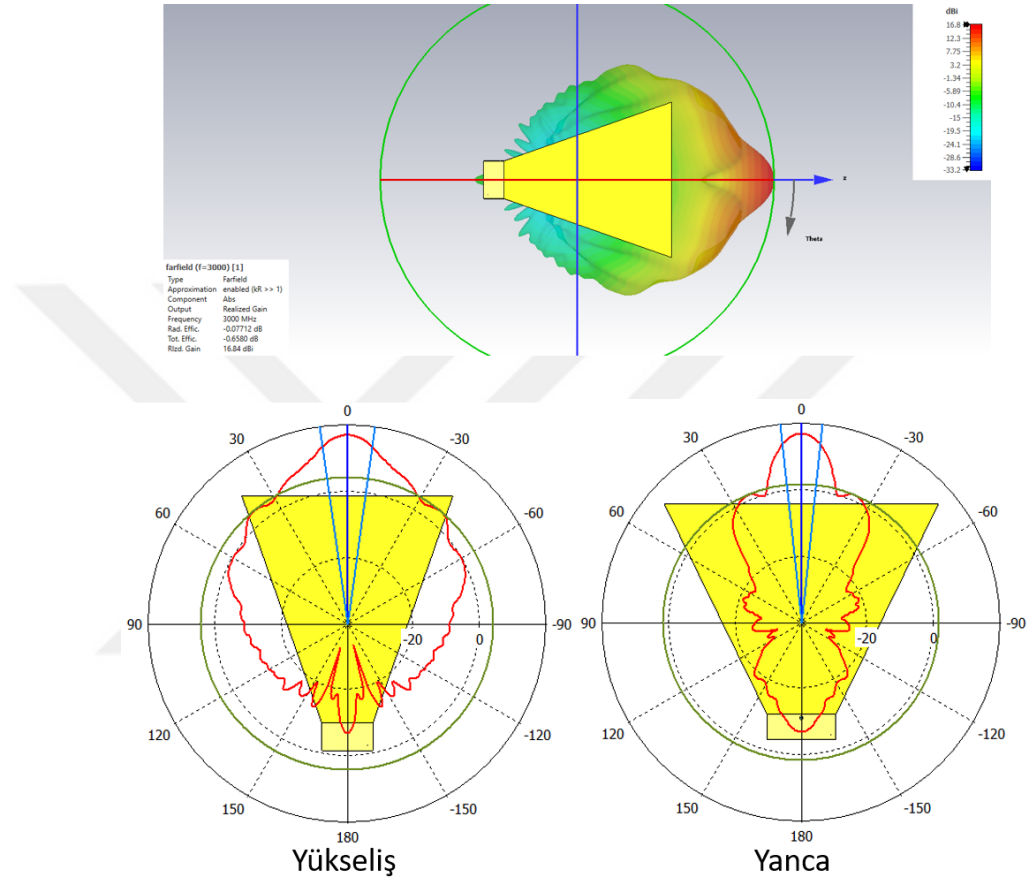
Şekil 3.11. 300 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü



Şekil 3.12. 1600 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

1600 MHz'deki 3B'lu ışına örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.12) verilmiştir.

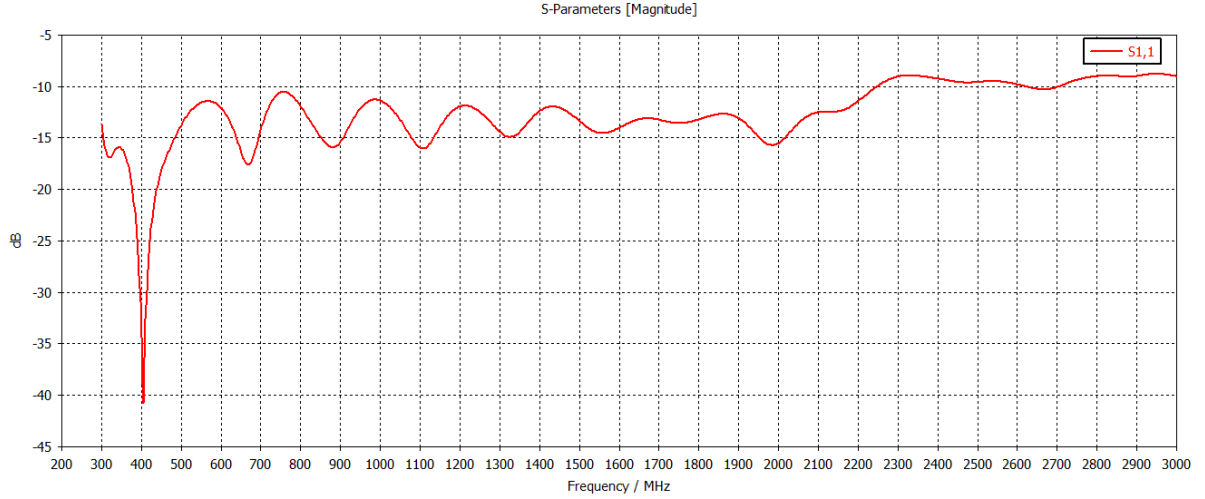
3000 MHz'deki 3B'lu ışına örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.13) verilmiştir.



