T.C
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU ELEKTROMANYETİK SAÇILIM PROBLEMLERİNİN MOMENT METODU VE RWG TABAN FONKSİYONLARI İLE ÇÖZÜLMESİ

Hüseyin ÖZMEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Şubat-2015

T.C
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU ELEKTROMANYETİK SAÇILIM PROBLEMLERİNİN MOMENT METODU VE RWG TABAN FONKSİYONLARI İLE ÇÖZÜLMESİ

Hüseyin ÖZMEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Şubat-2015

T.C. DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Hüseyin ÖZMEN tarafından yapılan "Üç Boyutlu Elektromanyetik Saçılım Problemlerinin Moment Metodu ve RWG Taban Fonksiyonu ile Çözülmesi" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. M. Bahattin KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Abdulnasır YILDIZ

Üye : Yrd. Doç. Dr. M. Emin ÖNCÜ

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 02/02/2015

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

02/03/2015

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

Enstitü Müdürü

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Dicle Üniversitesi DÜBAP 14-MF-95 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden ötürü DÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince her anlamda yardımını, bilimsel katkılarını ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Muhammed Bahattin Kurt'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR…… I

İÇİNDEKİLER……..... II

ÖZET……..……..... IV

ABSTRACT……..... V

ÇİZELGE LİSTESİ……..... VI

ŞEKİL LİSTESİ……..... VII

EK LİSTESİ..... VIII

KISALTMA VE SİMGELER…… IX

1. GİRİŞ……..... 1

2. KAYNAK ÖZETLERİ……. 5

3. MATERYAL ve METOT…….. 7

3.1. Elektromanyetik Saçılım Problemi…….....…….... 7

3.1.1. Maxwell Denklemleri.....…….. 8

3.2. Elektromanyetikte Nümerik Yöntemler.....……. 9

3.2.1. İntegral Denklemleri.....…….…….....…….... 10

3.2.1.1. Elektrik Alan İntegral Denklemleri.....…..... 10

3.2.1.2. Manyetik Alan İntegral Denklemleri…….…..... 11

3.2.1.3. Bileşik Alan İntegral Denklemleri.....…… 11

3.3. Moment Metodu…..……..... 12

3.4. RWG Taban Fonksiyonu ….……..... 14

3.5. Moment Metodu Denklemlerinin Elde Edilmesi.....……. 15

3.5. 1. RWG ile Moment Denklemlerinin Elde Edilmesi..... 15

3.5.1.1. Saçılım.....…… 15

3.5.1.2. Test Fonksiyonu…..……..... 16

3.5.1.3. Yüzey Akımları ve Yük Dağılımları.....…… 16

3.5.1.4. Moment Metodu Denklemleri.....……..... 17

3.5.1.5. RWG Taban Fonksiyonu'nun Uygulanması.....…..... 18

3.5.1.6. İntegral Hesaplamaları. ……..... 19
3.5.1.7. Self-İntegraller.....…..... 19
3.5.1.8. Empedans Matrisinin Oluşturulması.....……..... 20
3.6. Tez Kapsamında Kullanılan Bilgisayar Programları..... 21
4. BULGULAR VE TARTIŞMA…….. 27
4.1. Tez Kapsamında Kullanılan Saçıcılar ve Elektromanyetik Dalga Problemi…... 27
4.2. Saçıcı Küre, Kutu ve Silindir Uygulama Sonuçları.....……..... 30
5. SONUÇ VE ÖNERİLER…….……..... 39
6. KAYNAKLAR……..... 41
EKLER…….. 43
ÖZGEÇMİŞ……... 57

ÖZET

ÜÇ BOYUTLU ELEKTROMANYETİK SAÇILIM PROBLEMLERİNİN MOMENT METODU VE RWG TABAN FONKSİYONLARI İLE ÇÖZÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin ÖZMEN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2015

Bu çalışmada, üç boyutlu bazı saçıcıların elektromanyetik saçılım problemleri bir nümerik yöntem olan moment metodu(MoM) ile çözülmüştür. İntegral denklemleri ile formülize edilen üç boyutlu mükemmel iletken saçıcıların, elektromanyetik dalgalara maruz kalması sonucu oluşan yüzey akımlarının moment metodu ve Rao-Wilton-Glisson (RWG) taban fonksiyonları ile hesaplanması çalışılmıştır. Bu sayede analitik yöntemlerle çözümü olmayan integral denklemleri matris denklemlerine dönüştürülmüştür. Daha sonra bu matris denklemleri çözülerek saçıcı üzerindeki yüzey akımları elde edilmiştir.

Farklı geometrilere sahip saçıcıların farklı elektriksel büyüklükteki durumları için elektromanyetik saçılım problemlerinin çözümünde MoM etkin bir şekilde kullanılmıştır. Yüzey akımlarının elde edilmesi için saçıcı yüzeyleri üçgensel bölmelendirme yöntemi ile segmentlere ayrılmış, taban ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonu kullanılmıştır. Saçıcı yüzeylerinin bölmelendirilmesi ve saçıcıların yüzey akımlarının hesaplanması için matlab paket programı kullanılmıştır.

İntegral denklemlerin MoM ile çözülmesi sonucu elde edilen empedans matrisi her zaman yoğun olmaktadır. Bu yoğun matrislerin gerek doldurulması gerekse çözülmesi saçıcıların elektriksel boyutları büyüdükçe imkansız olacak şekilde zorlaşmakta; işlem süresi ve kullanılan bellek miktarı oldukça artmaktadır. Bu çalışmada, saçıcının elektriksel boyutları kullanılan bilgisayarın elverdiği noktaya kadar(6λ) kadar kademeli olarak arttırılarak problemin çözümü için gerekli işlem zamanı ve bellek miktarının tespiti sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Elektromanyetik saçılım, 3 boyutlu saçıcılar, moment metodu

ABSTRACT

SOLUTION OF THREE DIMENSIONAL ELECTROMAGNETIC SCATTERING PROBLEMS USING METHOD OF MOMENTS AND RWG BASIS FUNCTIONS

MsC THESIS

Hüseyin ÖZMEN

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2015

In this study, electromagnetic scattering problems of some three dimensional scatterers are solved using method of moments(MoM). Computing of surface currents that induced when an electromagnetic wave impinges upon a 3 dimensional perfectly conducting scatterer which formulated with integral equations are studied by using MoM and Rao-Wilton-Glisson (RWG) basis functions. Thus, integral equations that don't have analytical solution converted to matrix equations. Then, surface currents on the scatterers obtained by solving these matrix equations.

MoM was used efficiently to solve electromagnetic scattering problem of the scatterers that have different geometric shapes. In order to obtain the surface currents, surface of the scatterers segmented using triangular mesh refinement, RWG functions are used as basis and test functions. Matlab was used for discretization of surface of the scatterers and to calculate the surface currents of the scatterers.

Impedance matrices that obtained by solving integral equations using MoM are always dense matrices. Since processing time and memory usage becomes prohibitively large, both fill-in and solving of these impedance matrices becomes impossible while electrical size of the scatterers are increased. In this study, determination of processing time and memory usage are provided, as increasing size of the scatterers up to 6λ.

Key Words: Electromagnetic scattering, 3 Dimensional scatterers, method of moments

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 3.1.	iso2mesh kütüphanesinden kullanılan programlar…….	23
Çizelge 3.2.	Yüzey akım dağılımını, işlem süresini ve kullanılan bellek miktarını hesaplayan matlab programları……...	24
Çizelge 4.1.	Farklı büyüklüklerdeki küreler için MoM ile saçılım problemi çözümü.....	35

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 3.1.	Süper iletken saçıcılarda elektromanyetik saçılım olayı.....	8
Şekil 3.2.	Yüzey RWG taban fonksiyonu.....	14
Şekil 3.3.	Program akış diyagramı…….	22
Şekil 4.1.	Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş saçıcı küre.....	28
Şekil 4.2.	Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş saçıcı kutu.....	29
Şekil 4.3.	Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş saçıcı silindir.....	29
Şekil 4.4.	Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş küre. Bölmelendirme sayısı 1024, bilinmeyen RWG kenar elemanı sayısı 1536…….	30
Şekil 4.5.	Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş küp. Bölmelendirme sayısı 1024, bilinmeyen RWG kenar elemanı sayısı 1536.....	31
Şekil 4.6.	Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş silindir. Bölmelendirme sayısı 1024, bilinmeyen RWG kenar elemanı sayısı 1536……	31
Şekil 4.7.	Birim küre yüzeyindeki akım dağılımı N=1024, P=1536. Gri skala minimumdan maksimuma akım büyüklüklerini ifade etmektedir.....	32
Şekil 4.8.	Küp yüzeyindeki akım dağılımı. N=1024, P=1536. Gri skala minimumdan maksimuma akım büyüklüklerini ifade etmektedir.....	33
Şekil 4.9.	Silindir yüzeyindeki akım dağılımı. N=1024, P=1536. Gri skala minimumdan maksimuma akım büyüklüklerini ifade etmektedir.....	34
Şekil 4.10.	Küre yarıçapının artmasıyla beraber kullanılan bellek miktarının değişimi….	36
Şekil 4.11.	Küre yarıçapının artmasıyla beraber gerekli işlem süresinin değişimi……	36

EK LİSTESİ

Ek No		Sayfa
Ek-1.	Elektrik alan integral denklemlerinin RWG taban fonksiyonu kullanılarak MoM ile çözümünün sağlanması için kullanılan Matlab kodları	43
Ek-2.	Bölmelendirme programı iso2mesh kütüphanesinden kullanılan fonksiyonlar	53

KISALTMA VE SİMGELER

A_n^+ : n. yüzey RWG elemanının artı üçgen alanı

A_n^- : n. yüzey RWG elemanının eksi üçgen alanı

CFIE : Bileşik Alan İntegral Denklemi

EFIE : Elektrik Alan İntegral Denklemi

EM : Elektromanyetik

EMC : Elektromanyetik Uyumluluk

f_n^S : n. yüzey RWG elemanının taban fonksiyonu

IE : İntegral Denklemi

l_n : n. yüzey RWG elemanının kenar uzunluğu

m : Çift integraldeki dış indeks

MFIE : Manyetik Alan İntegral Denklemi

MoM : Moment Metodu

N : Saçıcı yüzeyinin bölmelendirme sayısı

n : Çift integraldeki iç indeks

P : RWG kenar elemanı sayısı

PDE : Kısmi Diferansiyel İntegral Denklemleri

$\vec{\rho}_n^{+S}$: t_n^+ tüçgeninin serbest köşesinden gözlem noktasına çizilen vektör

$\vec{\rho}_n^{-S}$: Gözlem noktasından t_n^- üçgeninin serbest köşesine çizilen vektör

$\vec{r}$: Gözlem noktasının pozisyon vektörü

$\vec{r}'$: İntegrasyon noktasının pozisyon vektörü

RWG : Rao-Wilton-Glisson

S : Yüzey

t_n^+ : n. yüzey RWG elemanının pozitif üçgeni

t_n^- : n. yüzey RWG elemanının negatif üçgeni

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojideki hızlı gelişmeler, elektromanyetik (EM) dalgaların yayılım ve saçılımlarıyla ilgili uygulama alanlarını hızla arttırmaktadır. Uzaktan algılama, haberleşme, radar, optik, kamera teknolojisi, tıbbi cihazlar vs. gibi alanlar EM dalgaları kullanmaktadır. EM dalgaların kullanım alanlarının artmasıyla beraber, bu dalgaların etki ettiği nesnelerle nasıl etkileşim içine girdiğini anlamak da önemli bir konu haline gelmiştir. Bu etkileşim yukarıda sayılan örnekler gibi olumlu olurken, elektromanyetik uyumluluk(EMC) gibi konularda olumsuz etkileri de vardır. Bu sebeple EM dalgaların yayılım ve saçılım olayının iyi anlaşılması gerekmektedir. EM dalga problemlerinin çoğu kısmi diferansiyel denklemlerle ya da integral denklemleri ile ifade edilmektedir. İntegral denklemler analitik olarak çözülebildiği gibi, nümerik yöntemlerle de çözülebilmektedir. İntegral denklemlerinin analitik olarak çözümü zor olduğundan dolayı genellikle nümerik çözüm yöntemlerine başvurulmaktadır. Bunlar; sonlu elemanlar metodu(FEM), sonlu farklar metodu(FDTD) ve moment metodu(MOM) gibi yöntemlerdir. Problemin tabiatına göre bu ve benzeri yöntemlerden uygun olanı seçilmektedir. FEM ve FDTD diferansiyel denklemlere uygulanırken, MoM integral denklemlere uygulanmaktadır.

