

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**EŞDEĞER AKIMLAR YÖNTEMİYLE
YAKIN ELEKTROMANYETİK ALANI UZAK ALANA DÖNÜŞTÜRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Derya Hatice YİĞİT

**İletişim Sistemleri Anabilim Dalı
Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selçuk PAKER

HAZİRAN 2018

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ BİLİŞİM ENSTİTÜSÜ

**EŞDEĞER AKIMLAR YÖNTEMİYLE
YAKIN ELEKTROMANYETİK ALANI UZAK ALANA DÖNÜŞTÜRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Derya Hatice YİĞİT

(705151022)

**İletişim Sistemleri Anabilim Dalı
Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selçuk PAKER

HAZİRAN 2018





Aileme,



ÖNSÖZ

Tezimde yardımcı olan, bana ışık tutan danışman hocam Prof. Dr. Selçuk Parker'e, süreç boyunca desteklerini esirgemeyen Profen ailesine teşekkürü burç bilirim. Buralara gelmemde emeği büyük olan aileme teşekkür ederim. Moral ve motivasyon sağlayan her daim yanımda olan arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Haziran 2018

Derya Hatice Yigit
(Elektrik Elektronik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1 GİRİŞ.....	27
2 ANTEN İŞİMA BÖLGELERİ.....	29
3 ANTEN TESTLERİNİN GENEL GEREKSİNİMLERİ.....	31
3.1 Yakın Alan Testlerinin Avantajları	34
3.2 Yakın Alan Mekanik Tarama Sistemleri	35
3.3 Yakın Alanda Anten Testi Kriterleri	39
4 YAKIN ALAN DÖNÜŞÜMÜNÜN ELEKTROMANYETİK TEMELLERİ 41	
4.1 Koordinat Sistemi Dönüşümleri.....	41
4.2 Manyetik ve Elektrik Vektör Potansiyelleri	42
4.3 Eşdeğer Alan Prensibi	42
4.4 Yakın Alanda Dipol Antenin Paterni	43
4.5 Uzak Alan Dönüşümleri	46
4.6 Akış şeması	50
5 SONUÇLAR.....	51
KAYNAKLAR.....	57
EKLER.....	59
ÖZGEÇMİŞ	71



KISALTMALAR

AUT	: Test altındaki anten (Antenna Under Test)
RF	: Radyo frekansı
PWS	: Düzlemsel dalga spektrumu (Plane wave spectrum)





SEMBOLLER

η	: Serbest uzay empedansı ($120\pi \Omega$)
I_0	: Kaynak akımı
λ	: Dalga boyu
l	: Dipolun boyu
k	: Dalga numarası
r	: $Y=10*\lambda$ düzleminin noktalar kümesidir.
A	: Manyetik vektör potansiyeli
F	: Elektrik vektör potansiyeli
H	: Manyetik alan
E	: Elektrik alan
μ	: Vakum geçirgenliği
ϵ	: Vakum geçirgenliği
P	: Gözlem noktası
J	: Manyetik akım yoğunluğu
M	: Elektrik akım yoğunluğu



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3-1: Tarama yöntemlerinin karşılaştırılması. [5].....39





ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: GAs akış diyagramı.	27
Şekil 2.1: Antenin alan bölgeleri.[4]	29
Şekil 3.1 Dalga yayılımı. [12]	32
Şekil 3.2: Uzak alan dalga yayılımı. [12]	32
Şekil 3.3: Uzak alan test düzeneği.....	33
Şekil 3.4: Yansımaz oda örneği.	35
Şekil 3.5: Yansımaz oda ölçüm düzeneği. [5].....	36
Şekil 3.6: Düzlemsel ölçüm düzeneği.[5]	37
Şekil 3.7: Silindirik ölçüm düzeneği.[5].....	37
Şekil 3.8: Küresel ölçüm düzeneği. [5]	38
Şekil 4.1: Eşdeğer alan prensibi.[4].....	43
Şekil 4.2: Dipol anten yerleşimi. [4].....	44
Şekil 4.3: Kartezyen koordinatlar.....	46
Şekil 4.4: Prob anten tarama mesafesi ve uzaklığı.	46
Şekil 4.5: Yakın alan ölçümü prob hareketi.....	47
Şekil 4.6: Eşdeğer elektrik ve manyetik akımlar.[12]	47
Şekil 4.7: $Y=10*\lambda$ düzlemi üzerindeki yüzey akımlarının R uzaklıktaki bir P gözlem noktasına taşınması.	48
Şekil 5.1: $Y=10*\lambda$ düzlemi üzerinde elektrik alan.	51
Şekil 5.2: $Y=10\lambda$ düzleminden P gözlem noktasına gelen $(EA)\theta$	52
Şekil 5.3: $Y=-10\lambda$ düzleminden P gözlem noktasına gelen $(EA)\theta$	52
Şekil 5.4: $X=-10\lambda$ düzleminden P gözlem noktasına gelen $(EA)\theta$	53
Şekil 5.5: $X=10\lambda$ düzleminden P gözlem noktasına gelen $(EA)\theta$	53
Şekil 5.6: Yönlü anten için Yakın alan - Uzak alan dönüşümü (E_{Toplam}) ve Dipol Anten kaynağından (E_{Kaynak}) hesaplanan elektrik alan büyüklükleri.	54
Şekil 5.7: Yönsüz anten için Yakın alan - Uzak alan dönüşümü (E_{Toplam}) ve Dipol Anten kaynağından (E_{Kaynak}) hesaplanan elektrik alan büyüklükleri.	55



EŞDEĞER AKIMLAR YÖNTEMİYLE YAKIN ELEKTROMANYETİK ALANI UZAK ALANA DÖNÜŞTÜRME

ÖZET

Gelişen teknoloji sayesinde antenler, yüksek frekanslarda daha az kayıplı daha yüksek kazançlı olarak tasarlanıp üretilebilmektedir. Anten test sistemleri düzeneklerinin gereksinimleri de gitgide daha hassas sonuçlar gerektirmektedir.

Antenin uzak alanda ışınma modelinin ölçümü, daha gelişmiş antenlerin tasarlanması ve üretilmesinde önemli bir konudur. Anten uzak alan ışınma paterninin ölçümü için kullanılan teknikler doğrudan ve dolaylı ölçüm olarak iki gruba ayrılmaktadır. Doğrudan ölçümler bir yansız odada ya da dış ortamda yapılabilmektedir. Doğrudan ölçümde bulunan sonuçlar hiçbir dönüşüm gerektirmeksizin kullanılabilir.

Bir antenden yayılan elektromanyetik alanın dağılımı antenden uzaklaştıkça kademeli olarak değişir. Antenin çevresindeki mesafe, temelde yakın alan ve uzak alan bölgeleri olarak iki ana bölgeye ayrılmaktadır. Antenlerin uzak alan testleri bir yansız odada ya da dış ortamda, çeşitli ön şartların sağlanması halinde yapılabilmektedir. Doğrudan ölçümler antenin uzak alanında yapılmaktadır.

Anten, yansız odada doğrudan ölçülmek istenirse ya oda boyutlarının çok büyük ya da anten çapının çok küçük olması gerekmektedir.

Anten, dış ortamda doğrudan ölçülmek istenirse, sağlanması gereken gereksinimler bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Anten dış ortamda ölçüldüğünde çevreden gelecek interferanslar engellenmelidir. Antenin gönderdiği gücün anten etrafındaki objelere çarpıp geri yansıması engellenmelidir. Bu gereksinimin sağlanması için antenin, çapının dört katı büyüklüğünde bir platform üzerinde test edilmesi gerekmektedir. Ayrıca anten testi dış ortamda yapıldığında hava durumuna bağlılık söz konusudur. Yağmurlu karlı havalarda yansıma ve kırılmalar fazla olacağından güneşli havalar tercih edilmelidir.

Tüm bu zorluklardan kaçınmak ve testlerin hassas sonuçlar vermesi istenmesi halinde antenler bir yansız odada, yakın alan bölgesinde test edilip, sonuçlar bazı matematiksel dönüşümler kullanılarak uzak alana taşınmalıdır.

Bu tez kapsamında antenlerin test gereksinimleri, uzak alan yakın alan bölgeleri açıklanmıştır. Yakın alan bölgesinde yüksek frekanslı antenlerin test edilmesi için gereksinimler tanımlanmıştır. Mekanik ölçüm sistemleri hakkında genel bilgi verilmiş olup, tez kapsamında düzlemsel ölçüm sistemi temel alınmıştır. Test sonuçları girdisi olarak, gerçek bir antenin testinden alınan yakın alan ve uzak alan verisi bulunmamaktadır. Bunun yerine matematiksel formülasyonu kullanılarak kolay ve pratik olarak pateni çizdirilebilecek teorik bir dipol anteni kullanılmıştır. Dipol antenin pateni yakın alan ve uzak alan için çizdirilmiştir. Yakın alanda çizdirilen dipol antenin yönlendiriciliği artırılmış, uzak alanda yönlü bir antenin test sonuçlarının transformu verilmiştir. Uzak alanda çizdirilen dipol antenin pateni ile

yakın alan uzak alan transformasyonu sonucu elde edilen patern karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar üzerinden metrik bir hata değeri bulunmuştur.

Yakın alanı uzak alana dönüştürürken eşdeğer alan prensibi (Huygens Prensibi) kullanılmıştır. Eşdeğer alan prensibi detaylı olarak tez kapsamında açıklanmıştır. Bu prensibe göre, yakın alanda bir S yüzeyinde ölçülen elektrik ve manyetik alanlar, yüzey akım yoğunluklarına çevrilmişlerdir. S yüzeyinin içinde elektrik ve manyetik alanların sıfır olduğu ve bulunan akım yoğunluklarının birer sanal kaynak olduğu Love teoremi temel alınarak tanımlanmıştır. Bu sanal kaynakların uzak mesafelere yaptıkları ışınım karakteristiğini veren formülasyon detaylı olarak açıklanmıştır. Dönüşüm işlemleri akış şemasında gösterilmiş, Matlab Programında geliştirilmiş kaynak kodu kullanılarak yakın alandan uzak alana dönüştürme işlemi tamamlanmıştır. Bunun sonucunda çıkan teorik değerler detaylı biçimde incelenmiş ve tez sonunda verilmiştir.



NEAR ELECTROMAGNETIC FIELD TO FAR FIELD TRANSFORMATION WITH FIELD EQUIVALENCE PRINCIPLE

SUMMARY

Thanks to the developing technology, previously unusable frequency bands are beginning to be used practically. The antennas used in these frequencies can be designed and manufactured with less loss and higher gain. Along with that, the requirements of the antenna test system arrangements require increasingly more precise results.

The purpose of this work is to find the characteristic of the far field using the electric and magnetic current densities that occur in the near field of an antenna.

The measurement of the antenna's far-field radiation pattern is an important issue in the development and production of high frequency antennas. Techniques for measuring the antenna far field radiation pattern can be divided into two groups as direct and indirect measurements.

Direct measurements can be made in a anechoic chamber or on the outside. Results from direct measurements can be used directly and do not need any conversion. Direct measurements are made in the far field area of the antenna.

Indirect measurements can be made in a anechoic chamber. The antenna under test is tested in near field region and far field characteristics are calculated using near field measurement results.

The distribution of electromagnetic field components emitted from antenna changes as the distance from it increases. The distance in the vicinity of the antenna is divided into two main regions, mainly near field and far field fields. The near-field region is the region where the radiated reactive power density dominates over the active power density. The area where the active power density dominates is called the far field. In other words if the distance between the source and the antenna under test is greater than or equal to the distance boundary area, the phase difference on the spherical wave surface that is incident on the test antenna does not exceed $22.5^\circ = \pi / 8$.

The far field tests of the antennas can be carried out in a anechoic chamber or outdoor environment, provided various preconditions are met.

If the antenna is to be directly measured in anechoic chamber, the room size must be very large or the antenna diameter should be very small.

If the antenna is intended to be directly measured in the outdoor environment, the requirements to be met are accompanied by some difficulties. Any future interferences when the antenna is measured outside must be eliminated. The power transmitted by the antenna must be prevented to reflect back by hitting the objects around the antenna. To meet this requirement, the antenna must be tested on a platform that is four times the diameter of the antenna. Furthermore, when the antenna test is carried out in an

outdoor environment, results obtained will be dependent on weather conditions. The sunny weather should be preferred because there will be more reflections and breaks in rainy and snowy weather. Also the distance between antenna under test and probe antenna must be large enough to avoid coupling. This distance must be more than ten times the diameter of the antenna so that there are not coupling between the antenna under test and probe antenna. These conditions make difficult to establish a measurement setup for large diameter antennas.

To avoid all these difficulties and to obtain more precise results, the antennas can be tested in a anechoic chamber in the near-field area and the far field results can be calculated using some mathematical transformations from near-field results.

Within the scope of this thesis, the test requirements of the antennas and the definitions of near and far fields are given. Requirements for testing high frequency antennas in the near area are defined. General information about near field mechanical measurement systems is given and the details of the planar measurement system used in the thesis are explained. In general there are three types of near field measurement systems. They are: cartesian, cylindrical and spherical systems. These systems have cons and pros over each other. While cartesian systems can be used for measuring high gain antenna measurements they show poor performance in low gain antenna measurements. These systems also show good performance for high frequencies. In terms of the testing time cartesian near field measuring systems is best. Taking in mind all of these performance results, in this thesis cartesian measuring system was chosen for the near to far field transformation.

As an input, no near field or far field data obtained from a real antenna test. Instead, a theoretical infinitally small dipole antenna data is used which can be easily and practically patterned using mathematical formulation as source data. Near field data of the dipole antenna for cartesian coordinate system is calculated from the theoretical formulas and the pattern of the dipole antenna is plotted for the near field. For the use in the cartesian near to far field transformation directivity of the dipole antenna has been increased.

The equivalent area principle (Huygens Prince) was used to convert the near field data to the far field pattern. Used equivalent area principle is explained in detail in the thesis. According to this principle, electric and magnetic fields measured on a surface in the near field are converted to surface current densities. It is defined on the basis of Love theorem that electric and magnetic fields within this surface are zero and that the current densities are a virtual source. The formulations that describe radiation of this virtual sources to far-field are described in detail.

First of all small dipole is placed in the origin of the cartesian coordinate system. Then electric and magnetic field components of the radiated field calculated on the surface of the theoretical cube. This is the basis of the equivalence are principle. This means that if we calculate all electric and magnetic field components in the all surfaces of the cube it means that we can define far field result of the dipole antenna. Then as a next step near field data will be calculated on the surface situated in $Y=10*\lambda$ coordinate. Steps for the x and z scanning probes are $0.5*\lambda$. After finding electric and magnetic fields they was transformed to the electric and magnetic surface currents. This procedure was done for all six surfaces.

Next step in the transformation is to choose observation point in the space in far field radiation area. This point is chosen in spherical system, then coordinates of the point are transformed to the cartesian coordinates. Then electric and magnetic vector potential components are calculated using previously found surface currents. Electric vector potential calculated from electric surface currents and magnetic vector potential calculated from magnetic surface currents accordingly. In this step integration is used for transformation.

Conversion from near field to far field is completed by using source code developed in Matlab Program. The resulting theoretical values are examined in detail and given at the end of the thesis. For pattern of the dipole antenna to be directional eight's power of the components are taken. As a result high gain result is found in Y plane which is expected due to the nature of the antenna. Also results from Y plane surfaces are much bigger than other surfaces due to the our antenna is directive.