Şekil 3.13. 3000 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

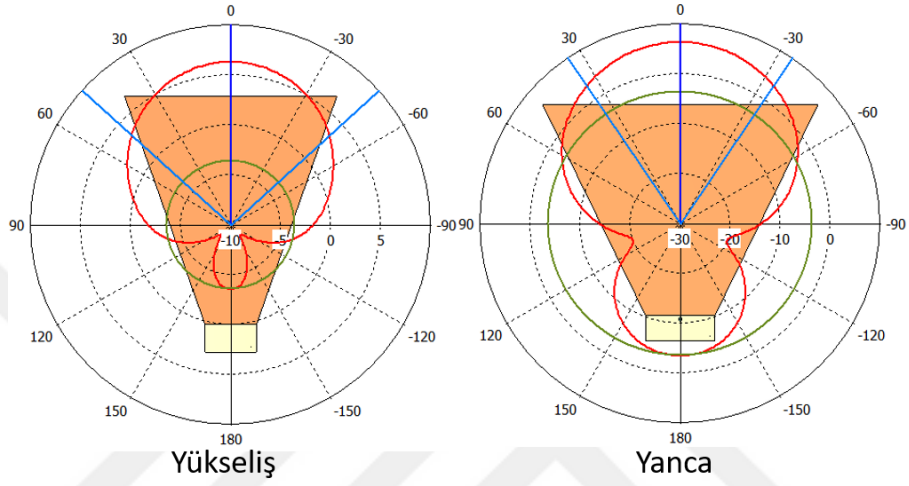
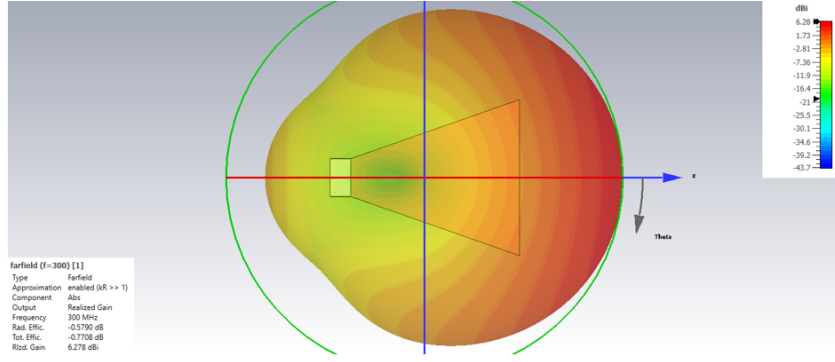
3.4.2. Bakır Alaşımı Elektromanyetik Analizleri

Bakır malzeme ile elde edilen geri dönüş kaybı (S_{11}) ve 3B ışına örüntüsü analiz sonuçları (Şekil 3.14) S_{11} sonucuna yer verilmiştir.



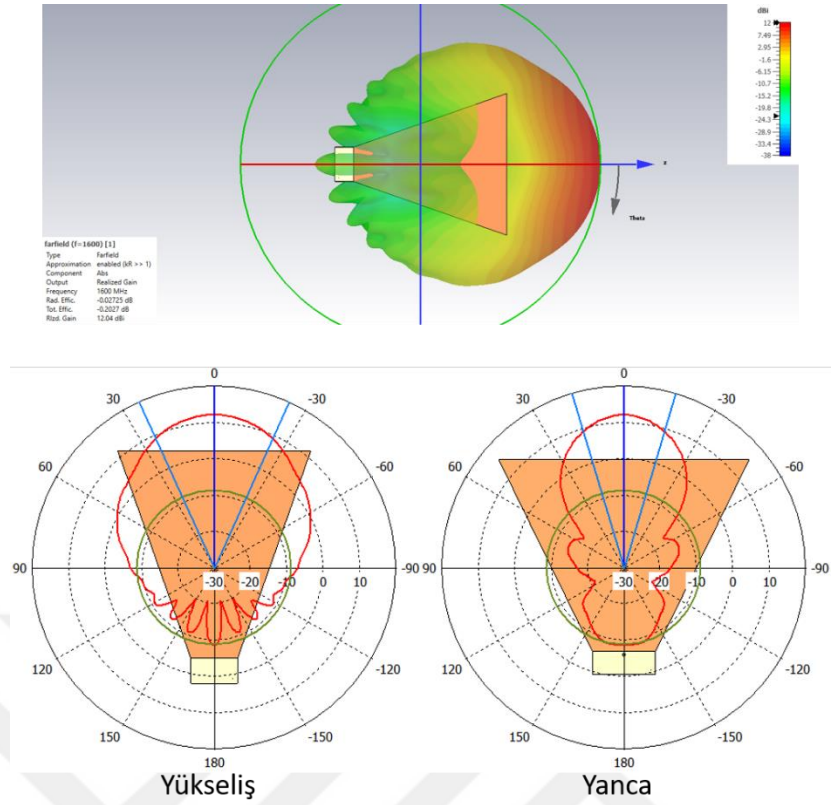
Şekil 3.14. S₁₁ değerinin Frekansa Bağlı Genlik Grafiği