EM yayılım ve saçılım problemlerinim MoM ile çözümünde integral denklemleri kullanılmaktadır. Yani problem integral denklemleri ile formülize edilir. Saçıcı geometrisi çeşitli yöntemlerle bölmelendirilir, taban ve test fonksiyonları ile genişletilen integral denklemleri, matris denklemler haline dönüştürülür. Bu sayede saçıcı üzerindeki akım veya yük dağılımı kolaylıkla elde edilir. Fakat getirdiği işlem kolaylığının yanında MoM'un dezavantajı da bulunmaktadır. Elektriksel boyutu küçük olan saçıcılarda verimli sonuçlar veren bu yöntem, saçıcı boyutlarının artması durumunda büyük işlem zamanı ve bellek kullanımı gerektirmektedir. Saçıcı boyutlarının artması, doğru sonuç elde etmek için bölmelendirme sayısını da arttıracaktır. Artan bölmelendirme yani bilinmeyen sayısı, çok daha büyük ve daha yoğun matris denklemlerinin oluşmasına sebep olacaktır. Dolayısıyla hem matrisi doldurmak, hem de matris denklemini çözmek oldukça zaman alacaktır. Sonuç matrisini saklamak da büyük bellek miktarları gerektirecektir. Yoğun bir matris denkleminin doğrudan çözümü $O(N^3)$ işlem ve $O(N^2)$ bellek alanı, iteratif çözümü ise her iterasyon

için $O(N^2)$ işlem ve $O(N^2)$ bellek alanı gerektirmektedir(Arfken ve Weber 1995)(Chew ve ark. 1997). Burada N, bölmelendirilmiş integral denklemlerindeki bilinmeyen sayısıdır. Bu nedenle, saçıcı boyutları büyüdükçe ve dolayısıyla bölmelendirme sayısı arttıkça matris denklemlerinin çözümü oldukça zaman alacak, matris denkleminin saklanması için aşırı bellek alanlarına ihtiyaç duyulacaktır. Bu nedenle, büyük saçıcıların saçılım problemlerinin çözümünde moment metodunun kullanılması zorlaşmaktadır. Bu sorunun önüne geçmek için saçıcı geometrisine uygun taban fonksiyonları kullanarak veya elde edilen yoğun matris denklemlerine dalgacık dönüşümü gibi teknikler uygulayarak yoğun empedans matrisleri çözümü kolay olan seyrek matrislere dönüştürülmektedir.

Bu tez çalışmasının hedefi, farklı geometriye sahip üç boyutlu saçıcılarda EM saçılım probleminin Rao-Wilton-Glisson (RWG) taban fonksiyonları kullanılarak MoM çözümü için bilgisayar programlarının oluşturulması ve bu programlarla, saçıcıların büyüklüğü arttırıldığında problemin çözüm sürelerinin ve gerekli bellek miktarının araştırılmasıdır.

Tez kapsamında uygulama olarak farklı boyutlara sahip küre, kutu ve silindirik saçıcıların EM saçılım problemleri incelenmiştir. İşlem kolaylığı getirmesi açısından saçıcı malzemeleri mükemmel iletken olarak seçilmiştir. Saçıcı geometrileri delaunay üçgenlemesi yöntemi ile üçgensel olarak bölmelendirilmiştir. Bunun için açık kaynak kodlu “iso2mesh” program paketi kullanılmıştır (Fang 2012). Saçılım problemleri, hem açık hem de kapalı geometrilere uygulanabilir olması nedeniyle (Poulsen 1999) EFIE ile formülize edilmiştir. Üç boyutlu saçıcılarda en çok kullanılan yöntemlerden biri olduğundan dolayı taban ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonu kullanılmıştır. Saçıcıların elektriksel boyutlarının büyüdükçe moment metodunun nasıl sonuç verdiğini görmek için saçıcı boyutları kademeli olarak büyütülmüş ve her durum için harcanan işlem zamanları ve bellek miktarları tespit edilmiştir.

Bu tezin ikinci bölümünde, moment metodu ile ilgili geçmişten günümüze yapılmış çalışmalar ve bununla ilgili literatür taramalarından bahsedilmiştir.

Bu tezin üçüncü bölümünde, EM saçılım problemi ve saçılım probleminin, bir sayısal çözüm tekniği olan moment metodu ile çözümünden, RWG taban fonksiyonlarından bahsedilmiştir.

Bu tezin dördüncü bölümünde, üç boyutlu saçıcılar olan küre, kutu ve silindirin EM saçılım problemlerinin MoM ve RWG taban fonksiyonları ile çözümü sonucu yüzey akımlarının elde edilmesi, problemlerin çözüm süreleri ve gerek duyulan bellek miktarlarının tespit edilmesi detaylı şekilde anlatılmış, matlab uygulama sonuçları gösterilmiştir.

Bu tezin son bölümünde ise, elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve ileride yapılabilecek uygulamalar için öneriler tartışılmıştır.

1. GİRİŞ

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Harrington, 1968 yılında integral denklemlerinin lineer denklem sistemine dönüştürülerek çözülmesini sağlayan "Moment Metodu"nu geliştirmiştir. Bu sayede analitik olarak çözümü zor veya imkansız olan elektromanyetik problemlerinin çözümü nümerik olarak sağlanmış ve kolaylaşmıştır. Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile beraber bu metot, elektromanyetik problemlerinin çözümünde en çok kullanılan nümerik yöntemlerden biri haline gelmiştir (Harrington 1968).

1973 yılında Poggio ve Miller, üç boyutlu saçılım problemlerinin integral denklem çözümleri üzerine yaptıkları çalışmalarda elektromanyetik saçılım problemleri çözülecek olan saçıcıların süper iletken olarak seçilmesi halinde problemin, bilinmeyen hacim fonksiyonları yerine bilinmeyen akım fonksiyonlarıyla ifade edilebildiğini göstermişlerdir. Bu sayede problem üç boyuttan iki boyuta indirgenmekte ve çözüm kolaylığı sağlanmaktadır. (Poggio ve Miller. 1973).

Rao, Wilton ve Glisson 1982 yılında yaptıkları "Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape" adlı çalışmalarında herhangi bir saçıcıdan kaynaklanan elektromanyetik saçılım olayının moment metodu ile çözümü için üçgensel bir taban fonksiyonu geliştirmiştirler ve bu fonksiyon RWG taban fonksiyonu olarak adlandırılmıştır. Saçıcı yüzeyleri üçgensel olarak bölmelendirildikten sonra RWG taban fonksiyonu kullanılarak yüzey akım veya yükleri başarılı bir şekilde hesaplanabilmektedir (Rao ve ark. 1982).

1998 yılında Peterson, Scott ve Mittra, yaptıkları çalışmalar ile üç boyutlu saçıcıların integral denklemlerle genel formülasyonlarını gerçekleştirmiştirler (Peterson ve ark. 1998).

Poulsen 1999 yılında, elektromanyetik saçılım problemlerinin hem kapalı hem de açık geometrilerde "elektrik alan integral denklemleri" ile formülize edilerek çözülebileceğini göstermiştir (Poulsen 1999).

Makarov 2001 yılında yaptığı çalışmada Matlab paket programını kullanarak moment metodu ile çeşitli anten simülasyonları gerçekleştirmiştir. Taban fonksiyonu olarak da RWG taban fonksiyonunu kullanmıştır (Makarov 2001).

2012 yılında Fang, “iso2mesh” adlı 3 boyutlu yüzeysel ve hacimsel bölmelendirme programını geliştirmiştir. Bu program ile üç boyutlu nesnelerin yüzeylerinin üçgensel olarak segmentasyonu sağlanabilmektedir (Fang 2012).

Bu çalışmada ise farklı elektriksel büyüklüklere sahip küre, kutu ve silindirik saçıcıların formülasyonu ve diskritizasyonu gerçekleştirilmiş, saçıcı boyutları mevcut bilgisayarın çözebileceği son büyüklüğe kadar kademeli olarak arttırılmış ve problemin çözümü için gerekli işlem zamanı ve bellek miktarının tespiti sağlanmıştır. Taban ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonu kullanılmış, moment metodu ile elektrik alan integral denklemi çözülerek empedans matrisi elde edilmiş ve son olarak empedans matrisi kullanılarak yüzey akım dağılımları bulunmuştur. Saçıcı boyutlarının büyümesi ile beraber saçılım probleminin çözümü için moment metodunun oldukça fazla işlem süresi ve bellek kullanımı gerektirdiği görülmüştür.

3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde üç boyutlu saçıcıların elektromanyetik saçılım problemlerinin çözümünün moment metodu ve RWG taban fonksiyonları kullanılarak yapılması anlatılmıştır. Elektromanyetik saçılım olayı, moment metodu ve RWG taban fonksiyonları hakkında teorik bilgiler detaylı şekilde sunulmuştur.

3.1. Elektromanyetik Saçılım Problemi

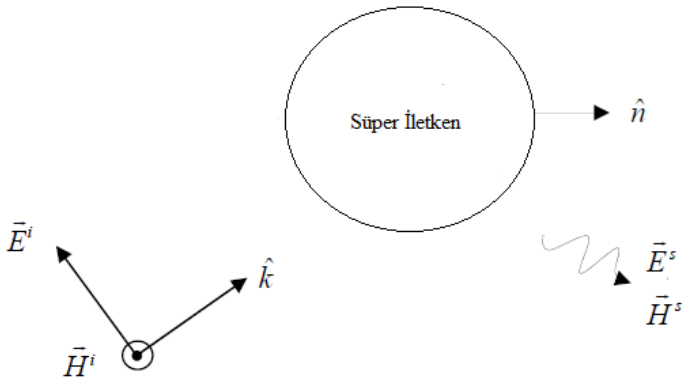
Elektromanyetik dalgalar bir nesneye uygulandığında, bu nesne üzerinde bir akım oluşur ve bu akım da bir elektromanyetik dalga saçılımına sebep olur. Gelen dalganın elektrik alanı ile saçılan dalganın elektrik alanı arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir;

$$E^i = \frac{J_{eş}}{j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma} - E^s \quad \text{(V hacmi üzerinde)} \tag{3.1}$$

Eğer dalganın uygulandığı nesne, süper iletken malzemeden oluşursa, yani iletken madde $\varepsilon = \varepsilon_0$ ve $\sigma = \infty$ özelliklerini gösterirse (3.1)'deki denklem aşağıdaki şekle dönüşür:

$$E^i = -E^s \quad \text{(V hacmi üzerinde)} \tag{3.2}$$

Bu tez çalışmasında, elektromanyetik saçılım problemleri çözülecek olan saçıcılar süper iletken olarak seçilmiştir. Bu sayede problem, bilinmeyen hacim fonksiyonları yerine bilinmeyen akım fonksiyonlarıyla ifade edilerek 3 boyuttan 2 boyuta indirgenmiş olacaktır (Poggio ve Miller. 1973). Şekil 3.1'de, süper iletken saçıcıların elektromanyetik saçılım olayı gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Süper iletken saçıcılarda elektromanyetik saçılım olayı

Şekil 3.1'de; E^i gelen elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni, H^i ise gelen elektromanyetik dalganın manyetik alan bileşenidir. $\hat{k}$ gelen dalganın propagasyon yönü, $\hat{n}$ ise süper iletken nesne yüzey sınır vektörüdür. E^s süper iletken nesne yüzeyinde oluşan akımın oluşturduğu saçılan elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni, H^s ise manyetik alan bileşenidir. Saçılan elektrik alan ve manyetik alanın hesaplanmasında maxwell denklemleri ve sınır koşulları temel araçlardır.