For the final result all the excited electric and magnetic field components from all six surfaces are summed up in the observation point. This result is our near to far field transformation result. To measure performance of the transformation calculated data and the theoretical data calculated at the beginning of the thesis were compared. For comparison L2N metric was used. This norm also called Euclidean Norm. Value of the metric decreases as inputs to the metric is close to each other. L2N data for this transformation is found to be 0.0018 which can be stated as a good result.

During thesis scanning parameters of the surfaces and directivities of the source antenna were changed to investigate the performance of the system under different situations. It is found that this system as stated in the theoretical part gives good performance for the antennas with high directivity. To measure this same procedure described above is performed for low directivity antenna. L2N metric was found in this situation is found to be 0.0040 which is worse. The main reason for this performance decrease is that power radiated from antenna transmits to the sides of the calculation cube. This problem can be solved by using cylindrical mechanical scanning system for near to far field transformation system.

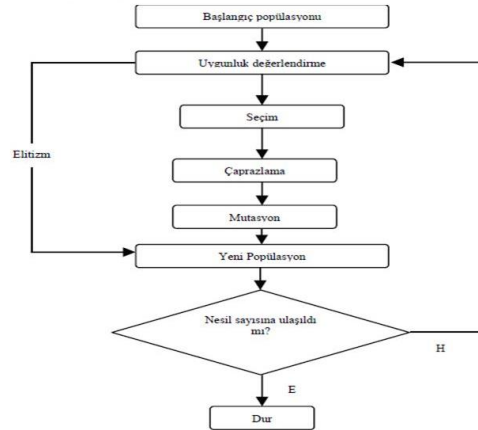
As a result it can be stated that this system works perfect for the high gain antennas and can be used in real life situations.



1 GİRİŞ

30 yıldan daha fazla süredir anten saçılmaları ve ışımalarının ölçümlerinde yakın alan ölçümlerini uzak alan sonuçlarına çeviren teknikler üzerine çalışmalar sürmektedir. Çalışmalar genel olarak ölçüm ortamının fiziksel olarak kurulması ve ölçüm sonuçlarının yazılımlar aracılığıyla uzak alana çevrilmesi olarak iki aşamadır. Yakın alan test sonuçlarını uzak alana taşımak için birçok metot bulunmaktadır. Bu tezde eşdeğer akımlar prensibi kolay ve anlaşılır olduğu için tercih edilmiştir. Bir başka önemli çıkan metot hızlı fourier dönüşümü (FFT) tabanlı algoritmadır. Temel olarak, antenlerin yakın alan ölçümlerinde düzlemsel tarama teknikleri, alanların Düzlemsel Dalga Spektrumu (PWS) temsiline dayanmaktadır.[1] Maxwell denklemlerinden, yakın alan örnekleri ile PWS arasındaki ilişki çıkarılabilmektedir. Daha sonra, uzak alan modeli PWS'den hesaplanabilmektedir. Kısaca, Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) ile tekniği kullanılarak konum domeninden frekans domenine geçilip uzak alan değerleri hesaplanmaktadır.

Bir başka teknik genetik algoritma tabanlı tekniktir. Eşdeğerlik teoremine göre, bir eşdeğer kaynak, test altındaki antenin hacmini çevreleyen yüzeyler üzerinde dağılan elektrik ve manyetik akımlarla değiştirilebilir. Bu yaklaşımda, bu akımlar bir paralel yüzeye eşit aralıklarla yerleştirilmiş elektrik ve manyetik dipoller aracılığıyla modellenir. [2] Bir düzlemsel yakın alan numunesi tarafından sağlanan referans bilgileri genetik algoritmalar (GAs) kullanılarak bilgisayar simülasyonu ile uzak alana çevrilir. Şekil 1.1'de Genetik algoritma akış diyagramı örneği verilmiştir.

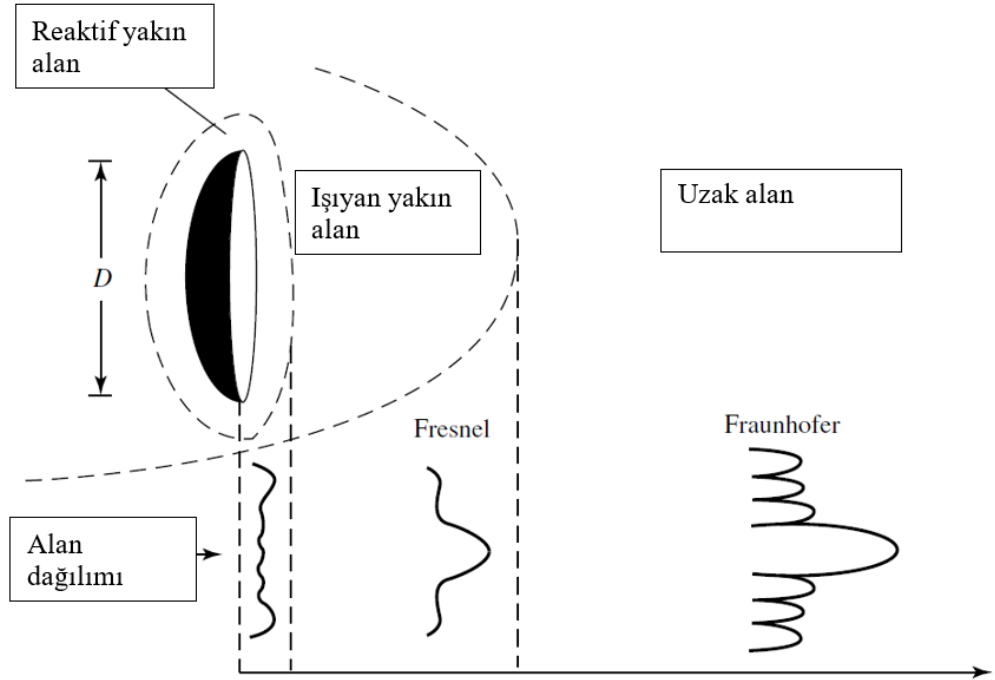


Şekil 1.1: GAs akış diyagramı.



2 ANTEN IŞIMA BÖLGELERİ

Anteni çevreleyen alan; ışılan yakın alan, reaktif yakın alan ve uzak alan olmak üzere üç bölgeye ayrılmaktadır. Şekil 2.1’de antenin bölgelere göre antenin genlik patern şeklinin değişimleri genel olarak verilmiştir.



Şekil 2.1: Antenin alan bölgeleri.[4]

Reaktif yakın alan bölgesi anten ışınma bölgesinde reaktif alanların baskın olduğu bölgedir ve Eşitlik 2.1 ile hesaplanmaktadır. Burada D anten çapını, λ anten dalga boyunu ifade eder.[1]

$$R_{\text{reaktif}} < 0.62 * \sqrt{\left(\frac{D^3}{\lambda}\right)} \quad (2.1)$$

Işıyan yakın alan bölgesi ise bir antenin ışılan alanlarının baskın olduğu bölgedir ve Eşitlik 2.2 ile hesaplanmaktadır. [1]

$$R_{\text{reaktif}} < R_{\text{fresnel}} < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.2)$$

Uzak alan bölgesi, bir antenin açısal alan dağılımının aslında antenden olan mesafeden bağımsız olduğu alan bölgesidir. Eşitlik 2.3 ile hesaplanmaktadır.[1]

$$R_{\text{frounhofer}} > \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2.3)$$



3 ANTEN TESTLERİNİN GENEL GEREKSİNİMLERİ

Anten testlerinde test ortamı, testi en doğru şekilde yapmak için özel olarak hazırlanmalıdır. Test ortamını etkileyen iki önemli unsur bulunmaktadır;

- i) Çevreden gelen sinyaller;

Test sırasında test edilecek antenin çalışma frekansında yüksek seviyede sinyal olmaması gerekmektedir.

- ii) Referans antenden çıkan sinyalin çevreye çarparak antene geri yansması;

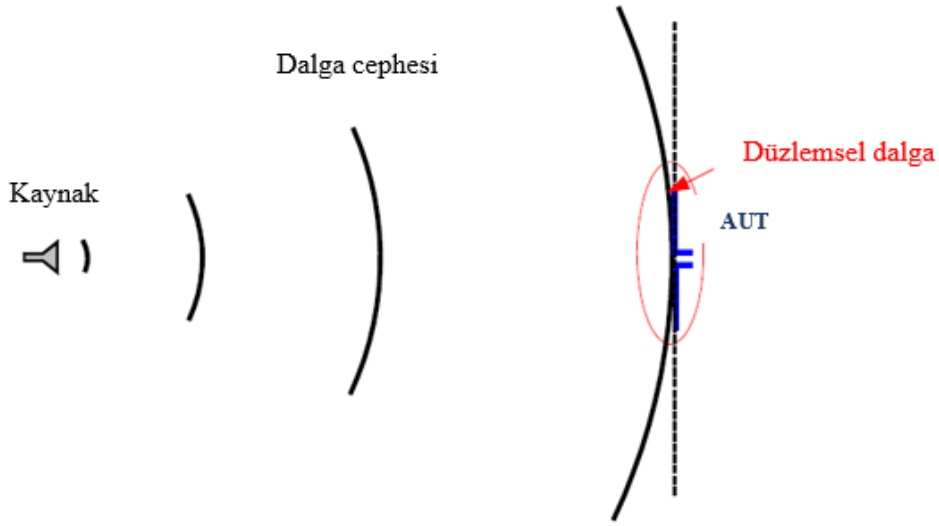
Test edilen antenin sadece görüş hattında sinyal alınması beklenmektedir. Test anteninden çıkan sinyallerin etraftaki objelere çarparak geri yansması toplam sinyal seviyesinde azalma ve artmalara sebep olmaktadır. Duran dalga oranını artırarak verimi azaltmakta ya da sinyal seviyesini artırarak anten besleme hattındaki cihazlara zarar vermektedir. Bu etkileri azaltmak için test ortamında anten çevresinde herhangi bir cisim olmaması gerekmektedir. Anten testlerinde en çok yansıma etkisi yerden olmaktadır. Bu nedenle test anteninin yerden yüksekte konumlandırılması gerekmektedir. Test anteni, yerden en az çapının dört katı kadar yüksekte konumlandırılmalıdır.

Uzak alan paternini ve anten kazancını ölçmek için ideal koşul, düzlemsel dalga cephesiyle bir aydınlatmadır. Alan vektörleri ile bu düzlemsel dalgalar, test altındaki anten açıklığının ötesine uzanan bir alan üzerinde sabit olan bir düzlemsel dalga cephesine sahip bir dalgadır. Örneğin düzgün ve zayıflamasız, zaman bağımlılığı $e^{-j\omega t}$ olan düzlem dalganın z yönünde yayılan \mathbf{E} alan vektörü bir boyutlu olarak Eşitlik 3.1'de tanımlanmıştır.

$$\mathbf{E}(\mathbf{z}) = \boldsymbol{\rho}_w E_m e^{-jkz} \quad (3.1)$$

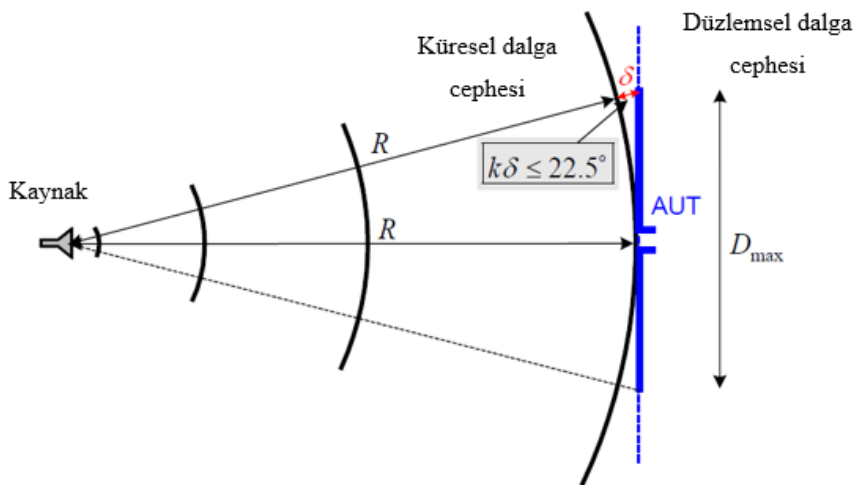
Burada $\boldsymbol{\rho}_w$ test altındaki anten hacminde sabit kalması gereken dalganın polarizasyon vektörüdür. Aynı durum, test altındaki anten açıklığında sabit kalması gereken E_m 'nin genliği için de geçerlidir. Uygulamada, antenler, kaynaktan yeterince uzaktaki bir

gözlem noktasından bakıldığında üç boyutlu yaklaşık olarak küresel şekle sahip dalga cepheleri oluştururlar. Ancak kaynağın antenden yeterince uzak olduğu mesafelerde Şekil 3.1’de görüldüğü gibi fazın eğriliği, test altındaki antenin açıklığından daha küçüktür ve dalga küresel olarak yayılmasına rağmen, test altındaki anten tarafından düzlemsel dalga şeklinde alınmaktadır.



Şekil 3.1 Dalga yayılımı. [12]

Eğer Şekil 3.2’de verilen, kaynak ile test altındaki anten arasındaki mesafe uzak alan sınır bölgesine ($R_{\min}=2D_{\max}^2/\lambda$) eşit ya da büyükse, gerçekte yansıyan alan ile uzak alan yaklaşımı arasındaki faz farkı $22.5^\circ=\pi/8$ aşmamaktadır.



Şekil 3.2: Uzak alan dalga yayılımı. [12]

Küresel dalga ve düzlem dalgası arasındaki en büyük faz farkı, test altındaki antenin uç bölgelerinde görünür ve bu da dalga yollarındaki (δ) farka karşılık gelir. Bu faz farkı Eşitlik 3.2'deki gereksinimi karşılamalıdır:

$$k\delta \leq \pi/8 \quad (3.2)$$

Dalga yolundaki fark kullanılarak;

$$(R + \delta^2) = R^2 + \left(\frac{D_{\max}}{2}\right)^2 \quad (3.3)$$

Bulunur. Buradan binom genişlemesi (sadece ilk iki terim);

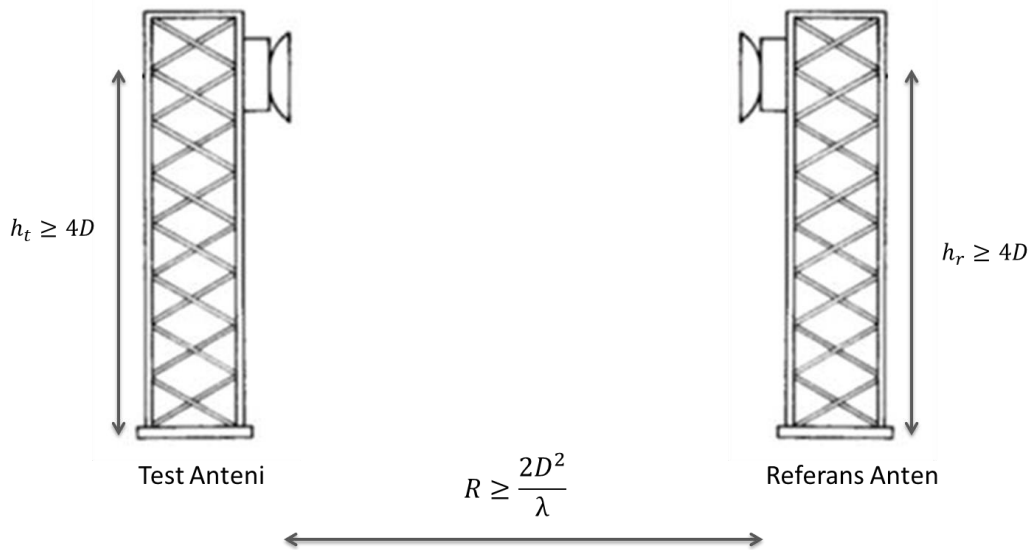
$$\delta = \left[\sqrt{\left(1 + \left(\frac{D_{\max}}{2R}\right)^2\right)} - 1 \right] \approx R \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{D_{\max}}{2R}\right)^2 - 1 \right] = \frac{D_{\max}^2}{4R} \quad (3.4)$$

Küresel dalganın kaynağından minimum mesafe Eşitlik 3.5'te verilmiştir.

$$k \frac{D_{\max}^2}{4R} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{D_{\max}^2}{4R} < \frac{\pi}{8} \quad (3.5)$$

Anten uzak alan testlerinde referans anteni ve test anteni arasında olması gereken mesafe Eşitlik 3.6'da verilmiştir. Uzak alan test düzeneğinin sağlanması gereken koşullar Şekil 3.3'de verilmiştir.