Bu sonuç kapsamında S₁₁ değerinin 400 MHz frekansında -41 dB'e ulaştığı, band genişliği için ~-10 dB'den daha düşük olduğu bölgelere bakılacak olursa antenin çalışma frekans aralığının 300-3000 MHz frekanslarında oldukça geniş bir band aralığında olduğu, antenin yayılım verimliliğinin -0,7714 dB, kazancının ise 16,84 dBi en iyi sonuçlar olduğu görülmüştür. Bu çalışma frekans aralığında 300 MHz, 1600 MHz ve 3000 MHz'deki ışıma örüntülerine ilişkin sonuçlar elde edilmiştir. 300 MHz'deki 3B'lu ışıma örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.15) verilmiştir. 3B ışıma örüntüsünün oldukça düzgün yayılım gösterdiği görülmüştür.

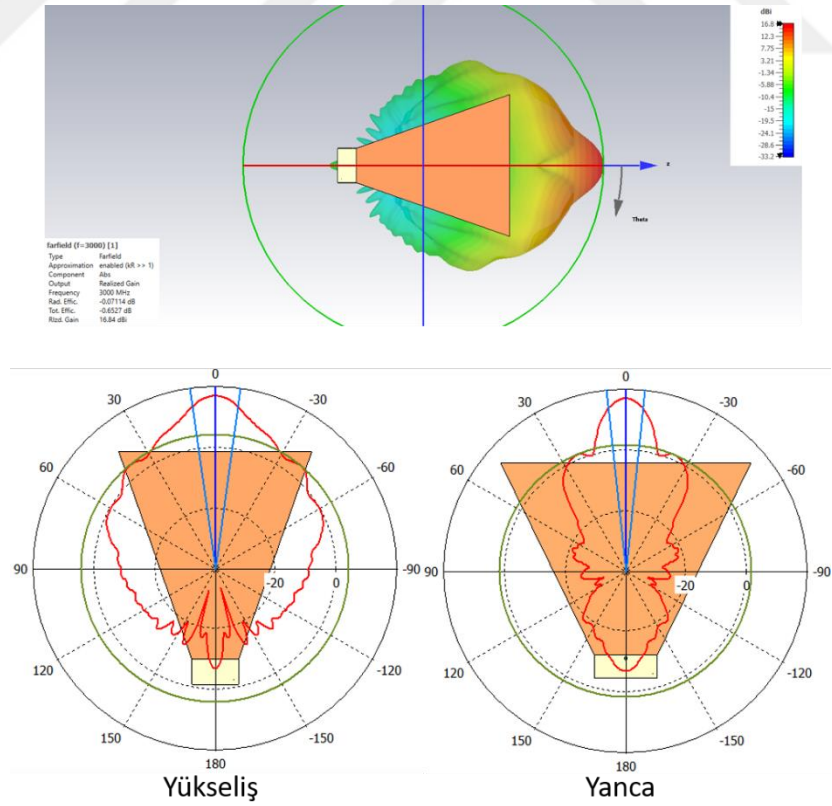


Şekil 3.15. 300 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

1600 MHz'deki 3B'lu ışımaya örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.16) verilmiş olup yönlü ışımının oldukça düzgün olduğu görülmüştür.