3.1.1. Maxwell Denklemleri

Maxwell denklemleri, tüm elektromanyetik problemlerin çözümü için temel teşkil eden ve Maxwell tarafından, Gauss Yasası, Ampere Yasası ve Faraday Yasası'nın düzenlenmesiyle oluşturulan denklemler takımıdır.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{3.3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3.4}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{3.5}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_i + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{3.6}$$

(3.3) denklemi elektrik alan için Gauss Yasası'nı ifade etmektedir ve kapalı bir yüzey üzerindeki elektrik alan akısının, kapalı yüzey içerisindeki toplam yük yoğunluğuna eşit olduğunu gösterir. (3.4) denklemi manyetik alan için Gauss Yasası'dır ve manyetik alan akısının durağan serbest yüklere bağlı olmadığını gösterir. (3.5) denklemi Faraday Yasası'nı ifade eder ve zamanla değişen manyetik akının, elektrik alan oluşturduğunu gösterir. (3.6) denklemi Ampere Yasası'nı ifade etmektedir.

Şekil 3.1'deki saçıcı için sınır koşulları aşağıdaki gibidir:

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \tag{3.7}$$

$$\hat{n} \times \vec{H} = \vec{J_s} \tag{3.8}$$

$$\hat{n} \cdot \vec{E} = \frac{\rho_s}{\varepsilon} \tag{3.9}$$

$$\hat{n} \cdot \vec{H} = 0 \tag{3.10}$$

Maxwell denklemleri ve sınır koşulları kullanılarak elektromanyetik saçılım problemleri çözülebilirler. Fakat analitik çözüm bir hayli zor olduğundan dolayı bu denklemlerin çözümünde sıklıkla sayısal çözüm yöntemleri kullanılmaktadır.

3.2.Elektromanyetikte Nümerik Yöntemler

Elektromanyetik saçılım problemlerinin nümerik yöntemlerle çözümünde kullanılan teknikler genel olarak ikiye ayrılır. Bunlar kısmi diferansiyel denklemler(PDE) ve integral denklemleridir(IE). PDE yönteminde saçılan elektromanyetik alanlar kısmi diferansiyel denklemleri cinsinden ifade edilirken, IE'de integral denklemleri cinsinden ifade edilir ve çözülürler. PDE tekniği olarak en sık kullanılan yöntemler FDTD ve FEM'dir. IE tekniğinde ise MoM gibi yöntemler kullanılmaktadır. Bu tezde elektromanyetik saçılım problemlerinin çözümü için bir IE tekniği olan MoM kullanılmıştır.

3.2.1. İntegral Denklemleri

Elektromanyetik saçılım problemlerinde integral denklemi yönteminin amacı, saçıcı yüzeyi üzerindeki bilinmeyen akım yoğunluğu dağılımının bulunmasıdır. Akım yoğunluğu fonksiyonu integral denklemi formundadır ve bu denklem moment metodu gibi sayısal hesaplama yöntemleri kullanılarak çözülebilmektedir. İntegral denklemleri; elektrik alan integral denklemi(EFIE), manyetik alan integral denklemi(MFIE) ve bileşik alan integral denklemi(CFIE) olarak üçe ayrılılar. Bu tezde integral denklemi olarak EFIE kullanılmıştır.

3.2.1.1.Elektrik Alan İntegral Denklemleri

EFIE, sınır koşullarının bir yüzey üzerindeki elektrik alanın teğet bileşenine uygulanmasıyla elde edilebilir. EFIE'nin avantajı hem kapalı hem de açık yüzeylere uygulanabilir olmasıdır. Gözlem noktasının yüzey üzerinde alındığı mükemmel iletken bir yüzey için:

$$\hat{t}\cdot\vec{E}^{i}(r)+\hat{t}\cdot\vec{E}^{s}(r)=0 \tag{3.11}$$

denklemi yazılabilir. Denklemde, $\vec{E}^{i}$ dış kaynaktan gelen elektrik alanı, $\vec{E}^{s}$ saçılan alanı belirtir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\vec{E}^{s}(r)=j\omega\mu\int_{s'}dr'\overline{G}(r,r')\cdot J(r') \tag{3.12}$$

ve

$$\overline{G}(r,r')=\left[\overline{I}+\frac{\nabla\nabla}{k^{2}}\right]g(r,r') \tag{3.13}$$

diyadic Green fonksiyonudur ve üç boyutlu hali aşağıdaki gibidir:

$$g(r,r')=\frac{e^{ik|r-r'|}}{4\pi|r-r'|} \tag{3.14}$$

Sonuç olarak (3.12) denkleminde akım ifadesinin denklemi ve üç boyutlu green fonksiyonu denklemi yerlerine yazılırsa üç boyutlu saçıcılar için saçılım problemi formülize edilmiş olur.

3.2.1.2.Manyetik Alan İntegral Denklemleri

MFIE, sınır koşullarının kapalı bir yüzey üzerindeki manyetik alanın teğet bileşenine uygulanmasıyla elde edilebilir. Gözlem noktasının dışarıdan yüzeye doğru yaklaştığı iletken bir yüzey için:

$$\hat{n}\times H^{i}\left(r\right)+\hat{n}\times H^{s}\left(r\right)=J\left(r\right) \tag{3.15}$$

denklemi yazılabilir. Denklemde, H^{i} dış kaynaktan gelen manyetik alanı, H^{s} yüzeyde endüklenen akımın oluşturduğu manyetik alanı belirtir ve aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$H^{s}\left(r\right)=\int_{s'}dr'J\left(r'\right)\times\nabla' g\left(r,r'\right) \tag{3.16}$$

(3.14) denklemindeki green fonksiyonu ifadesi (3.16) denkleminde yerine yazılarak gözlem noktasının dışarıdan yüzeye yaklaştığı durumlar için kapalı iletken yüzeylerde MFIE ifadesinin genel formuna ulaşılabilir.

3.2.1.3.Bileşik Alan İntegral Denklemleri

EFIE ve MFIE kapalı nesnelerin saçılım problemleri için kullanıldığında rezonans frekansı durumunda internal rezonans problemi açığa çıkmaktadır. Her iki integral denklemi de nesne üzerinde olan gerçek akıma ilaveten ek akıma da neden olmaktadır. EFIE kullanıldığı zaman bu ilave akım yayılıma katılmaz ve toplam akım yanlış hesaplansa bile uzak alan ışıma doğru hesaplanabilir. Fakat MFIE için aynı durum söz konusu değildir. Ek akım uzak alan ışımasında etkiye sebep olur ve bu da yanlış sonuçlar doğurur(Mautz ve Harrington 1978).

İnternal rezonans probleminin önüne geçmek için CFIE kullanılabilir. CFIE, basit olarak EFIE ve MFIE'nin lineer kombinasyonundan oluşmaktadır. CFIE ifadesi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$CFIE = \alpha EFIE + (1-\alpha) MFIE \tag{3.17}$$

α katsayısı 0 ve 1 arasında bir değerdir. CFIE, (3.12) ve (3.16) denklemlerinin birleştirilmesiyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\alpha\left[\hat{t}\cdot\int_{s'} dr'\overline{G}(r,r')\cdot J(r')\right]$$

$$+\frac{i}{k}(1-\alpha)\left[J(r)-\hat{n}\times\int_{s'} d\,'\nabla(r')\times\nabla' g(r,r')\right] \tag{3.18}$$

$$=\frac{i}{k}\left[\frac{\alpha}{\eta}\hat{t}\cdot\vec{E}^{i}(r)+(1-\alpha)\hat{n}\times H^{i}(r)\right]$$

CFIE internal rezonans probleminden bağımsızdır ve her frekans için eşsiz sonucu vardır. Fakat CFIE bu avantajına rağmen, EFIE gibi açık yüzeylerde saçılım problemlerinde kullanılamamaktadır. Bu durum EFIE'yi açık yüzeyler için tek seçenek yapmaktadır.

3. 3. Moment Metodu

Moment metodu, 1968 yılında Harrington tarafından geliştirilen ve integral denklemleri lineer denklem sistemine dönüştürerek çözümü kolaylaştıran bir nümerik yöntemdir(Harrington 1968). Elektromanyetik yayılım ve saçılım problemlerinde etkin olarak kullanılmaktadır. Elde edilen integral denklemlerinin analitik çözümü pratikte bir hayli zordur. Moment metodu yardımıyla bu denklemler lineer denklem sistemine dönüştürülerek, bilgisayar vasıtasıyla nümerik olarak kolaylıkla çözülürler. Moment metodunun diğer nümerik yöntemlere nazaran dezavantajları da bulunmaktadır. En belirgin dezavantajı, problemin matris denklemine dönüştürülerek çözülmesinden dolayı, ele alınan nesnenin elektriksel büyüklüğünün artmasıyla beraber matris denkleminin boyutlarının da büyümesi ve bununla beraber problemin çözümü için harcanan zamanın ve gereksinim duyulan bellek miktarının artmasıdır.

Önceki bölümlerde anlatılan integral denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilirler:

$$L\{f(x)\} = g(x) \tag{3.19}$$

Denklem (3.19)'da, L denklemin lineer operatörü, f(x) akım dağılımının bilinmeyen fonksiyonu ve g(x) uyartım fonksiyonudur. Problemin çözümü için bilinmeyen fonksiyon taban fonksiyonun serisi olarak aşağıdaki şekilde genişletilebilir:

$$f(x) \approx \sum_{n=1}^{N} a_n b_n(x) \tag{3.20}$$

a_n ifadesi n. taban fonksiyonunun katsayılarıdır. Taban fonksiyonları bilinmeyen akım fonksiyonlarını genişletirler. N bilinmeyeni çözmek için N tane denklem gerekir. Bu da N adet test noktası için aynı denklemin yazılmasıyla elde edilir. Bunun sonucunda aşağıdaki denklem takımı elde edilir:

$$\sum_{n=1}^{N} a_n \int dxt_m(x).L\{b_n(x)\} = \int dxt_m(x).g(x) \tag{3.21}$$

(3.21), aşağıdaki gibi bir lineer sistem formunda yazılabilir:

$$\sum_{n=1}^{N} [Z_{mn}][a_n] = [v_m] \tag{3.22}$$

Burada Z_{mn}, mxn'lik empedans matrisi, v_m mx1'lik sütun vektörü ve a_n ise nx1'lik bilinmeyen katsayı vektörüdür. a_n'nin hesaplanabilmesi için Z_{mn} ve v_m'nin hesaplanması gerekmektedir. Z_{mn} aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Z_{mn} = \int dxt_m(x).L\{b_n(x)\} \tag{3.23}$$

v_m ise mx1'lik sütun vektörüdür ve aşağıdaki şekilde ifade edilir:

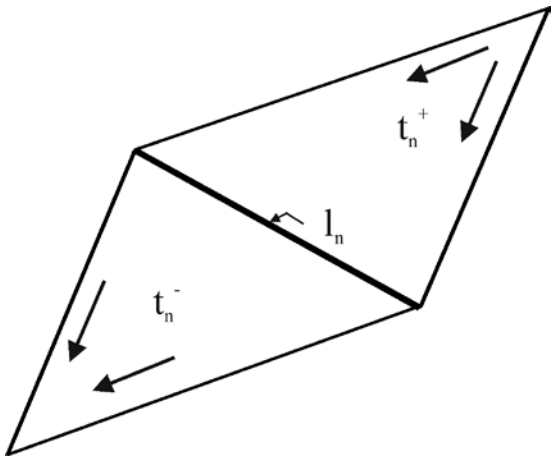
$$v_m = \int dxt_m(x).g(x) \tag{3.24}$$

Teorik olarak açıklaması yapılan moment metodu (Harrington, 1968) bir çok bilim insanı tarafından elektromanyetik saçılım problemlerinin nümerik olarak

çözümünde yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde, integral denklemleri matris denklemlerine indirgenmekte ve çözülmektedir.