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (3.6)$$



Şekil 3.3: Uzak alan test düzeneği.

Anten çapı büyüdükçe uzak alan test düzeneğini gerçeklemek fiziksel olarak zorlaşmaktadır. Örneğin 3m çapında, 10 GHz bir reflektör anten için gereken R mesafesi 100m, antenin yerden yüksekliği ise 12m olmalıdır.

Anten testlerinin yapılması için gerekli test ortamını oluşturmanın fiziksel zorluğundan dolayı anteni yakın alanda test etmek için bazı yöntemler kullanılmaktadır.

3.1 Yakın Alan Testlerinin Avantajları

Yakın alan ölçümü, yönlü antenlerin laboratuvar ortamında ölçülebilmesini mümkün kılmaktadır. Yakın alan ölçüm teknikleri hassas mekanik altyapıya ve yakın alan ölçüm verisinin uzak alan verisine çevrilmesi için matematiksel dönüşüme ihtiyaç duyulmaktadır. [2]

Anten testlerinin yakın alanda yapılmasının birçok avantajı bulunmaktadır. Büyük yarıçaplı antenlerin test ölçüm düzeneği, anten frekansı ve boyutlarına göre değişecektir. Bir yansız oda kurulması halinde yüksek frekanslı veya büyük çaplı antenlerin yakın alanda ölçümlerini yapmak kolaylaşacaktır. Yakın alan test düzeneği daha maliyetli olmasına rağmen bir kez kurulacaktır. Yakın alanda test yapıldığında test düzeneği bir kez kurulduktan sonra hassas ölçüm yapmak kolaylaşacak, taşıma maliyetleri ve işçilik azalacaktır.

Su ve buhar tanecikleri RF sinyallerinin saçılmasına ve geri yansımaya neden olduğundan, yağmurlu, karlı ve sisli havalar anten testlerinde sonuçları olumsuz etkilemektedir. Testler bir yansız oda içinde yapıldığında hava şartlarına bağımlı olmadan yapılabilecektir.

Testler yansız odada yapıldığında, çevredeki RF sinyalleri ölçüm sonuçlarını etkilemeyecektir. Ayrıca antenin etrafındaki objeler yüzünden oluşacak geri yansımaya sorunu, yansız odada bulunan yutucular sayesinde oluşmayacaktır. İnterferans azalacaktır.

Yakın alan ölçümü, yönlü antenlerin laboratuvar ortamında ölçülebilmesini mümkün kılmaktadır. Yakın alan ölçüm teknikleri hassas mekanik altyapıya ve yakın alan ölçüm verisinin uzak alan verisine çevrilmesi için matematiksel dönüşüme ihtiyaç duyarlar. Bununla birlikte ölçüm mesafesini, ölçüm yapılan frekans dalga boyunun birkaç katı mertebesine düşürürler. Ölçümlerde sağladığı hassasiyet ve tekrarlanabilirlik, testlerin hızlı ve kolay yapılmasını sağlaması, personel ihtiyacını

minimize etmesi, personel ve test cihazlarının taşınması gibi zorlukları ortadan kaldırması, kapalı ortamda testlerin kesintisiz ve güvenli olarak yürütülebilmesi gibi avantajlarından dolayı yakın alan ölçümü, açık saha testlerine nazaran daha kolaydır. [2]. Diğer taraftan, yakın alan ölçüm sistemlerinin tasarım ve gerçekleştirilmesi, uzak alan ölçüm sistemlerine oranla daha fazla mühendislik gerektirdiğinden anahtar teslim sistemler oldukça yüksek fiyatlara çözüm sunmaktadır. Buna karşılık anahtar teslim çözümler yerine bir yansımaz odanın bireysel olarak kurulması maliyeti azaltmaktadır. Mekanik bir tarama düzlemi, yutucular, test cihazları ve yakın alanı uzak alana çeviren kaynak kod ile yüksek frekanslı antenler için yakın alan ölçüm düzeneği kurulabilmektedir. Burada maliyeti artıracak olan test cihazları ve kalibrasyon sertifikalarıdır. Halihazırda uzak alan testlerini de yaparken de test cihazları kullanılacağından bu kalem ek maliyet olarak düşünülmemelidir.

3.2 Yakın Alan Mekanik Tarama Sistemleri

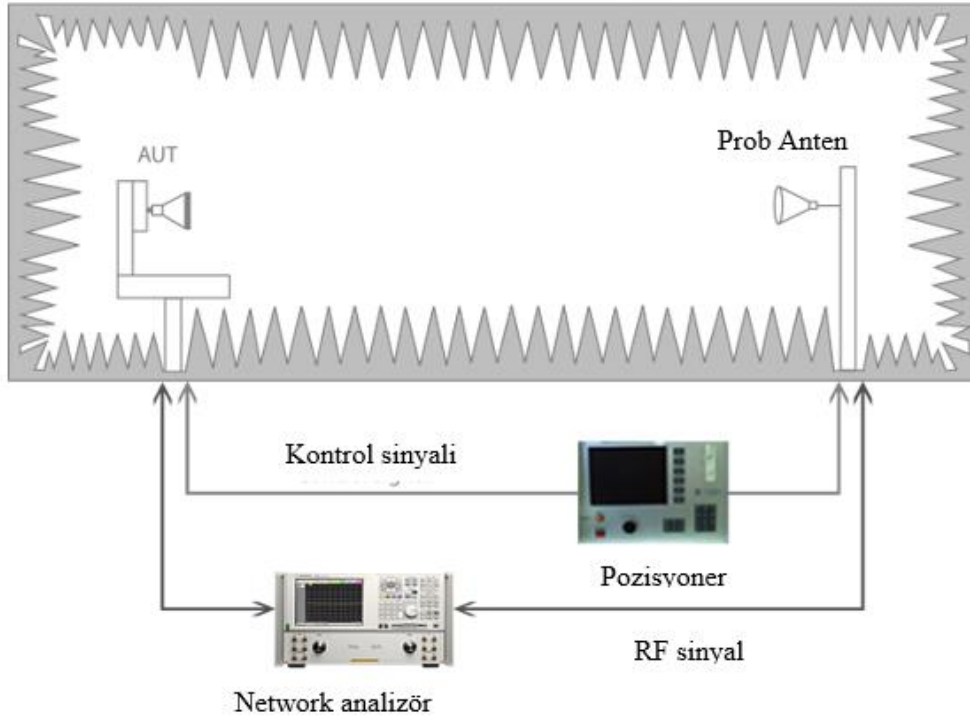
Anten testlerinin yakın alanda test edilebilmesi için yutucularla kaplı yansımaz odalar oluşturulmaktadır. Yansımaz odanın kaplanacağı malzemeler; test edilecek antenin boyutu, çalışma frekansı ve yapılmak istenen testlere göre değişmektedir. Şekil 3.4’te bir yansımaz oda örneği görülmektedir.



Şekil 3.4: Yansımaz oda örneği.

Yansımaz odada kurulacak ölçüm düzeneği en genel hatlarıyla Şekil 3.5’te verilmiştir.

Yansımaz oda



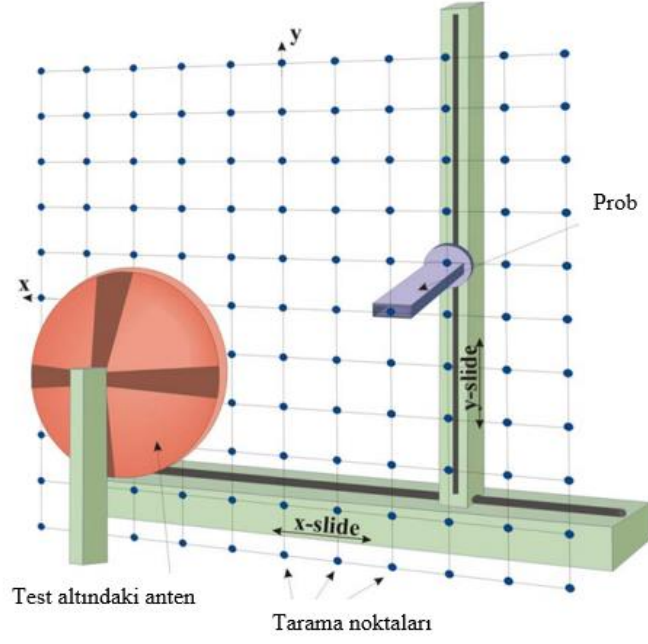
Şekil 3.5: Yansımaz oda ölçüm düzeneği. [5]

Oda boyutları, anten boyutları gibi faktörlere göre çeşitli ölçüm düzeneği mekanizmaları kullanılmaktadır. Genel olarak;

- Düzlemsel
- Silindirik
- Küresel

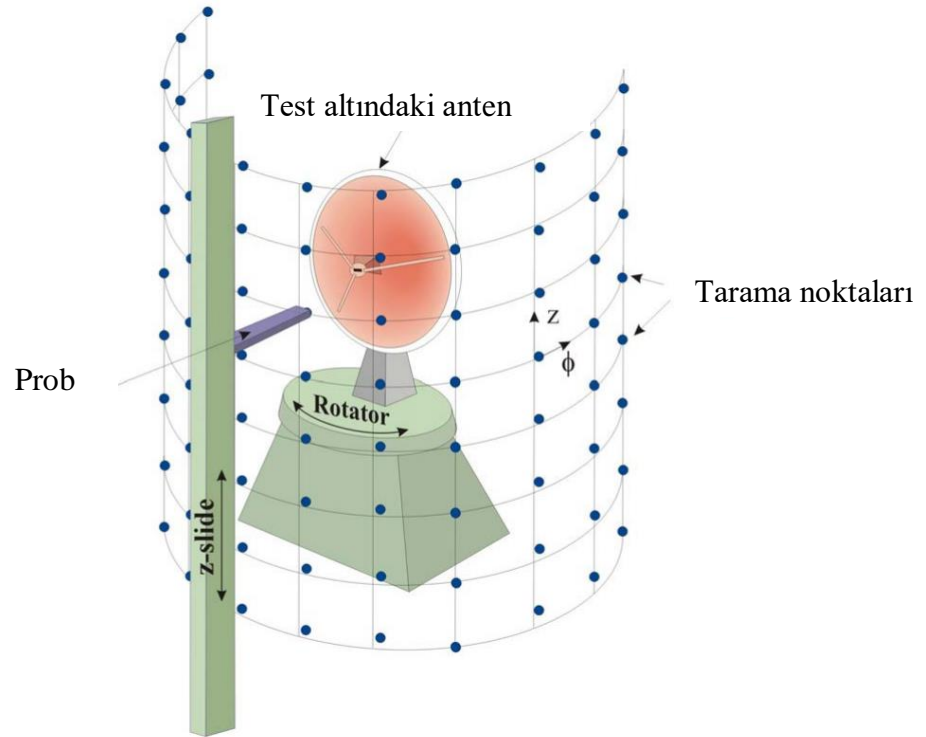
Olmak üzere üç çeşit yakın alan ölçüm düzeneği bulunmaktadır.

Düzlemsel ölçüm düzeneği Şekil 3.6’te verilmiştir. Yansımaz odanın bir yüzeyine tarama sistemi kurulur. Tarama sistemi x-y yönünde tarama yaparak antenin paternini çıkarır. Yan lobları ve arka lobları ölçmek için anten döndürülebilir.



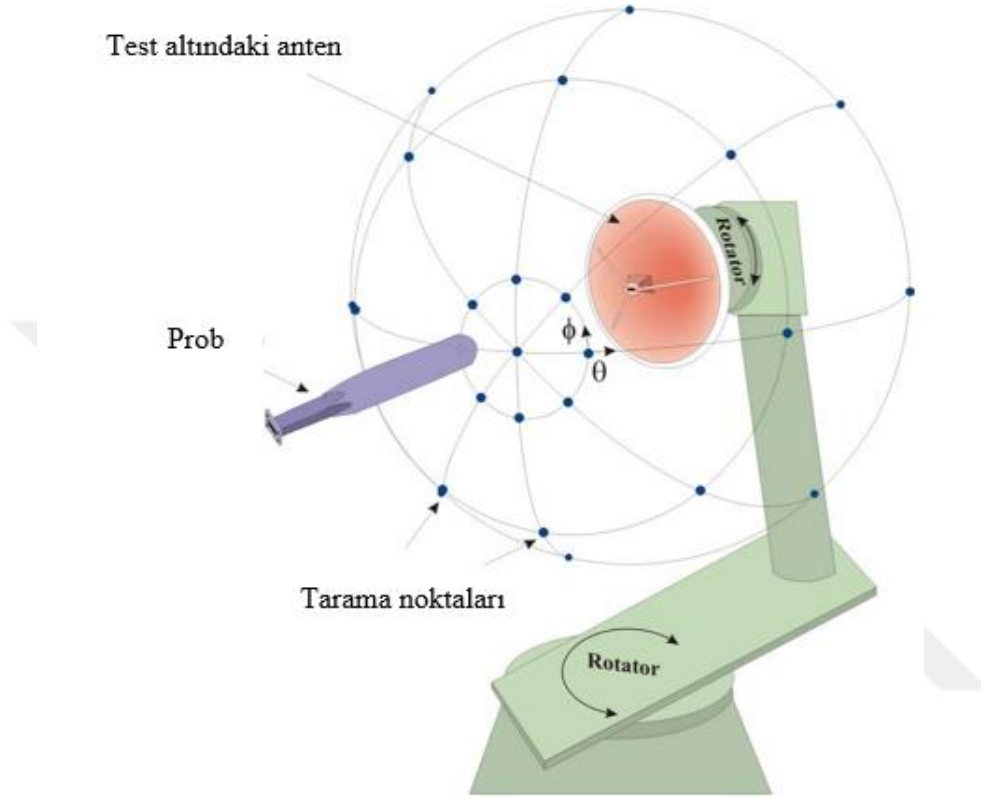
Şekil 3.6: Düzlemsel ölçüm düzeneği.[5]

Silindirik tarama düzeneği Şekil 3.7’da verilmiştir. Tarama düzlemi z yönünde hareket etmektedir. Anten bir pozisyoner yardımıyla kendi eksenini etrafında (Φ yönünde) dönmektedir.



Şekil 3.7: Silindirik ölçüm düzeneği.[5]

Küresel ölçüm düzeneği Şekil 3.8’de verilmiştir. Tarama düzlemi sabittir. Anten bir pozisyoner yardımıyla kendi eksenini etrafında (Φ yönünde) dönmektedir. Aynı zamanda bir pozisyoner yardımıyla θ yönünde dönmektedir.