Şekil 3.16. 1600 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

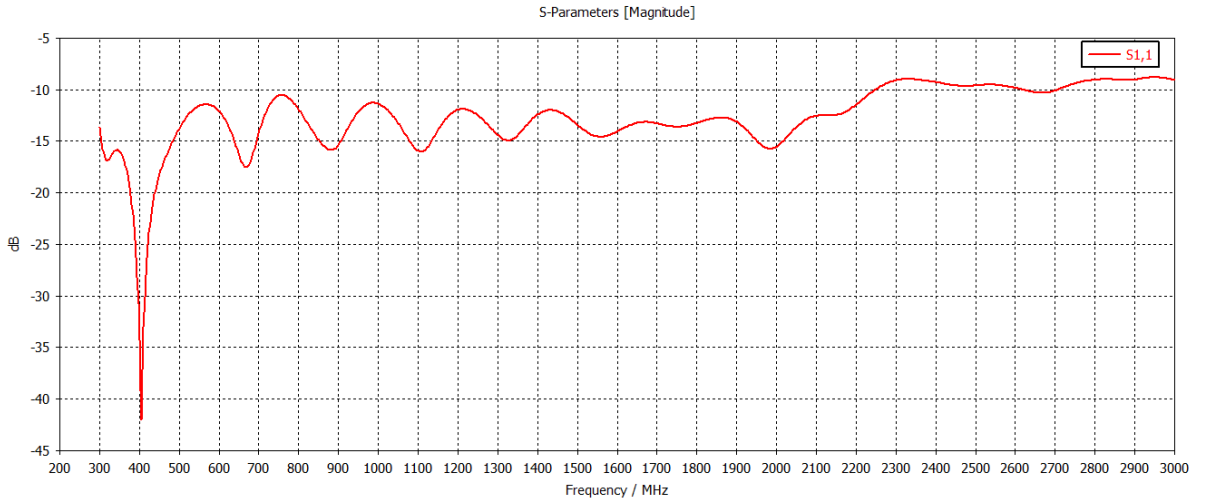


Şekil 3.17. 3000 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

3000 MHz'deki 3B'lu ışıma örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.17) verilmiştir. Işımanın bu frekansta bir miktar bozulduğu ancak kazancın ve verimin iyi olduğu gözlemlenmiştir.

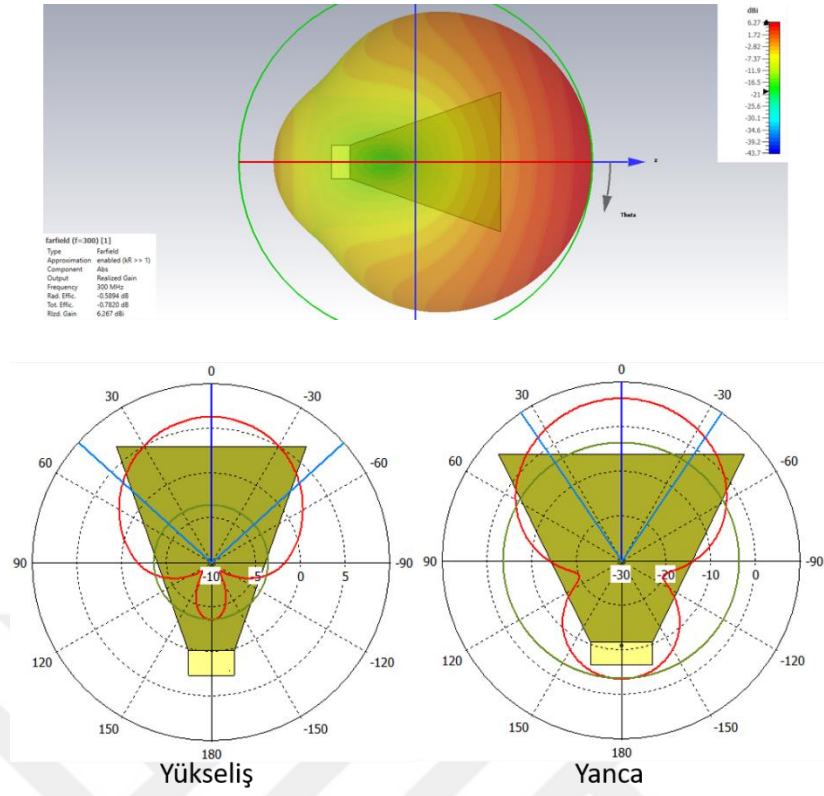
3.4.3. Çelik St-37-2 Alaşımı Elektromanyetik Analizleri

Çelik malzeme ile elde edilen geri dönüş kaybı (S_{11}) ve 3B ışıma örüntüsü analiz sonuçları, (Şekil 3.18) S_{11} sonucuna yer verilmiştir.