3.4. RWG Taban fonksiyonu

Elektromanyetik saçılım problemlerinde saçıcı yüzeyinin bölmelendirilmesi ve uygun taban/test fonksiyonu ile genişletilerek modellenmesi çok fazla önem arz etmektedir. Üç boyutlu saçıcıların modellenmesinde en çok kullanılan taban fonksiyonlarından biri RWG fonksiyonudur(Rao ve ark. 1982). Bu fonksiyonun uygulanabilmesi için saçıcı yüzeyinin üçgensel olarak bölmelendirilmesi gerekmektedir. RWG üçgen çifti aşağıdaki şekildeki gibidir:



Şekil.3.2. Yüzey RWG Taban Fonksiyonu

Üçgensel olarak bölmelendirilmiş bir yüzey üzerindeki herhangi bir üçgen çifti için t_n^+ ve t_n^- üçgenleri, A_n^+ ve A_n^- üçgen alanlarını, l_n üçgen çiftinin ortak kenarını göstermektedir. n'inci RWG taban fonksiyonu aşağıdaki şekillerde ifade edilir;

$$f_n^S(\vec{r}) = \begin{cases} \dfrac{l_n}{2A_n^+}\vec{\rho}_n^{+S} & \vec{r}\ in\ t_n^+ \\ \dfrac{l_n}{2A_n^-}\vec{\rho}_n^{-S} & \vec{r}\ in\ t_n^- \end{cases} \tag{3.25}$$

Burada $\vec{\rho}_n^{+S} = \vec{r} - \vec{r}_n^{+}$ vektörü, t_n^{+} üçgeninin serbest köşesinden gözlem noktasına olan vektör; $\vec{\rho}_n^{-S} = \vec{r}_n^{-} - \vec{r}$ vektörü, gözlem noktasından t_n^{-} üçgenin serbest köşesine olan vektördür. Taban fonksiyonu t_n^{+} ve t_n^{-} üçgen çifti dışında olan yerlerde sıfırdır.

3.5. Moment Metodu Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde farklı şekillerdeki üç boyutlu saçıcıların yüzey akımlarının elde edilmesi için RWG taban ve test fonksiyonu kullanılarak MoM matris denklemlerinin nasıl oluşturulduğu gösterilecektir.

3.5.1. RWG ile Moment Metodu Denklemlerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde mükemmel iletken saçıcılar için MoM matris denklemlerinin, RWG fonksiyonu kullanılarak doğru bir şekilde oluşturulması gösterilecektir. RWG fonksiyonu hem taban hem de test fonksiyonu olarak kullanılacaktır.

3.5.1.1. Saçılım

Elektromanyetik dalgalar etki ettiği nesneler üzerinde bir akım oluşmasına neden olmaktadır. Bu akım da elektrik alan oluşmasına neden olur. Süper iletken malzemelerde akım sadece yüzey üzerinde indüklenir ve indüklenen akımın oluşturduğu elektrik alan, gelen elektrik alana eşittir. Dolayısıyla toplam elektrik alan gelen ve saçılan dalganın toplamına eşit olur. Bu eşitlik aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\vec{E} = \vec{E}^{i} + \vec{E}^{s} \tag{3.26}$$

Saçılan elektrik alan gelen dalga sebebiyle oluşacağı gibi uyartıcı elektrik alan ile de oluşabilir. Örneğin verici antenlerde yayılan elektrik alan bu şekilde oluşmaktadır.

Metal yüzeyinden saçılan elektrik alanın nedeni yüzey akımları ve serbest yüklerdir. Metal saçıcılar için elektrik alan formülü aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$\vec{E}^{s} = -j\omega\vec{A}_S(\vec{r}) - \nabla\Phi_S(\vec{r}) \tag{3.27}$$

$\vec{A}_S(\vec{r})$ manyetik vektör potansiyelini ifade ederken, $\Phi_S(\vec{r})$ elektrik skaler potansiyeli ifade eder. Yakın alan problemlerinde $\vec{A}_S(\vec{r})$, uzak alan problemlerinde ise $\Phi_S(\vec{r})$ etkisi daha fazladır.

3.5.1.2. Test Fonksiyonu

Bu bölümde farklı şekillerdeki üç boyutlu saçıcıların yüzey akımlarının elde edilmesi için RWG fonksiyonu tabanlı moment metodu matris denklemlerinin nasıl oluşturulduğu gösterilecektir. Test fonksiyonu $\vec{f}_m^S(\vec{r})$ $m = 1\ldots N_M$ şeklindedir ve tüm S yüzeyini kapsar. Yüzeye dik bileşene sahip değildir. (2.1.3) denkleminin $\vec{f}_m^S$ ile çarpımı ve S yüzeyi üzerindeki integrasyon N_M adet denklem oluşturur:

$$\int_S \vec{f}_m^S \cdot \vec{E}^i d\vec{r} = j\omega \int_S \vec{f}_m^S \cdot \vec{A}_S d\vec{r} - \int_S \left(\nabla \cdot \vec{f}_m^S\right) \Phi_S d\vec{r} \tag{3.28}$$

3.5.1.3. Yüzey Akımları ve Yük Dağılımları

Yüzey akım yoğunluğu $\vec{J}_S$'nin genişletilmiş formu aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\vec{J}_S = \sum_{n=1}^{N_M} I_n \vec{f}_n^S \tag{3.29}$$

Manyetik vektör potansiyeli $\vec{A}_S(\vec{r})$ aşağıdaki gibi ifade edilirken,

$$\vec{A}_S(\vec{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \int_S \vec{J}_S g d\vec{r}' \tag{3.30}$$

genişletme işlemi sonrasında aşağıdaki formu alır;

$$\vec{A}_S(\vec{r}) = \sum_{n=1}^{N_M} \left\{ \frac{\mu}{4\pi} \int_S \vec{f}_n^S(\vec{r}') g d\vec{r}' \right\} I_n \tag{3.31}$$

Bu denklemde $g = \exp(-jkR)/R$ denklemi, üç boyutlu Green fonksiyonu'dur ve $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$ şeklindedir. Aynı şekilde elektrik potansiyel de genişletilirse aşağıdaki gibi olan elektrik potansiyel ifadesi,

$$\Phi_S(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon}\int_S \sigma_S g dr', \quad j\omega\sigma_S = -\nabla_S \cdot J \tag{3.32}$$

aşağıdaki forma dönüşür:

$$\Phi_S(\vec{r}) = \sum_{n=1}^{N_M}\left\{\frac{1}{4\pi\varepsilon}\frac{j}{\omega}\int_S \nabla_S \cdot f_n^S(\vec{r}')d\vec{r}'\right\}I_n \tag{3.33}$$

3.5.1.4. Moment Metodu Denklemleri

(2.1.8) ve (2.1.10) denklemleri (2.1.4) denkleminde yerlerine yazılırsa moment denklemleri elde edilmiş olur. Voltaj ya da uyartım bileşeni aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\upsilon_m = \sum_{n=1}^{N_M} Z_{mn}^{MM} I_n, \quad m = 1,..., N_M \tag{3.34}$$

taban/test fonksiyonu ile genişletilirse aşağıdaki forma dönüşür:

$$\upsilon_m = \int_S \vec{f}_m^S \cdot \vec{E}^i d\vec{r} \tag{3.35}$$

(N_M x N_M) boyutundaki Z_{mn}^{MM} empedans matrisi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$Z_{mn}^{MM} = \left(\frac{j\omega\mu}{4\pi}\right)\int_S\int_S \vec{f}_m^S(\vec{r}) \cdot \vec{f}_n^S(\vec{r}')g d\vec{r}' d\vec{r} - \left(\frac{j}{4\pi\omega\varepsilon}\right)\int_S\int_S \left(\nabla_S \cdot \vec{f}_m^S\right)\left(\nabla_S \cdot \vec{f}_n^S\right)g d\vec{r}' d\vec{r} \tag{3.36}$$

Bu denklemde taban ve test fonksiyonları birbirine eşittir. İki katlı integral problemi çözüldüğünde empedans matrisi elde edilir. İntegral içindeki "g" ifadesi üç boyutlu green fonksiyonudur.

Moment denklemlerinin matris formu aşağıdaki şekilde gösterilir;

$$\vec{\upsilon} = \hat{Z}\vec{I} \tag{3.37}$$

3.5.1.5. RWG taban fonksiyonu'nun uygulanması

Bu bölümde RWG taban fonksiyonlarının özellikleri ve moment matris denklemine uygulanışı gösterilecektir. Üçgensel olarak bölmelendirilmiş bir yüzey üzerindeki herhangi bir üçgen çifti için t_n^+ ve t_n^- üçgenleri, A_n^+ ve A_n^- üçgen alanlarını, l_n üçgen çiftinin ortak kenarını göstermektedir. n'inci RWG taban fonksiyonu aşağıdaki şekillerde ifade edilir:

$$f_n^S(\vec{r}) = \begin{cases} \dfrac{l_n}{2A_n^+}\vec{\rho}_n^{+S} & \vec{r}\ in\ t_n^+ \\ \dfrac{l_n}{2A_n^-}\vec{\rho}_n^{-S} & \vec{r}\ in\ t_n^- \end{cases} \tag{3.38}$$

ve

$$\nabla_S \cdot f_n^S(\vec{r}) = \begin{cases} \dfrac{l_n}{A_n^+} & \vec{r}\ in\ t_n^+ \\ -\dfrac{l_n}{A_n^-} & \vec{r}\ in\ t_n^- \end{cases} \tag{3.39}$$

Burada $\vec{\rho}_n^{+S} = \vec{r} - \vec{r}_n^+$ vektörü, t_n^+ üçgeninin serbest köşesinden gözlem noktasına olan vektör; $\vec{\rho}_n^{-S} = \vec{r}_n^- - \vec{r}$ vektörü, gözlem noktasından t_n^- üçgenin serbest köşesine olan vektördür. Taban fonksiyonu t_n^+ ve t_n^- üçgen çifti dışında olan yerlerde sıfırdır. (3.38) ve (3.39) ifadeleri (3.36) denkleminde yerlerine konursa empedans matrisi bileşenlerinin yüzey RWG taban fonksiyonu cinsinden şekli ortaya çıkar:

$$\begin{aligned} &\int_S\int_S \vec{f}_m^S \cdot \vec{f}_n^S g d\vec{r}' d\vec{r} = \\ &+\frac{l_m l_n}{4A_m^+A_n^+}\int_{t_m^+}\int_{t_n^+}\left(\vec{\rho}_m^{+S}\cdot\vec{\rho}_n'^{+S}\right)g d\vec{r}' d\vec{r} + \frac{l_m l_n}{4A_m^+A_n^-}\int_{t_m^+}\int_{t_n^-}\left(\vec{\rho}_m^{+S}\cdot\vec{\rho}_n'^{-S}\right)g d\vec{r}' d\vec{r} \\ &+\frac{l_m l_n}{4A_m^-A_n^+}\int_{t_m^-}\int_{t_n^+}\left(\vec{\rho}_m^{-S}\cdot\vec{\rho}_n'^{+S}\right)g d\vec{r}' d\vec{r} + \frac{l_m l_n}{4A_m^-A_n^-}\int_{t_m^-}\int_{t_n^-}\left(\vec{\rho}_m^{-S}\cdot\vec{\rho}_n'^{-S}\right)g d\vec{r}' d\vec{r} \end{aligned} \tag{3.40}$$

ve

$$\int_S \int_S \nabla_S \cdot \vec{f}_m^{\,S} \nabla_S \cdot \vec{f}_n^{\,S} g d\vec{r}' d\vec{r} =$$
$$+ \frac{l_m l_n}{A_m^+ A_n^+} \int_{t_m^+} \int_{t_n^+} g d\vec{r}' d\vec{r} - \frac{l_m l_n}{A_m^+ A_n^-} \int_{t_m^+} \int_{t_n^-} g d\vec{r}' d\vec{r} \qquad (3.41)$$
$$- \frac{l_m l_n}{A_m^- A_n^+} \int_{t_m^-} \int_{t_n^+} g d\vec{r}' d\vec{r} + \frac{l_m l_n}{A_m^- A_n^-} \int_{t_m^-} \int_{t_n^-} g d\vec{r}' d\vec{r}$$