Şekil 3.8: Küresel ölçüm düzeneği. [5]

Yansımasız odalarda dizi problar gibi birçok mekanik sistem yöntemi bulunmasına rağmen genel olarak verilen şekilde gerçekleştirilmektedir. Tarama yöntemlerinin birbirine göre üstün ve zayıf yönleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu tez kapsamında yazılacak olan Matlab kodu düzlemsel tarama sistemine yöneliktir. Bunun nedeni,

- Düzlemsel tarama sistemi daha küçük oda boyutlarına daha kolay kurulmaktadır.
- Düzlemsel tarama sisteminin maliyeti daha azdır.
- Ölçüm yaparken anten ayarı daha kolaydır.
- Kaynak kod yüksek frekansta antenler için yazılmaktadır.
- Kaynak kod anten kazancı, yönlülüğü, ışınma paterni, eksenel oran ölçüm ve testlerinin yapılmasında kullanılacaktır.

Çizelge 3.1: Tarama yöntemlerinin karşılaştırılması. [5]

YAKIN ALAN KOORDİNAT DÜZLEMİ KARŞILAŞTIRILMASI			
	KARTEZYEN	SİLİNDİRİK	KÜRESEL
Yüksek kazançlı anten	Çok iyi	İyi	İyi
Düşük kazançlı anten	Zayıf	İyi	İyi
Yüksek frekans	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Düşük frekans	Zayıf	Zayıf	Zayıf
Kazanç ölçümü	Çok iyi	İyi	İyi
Yakın yan lobelar	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Uzak yan lobelar	Yeterli	Çok iyi	Çok iyi
Düşük yanlobelar	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Eksenel oran	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Yerçekimsiz ortam etkisi	Çok iyi	Zayıf	İyi
Hava şartları	Çok iyi	Çok iyi	Çok iyi
Hız (test zamanı)	Çok iyi	İyi	Zayıf
Karmaşıklık	Orta	Orta	Yüksek
Mekanik yüzey ölçümü	Çok iyi	Yok	Yok
Anten hizalaması	Kolay	Orta	Zor

3.3 Yakın Alanda Anten Testi Kriterleri

Yakın alanda test yapılırken tarama düzleminin aldığı örnek sayısı tarama adımı mesafesini belirler. Şekil 4.7’de verilen Δx ve Δy ile verilen uzunluklar tarama adımı mesafesidir. Yakın alanda ölçüm yaparken kullanılacak olan tarama düzlemindeki prob antenin tarama adımı mesafesi yaklaşık dalga boyunun yarısı kadar olmalıdır. Bu kural Nyquist örnekleme teoreminden bulunur. Dalga numarası sınırlı spektrum için elektrik alan, $z = 0$ düzlemindeki tüm noktalar için, dalga boyunun yarısından küçük tarama adımı mesafesi ile ayrılmış noktaların dikkörtgensel yüzeyindeki değerlerinin bilinmesinden yeniden oluşturulabilir.[6]

Tarama düzleminin bir başka gereksinimi test altındaki anten ile arasında olması gereken mesafedir. Prob ve test altındaki anten arasındaki mesafenin reaktif alanlarının önemli bir birleşimini önlemek için yeterince büyük olması gerekmektedir. [7] Bazı araştırmacılara göre tarama mesafesinin dalga boyunun on katı olması gerekmektedir. Böylelikle probun VSWR'si, bir verici olarak çalışırken, test edilen antenin varlığına karşı duyarsızdır. [8]

Tez kapsamında hazırlanan kaynak kodda bu etki çok açık görülmüştür. Tarama adımı mesafesi ve tarama düzlemi ile test altındaki anten arasındaki mesafe bu gereksinimler göz önüne alınarak yapıldığında optimum sonuçları vermiştir.

Bu mesafelerin sağlanması için düzlemsel tarama yüzeyinin mekanik olarak hareketli tasarlanmasının farklı antenler için ölçüm yapmayı kolaylaştıracağı öngörülmektedir.



4 YAKIN ALAN DÖNÜŞÜMÜNÜN ELEKTROMANYETİK TEMELLERİ

4.1 Koordinat Sistemi Dönüşümleri

Bu tezde sadece küresel koordinatlarla kartezyen koordinatlar arası dönüşümler kullanılacaktır. Kartezyen koordinatlardan küresel koordinatlara Eşitlik 4.1-4.6 kullanılmaktadır.

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4.1)$$

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{z}} \quad (4.2)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (4.3)$$

$$A_r = A_x \sin \theta \cos \varphi + A_y \sin \theta \sin \varphi + A_z \cos \theta \quad (4.4)$$

$$A_\theta = A_x \cos \theta \cos \varphi + A_y \cos \theta \sin \varphi + A_z \sin \theta \quad (4.5)$$

$$A_\varphi = -A_x \sin \varphi + A_y \cos \varphi \quad (4.6)$$

Küresel koordinatlardan kartezyen koordinatlara dönüşüm ise Eşitlik 4.7-4.12 arasında verilmiştir.

$$x = r \sin \theta \cos \varphi \quad (4.7)$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi \quad (4.8)$$

$$z = r \cos \theta \quad (4.9)$$

$$A_x = A_r \sin \theta \cos \varphi + A_\theta \cos \theta \cos \varphi - A_\varphi \sin \varphi \quad (4.10)$$

$$A_y = A_r \sin \theta \sin \varphi + A_\theta \cos \theta \sin \varphi + A_\varphi \cos \varphi \quad (4.11)$$

$$A_z = A_r \cos \theta - A_\theta \sin \theta \quad (4.12)$$

4.2 Manyetik ve Elektrik Vektör Potansiyelleri

Işıma problemlerinin analizinde kaynakları belirlemek ve bu kaynaklar tarafından ışılan alanı bulmak gerekmektedir. Analiz işlemlerinde, problemlerin çözümünde yardımcı olacak olan ve vektör potansiyelleri olarak bilinen yardımcı fonksiyonlar tanımlanacaktır. Bu yardımcı fonksiyonlar, **A** (Manyetik vektör potansiyeli) ve **F** (Elektrik vektör potansiyeli) olarak tanımlanmıştır. Elektrik ve manyetik alanlar fiziksel olarak ölçülebilir nicelikler olmasına rağmen manyetik ve elektrik vektör potansiyelleri sadece matematiksel araçlardır. Vektör potansiyelleri kullanarak **J** ve **M** kaynak akım yoğunluklarından **E** ve **H** alanlarını hesaplamak daha kolaydır.

Problemi çözerken ilk olarak merkezde bir dipol anten olduğu varsayılacaktır. Dipol antenden düzlemsel bir alan üzerine gelen elektrik ve manyetik alanlar hesaplanacaktır. Daha sonra eşdeğer alan prensibi ile antenin uzak alandaki ışılma karakteristikleri tanımlanacaktır.

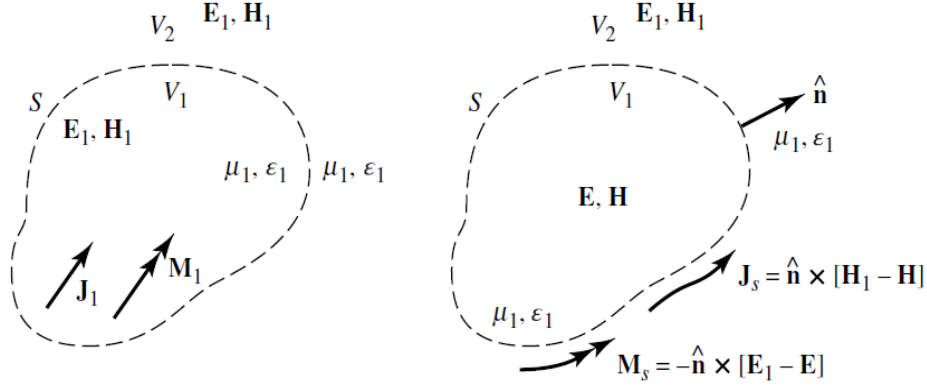
4.3 Eşdeğer Alan Prensibi

Alan eşdeğerliği, bir anten ve verici gibi gerçek kaynakların eşdeğer kaynaklarla değiştirilmesi prensibidir. Hayali kaynaklar bir bölgede gerçek kaynaklarla aynı alanları üretmeleri nedeniyle o bölge içinde eşdeğerdir. Alan eşdeğerliği ilk olarak 1936'da S.A. Shelknoff tarafından "Bir birincil dalga cephesindeki her bir nokta yeni bir ikincil küresel dalganın kaynağı olarak ele alınabilir. Ve bir ikincil dalga cephesi bu ikincil küresel dalgaların zarfı olarak yapılandırılabilir." Şeklinde ortaya koyulmuştur.

Huygens prensibine göre noktasal kaynaktan çıkan bir dalganın herhangi bir anda ulaştığı konumda, yani dalga sınırında o konumdaki parçacıkların her biri küresel dalgacıklar yayarlar. Bir dalga sınırı üzerindeki her bir nokta, bir başka dalganın merkezini oluşturmaktadır.[5] Bu küresel dalgacıklar tekrar yeni bir dalga sınırı oluştururlar. Ve dalgalar bu şekilde yayılarak ilerler.

Eşdeğerlik prensibine göre bir sanal kapalı yüzeyin dışındaki alanlar, kapalı yüzey üzerine bu yüzey üzerinde sınır koşullarını sağlayan uygun elektrik ve manyetik akım yoğunlukları yerleştirilerek elde edilir. Eşdeğerlik prensibi kapalı bir yüzeyin içinde çevrelenen kaynaklar tarafından dışına yansıyan alanları elde etmede kullanılacaktır.

Bu tezde temel alınan eşdeğerlik prensibine göre anten testleri kapalı ve yansımaz bir odada yapıldığında, odanın altı yüzeyine düşen elektrik ve manyetik akım



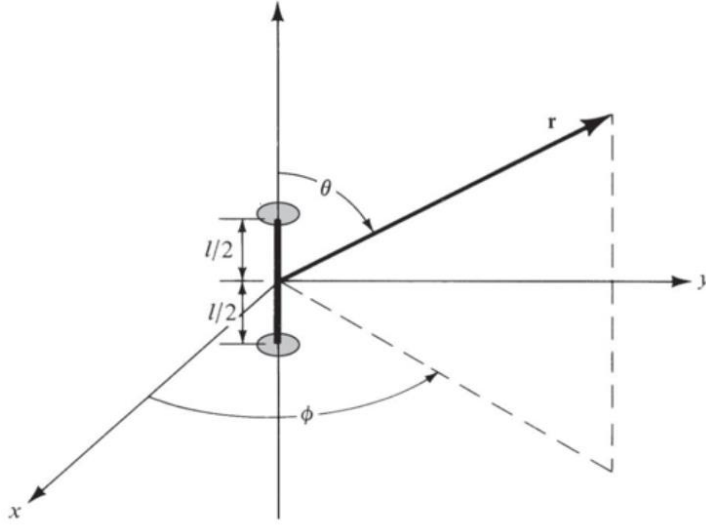
Şekil 4.1: Eşdeğer alan prensibi.[4]

yoğunlukları birer eşdeğer kaynak olarak alınacaktır. Çeşitli dönüşümler yapılarak odanın altı yüzeyindeki eşdeğer kaynaklardan yansıdığı varsayılan elektrik ve manyetik alan ifadesinin uzak mesafelere yansıtılması yoluyla uzak alandaki anten paterninin çıkarılması sağlanacaktır. Şekil 4.1’de eşdeğer alan prensibinin anlatımı verilmiştir.

4.4 Yakın Alanda Dipol Antenin Paterni

Test altındaki antenin yakın alanında elektrik alanının paterni spektrum analizör ile ölçülmektedir. Yakın alanda okunan ölçüm sonuçları, bir bilgisayar sistemi tarafından yürütülen karmaşık yazılımlarla uygulanan analitik tekniklerle uzak alan verilerine dönüştürülmektedir.

Problemin çözümüne başlarken merkezde bir sonsuz küçük dipol anten varsayılmıştır. Başlangıçta ölçüm verilerini kullanmak yerine, anten yapısının karmaşıklığı ve matematiksel detayları minimum olan dipol anteni tercih edilmiştir. Anten testleri yapılırken dipol anten yerine test anteni yerleştirilecektir.



Şekil 4.2: Dipol anten yerleşimi. [4]

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi, sonsuz küçük uzunlukta doğrusal tel z eksenini boyunca koordinat düzleminin (0, 0, 0) noktasına simetrik olarak yerleştirilmiştir. Tel çok küçük ve çok incedir. ($l \ll \lambda, a \ll \lambda$) Akımın sabit olduğu varsayılır.

$$\mathbf{I}(z') = \mathbf{a}_z I_0$$

Burada I_0 sabittir. [1]

Bir dipol antenden bir yüzeye yayılan elektrik alan ifadesi ve manyetik alan ifadesini bulmak için **A** ve **F** akım vektörleri bulunacak, daha sonra **E** ve **H** bulunacaktır. Eşitlik 1.21’de (x, y, z) koordinatlarındaki **A** vektör potansiyeli;

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \mathbf{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (4.13)$$

Burada R ($-1 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 1, -1 \leq z \leq 1$) noktalarının oluşturduğu koordinat matrisi;

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r = \text{sabit} \quad (4.14)$$

Şeklinde hesaplanır. (x, y, z) koordinatlarındaki A vektör potansiyeli;

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \mathbf{a}_z \frac{\mu I_0 e^{-jkr}}{4\pi r} \iint_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} dz' = \mathbf{a}_z \frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (4.15)$$

Olarak bulunur. Kartezyen bileşenler küresel koordinatlara çevrilirse;

$$A_r = A_z \cos \theta = \hat{a}_z \frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \cos \theta \quad (4.16)$$

$$A_\theta = -A_z \sin \theta = -\hat{a}_z \frac{\mu I_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (4.17)$$

$$A_\phi = 0 \quad (4.18)$$

Buradan merkezden r uzaklıkta elektrik alan bileşenleri;

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_A + \mathbf{E}_F = -j\omega\mathbf{A} - j\frac{1}{w\mu\epsilon}\nabla(\nabla\cdot\mathbf{A}) - \frac{1}{\epsilon}\nabla\times\mathbf{F} \quad (4.19)$$

Bağıntısı kullanılarak;

$$E_r = \eta \frac{I_0 l \cos \theta}{2\pi r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (4.20)$$

$$E_\theta = j\eta \frac{kI_0 l \sin \theta}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} \quad (4.21)$$

$$E_\phi = 0 \quad (4.22)$$

Elektrik alan bileşeni;

$$\mathbf{E}_A = j\omega\mathbf{A} \quad (4.23)$$

İfadesinde yerine yazılır. Problemin simetrisi kullanılarak,

$$H_\theta = H_r = 0 \quad (4.24)$$

$$H_\phi = j \frac{kI_0 l \sin(\theta)}{4\pi r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \quad (4.25)$$

Bulunur. Dalga r yönünde ilerlediği için $E_r=0$ olur. Sonuç olarak sonsuz küçük dipolden $Y=10*\lambda$ düzlemine yansıyan elektrik alan ve manyetik alanın küresel koordinatlardaki bileşenleri;

$$E_\theta = j\eta \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \sin \theta \quad (4.26)$$

$$E_r = E_\phi = H_\theta = H_r = 0 \quad (4.27)$$

$$H_\phi = j \frac{kI_0 l e^{-jkr}}{4\pi r} \quad (4.28)$$

Olarak bulunur.