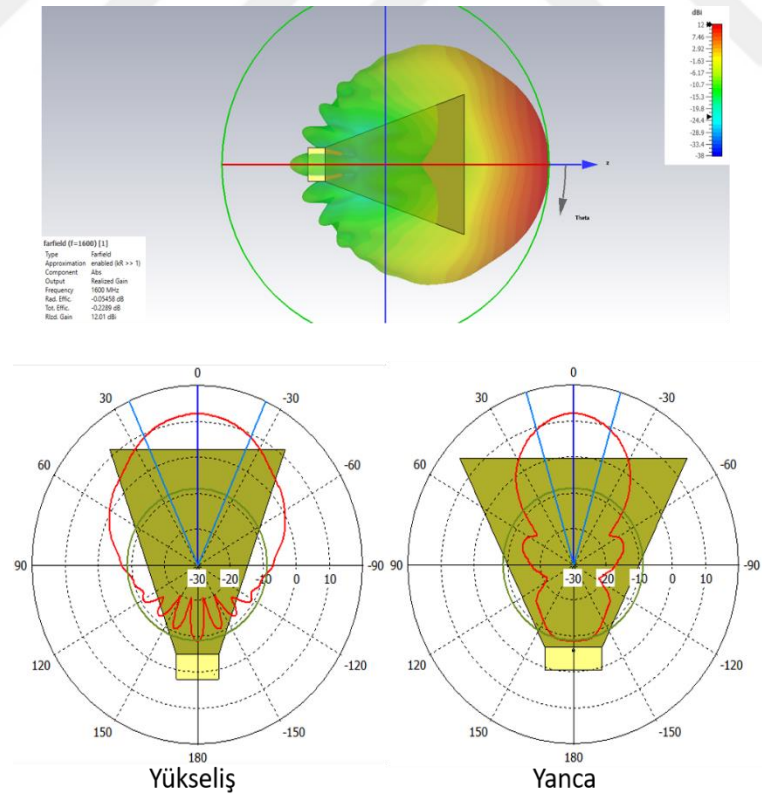


Şekil 3.18. S₁₁ değerinin Frekansa Bağlı Genlik Grafiği

Bu sonuç kapsamında S_{11} değerinin 400 MHz frekansında -41 dB'e ulaştığı, band genişliği için ~ -10 dB'den daha düşük olduğu bölgelere bakılacak olursa antenin çalışma frekans aralığının 300-3000 MHz frekanslarında oldukça geniş bir band aralığında olduğu, antenin yayılım verimliliğinin -0,7820 dB, kazancının ise 16,81 dBi en iyi sonuçlar olduğu görülmüştür. Bu çalışma frekans aralığında 300 MHz, 1600 MHz ve 3000 MHz'deki ışıma örüntülerine ilişkin sonuçlar elde edilmiştir. 300 MHz'deki 3B'lu ışıma örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.19) verilmiştir. 3B ışıma örüntüsünün oldukça düzgün yayılım gösterdiği görülmüştür.



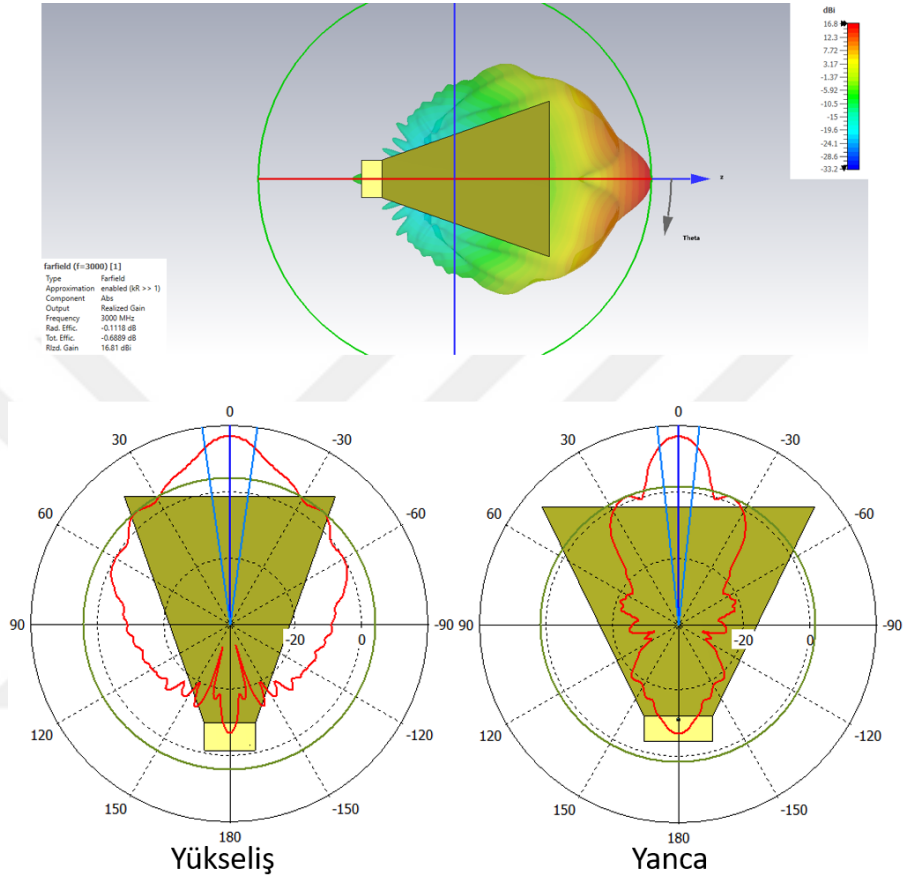
Şekil 3.19. 300 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü



Şekil 3.20. 1600 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

1600 MHz'deki 3B'lu ışıma örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.20) verilmiştir.

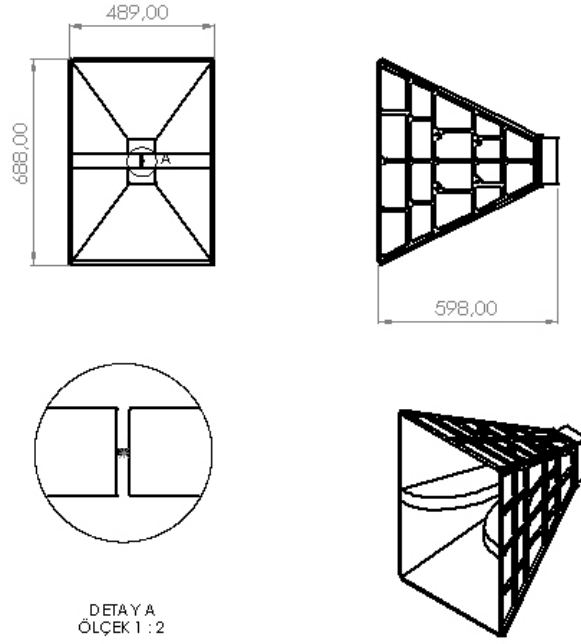
3000 MHz'deki 3B'lu ışıma örüntüsüne ilişkin analiz sonuçları (Şekil 3.21) verilmiştir.



Şekil 3.21. 3000 MHz'deki 3B Işıma Örüntüsü

3.5. Alüminyum 6061 Alaşımı Anten Üretimi

Bu kısımda radar antenin malzemesinin alüminyum 6061 alaşımı olacak şekilde üretimi gerçekleştirilmiş olup, bu sayede antenin elektromanyetik analizi ile network analizör değerlerinin birbiri ile kıyası gerçekleştirilebilecektir.



Şekil 3.22. Anten Teknik Resmi

Radar anteni tasarım ölçüsü 668x489x598 mm³ ebatlarında olacak şekilde 6 parça olarak 5 eksenli CNC işleme merkezinde üretilmiş olup, M2 ve M2,5 vidalar yardımıyla monte montajı yapıldıktan sonra antenin SMM cihazındaki ilk fiziksel ölçü kontrolleri tamamlanmıştır. Anten teknik resmi Şekil 3.22’de verilmiştir. Ölçü kontrolü sonrasında gerekli hassasiyetin sağlandığının gözlemlenildikten sonra antenin iç yüzeyine boya değmeyecek şekilde kaplama önlemi alınıp, dış yüzeyi elektrostatik toz boya yöntemi ile boyanmıştır.

Anten için dizayn edilen besleme devresinin montajı yapıldı, sonrasında konnektör bağlantısı tamamlandıktan sonra SMM cihazındaki son fiziksel ölçü kontrolü yapıldı. SMM cihazında yapılan ölçü kontrolü Şekil 3.23’de verilmiştir.



Şekil 3.23. SMM Cihazındaki Anten Ölçü Kontrolü

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Ansys ortamında yapılan statik analizler sonucunda polietilen ara yüz ile sabit mesnetlenen radar antenine tayin edilen her üç malzeme içinde; Uygulanan -300 N yayılı yük ve ağırlık merkezinden yerçekimi kuvveti ile maruz kaldığı antenin kendi ağırlığı doğrultusunda maksimum deformasyonların mesnete en uzak bölgede gerçekleştiği görülmüş olup, maksimum deformasyon değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Statik analiz sonucu maksimum deformasyonlar

	Alüminyum	Bakır	Çelik
Maks. Deformasyon (mm)	2,20	6,75	4,91

Radar anteni üzeri tayin edilen üç farklı malzeme sonrasında maksimum deformasyonun en düşük alüminyum alaşımında olduğu gözlemlenmiştir.

Statik analiz için belirtilen sınır koşullar çerçevesinde radar anteni alüminyum, bakır ve çelik malzemeleri tayin edilerek MIL-STD-810G standardı baz alınarak 750 Hz’e kadar her bir malzeme için modal analize tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Statik analiz sonucu maksimum deformasyonlar

Malzeme	Toplam Mod Sayısı	En Düşük(Hz) (1.Mod)	8. Mod (Hz)	En Yüksek (Hz)
Alüminyum	21	5,9	112	745,4
Bakır	30	3,4	76,3	727,7
Çelik	21	3,9	103,4	747,9

MIL-STD-810G standardı baz alınarak 750 Hz’e kadar simülasyon yapılmış olup, görece olarak yapının stres ve deformasyona bağlı etkileşim göstermediği anlaşılmıştır.