3.5.1.6. İntegral Hesaplamaları

(3.40) ve (3.41) denklemlerindeki integrallerin hesaplanması, RWG fonksiyonları kullanılarak MoM ile empedans matrislerinin oluşturulması işleminde en çok zaman alan kısımdır. Üzerindeki tüm üçgen yüzeylerinin $p = 1,...,P$ ile numaralandırıldığı bir yapı düşünülürse (3.40)'taki integral terimleri aşağıdaki gibi olur;

$$\vec{A}_{S\,pq}^{ij} = \int_{t_p} \int_{t_q} \left(\vec{\rho}_i^{\,S} \cdot \vec{\rho}_j'^{\,S} \right) g(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}' d\vec{r} \quad p,q = 1,...,P \quad i,j = 1,2,3 \qquad (3.42)$$

Burada, *p* yaması üzerindeki *i*. vektör $\vec{\rho}_i^{\,S} = \vec{r} - \vec{r}_i$, q yaması üzerindeki *j*. vektör $\vec{\rho}'^{\,S}_j = \vec{r}' - \vec{r}_j$ şeklinde olur. Benzer şekilde, (3.41)'deki integral terimleri aşağıdaki gibi olur;

$$\Phi_{S\,pq} = \int_{t_p} \int_{t_q} g(|\vec{r} - \vec{r}'|) d\vec{r}' d\vec{r} \quad p,q = 1,...,P \qquad (3.43)$$

(3.42) ve (3.43) denklemlerindeki integral farklı integrasyon yöntemleri ile hesaplanabilirler.

3.5.1.7. Self-integraller

Self integraller (3.42) ve (3.43) denklemlerinde $p = q$ olması durumunda ortaya çıkarlar. Green fonksiyonu için Taylor açılımı yapılırsa;

$$g = \exp(-jkR)/R \approx 1/R - jk - \frac{k^2 R}{2} ... \qquad (3.44)$$

daha sonra

$$\Phi_{Spp} = \int_{t_p}\int_{t_p} g(|\vec{r}-\vec{r}'|)d\vec{r}'d\vec{r} \approx \int_{t_p}\int_{t_p} \frac{1}{|\vec{r}-\vec{r}'|} d\vec{r}'d\vec{r} - jkA_p^2 \quad p = 1,...,P \tag{3.45}$$

ve

$$A_{Spp}^{ij} \approx \int_{T_p}\int_{T_p} \frac{(\vec{r}-\vec{r}_i)\cdot(\vec{r}'-\vec{r}_j)}{|\vec{r}-\vec{r}'|} d\vec{r}'d\vec{r} - jk\int_{T_p}\int_{T_p} (\vec{r}-\vec{r}_i)\cdot(\vec{r}'-\vec{r}_j)d\vec{r}'d\vec{r} \tag{3.46}$$
$$p = 1,...,P \quad i,j = 1,2,3$$

olur.

t_p üçgeni için simpleks koordinatlar λ_1, λ_2 şu şekildedir(Eibert ve Hansen 1995):

$$\vec{r} = \lambda_1(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) + \lambda_2(\vec{r}_2 - \vec{r}_3) + \vec{r}_3, \quad \vec{r}' = \lambda_1'(\vec{r}_1 - \vec{r}_3) + \lambda_2'(\vec{r}_2 - \vec{r}_3) + \vec{r}_3 \tag{3.47}$$

ve

$$\begin{aligned}
(\vec{r}-\vec{r}_i)\cdot(\vec{r}'-\vec{r}_j) = \\
&(\vec{r}_3-\vec{r}_i)\cdot(\vec{r}_3-\vec{r}_j)\times 1 + \\
&(\vec{r}_1-\vec{r}_3)\cdot(2\vec{r}_3-\vec{r}_i-\vec{r}_j)\times\lambda_1 + \\
&(\vec{r}_2-\vec{r}_3)\cdot(2\vec{r}_3-\vec{r}_i-\vec{r}_j)\times\lambda_2 + \\
&(\vec{r}_1-\vec{r}_3)\cdot(\vec{r}_1-\vec{r}_3)\times\lambda_1\lambda_1' + \\
&(\vec{r}_2-\vec{r}_3)\cdot(\vec{r}_2-\vec{r}_3)\times\lambda_2\lambda_2' + \\
&(\vec{r}_1-\vec{r}_3)\cdot(\vec{r}_2-\vec{r}_3)\times\lambda_1\lambda_2' + \\
&(\vec{r}_1-\vec{r}_3)\cdot(\vec{r}_2-\vec{r}_3)\times\lambda_1'\lambda_2
\end{aligned} \tag{3.48}$$

(3.48) denkleminin (3.46) denkleminde yerine yazılmasıyla yedi integral elde edilir. Böylece her biri (Eibert ve Hansen 1995)'te verilen dört bağımsız temel integralden birine indirgenir. Kalan değerler cyclic dönüşümü kullanılarak elde edilir. (3.45) denklemindeki integral sadece ilk temel integrale ihtiyaç duyar(Eibert ve Hansen 1995). (3.45) denkleminin sağ taraf ifadesinin ikinci terim doğrudan çözülebilir.

3.5.1.8. Empedans Matrisinin Oluşturulması

(3.42) ve (3.43) denklemlerindeki integraller hesaplandıktan sonra, (3.39) ve (3.40) denklemleri (3.36)'da yerlerine yazılırsa empedans matrisi denklemi aşağıdaki forma dönüşür:

$$
\begin{aligned}
Z_{mn}^{MM} = & \\
& + \frac{j}{4\pi\omega\varepsilon} l_m l_n \left\{ \begin{array}{l} + \dfrac{1}{A_m^+ A_n^+} \Phi_{S\,p(m^+)q(n^+)} - \dfrac{1}{A_m^+ A_n^-} \Phi_{S\,p(m^+)q(n^-)} \\ - \dfrac{1}{A_m^- A_n^+} \Phi_{S\,p(m^-)q(n^+)} + \dfrac{1}{A_m^- A_n^-} \Phi_{S\,p(m^-)q(n^-)} \end{array} \right\} \\
& - \frac{j\omega\mu}{16\pi} l_m l_n \left\{ \begin{array}{l} + \dfrac{1}{A_m^+ A_n^+} A_{S\,p(m^+)q(n^+)}^{i(m^+)j(n^+)} - \dfrac{1}{A_m^+ A_n^-} A_{S\,p(m^+)q(n^-)}^{i(m^+)j(n^-)} \\ - \dfrac{1}{A_m^- A_n^+} A_{S\,p(m^-)q(n^+)}^{i(m^-)j(n^+)} + \dfrac{1}{A_m^- A_n^-} A_{S\,p(m^-)q(n^-)}^{i(m^-)j(n^-)} \end{array} \right\}
\end{aligned}
\tag{3.49}
$$

Burada, $p(m^{\pm})$ sırasıyla artı ve eksi RWG fonksiyonu üçgenlerinin yama numarasını göstermektedir. $q(n^{\pm})$ indeksi de aynı manaya gelmektedir. İndeks $i(m^{\pm})$, sırasıyla artı ve eksi RWG fonksiyonu üçgen yamalarının serbest köşe numaralarını tutmaktadır. $j(n^{\pm})$ indeksi de aynı manaya gelmektedir.

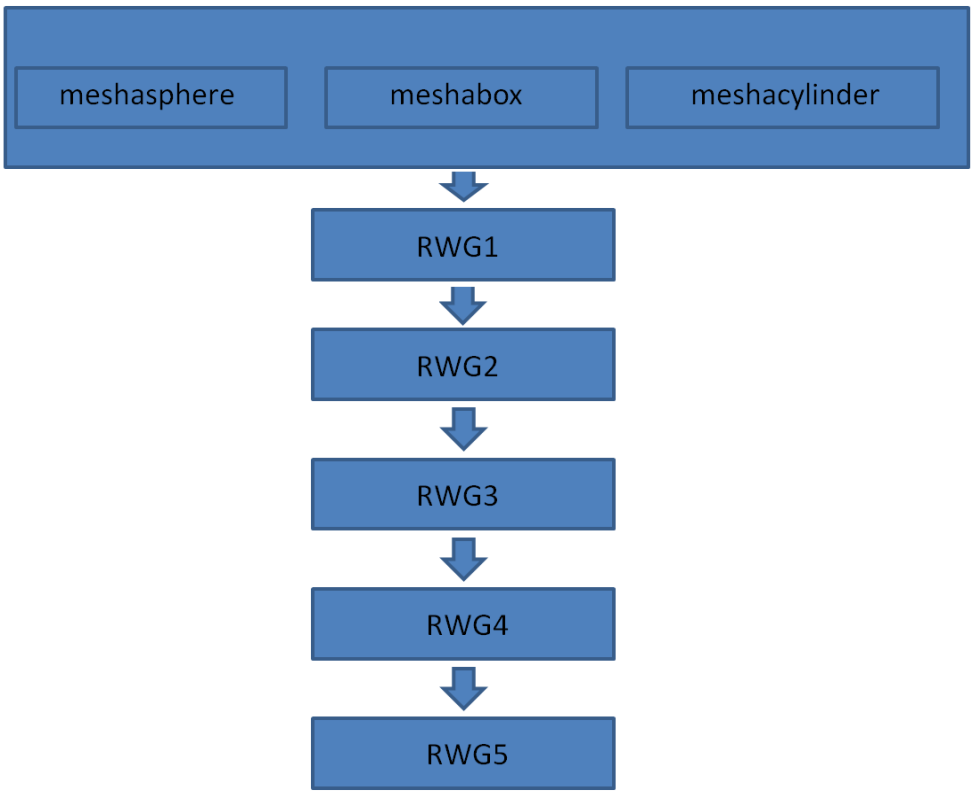
3.6. Tez Kapsamında Kullanılan Bilgisayar Programları

Bu bölümde tez kapsamında kullanılan bilgisayar programlarından bahsedilmiş, saçıcı yüzeyinin bölmelendirilmesi ve RWG taban fonksiyonlarının kullanılmasıyla yüzey akımlarını hesaplayan Matlab programlarının özellikleri ve akış diyagramı gösterilmiştir.

Saçıcı yüzeylerinin bölmelendirilmesi için iso2Mesh (Fang 2012) açık kaynak kodu kullanılmıştır. Üçgensel bir bölmelendirme yöntemi olan delaunay üçgenlemesine dayalı bu kütüphane matlab ile oluşturulmuştur. Tez kapsamında, elektromanyetik saçılım problemleri çözülen üç boyutlu küre, kutu ve silindir saçıcıların yüzeyleri bu yazılımla bölmelendirilmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda, elektromanyetik saçılım problemlerinin RWG taban fonksiyonları kullanılarak MoM ile çözülmesinde matlabın oldukça güçlü bir araç olduğu gösterilmiştir (Makarov 2002). Bu tez çalışmasında da Makarov'un (2002) geliştirdiği matlab kodlarından faydalanılmıştır.