Burada $r \geq 2m$ için;

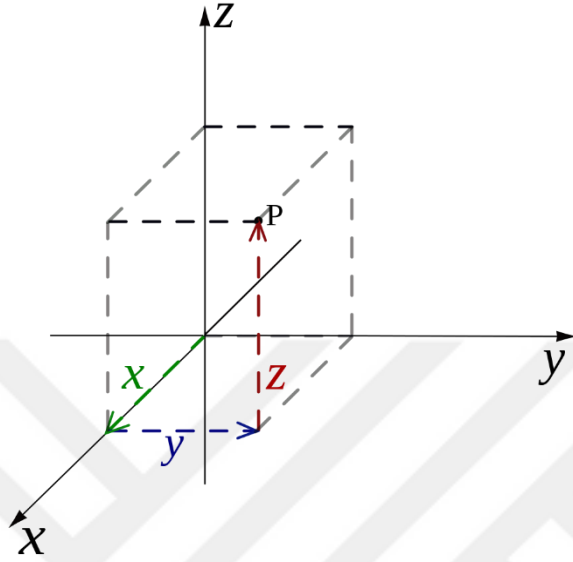
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = 209,4395 \quad (4.29)$$

$$kr \geq 418,8790 \quad (4.30)$$

Olduğu için Eşitlik 4.20 ve 4.21'deki $\left(\frac{1}{jkr}, \frac{1}{(kr)^2}\right)$ 'li terimler hesaba katılmamıştır.

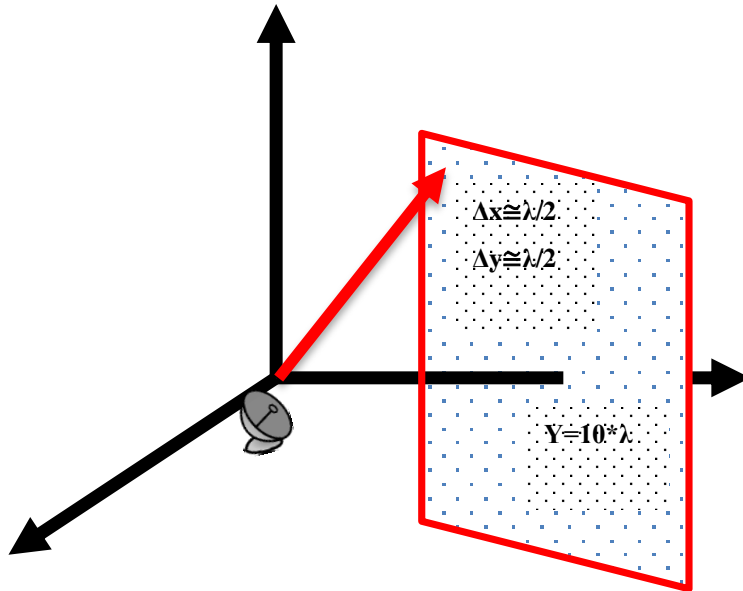
4.5 Uzak Alan Dönüşümleri

Şekil 4.3'te verilen kartezyen koordinatlarda (0,0,0) noktasında bir dipol anten olduğu varsayıldığında kapalı bir küpün her bir yüzeyine düşen elektrik alan birleşenleri hesaplanacaktır. Kapalı yüzey yansımatsız odayı temsil etmektedir.



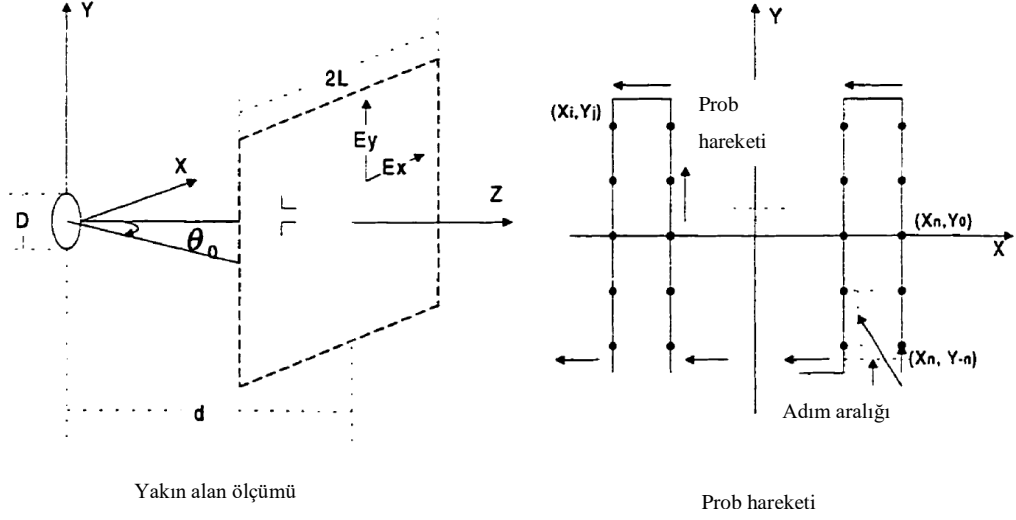
Şekil 4.3: Kartezyen koordinatlar.

İlk olarak Şekil 4.4'te verilen $Y=10*\lambda$ düzlemi üzerinde tarama probunun x ve z yönünde $0.5*\lambda$ adımlarla ölçüm alması üzerine hesaplamalar yapılacaktır.



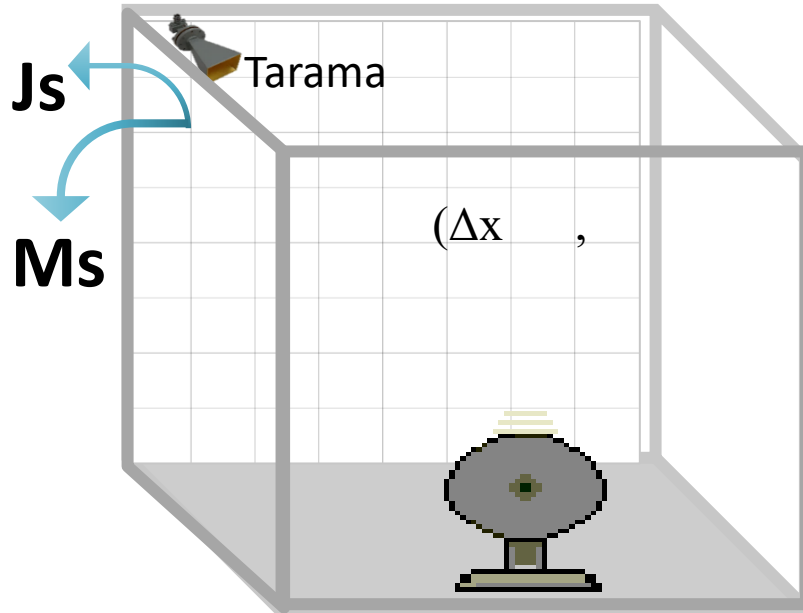
Şekil 4.4: Prob anten tarama mesafesi ve uzaklığı.

Şekil 4.5'te prob antenin test altındaki antenden alacağı ölçüm verileri ve prob antenin hareketi verilmiştir.



Şekil 4.5: Yakın alan ölçümü prob hareketi.

Şekil 4.6'da görülen kapalı bir yüzeydeki elektrik ve manyetik akım yoğunlukları bir odanın altı yüzeyinde hesaplanacaktır. Burada elektrik ve manyetik akım yoğunluklarının birbirine dik theta ve phi bileşenleri oluşacaktır.



Şekil 4.6: Eşdeğer elektrik ve manyetik akımlar.[12]

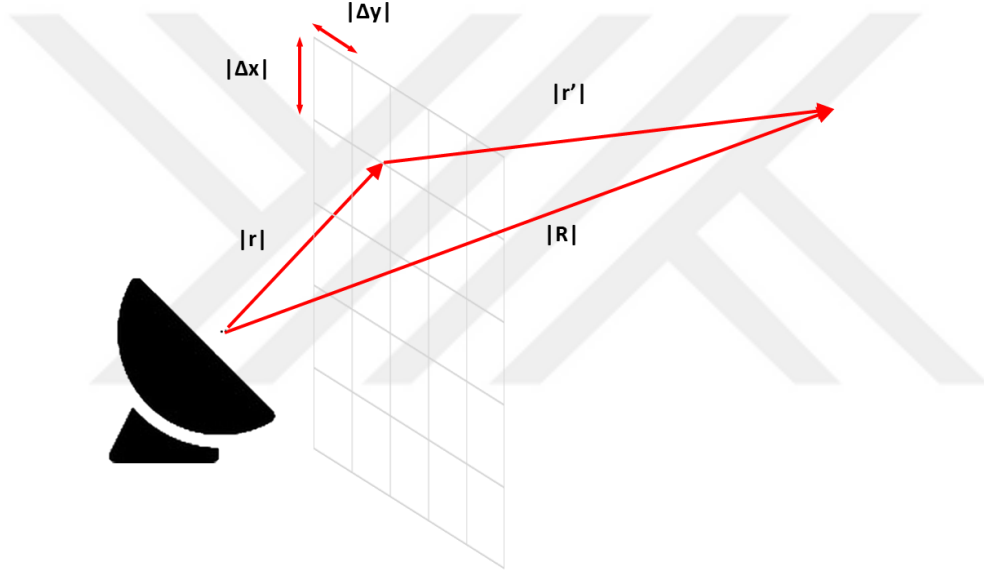
Altı yüzey için elektrik alan ve manyetik alanın küresel bileşenleri hesaplandığında, kapalı bir yüzey üzerindeki elektrik alan ve manyetik alan ifadeleri bulunmuş

olacaktır. Elektrik alan ve manyetik alan ifadeleri Eşitlik 4.31 ve 4.32 kullanılarak yüzey akım yoğunluklarına çevrilecektir.

$$\mathbf{J}_s = \hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H})|_{\mathbf{H}=0} = \hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_1 \quad (4.31)$$

$$\mathbf{M}_s = -\hat{\mathbf{n}} \times (\mathbf{E}_1 - \mathbf{E})|_{\mathbf{E}=0} = -\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}_1 \quad (4.32)$$

Şekil 4.7’te görüldüğü $Y=10*\lambda$ yüzeyi $\Delta x=\Delta y=0.5*\lambda$ uzunluğunda aralıklara bölünmüştür. Her bir $\Delta x - \Delta y$ kesişim noktasında oluşan yüzey akım yoğunlukları hesaplanmıştır. Artık eşdeğer alanlar prensibini temel alarak, test altındaki antenin yaydığı elektrik alan yerine, $\Delta x - \Delta y$ kesişim noktasında oluşan yüzey akım yoğunlukları sanal kaynaklar olarak görülecektir. Bu sanal kaynakların P gözlem noktasında oluşturdukları elektrik alan bulunacaktır.



Şekil 4.7: $Y=10*\lambda$ düzlemi üzerindeki yüzey akımlarının R uzaklıktaki bir P gözlem noktasına taşınması.

P gözlem noktasına olan uzaklık;

$$R = \sqrt{(R_x - x)^2 + (R_y - y)^2 + (R_z - z)^2} \quad (4.33)$$

Şeklinde hesaplanacaktır. Burada,

$$R_x = P \sin(\theta) \cos(\varphi) \quad (4.34)$$

$$R_y = P \sin(\theta) \sin(\varphi) \quad (4.35)$$

$$R_z = P \cos(\theta) \quad (4.36)$$

Olarak bulunacaktır. Elektrik alanın bileşenlerini hesaplamak için \mathbf{A} elektrik ve \mathbf{F} manyetik vektör potansiyelleri Eşitlik 4.37 ve 4.38'den hesaplanacaktır.

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iint_s \frac{\mathbf{J}_s(e^{-jkR})}{R} ds' \quad (4.37)$$

$$\mathbf{F} = \frac{\varepsilon}{4\pi} \iint_s \frac{\mathbf{M}_s(e^{-jkR})}{R} ds' \quad (4.38)$$

Vektör potansiyelleri Eşitlik 4.39-4.42 kullanılarak elektrik alan değerleri bulunacaktır.

$$(E_A)_\theta \cong -j\omega A_\theta \quad (4.39)$$

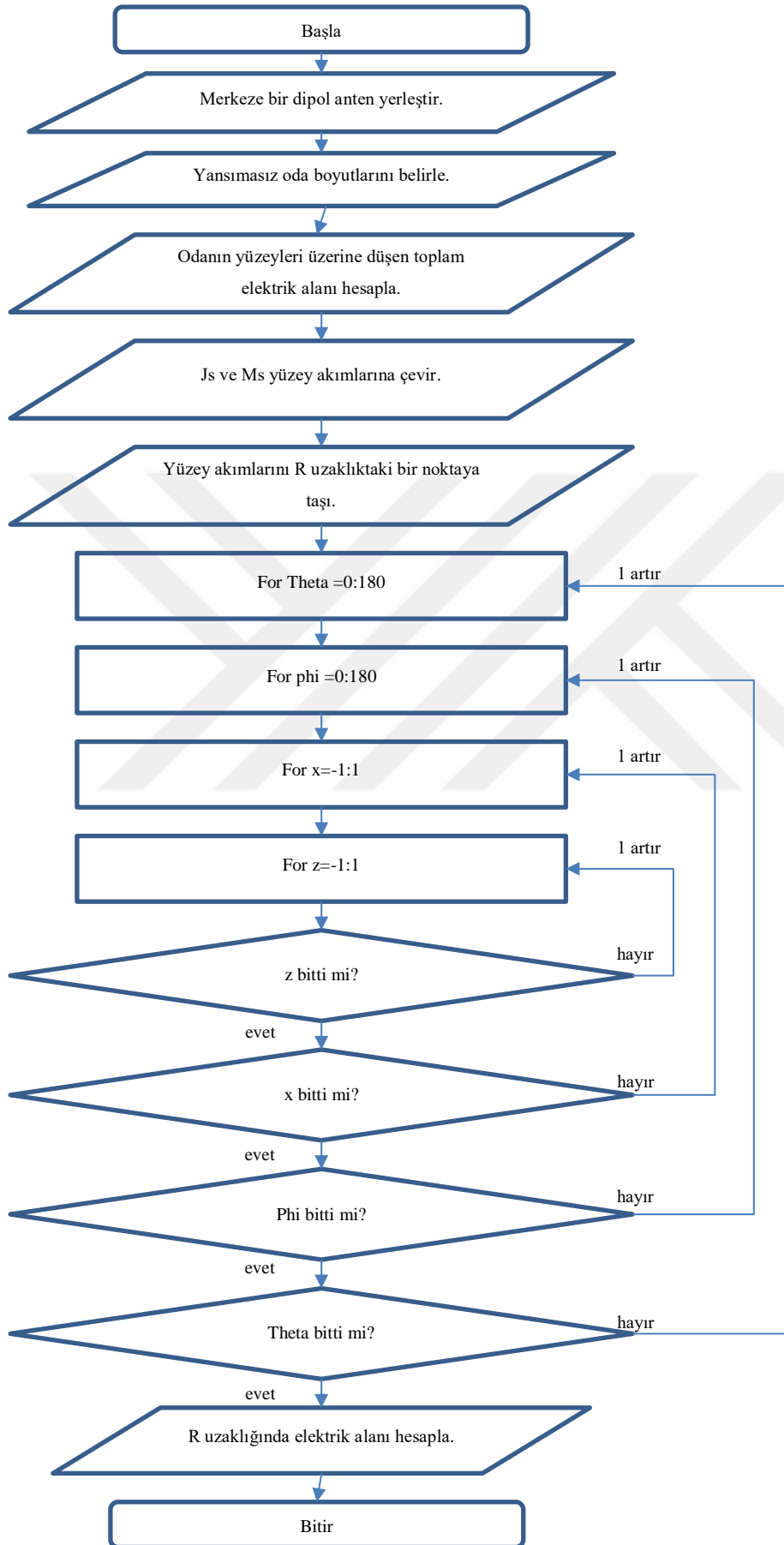
$$(E_A)_\varphi \cong -j\omega A_\varphi \quad (4.40)$$