Elektromanyetik benzetimler neticesinde her üç malzeme için S_{11} ve 3B ışınma örüntülerinde büyük farklılıklar gözlemlenmemiş olup her bir malzeme için 300 MHz’deki yayılım verimliliği, toplam verimlilik ve kazanç değerleri çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu değerlere baktığımızda da büyük farklılıkların olmadığı değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.3. 300 MHz'deki yayılım verimliliği, toplam verimlilik ve kazanç değeri

	Yayılım Verimliliği (dB)	Toplam Verimlilik (dB)	Kazanç (dBi)
Alüminyum	-0.7724	-0.5805	6.276
Bakır	-0.7708	-0.5790	6.278
Çelik	-0.7820	-0.5894	6.267

Yüksek frekanslara çıkıldığında ise alüminyum, bakır ve çeliğin verimlilik ve kazanç açısından benzer oldukları, çeliğin ise manyetik nüve kaynaklı verimlilik ve kazancının azaldığı gözlemlenmiştir. Buna ilişkin değerler Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. 3000 MHz'deki yayılım verimliliği, toplam verimlilik ve kazanç değeri

	Yayılım Verimliliği (dB)	Toplam Verimlilik (dB)	Kazanç (dBi)
Alüminyum	-0.7712	-0.6580	16.84
Bakır	-0.7714	-0.5527	16.84
Çelik	-0.1118	-0.6889	16.81

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Radar anteninde belirlenen sınır koşullarında alüminyum, bakır ve çelik malzemeleri ANSYS ortamında statik ve modal analiz simülasyonları ve CST ortamında da elektromanyetik simülasyonları her biri için ayrı ayrı yapılmıştır.

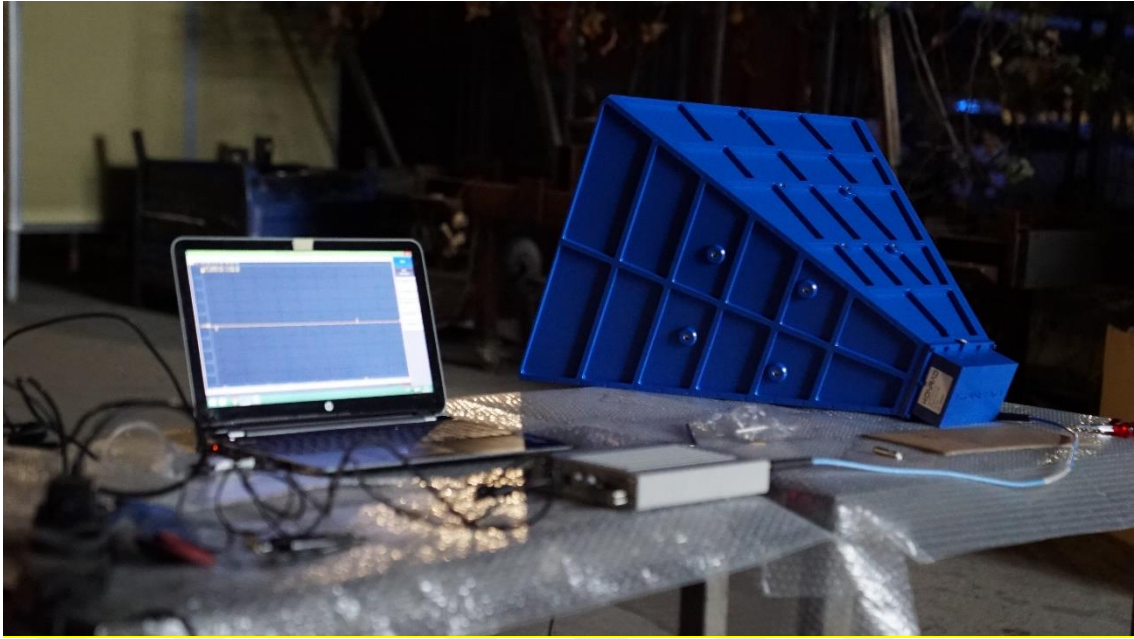
ANSYS ortamında yapılan statik analizlerin simülasyon sonuçlarına bakıldığında maksimum deformasyon değerlerindeki farklılıklar dikkat çekmekte olup, en düşük deformasyonun alüminyumda, en yüksek deformasyonun da bakırda olduğu gözlemlenmiştir.

Modal analiz simülasyonları kapsamında MIL-STD-810G standardı referans alınarak 750 Hz'e kadar simülasyonlar gerçekleştirilmiş olup görece olarak yapının stres ve deformasyona bağlı etkileşim göstermediği anlaşılmış ve her bir malzeme için modal analiz sonuçlarının uygun olduğu değerlendirilmiştir.