Kullanılan programların akış diyagramı Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Program akış diyagramı

Şekil 3.3'te tez kapsamında kullanılan programların akış diyagramı gösterilmiştir. İlk adımda iso2mesh kütüphanesindeki meshasphere, meshabox veya meshacylinder fonksiyonları kullanılarak elektromanyetik saçılım problemi çözülecek olan saçıcı geometrisi oluşturulur. Daha sonra RWG1 ve RWG2 programları ile saçıcının RWG kenar elemanları oluşturulur. RWG3 programı ile integral denklemleri matris denklem formuna dönüştürülür ve empedans matrisi hesaplanır. Sonra RWG4 akım dağılımı matrisini hesaplar ve son olarak RWG5 programı yüzey akım dağılımını saçıcı yüzeyinde gri skala ile gösterilmesini sağlar.

Saçıcı yüzeyinin üçgensel olarak bölmelendirilmesi için iso2mesh açık kaynak kodlu matlab programından faydalanılmıştır. Üçgenleme yöntemi olarak delaunay üçgenlemesini kullanmaktadır. Bu program aslında bir kütüphane olup çok sayıda alt program barındırmaktadır. Tez kapsamında kullanılan saçıcılar küre, kutu ve silindir olduğundan dolayı sadece bu geometrileri bölmelendiren programlardan bahsedilmiştir. Bunlar meshasphere, meshabox ve meshacylinder alt programlarıdır. Bu programların işlevleri, giriş parametreleri, çıkış parametreleri ve çıktı olarak oluşturdukları dosyalar Çizelge 3.1.'de açıklamalarıyla birlikte gösterilmiştir:

Çizelge 3.1. iso2mesh kütüphanesinden kullanılan programlar

Matlab Programları	Giriş Parametreleri	Çıkış Parametreleri	Oluşturduğu Dosya	İşlevi
meshasphere	**c0**:merkez koord. **r:**küre yarıçapı **tsize:** max. üçgen büyüklüğü	**p:**düğüm noktaları koord. **t:** üçgen düğüm numaraları	sphere.mat	İstenen boyutlarda bir küre oluşturur
meshabox	**P0:** bir köşegenin bitiş koord. **P1:** diğer köşegenin bitiş koord.	**p:**düğüm noktaları koord. **t:** üçgen düğüm numaraları	box.mat	İstenen boyutlarda bir kutu oluşturur
meshacylinder	**h:** silindirin yüksekliği **r:** silindirin yarıçapı **tsize:** max. üçgen büyüklüğü	**p:**düğüm noktaları koord. **t:** üçgen düğüm numaraları	cylinder.mat	İstenen boyutlarda bir silindir oluşturur

Çizelge 3.1'de gösterilen fonksiyonların matlab kodları açıklamalarıyla beraber Ek-2'de sunulmuştur. Bu programların çalıştırılmasıyla beraber, istenen boyutlarda saçıcı küre, kutu ve silindir geometrileri oluşturabilir.

İstenen boyutlarda saçıcı geometrileri oluşturulduktan sonra RWG kenar elemanlarının oluşturulması, empedans matrisinin oluşturulması, yüzey akım dağılımının bulunması ve sonuçların saçıcı yüzeyinde görsel olarak sunulması için Çizelge 3.2'deki programlar kullanılmıştır:

Çizelge 3.2. Yüzey akım dağılımını, işlem süresini ve kullanılan bellek miktarını hesaplayan matlab programları

Matlab Programları	Giriş Parametreleri	Çıkış Parametreleri	Oluşturduğu Dosya	İşlevi
RWG1	sphere.mat, box.mat veya cylinder.mat	Edge_Node TrianglesTotal EdgesTotal TrianglePlus TriangleMinus EdgeLength Area Center	mesh1.mat	Geometrik hesaplamalar-Bölmelendirilmiş yapının mesh dosyasını kullanarak RWG elemanlarını oluşturur
RWG2	mesh1.mat	RHO_Plus RHO_Minus RHO__Minus Center_	mesh2.mat	Geometrik hesaplamalar- RWG vektörlerini oluşturur.
RWG3	mesh2.mat	Frequency Omega Mu_ Epsilon_ C_ Eta_ Z	impedance.mat	Empedans matrisi hesaplar
RWG4	mesh2.mat impedance.mat	Frequency Omega Mu_ Epsilon_ C_ Eta_ I V D Pol	current.mat	Saçılım problemi için RWG taban fonksiyonu elemanlarını kullanarak MoM denklemlerini çözer. Akım matrisini hesaplar.
RWG5	mesh2.mat current.mat			Yüzey akım yoğunluğunu saçıcı yüzeyi üzerinde görsel olarak sunar
Bellek_Hesapla	Z (Empedans matrisi)	Harcanan bellek miktarı		MoM hesaplamaları sırasından kullanılan bellek miktarlarını hesaplar

Çizelge 3.2'de gösterilen fonksiyonların matlab kodları açıklamalarıyla beraber Ek-1'de sunulmuştur. Bu programların çalıştırılmasıyla beraber, istenen boyutlarda saçıcı küre, kutu ve silindir'in elektromanyetik saçılım problemi RWG taban fonksiyonu

kullanılarak MoM ile çözülebilir. Ayrıca, çözüm için gerekli işlem süreleri ve ihtiyaç duyulan bellek miktarları tespit edilebilir.

3. MATERYAL VE METOT

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde üç boyutlu mükemmel iletken saçıcıların elektromanyetik saçılım problemlerinin moment metodu ve RWG taban fonksiyonları kullanılarak çözümü anlatılmış, yöntemin farklı büyüklüklerdeki saçıcılara uygulanması sonucu tespit edilen problem çözüm süreleri ve gerekli bellek miktarları sunulmuştur. Uygulama olarak küre, kutu ve silindir saçıcılar ele alınmış, konunun detayları aşamalı olarak anlatılmıştır. Birinci aşamada tezde kullanılan saçıcıların özellikleri, sınır koşulları ve gelen elektromanyetik dalganın karakteristiği, problemin formülasyonu, saçıcıların diskritizasyonu ve diğer çözüm adımları; ikinci aşamada küre, kutu ve silindir saçıcıların saçılım probleminin çözülmesi için moment metodunun uygulanması ve sonuçları; son olarak üçüncü aşamada ise farklı büyüklüklerdeki saçıcılara moment metodu uygulanması neticesinde elde edilen problem çözüm süreleri ve gerekli bellek miktarları tablolar ve grafiklerle gösterilmiştir.

4.1. Tez Kapsamında Kullanılan Saçıcılar ve Elektromanyetik Dalga Problemi

Yapılan çalışmada üç boyutlu küre, kutu ve silindir saçıcıların elektromanyetik saçılım problemleri moment metodu ve RWG taban fonksiyonu ile çözülerek yüzey akımları elde edilmiştir. Saçıcıların formülasyonu EFIE ile yapılmıştır. Üç boyutlu saçıcıların integral denklemlerle genel formülasyonları (Poggio ve Miller 1973)(Peterson ve ark. 1998) de gösterilmiştir. Üç boyutlu saçıcılar ile çalışıldığından dolayı integral denklemlerinde üç boyutlu green fonksiyonu kullanılmıştır. Problemlerdeki hesap zorluğunun indirgenmesi amacıyla saçıcılar üzerinde endüklenen akım, bilinmeyen hacim fonksiyonları yerine bilinmeyen yüzey akımları ile ifade edilerek problem üç boyuttan iki boyuta indirgenmiştir(Pogio ve Miller 1973). 3 boyutlu bir saçıcıda gelen dalga E^i, saçıcı üzerinde endüklenen hacimsel eşdeğer akım $J_{eş}$ ve bu akımın neden olduğu saçılan alan E^s'i ilişkilendiren bağıntı(Catedra ve Torres 1995)'den:

$$E^i = \frac{J_{eş}}{j\omega(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma} - E^s \qquad \text{(V hacmi üzerinde)} \tag{4.1}$$

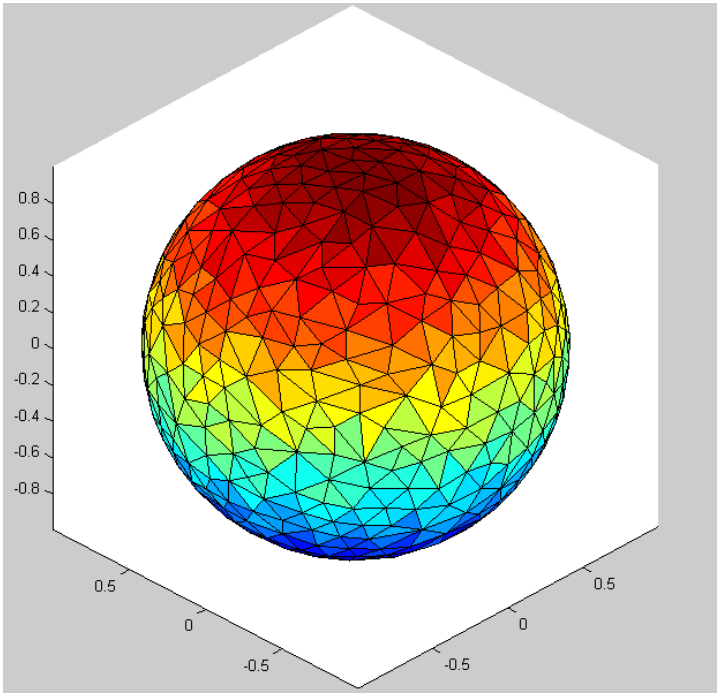
şeklindedir. Eğer saçıcı mükemmel iletken ise $\varepsilon = \varepsilon_0$ ve $\sigma = \infty$ olur. Bu durumda, (4.1) bağıntısı (3.1) denklemindeki mükemmel iletken bağıntısı olan,

$$E^i = -E^s \qquad \text{(V hacmi üzerinde)} \tag{4.2}$$

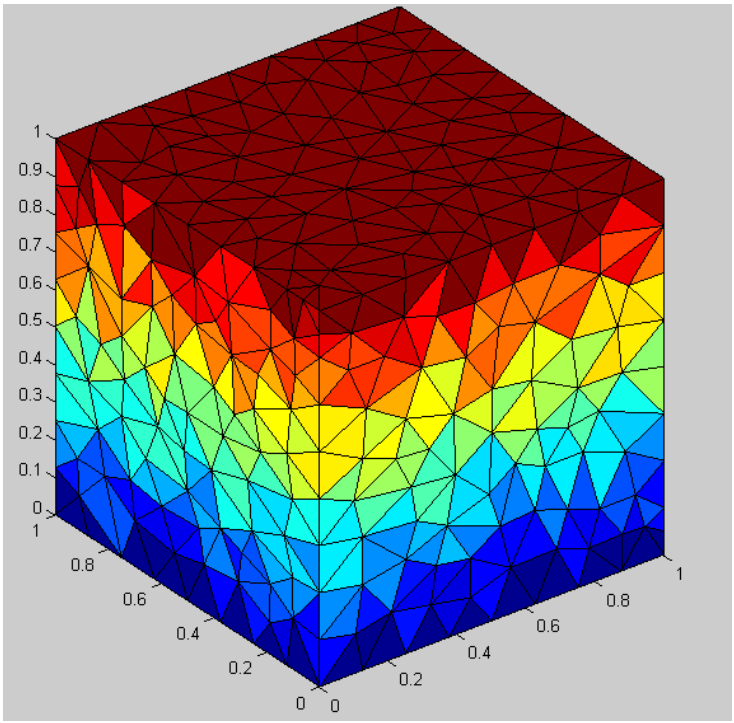
biçimine döner. Dolayısıyla hacimsel akımlar yüzey akımlarına dönüşür. İşlem kolaylığı sağlaması, daha az işlem süresi ve bellek kullanımı gerektirmesinden dolayı bu çalışmada saçıcılar mükemmel iletken olarak seçilmişlerdir. Saçıcıların maruz kaldığı gelen dalga z ekseni boyunca saçıcıya doğru hareket eden bir düzlem dalgadır. Dalga sadece x yönünde elektrik alan bileşenine sahiptir. Düzlem dalganın küre, kutu ve silindirik saçıcılara çarpması sonucu endüklenen akım dağılımını elde etmek için gelen dalganın x yönlü elektrik alan bileşeni $\left|\vec{E}\right| = 1$ V/m seçilmiştir.