$$(E_F)_\theta \cong -j\omega \eta F_\varphi \quad (4.41)$$

$$(E_F)_\varphi \cong +j\omega \eta F_\theta \quad (4.42)$$

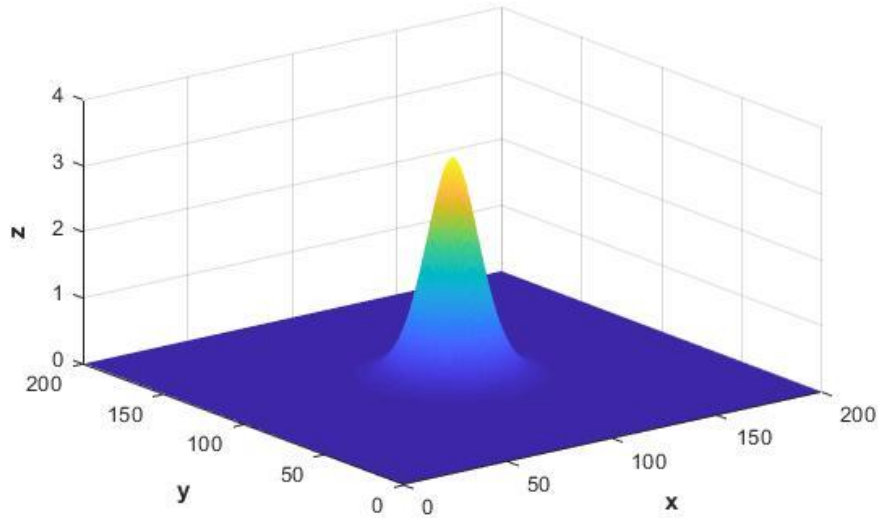
Burada $(E_A)_\varphi$, $(E_F)_\varphi$ ve $(E_F)_\theta$ bileşenlerinin katkısı çok küçüktür. Baskın birleşen $(E_A)_\theta$ 'dir. Kapalı bir hacimdeki her bir yüzey üzerindeki $(E_A)_\theta$ uzak alan bileşenleri hesaplanıp toplanarak uzak alandaki anten paterni elde edilmektedir.

4.6 Akış şeması



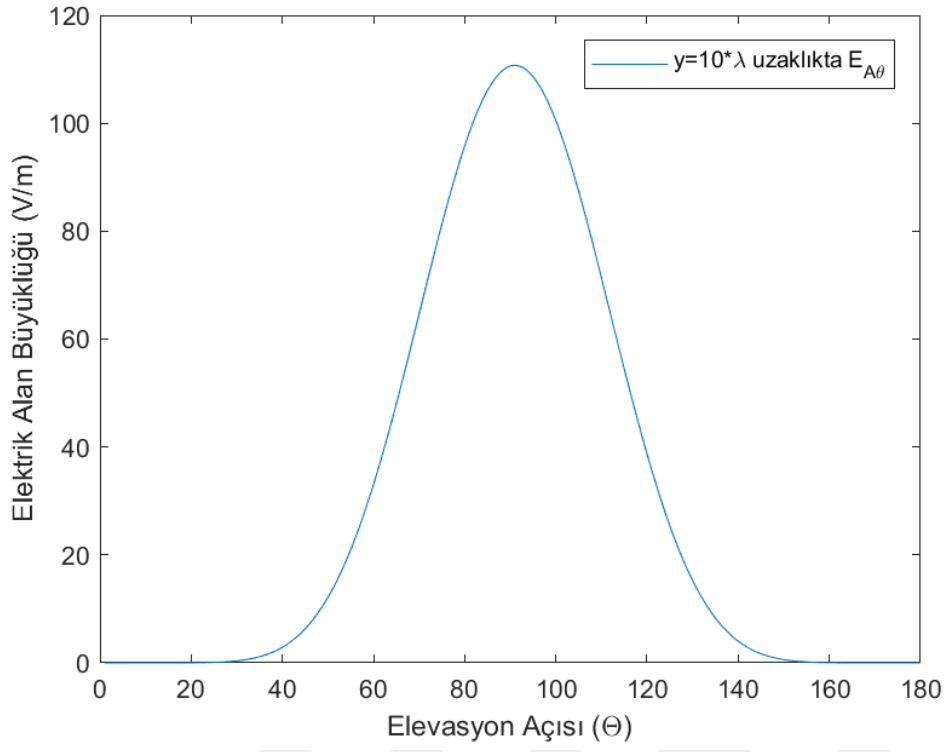
5 SONUÇLAR

Dipol anten ile çalışıldığı için sonuçlar simetrik çıkacaktır. İşlemi hızlandırmak ve paterni görebilmek için iki boyutta kesit alınmıştır. İlk olarak dipol antenin paterni hesaplanmıştır. Test altındaki anten yönlü bir anten olacağından dolayı dipol antenin elektrik alan ve manyetik alan ifadeleri sinüs ve cosinüs fonksiyonlarının 8. Kuvveti alınmıştır. Bu durumda kodun sonucunda, $Y=10*\lambda$ düzleminde $(E_A)_\theta$, sinüs eğrisi şeklinde bir tepe olacaktır. Antenin yönlü olduğu düşünüldüğünde, başka düzlemde yüksek genlikli bir elektrik alan bileşeni bulunmamalıdır. Şekil 5.1’de dipol antenin yakın alan ölçümü verilmiştir.

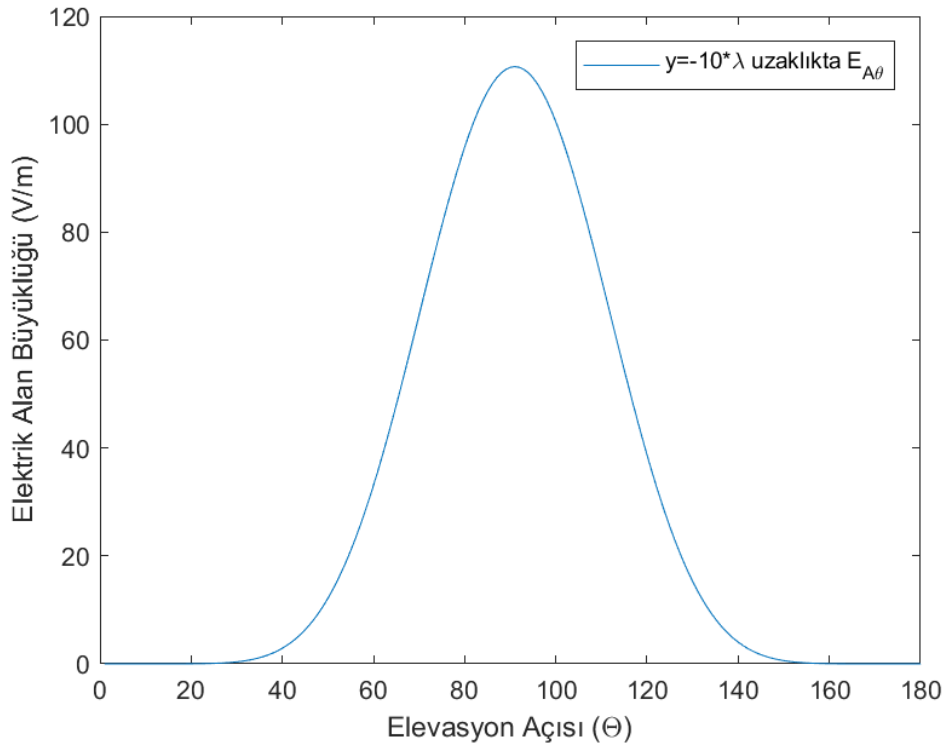


Şekil 5.1: $Y=10*\lambda$ düzlemi üzerinde elektrik alan.

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’te antenin uzak alandaki $(E_A)_\theta$ değeri çizdirilmiştir. Antenin $y=\pm 10*\lambda$ yüzeyine baktığı andaki manyetik akım yoğunluğundan kaynaklanan elektrik alanının genliği beklenildiği üzere maksimumdur.

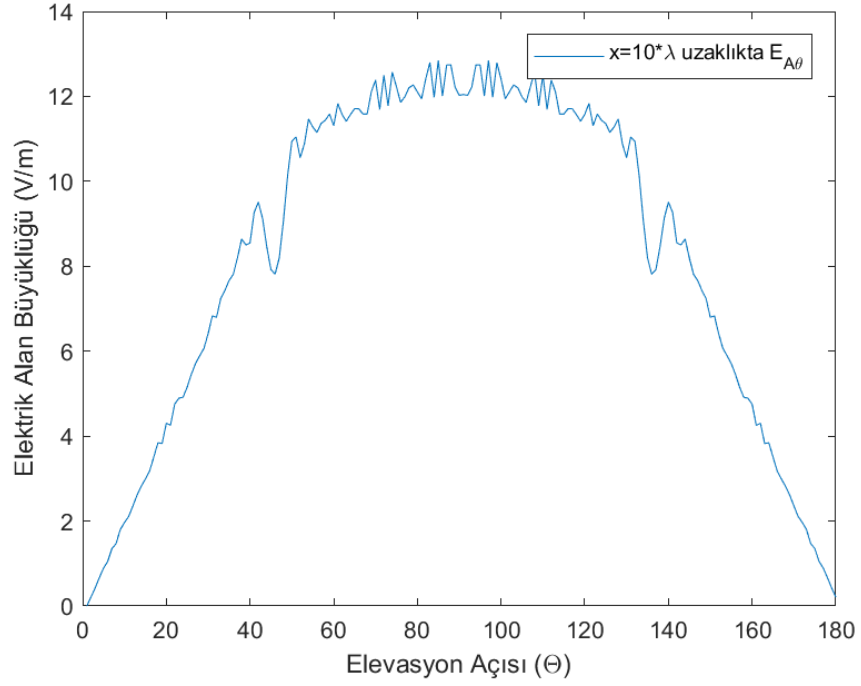


Şekil 5.2: $Y=10\lambda$ düzleminde P gözlem noktasına gelen $(E_A)_\theta$

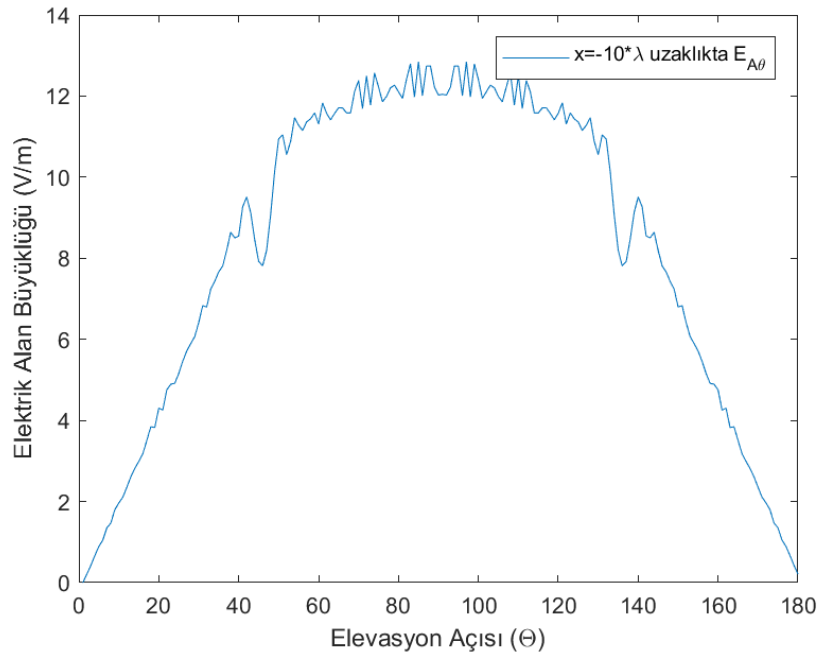


Şekil 5.3: $Y=-10\lambda$ düzleminde P gözlem noktasına gelen $(E_A)_\theta$.

Antenin yönlenciliği çok fazla olduğu için geri kalan yüzeylerdeki elektrik alan bileşenlerinin tümü düşük çıkmaktadır. Şekil 5.4-Şekil 5.5'te $X=\pm 10\lambda$ düzleminde ışılan elektrik ve manyetik akım yoğunluklarının P gözlem noktasında oluşturduğu elektrik alanın theta bileşeni verilmiştir.



Şekil 5.4: $X=-10\lambda$ düzleminde P gözlem noktasına gelen $(E_A)_\theta$



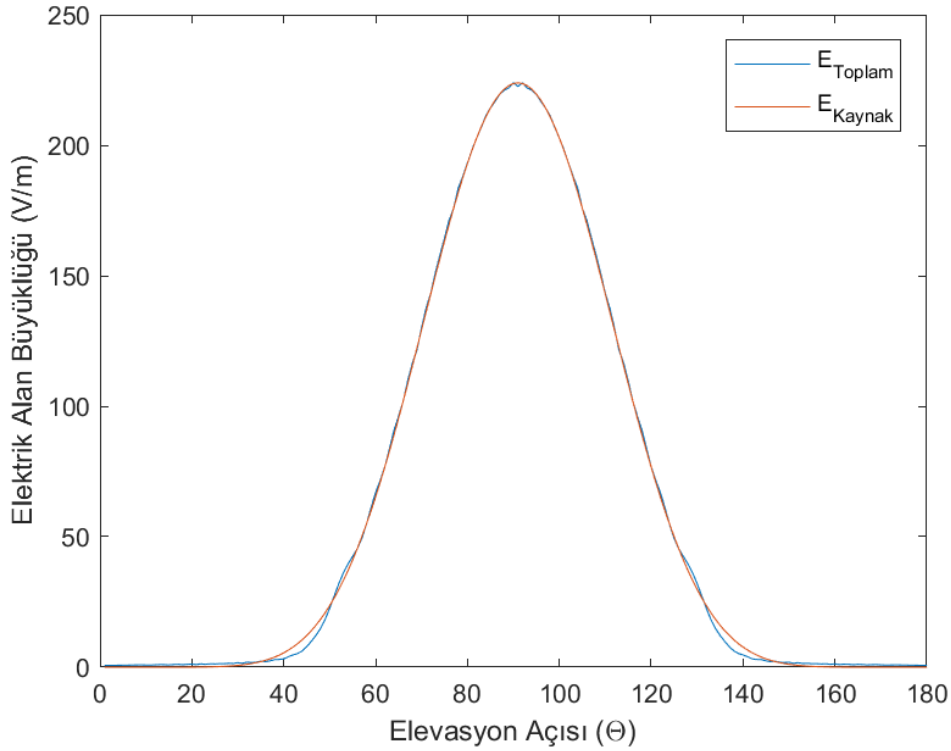
Şekil 5.5: $X=10\lambda$ düzleminde P gözlem noktasına gelen $(E_A)_\theta$.

$Y=\pm 10 \lambda$ düzlemlerinden ışılan elektrik ve manyetik akım yoğunluklarının P gözlem noktasında oluşturduğu elektrik alanın theta bileşenleri 10^{-15} mertebelerindedir. Bu değerler yaklaşıklıkta kaynaklı doğan nümerik hatalardır.