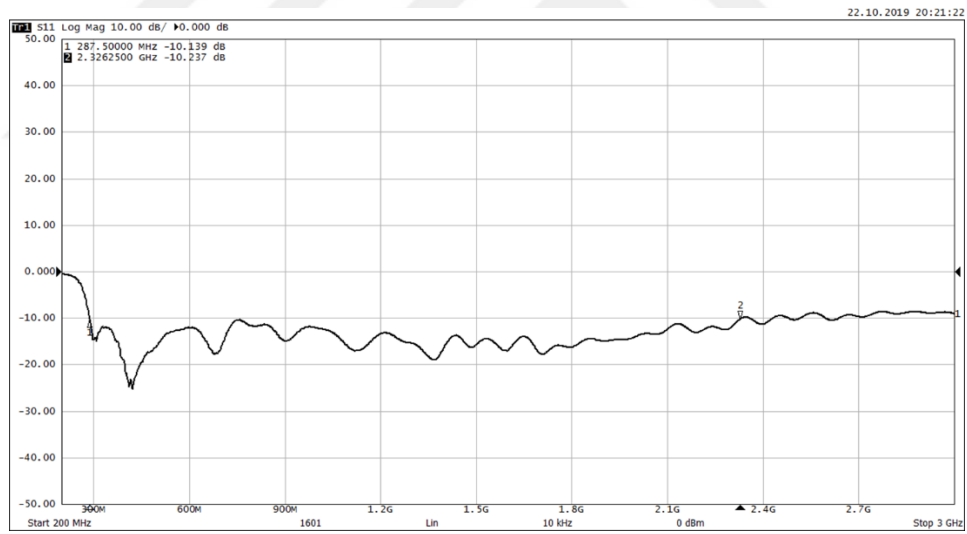
Elektromanyetik simülasyonlar kapsamında her bir malzeme için kazanç ve S_{11} değerlerinin birbirine yakın olduğu değerlendirilmiştir.

Yapılan tüm simülasyon çalışmaları kapsamında modal analiz ve elektromanyetik simülasyonları için sonuçların malzemeden bağımsız olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak statik simülasyonlar kapsamında maksimum deformasyonun bakırda olduğu, minimum deformasyonun ise alüminyumda olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar değerlendirildiğinde antenin üretimi için en uygun malzemenin alüminyum olduğu belirlenmiş ve daha sonrasında Alüminyum 6061 alaşımından anten üretilmiştir.

Üretilen antenin network analizör kullanılarak S_{11} parametresinin ölçülmesine ilişkin düzenek Şekil 5.1'de verilmiştir. Ayrıca bu düzenek ile alınan S_{11} parametresi sonucu Şekil 5.2'de verilmiş olup simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ile örtüştüğü gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1. Anten S_{11} Parametresi Ölçüm Düzeneği



Şekil 5.2. Network Analizör ile Ölçülen S_{11} Parametre Sonucu

6. KAYNAKLAR

Balanis CA, 1982. *Antenna theory: analysis and design*

Baran, İ., Özgen, G. O., & Cigeroğlu, E. (2010). *Bir radar anten yapısının titreşim özelliklerinin topolojik optimizasyon tekniği ile*. Ankara: Savtek.

Bayrakçı, H. (1992). *Antenlerin Teori ve Tekniği*. Bursa: Güneş Kitabevi.

Belen, M. A., & Mahouti, P. (2018). *X Band Radar Sistemleri için Mikroşerit Yürüyen Dalga*. Iğdır: Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.

Dündar Ö., 2018. *Dizi Yama Anten Tasarımında Yapay Sinir Ağları Kullanarak Anten Parametrelerinin Hesaplanması*. SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Erdoğan, K. (1993). *Antenler-I İnce Antenler*. Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi basım Evi.

Hüseyinoğlu, M., & Abut, T. (2019). *İki ucu ankastre u çerçeve yapınının modal analizi*. Diyarbakır.

İpekoğlu, Y., & Saraydemir, Ş. (2016). *İleri saçılım radar anten tasarımı*. Ankara: URSI-TÜRKİYE.

Matweb (n.d.). *Matweb, your source for materials information* Retrieved July 5, 2022 from <https://www.matweb.com/index.aspx>

Sainati R. A., 1996. *CAD of Microstrip Antennas for Wireless Appligation*, Artech House, London.

Shelby, R.A., Smith, D.R. ve Schultz, S., *Experimental verification of a negative index of refraction*. Science, 292.5514, 77-79, (2001).

Şengül, H. (2018). *UHF (Aşırı Yüksek Frekans) Bandında Yere Nüfuz Eden Radar Uygulamaları İçin Geniş Bantlı Anten Tasarımı*. Ankara.

Traut, G., “Clad laminates of ptfе composites for microwave antennas”, Microwave Journal, 23:47–51, 1980.