Saçıcı yüzeyleri, "iso2mesh"(Fang 2012) programı kullanılarak "delaunay üçgenlemesi" yöntemi ile bölmelendirilmiştir. iso2mesh, matlab/octave tabanlı ücretsiz ve açık kaynak kodlu bir yüzeysel ve hacimsel bölmelendirme programıdır.

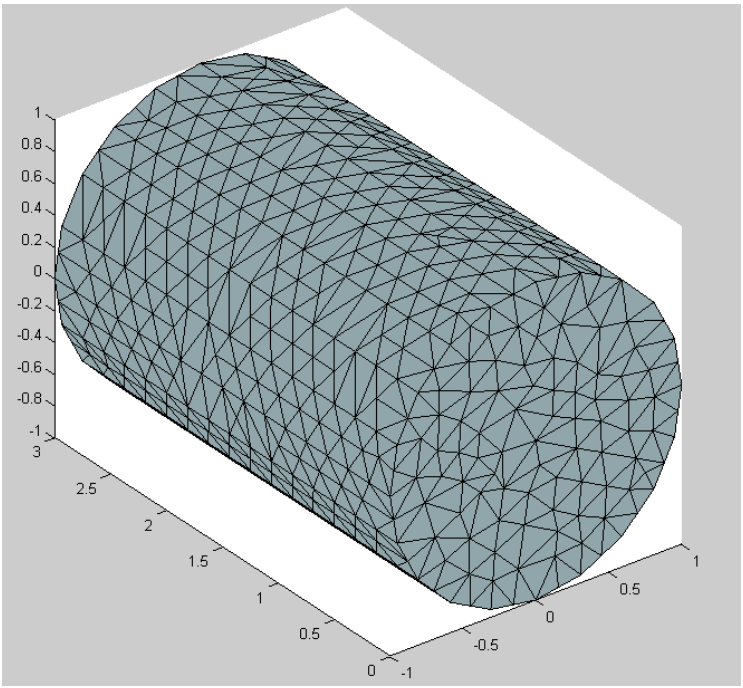
Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş küre, kutu ve silindir örnekleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmiştir:



Şekil 4.1. Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş saçıcı küre



Şekil 4.2. Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş saçıcı kutu



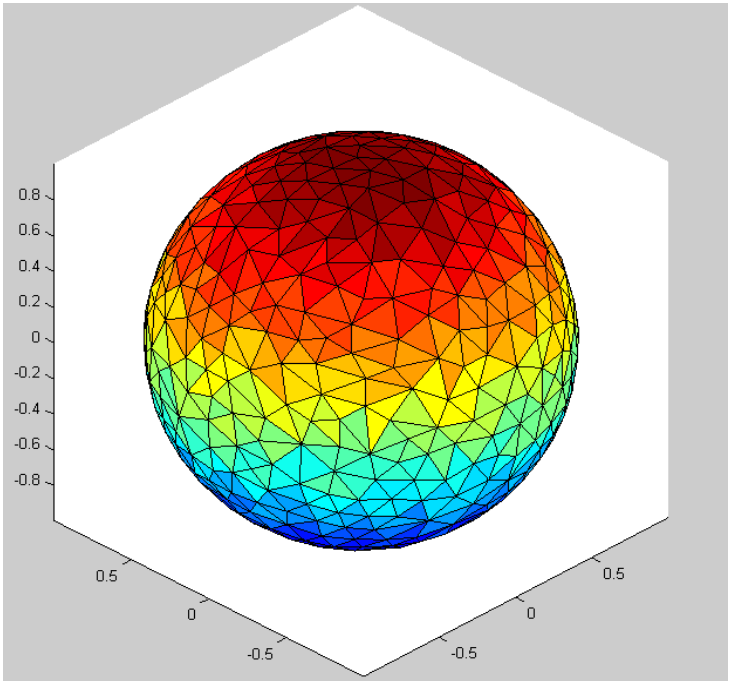
Şekil 4.3. Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş saçıcı silindir

Taban ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonu kullanılmıştır. Üçgensel bölmelendirme ile kullanılan bu fonksiyon bölüm 3'te ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. RWG fonksiyonları kullanılarak elde edilen moment denklemleri EK 1'deki matlab kodları (Makarov 2002) ile çözülmüş ve empedans matrisleri bulunmuştur. Son olarak empedans matrisi kullanılarak saçıcı yüzeyindeki akım dağılımı hesaplanmıştır.

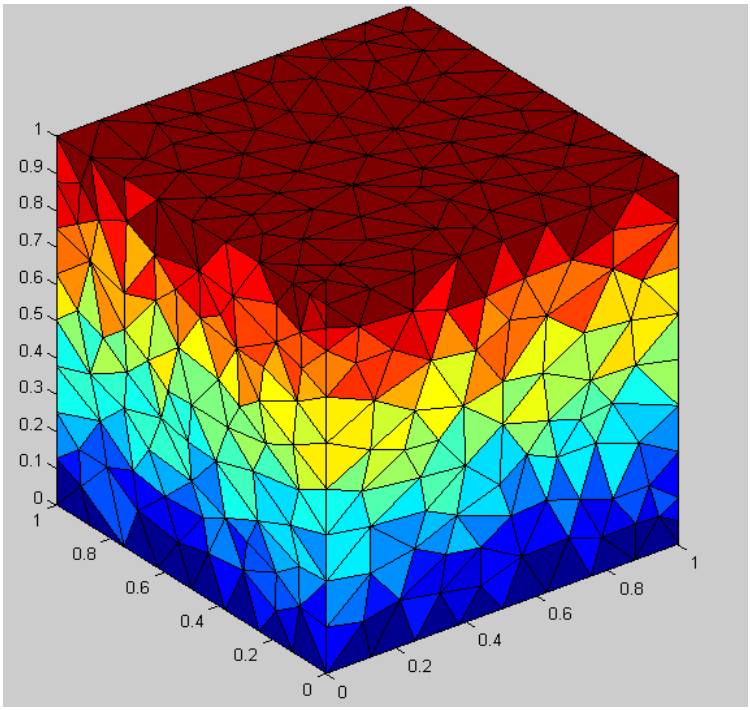
4.2. Saçıcı Küre, Kutu ve Silindir Uygulama Sonuçları

Bu kısımda farklı elektriksel büyüklüklere sahip mükemmel iletken saçıcı küre, kutu ve silindirin EM dalgalaya maruz kalması sonucu üzerinde endüklenen yüzey akımları hesaplanmıştır. İntegral denklemlerin moment denklemlerine dönüştürülmesi için, bölüm 3'teki prosedürler kullanılmıştır. Üç boyutlu saçıcılar küre, küp ve silindirin saçılım problemleri geleneksel moment metodu ile çözülerek yüzey akımları elde edilmiş, problemlerin çözüm süreleri ve kullanılan bellek miktarları tespit edilmiştir.

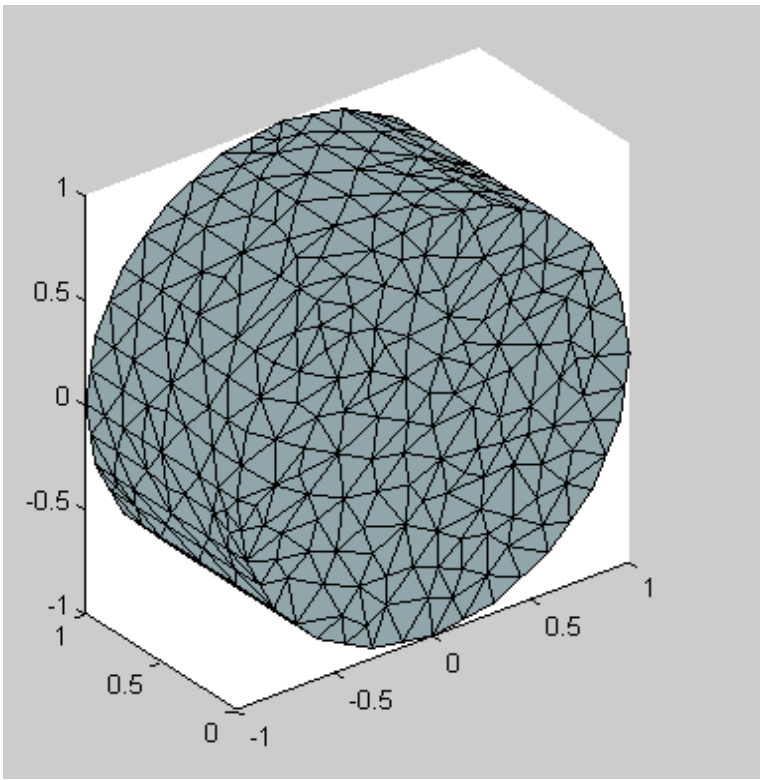
Saçıcı yüzeylerinin bölmelendirilmesi için Ek-2'deki iso2Mesh kodları kullanılmış, tüm kodlamalar MATLAB paket programı ile yapılmıştır. Çalışmalar, Intel Core i7-4700HQ 2.40 GHz işlemci ve 16 GB RAM hafızasına sahip bir bilgisayar ile yapılmıştır. 1024 üçgen ile bölmelendirilmiş, 1536 RWG kenar elemanına sahip küre, kutu ve silindir sırasıyla Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir:



Şekil 4.4. Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş küre. Bölmelendirme sayısı 1024, bilinmeyen RWG kenar elemanı sayısı 1536.



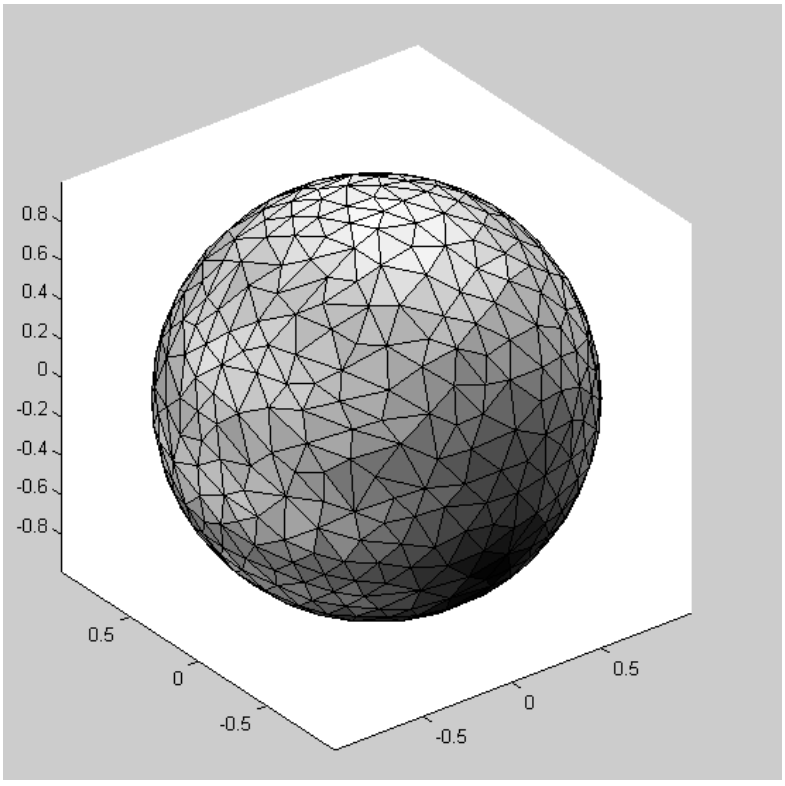
Şekil 4.5. Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş küp. Bölmelendirme sayısı 1024, bilinmeyen RWG kenar elemanı sayısı 1536.