$X=\pm 10 \lambda$ ve $Y=\pm 10 \lambda$ düzlemlerinden P gözlem noktasına ışılan elektrik alanın phi bileşeni sıfırdır. Eşitlik 1.36'da görüldüğü gibi manyetik alanın sadece phi bileşeni vardır. H_ϕ kartezyen koordinatlara çevrildiğinde H_z bileşeni 0 bulunmaktadır. Eşitlik 4.31 ve 4.32'de yerine konulduğunda bu yüzeylerde elektrik alanın phi bileşeni 0 çıkmaktadır.

$Z=\pm 10 \lambda$ düzlemlerinden ışılan elektrik ve manyetik akım yoğunluklarının P gözlem noktasında oluşturduğu elektrik alanın theta ve phi bileşenleri beklenen üzere çok küçüktür.

Şekil 5.6'de tüm yüzeylerdeki elektrik ve manyetik akım kaynaklarının eşdeğer akım kaynağı olarak kabul edilip toplanmasıyla elde edilen ve uzak alana dönüşümü yapılan elektrik alanın theta bileşeni bulunmaktadır.



Şekil 5.6: Yönlü anten için Yakın alan - Uzak alan dönüşümü (E_{Toplam}) ve Dipol Anten kaynağından (E_{Kaynak}) hesaplanan elektrik alan büyüklükleri.

Ayrıca bir dipol antenin teorik olarak uzak alanda oluşturacağı elektrik alan değeri verilmiştir. İki değer arasındaki farktan bir hata değeri bulunmuştur. Hata değeri L2N

metriği kullanılarak hesaplanmıştır. Burada önce E_{Toplam} ve E_{Kaynak} Eşitlik 5.1 ve Eşitlik 5.2 kullanılarak normalize edilmiştir.

$$\mathbf{E}_{\text{Toplam}} = \mathbf{E}_{\text{Toplam}} \left[\sum_{n=1}^{181} \mathbf{E}_{\text{Toplam}}(\mathbf{n}) \right]^{-1} \quad (5.1)$$

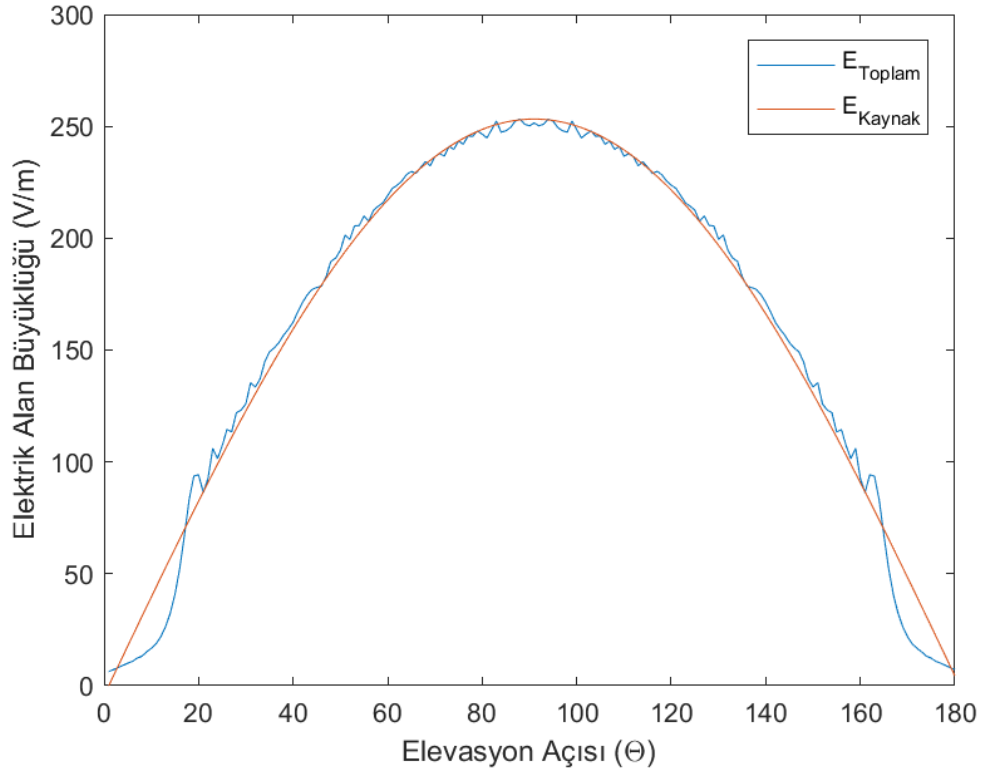
$$\mathbf{E}_{\text{Kaynak}} = \mathbf{E}_{\text{Kaynak}} \left[\sum_{n=1}^{181} \mathbf{E}_{\text{Kaynak}}(\mathbf{n}) \right]^{-1} \quad (5.2)$$

L2N metriği hesaplamak için Eşitlik 5.3 kullanılmıştır.

$$L2N = \sqrt{\sum_{n=1}^{181} [\mathbf{E}_{\text{Toplam}}(\mathbf{n}) - \mathbf{E}_{\text{Kaynak}}(\mathbf{n})]^2} \quad (5.3)$$

Hesaplamalar sonucunda L2N metriği 0.0018 olarak bulunur.

Bu tez kapsamında yazılan kaynak kod yönlendiriciliği yüksek olan antenler için yüksek hassasiyete sahip test sonuçları sağlamaktadır. Yönsüz (omnidirectional) antenler için silindirik / küresel tarama düzlemleri ya da daha büyük bir planer tarama düzlemi tercih edilebilir. Şekil 5.7’de yönsüz anten için yakın alan uzak alan dönüşümü yapılmıştır.



Şekil 5.7: Yönsüz anten için Yakın alan - Uzak alan dönüşümü (E_{Toplam}) ve Dipol Anten kaynağından (E_{Kaynak}) hesaplanan elektrik alan büyüklükleri.

- Burada Eşitlik 5.1-5.3 kullanılarak L2N metriği hesaplandığında, 0.0040 olarak bulunmaktadır. Bu bozulmalara köşe noktalar ve ölçüm düzeneğinin sınır koşulları neden olmaktadır.

Tez kapsamında yazılan kaynak kod antenin frekansına, test ortamının hacmine göre ayarlanabilmektedir. Bir yansısız oda kurulmak istendiğinde, tarama düzleminin hareketli olması, test anteni ile arasındaki mesafenin dalga boyuna göre ayarlanabilir olması tavsiye edilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **G. Evans**, (1990.): Antenna Measurement Techniques, Artech House, Norwood,MA,
- [2] **Rahmat-Samii, Y., & Michielssen, E.** (1999). Electromagnetic optimization by genetic algorithms. Microwave Journal, 42(11), 232-232.
- [3] **Pérez, J. R., & Basterrechea, J.** (2002). A theoretical comparison between three planar near to far-field transformation methods for antenna measurements. Proceedings of the XXVII General Assembly of the URSI.
- [4] **C. A. Balanis**, (2005): Antenna Theory: Analysis and Design, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- [5] **M. H. Francis**, (2012). IEEE recommended practice for near-field antenna measurements. IEEE Standard, 1720.
- [6] **Hansen, T. B., & Yaghjian, A. D.** (1994). Planar near-field scanning in the time domain. 1. Formulation. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 42(9), 1280-1291.
- [7] **Yaghjian, A.** (1986). An overview of near-field antenna measurements. IEEE Transactions on antennas and propagation, 34(1), 30-45.
- [8] **Joy, E., & Paris, D.** (1972). Spatial sampling and filtering in near-field measurements. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 20(3), 253-261.
- [9] **Topdemir Hüseyin Gazi**, Işığın Öyküsü, s.198 Tübitak Yayınları
- [10] **Vince Rodriguez**; (2016) Basic Rules for Anechoic Chamber Design, Part One: RF Absorber Approximations, Microwave Journal
- [11] **Nearfield Systems Inc.** Near-field vs Far-field
- [12] **N. K. Nikolova**, (2014) Lecture 8: Basic methods in antenna measurements”, Modern Antennas in Wireless Telecommunications Course ECE753, Department of Electrical & Computer Engineering, McMaster University Canada
- [13] **Pérez, J. R., & Basterrechea, J.** (2002). A theoretical comparison between three planar near to far-field transformation methods for antenna measurements. Proceedings of the XXVII General Assembly of the URSI.

- [14] **Yan, B., Saoudy, S. A., & Sinha, B. P.** (1997, July). A low cost planar near-field/far-field antenna measurement system. In Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. IEEE., 1997 Digest (Vol. 1, pp. 152-155). IEEE.
- [15] **Petre, P., & Sarkar, T. K.** (1992, June). A planar near-field to far-field transformation using an equivalent magnetic current approach. In Antennas and Propagation Society International Symposium, 1992. AP-S. 1992 Digest. Held in Conjunction with: URSI Radio Science Meeting and Nuclear EMP Meeting., IEEE (pp. 1534-1537). IEEE.
- [16] **Cheng, D. K.** (1989). Field and wave electromagnetics. Pearson Education India.
- [17] **Öztürk, Y., & Üstüner, F.** (2010). Düşük Maliyetli Bir Düzlemsel Yakın Alan Anten Ölçüm Sisteminin Tasarlanması ve Gerçeklenmesi. V. URSI Türkiye Bilimsel Kongresi, Güzelyurt, KKTC, 223-226.
- [18] **Hemming, L. H.** (2002). Electromagnetic anechoic chambers: a fundamental design and specification guide. Wiley Interscience.
- [19] **Gregson, S., McCormick, J., & Parini, C.** (2007). Principles of planar near-field antenna measurements (Vol. 53). IET.
- [20] **Li, M., Wang, W., Wu, Y., & Li, S.** (2017, October). Prediction of far-field from under-sampled near-field data based on cubic spline interpolation in spherical near-field antenna measurements. In Electromagnetic Compatibility (EMC-Beijing), 2017 IEEE 5th International Symposium on (pp. 1-4). IEEE.
- [21] **Kobayashi, H., Yamaguchi, Y., & Cui, Y.** (2012). Simple near-field to far-field transformation method using antenna array-factor. Journal of Wireless Networking and Communications, 2(4), 43-48.
- [22] **Stephanson, M.** (2007). A fast near-to far-field transform algorithm (Doctoral dissertation, The Ohio State University).

EKLER

EK A: Kaynak Kodu

```
%%%Derya Hatice YİĞİT
%%%İstanbul Teknik Üniversitesi
%%%05.05.2018
%%%EŞDEĞER AKIMLAR YÖNTEMİYLE YAKIN ELEKTROMANYETİK ALANI UZAK
ALANA DÖNÜŞTÜRME

close all;
clear,clc
freq=10d9;
c=3d8;
Ro=1000;
lambda=c/freq;
k=2*pi/lambda;
epsilon=(10^-9)/(36*pi);
mu=4*pi*10^-7;

Nx=200;
Nz=200;
Lx=2;
Lz=2;
dx=Lx/(Nx-1);
dz=Lz/(Nz-1);
y=0.3;

for ix=1:Nx
    x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
    for iz=1:Nz
        z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

        r=sqrt(x^2+y^2+z^2);
        costheta=z/r;
        sintheta=sqrt(1-costheta^2);
        sinphi=y/sqrt(x^2+y^2);
        cosphi=x/sqrt(x^2+y^2);

        etheta(ix,iz)=1i*exp(-1i*k*r)*sintheta^8*sinphi^8/r;
        Hphi(ix,iz)=120*pi*etheta(ix,iz);

        Ex(ix,iz)=costheta*cosphi*etheta(ix,iz);
        Ey(ix,iz)=costheta*sinphi*etheta(ix,iz);
        Ez(ix,iz)=-sintheta*etheta(ix,iz);

        Hx(ix,iz)=-sinphi*Hphi(ix,iz);
        Hy(ix,iz)=cosphi*Hphi(ix,iz);
        Hz(ix,iz)=0;
    end
end
```

```

Jz=-(y/abs(y))*Hx;
Jx=(y/abs(y))*Hz;
Mx=(y/abs(y))*Ez;
Mz=-(y/abs(y))*Ex;

[ max(max(abs(Jx))) max(max(abs(Jz))) max(max(abs(Mx)))
max(max(abs(Mz))) ]

% INTEGRAL %%%%%%%%%%

phi=pi/2;
for ntheta=1:181
    theta=(ntheta-1)*1*pi/180;
    Rx=Ro*sin(theta)*cos(phi);
    Ry=Ro*sin(theta)*sin(phi);
    Rz=Ro*cos(theta);

    Ax(ntheta)=0;
    Az(ntheta)=0;
    Fx(ntheta)=0;
    Fz(ntheta)=0;

    for ix=1:Nx
        x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
        for iz=1:Nz
            z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

            R=sqrt((Rx-x)^2+(Ry-y)^2+(Rz-z)^2);

            arg=exp(-1i*k*R)/R;
            Ax(ntheta)=Ax(ntheta)+Jx(ix,iz)*arg;
            Az(ntheta)=Az(ntheta)+Jz(ix,iz)*arg;

            Fx(ntheta)=Fx(ntheta)+Mx(ix,iz)*arg;
            Fz(ntheta)=Fz(ntheta)+Mz(ix,iz)*arg;
            Etheta(ntheta)=-1i*(Ax(ntheta)*cos(theta)*cos(phi)-
Az(ntheta)*sin(theta));
            Eaphi(ntheta)=-1i*mu*(Ax(ntheta)*sin(phi));
            EFtheta(ntheta)=-1i*epsilon*120*pi*(-
Fz(ntheta)*sin(phi));
            EFphi(ntheta)=1i*epsilon*120*pi*(-
Fz(ntheta)*sin(theta)+Fx(ntheta)*cos(theta)*cos(phi));

            Etheta(ntheta)=Etheta(ntheta)+Eaphi(ntheta)+EFtheta(ntheta)+EFphi
(ntheta);
            Asin(ntheta)=sin(theta);
        end
    end
end

%*****1.
YÜZEY

```

```

y=-0.3;

for ix=1:Nx
    x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
    for iz=1:Nz
        z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

        r=sqrt(x^2+y^2+z^2);
        costheta=z/r;
        sintheta=sqrt(1-costheta^2);
        sinphi=y/sqrt(x^2+y^2);
        cosphi=x/sqrt(x^2+y^2);

        ethetal(ix,iz)=1i*exp(-1i*k*r)*sintheta^8*sinphi^8/r;
        Hphi(ix,iz)=120*pi*ethetal(ix,iz);

        Ex(ix,iz)=costheta*cosphi*ethetal(ix,iz);
        Ey(ix,iz)=costheta*sinphi*ethetal(ix,iz);
        Ez(ix,iz)=-sintheta*ethetal(ix,iz);

        Hx(ix,iz)=-sinphi*Hphi(ix,iz);
        Hy(ix,iz)=cosphi*Hphi(ix,iz);
        Hz(ix,iz)=0;
    end
end

Jz1=-(y/abs(y))*Hx;
Jx1=(y/abs(y))*Hz;
Mx1=(y/abs(y))*Ez;
Mz1=-(y/abs(y))*Ex;

% INTEGRAL %%%%%%%%%%%

phi=pi/2;
for ntheta=1:181
    theta=(ntheta-1)*1*pi/180;
    Rx=Ro*sin(theta)*cos(phi);
    Ry=Ro*sin(theta)*sin(phi);
    Rz=Ro*cos(theta);

    Ax1(ntheta)=0;
    Az1(ntheta)=0;
    Fx1(ntheta)=0;
    Fz1(ntheta)=0;

    for ix=1:Nx
        x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
        for iz=1:Nz
            z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

            R=sqrt((Rx-x)^2+(Ry-y)^2+(Rz-z)^2);

            arg=exp(-1i*k*R)/R;
            Ax1(ntheta)=Ax1(ntheta)+Jx1(ix,iz)*arg;
            Az1(ntheta)=Az1(ntheta)+Jz1(ix,iz)*arg;
        end
    end
end

```

```

        Fx1(ntheta)=Fx1(ntheta)+Mx1(ix,iz)*arg;
        Fz1(ntheta)=Fz1(ntheta)+Mz1(ix,iz)*arg;

        EAtheta1(ntheta)=-1i*(Ax1(ntheta)*cos(theta)*cos(phi)-
Az1(ntheta)*sin(theta));
        EAphi1(ntheta)=-1i*mu*(Ax1(ntheta)*sin(phi));
        EFtheta1(ntheta)=-1i*epsilon*120*pi*(-
Fz1(ntheta)*sin(phi));
        EFphi1(ntheta)=1i*epsilon*120*pi*(-
Fz1(ntheta)*sin(theta)+Fx1(ntheta)*cos(theta)*cos(phi));

Etheta1(ntheta)=EAtheta1(ntheta)+EAphi1(ntheta)+EFtheta1(ntheta)+E
Fphi1(ntheta);
        Asin(ntheta)=sin(theta);
    end
end

end
%%***** 2.YÜZEY
Ny=200;
Nz=200;
Ly=2;
Lz=2;
dy=Ly/(Ny-1);
dz=Lz/(Nz-1);
x=0.3;

for iy=1:Ny
    y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;
    for iz=1:Nz
        z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

        r=sqrt(x^2+y^2+z^2);
        costheta=z/r;
        sintheta=sqrt(1-costheta^2);
        sinphi=y/sqrt(x^2+y^2);
        cosphi=x/sqrt(x^2+y^2);

        etheta2(iy,iz)=1i*exp(-1i*k*r)*sintheta^8*sinphi^8/r;
        Hphi2(iy,iz)=120*pi*etheta2(iy,iz);

        Ex(iy,iz)=costheta*cosphi*etheta2(iy,iz);
        Ey(iy,iz)=costheta*sinphi*etheta2(iy,iz);
        Ez(iy,iz)=-sintheta*etheta2(iy,iz);

        Hx(iy,iz)=-sinphi*Hphi2(iy,iz);
        Hy(iy,iz)=cosphi*Hphi2(iy,iz);
        Hz(iy,iz)=0;
    end
end

Jz2=(x/abs(x))*Hy;
Jy2=-(x/abs(x))*Hz;
My2=-(x/abs(x))*Ez;
Mz2=(x/abs(x))*Ey;

% INTEGRAL %%%%%%%%%%%

```

```

phi=pi/2;
for ntheta=1:181
    theta=(ntheta-1)*1*pi/180;
    Rx=Ro*sin(theta)*cos(phi);
    Ry=Ro*sin(theta)*sin(phi);
    Rz=Ro*cos(theta);

    Ay2(ntheta)=0;
    Az2(ntheta)=0;
    Fy2(ntheta)=0;
    Fz2(ntheta)=0;

    for iy=1:Ny
        y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;
        for iz=1:Nz
            z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

            R=sqrt((Rx-x)^2+(Ry-y)^2+(Rz-z)^2);

            arg=exp(-1i*k*R)/R;
            Ay2(ntheta)=Ay2(ntheta)+Jy2(iy,iz)*arg;
            Az2(ntheta)=Az2(ntheta)+Jz2(iy,iz)*arg;

            Fy2(ntheta)=Fy2(ntheta)+My2(iy,iz)*arg;
            Fz2(ntheta)=Fz2(ntheta)+Mz2(iy,iz)*arg;
            EAtheta2(ntheta)=-1i*(Ay2(ntheta)*cos(theta)*sin(phi)-
Az2(ntheta)*sin(theta));
            EAlpha2(ntheta)=-1i*mu*(Ay2(ntheta)*cos(phi));
            EPhi2(ntheta)=-
1i*epsilon*120*pi*(Fy2(ntheta)*cos(theta)*sin(phi)-
Fz2(ntheta)*sin(phi));
            EPhi2(ntheta)=1i*epsilon*120*pi*(-
Fy2(ntheta)*cos(phi));

            Etheta2(ntheta)=EAtheta2(ntheta)+EAlpha2(ntheta)+EPhi2(ntheta)+E
Phi2(ntheta);

            end
        end
    end

end

%***** 3.YÜZEY

Ny=200;
Nz=200;
Ly=2;
Lz=2;
dy=Ly/(Ny-1);
dz=Lz/(Nz-1);
x=-0.3;

for iy=1:Ny
    y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;

```

```

for iz=1:Nz
    z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

    r=sqrt(x^2+y^2+z^2);
    costheta=z/r;
    sintheta=sqrt(1-costheta^2);
    sinphi=y/sqrt(x^2+y^2);
    cosphi=x/sqrt(x^2+y^2);

    etheta3(iy,iz)=1i*exp(-1i*k*r)*sintheta^8*sinphi^8/r;
    Hphi3(iy,iz)=120*pi*etheta3(iy,iz);

    Ex(iy,iz)=costheta*cosphi*etheta3(iy,iz);
    Ey(iy,iz)=costheta*sinphi*etheta3(iy,iz);
    Ez(iy,iz)=-sintheta*etheta3(iy,iz);

    Hx(iy,iz)=-sinphi*Hphi3(iy,iz);
    Hy(iy,iz)=cosphi*Hphi3(iy,iz);
    Hz(iy,iz)=0;
end
end

Jz3=(x/abs(x))*Hy;
Jy3=-(x/abs(x))*Hz;
My3=-(x/abs(x))*Ez;
Mz3=(x/abs(x))*Ey;

% INTEGRAL %%%%%%%%%%%%%%

phi=pi/2;
for ntheta=1:181
    theta=(ntheta-1)*1*pi/180;
    Rx=Ro*sin(theta)*cos(phi);
    Ry=Ro*sin(theta)*sin(phi);
    Rz=Ro*cos(theta);

    Ay3(ntheta)=0;
    Az3(ntheta)=0;
    Fy3(ntheta)=0;
    Fz3(ntheta)=0;

    for iy=1:Ny
        y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;
        for iz=1:Nz
            z=-0.5*Lz+(iz-1)*dz;

            R=sqrt((Rx-x)^2+(Ry-y)^2+(Rz-z)^2);

            arg=exp(-1i*k*R)/R;
            Ay3(ntheta)=Ay3(ntheta)+Jy3(iy,iz)*arg;
            Az3(ntheta)=Az3(ntheta)+Jz3(iy,iz)*arg;

            Fy3(ntheta)=Fy3(ntheta)+My3(iy,iz)*arg;
            Fz3(ntheta)=Fz3(ntheta)+Mz3(iy,iz)*arg;
            EAteta3(ntheta)=-1i*(Ay3(ntheta)*cos(theta)*sin(phi)-
            Az3(ntheta)*sin(theta));

```



```

        EPhi3 (ntheta)=-li*mu* (Ay3 (ntheta) *cos (phi) ) ;
        EFtheta3 (ntheta)=-
1i*epsilon*120*pi* (Fy3 (ntheta) *cos (theta) *sin (phi) -
Fz3 (ntheta) *sin (phi) ) ;
        EPhi3 (ntheta)=1i*epsilon*120*pi* (-
Fy3 (ntheta) *cos (phi) ) ;

Etheta3 (ntheta)=EAtheta3 (ntheta)+EPhi3 (ntheta)+EFtheta3 (ntheta)+E
Phi3 (ntheta) ;

        end
    end

end

%*****4. YÜZEY
Nx=200;
Ny=200;
Lx=2;
Ly=2;
dx=Lx/ (Nx-1) ;
dy=Ly/ (Ny-1) ;
z=0.3;

for ix=1:Nx
    x=-0.5*Lx+ (ix-1) *dx;
    for iy=1:Ny
        y=-0.5*Ly+ (iy-1) *dy;

        r=sqrt (x^2+y^2+z^2) ;
        costheta=z/r;
        sintheta=sqrt (1-costheta^2) ;
        sinphi=y/sqrt (x^2+y^2) ;
        cosphi=x/sqrt (x^2+y^2) ;

        etheta4 (ix, iz)=1i*exp (-li*k*r) *sintheta^8*sinphi^8/r;
        Hphi4 (ix, iz)=120*pi*etheta4 (ix, iz) ;

        Ex (ix, iz)=costheta*cosphi*etheta4 (ix, iz) ;
        Ey (ix, iz)=costheta*sinphi*etheta4 (ix, iz) ;
        Ez (ix, iz)=-sintheta*etheta4 (ix, iz) ;

        Hx (ix, iz)=-sinphi*Hphi4 (ix, iz) ;
        Hy (ix, iz)=cosphi*Hphi4 (ix, iz) ;
        Hz (ix, iz)=0;
    end
end

Jy4= (z/abs (z) ) *Hx;
Jx4=- (z/abs (z) ) *Hy;
Mx4= (z/abs (z) ) *Ey;
My4=- (z/abs (z) ) *Ex;

% INTEGRAL %%%%%%%%%%%

phi=pi/2;
for ntheta=1:181
    theta= (ntheta-1) *1*pi/180;

```

```

Rx=Ro*sin(theta)*cos(phi);
Ry=Ro*sin(theta)*sin(phi);
Rz=Ro*cos(theta);

Ax4(ntheta)=0;
Ay4(ntheta)=0;
Fx4(ntheta)=0;
Fy4(ntheta)=0;

for ix=1:Nx
    x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
    for iy=1:Ny
        y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;

        R=sqrt((Rx-x)^2+(Ry-y)^2+(Rz-z)^2);

        arg=exp(-li*k*R)/R;
        Ax4(ntheta)=Ax4(ntheta)+Jx4(ix,iy)*arg;
        Ay4(ntheta)=Ay4(ntheta)+Jy4(ix,iy)*arg;
        Fx4(ntheta)=Fx4(ntheta)+Mx4(ix,iy)*arg;
        Fy4(ntheta)=Fy4(ntheta)+My4(ix,iy)*arg;

        Etheta4(ntheta)=-li*(Ax4(ntheta)*cos(theta)*cos(phi)-
Ay4(ntheta)*cos(theta)*sin(phi));
        Ephi4(ntheta)=-li*mu*(-
Ax4(ntheta)*sin(phi)+Ay4(ntheta)*cos(phi));
        EFtheta4(ntheta)=-
li*epsilon*120*pi*(Fx4(ntheta)*cos(theta)*cos(phi)+Fy4(ntheta)*cos
(theta)*sin(phi));
        EPhi4(ntheta)=li*epsilon*120*pi*(-
Fx4(ntheta)*sin(phi)+Fy4(ntheta)*cos(phi));

Etheta4(ntheta)=Etheta4(ntheta)+Ephi4(ntheta)+EFtheta4(ntheta)+E
Phi4(ntheta);

    end
end

end

%*****5. YÜZEY
Nx=200;
Ny=200;
Lx=2;
Ly=2;
dx=Lx/(Nx-1);
dy=Ly/(Ny-1);
z=-0.3;

for ix=1:Nx
    x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
    for iy=1:Ny
        y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;

        r=sqrt(x^2+y^2+z^2);
        costheta=z/r;
        sintheta=sqrt(1-costheta^2);
        sinphi=y/sqrt(x^2+y^2);

```

```

cosphi=x/sqrt(x^2+y^2);

etheta5(ix,iz)=1i*exp(-1i*k*r)*sintheta^8*sinphi^8/r;
Hphi5(ix,iz)=120*pi*etheta5(ix,iz);

Ex(ix,iz)=costheta*cosphi*etheta5(ix,iz);
Ey(ix,iz)=costheta*sinphi*etheta5(ix,iz);
Ez(ix,iz)=-sintheta*etheta5(ix,iz);

Hx(ix,iz)=-sinphi*Hphi5(ix,iz);
Hy(ix,iz)=cosphi*Hphi5(ix,iz);
Hz(ix,iz)=0;
end
end

Jy5=(z/abs(z))*Hx;
Jx5=-(z/abs(z))*Hy;
Mx5=(z/abs(z))*Ey;
My5=-(z/abs(z))*Ex;

% INTEGRAL %%%%%%%%%%%

phi=pi/2;
for ntheta=1:181
    theta=(ntheta-1)*1*pi/180;
    Rx=Ro*sin(theta)*cos(phi);
    Ry=Ro*sin(theta)*sin(phi);
    Rz=Ro*cos(theta);

    Ax5(ntheta)=0;
    Ay5(ntheta)=0;
    Fx5(ntheta)=0;
    Fy5(ntheta)=0;

    for ix=1:Nx
        x=-0.5*Lx+(ix-1)*dx;
        for iy=1:Ny
            y=-0.5*Ly+(iy-1)*dy;

            R=sqrt((Rx-x)^2+(Ry-y)^2+(Rz-z)^2);

            arg=exp(-1i*k*R)/R;
            Ax5(ntheta)=Ax5(ntheta)+Jx5(ix,iy)*arg;
            Ay5(ntheta)=Ay5(ntheta)+Jy5(ix,iy)*arg;
            Fx5(ntheta)=Fx5(ntheta)+Mx5(ix,iy)*arg;
            Fy5(ntheta)=Fy5(ntheta)+My5(ix,iy)*arg;

            EAtheta5(ntheta)=-1i*(Ax5(ntheta)*cos(theta)*cos(phi)-
            Ay5(ntheta)*cos(theta)*sin(phi));
            EPhi5(ntheta)=-1i*mu*(-
            Ax5(ntheta)*sin(phi)+Ay5(ntheta)*cos(phi));
            Etheta5(ntheta)=-
            1i*epsilon*120*pi*(Fx5(ntheta)*cos(theta)*cos(phi)+Fy5(ntheta)*cos
            (theta)*sin(phi));
            Ephi5(ntheta)=1i*epsilon*120*pi*(-
            Fx5(ntheta)*sin(phi)+Fy5(ntheta)*cos(phi));

```

```

Etheta5 (ntheta)=EAtheta5 (ntheta)+EAphi5 (ntheta)+EFtheta5 (ntheta)+E
Fphi5 (ntheta);
        Asin (ntheta)=sin (theta);

        end
    end

end

    ETHETA=Etheta+Etheta1+Etheta2+Etheta3+Etheta4+Etheta5;

%*****Son

ETHETA=abs (Etheta)+abs (Etheta1)+abs (Etheta3)+abs (Etheta2)+abs (Ethe
ta4)+abs (Etheta5);

Athetamax=max (abs (ETHETA));
Asin=Asin.^8;
Asin=(Athetamax.*Asin);
figure
polarplot (linspace (0,pi,181), (ETHETA))
figure
plot (abs (ETHETA))

hold on
plot (abs (Asin))

```

EK 2: L2N metrik hesaplama

```
ETHETA_n=ETHETA/sum(ETHETA);  
Asin_n=Asin/sum(Asin);  
fark_norm=norm(Asin_n-ETHETA_n)  
  
yuzde = sum((Asin-ETHETA)./Asin);
```





ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Derya Hatice YİĞİT
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.04.1993
E-posta : derya_yigit93@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** :2018, İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Uydu Haberleşmesi ve Uzaktan Algılama

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-2018 Arası Profen Grup şirketinde Ar-Ge mühendisi olarak çalıştı.