Şekil 4.6. Delaunay üçgenlemesi ile bölmelendirilmiş silindir. Bölmelendirme sayısı 1024, bilinmeyen RWG kenar elemanı sayısı 1536.

Küre, küp ve silindir yüzeyleri en sık kullanılan üçgenleme yöntemlerinden biri olan delaunay üçgenlemesi yöntemiyle 1024 üçgen ile bölmelendirilmiştir(Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6). Bölmelendirme sayısı'nın(N) 1024 olması durumunda RWG kenar eleman sayısı, yani matris boyutu(P) 1536 olmaktadır.

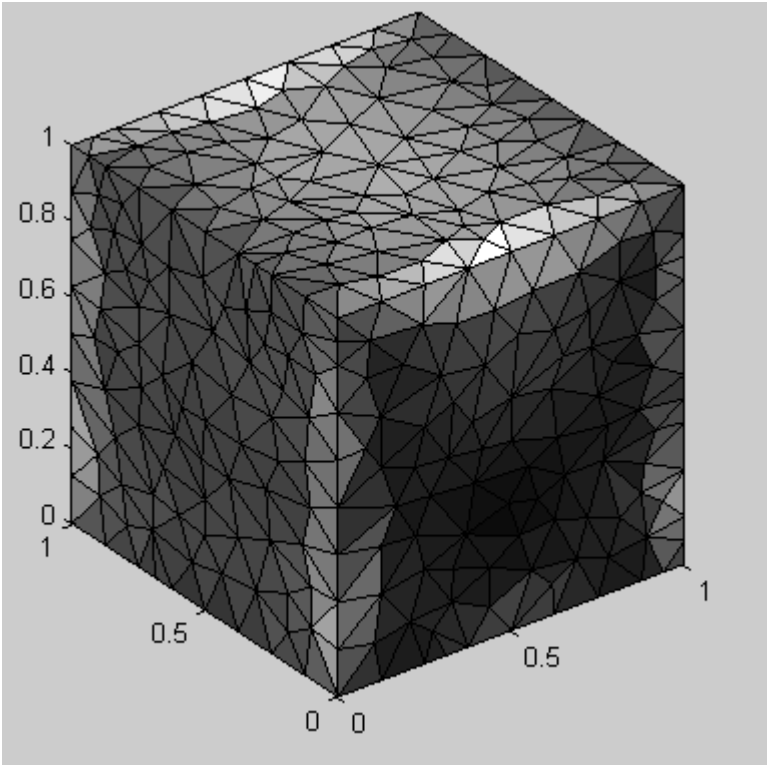
Saçıcı yüzeyindeki akım dağılımının bulunması için Ek-1'de verilen matlab kodları kullanılmıştır(Makarov 2002). Bölüm 3'teki matematiksel prosedürlerin matlab ile kodlanmasıyla oluşturulan bu program, üç boyutlu mükemmel iletkenliğe sahip her hangi bir saçıcının EM dalgalara maruz kalması durumunda oluşan yüzey akımlarının bulunmasını sağlamaktadır. Program, taban ve test fonksiyonu olarak RWG'yi kullanmaktadır. Programın, N=1024 ve P = 1536 olan birim küre, küp ve birim silindire uygulanmasıyla empedans matrisleri ve yüzey akım dağılımları bulunmuştur. Sonuçlar küre, kutu ve silindir saçıcılar için sırasıyla Şekil 4.7, Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Birim küre yüzeyindeki akım dağılımı N=1024, P=1536. Gri skala minimumdan maksimuma akım büyüklüklerini ifade etmektedir.

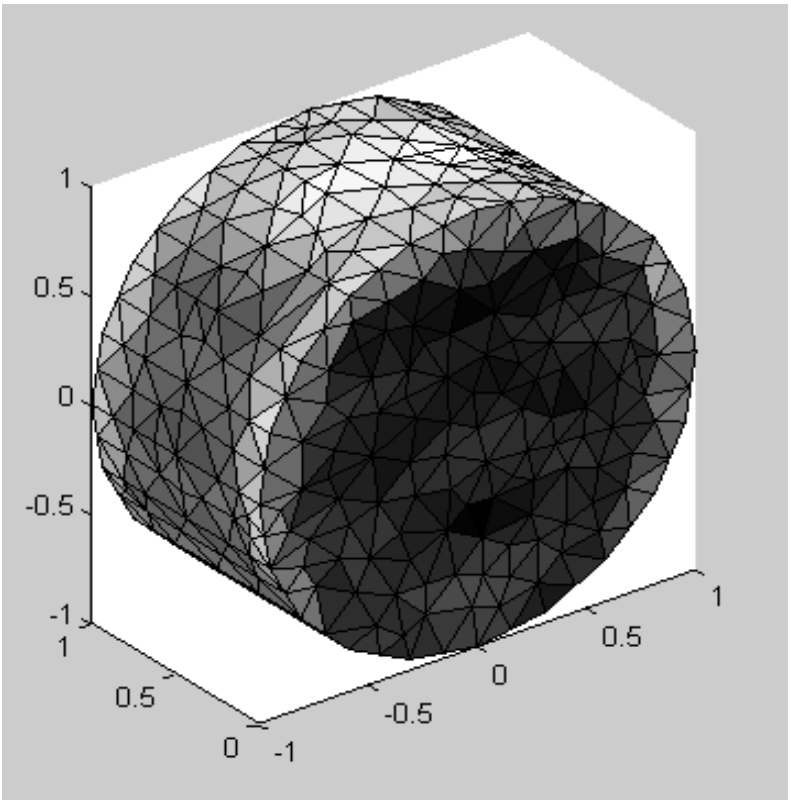
Şekil 4.7'de yüzey akım dağılımı gösterilen saçıcı küre için, program çalışma süresi 17.27 sn olarak tespit edilmiştir. Bunun 9.37 sn'si empedans matrisinin

oluşturulması ve yüzey akımlarının elde edilmesi sırasında geçmiştir. Küre yüzeyindeki maksimum akım 0.0062 A, toplam akım ise 3.1 A olarak bulunmuştur. Sadece empedans matrisinin bellek üzerinde kapladığı alan 36 Mb olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.8. Küp yüzeyindeki akım dağılımı. N=1024, P=1536. Gri skala minimumdan maksimuma akım büyüklüklerini ifade etmektedir.

Şekil 4.8'de yüzey akım dağılımı gösterilen saçıcı küp için, program çalışma süresi 18.59 sn olarak tespit edilmiştir. Bunun 9.44 sn'si empedans matrisinin oluşturulması ve yüzey akımlarının elde edilmesi sırasında geçmiştir. Küp yüzeyindeki maksimum akım 0.0090432 A, toplam akım ise 2.9407 A olarak bulunmuştur. Sadece empedans matrisinin bellek üzerinde kapladığı alan 36 Mb olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Silindir yüzeyindeki akım dağılımı. N=1024, P=1536. Gri skala minimumdan maksimuma akım büyüklüklerini ifade etmektedir.

Şekil 4.9'da yüzey akım dağılımı gösterilen saçıcı silindir için, program çalışma süresi 18.97 sn olarak tespit edilmiştir. Bunun 9.57 sn'si empedans matrisinin oluşturulması ve yüzey akımlarının elde edilmesi sırasında geçmiştir. Silindir yüzeyindeki maksimum akım 0.0081821 A, toplam akım ise 3.146 A olarak bulunmuştur. Sadece empedans matrisinin bellek üzerinde kapladığı alan 36 Mb olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak 1536 X 1536 boyutlu empedans matrisleri elde edilmiştir. Empedans matrisinin çözülmesiyle saçıcı küre, kutu ve silindirin yüzey akımlar dağılımları bulunmuştur.

Daha önce değinildiği gibi, moment metodunun saçılım problemlerinde kullanımında en çok zaman alan kısım empedans matrisinin oluşturulmasıdır. Saçıcı boyutları arttıkça daha iyi sonuç almak için bölmelendirme sayısı da artmaktadır. Çünkü bilinmeyen sayısının artması daha doğru sonuç alınmasını sağlamaktadır. Bu durum büyük saçıcıların saçılım problemlerinin moment metodu ile çözülmesini zorlaştırmaktadır. Bunu göstermek için yarıçap değerleri 1λ, 2λ, 3λ, 5λ ve 6λ olan

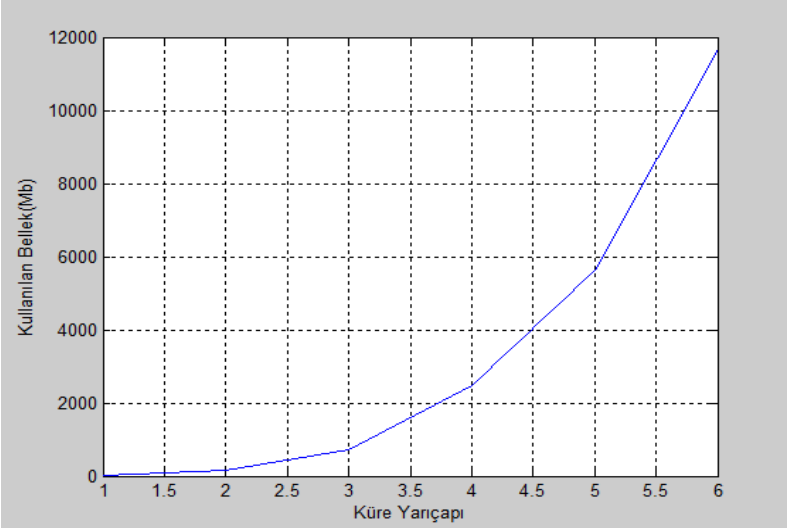
mükemmel iletkenliğe sahip kürelerin yüzey akımları moment metodu kullanılarak hesaplanmış ve çözüm için gereken işlem süreleri ve bellek kullanım miktarları tespit edilmiştir. Sonuçlar çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Farklı büyüklüklerdeki küreler için MoM ile saçılım problemi çözümü

Küre Yarıçapı	N	P	Empedans matrisinin oluşturulması ve çözümü(sn)	Toplam Süre(sn)	Max. Akım(A)	Toplam Akım(A)	Empedans Matrisin Bellekteki Alanı
1 λ	512	768	2.55	4.95	0.006783	1.6414 A	9 Mb
2 λ	2048	3072	33.46	51.96	0.010615	6.3550 A	144 Mb
3 λ	4608	6912	190.27	362.4	0.009524	13.168 A	728 Mb
4 λ	8176	12264	300.67	778.46	0.008593	22.382 A	2.24 Gb
5 λ	12800	19200	949.74	2170.35	0.010888	29.654 A	5.5 Gb
6 λ	18430	27645	3642.89	6125.48	0.013012	51.103 A	11.4 Gb

Çizelge 4.1.'de de görüldüğü gibi saçıcı boyutları büyüdükçe doğru sonuca ulaşmak için N arttırılmakta ve P büyümektedir. Bilinmeyen sayısı, RWG kenar elemanları sayısına eşit olduğu için P değeri N değerinden farklı çıkmaktadır. P arttıkça empedans matrisinin boyutları da P x P olduğundan dolayı oldukça artmaktadır. Çizelge 4.1'de empedans matrisinin boyutlarının artmasıyla beraber çözüm için gereken işlem süresinin ve kullanılan bellek miktarının nasıl hızlı bir şekilde büyüdüğü görülmektedir. Aynı zamanda yarıçap değerleri 1λ, 2λ, 3λ, 5λ ve 6λ olan mükemmel iletkenliğe sahip kürelerin yüzey akımları moment metodu kullanılarak hesaplanmış ve çizelge 4.1'de maksimum yüzey akımları ile yüzey akımlarının toplam büyüklüğü gösterilmiştir.

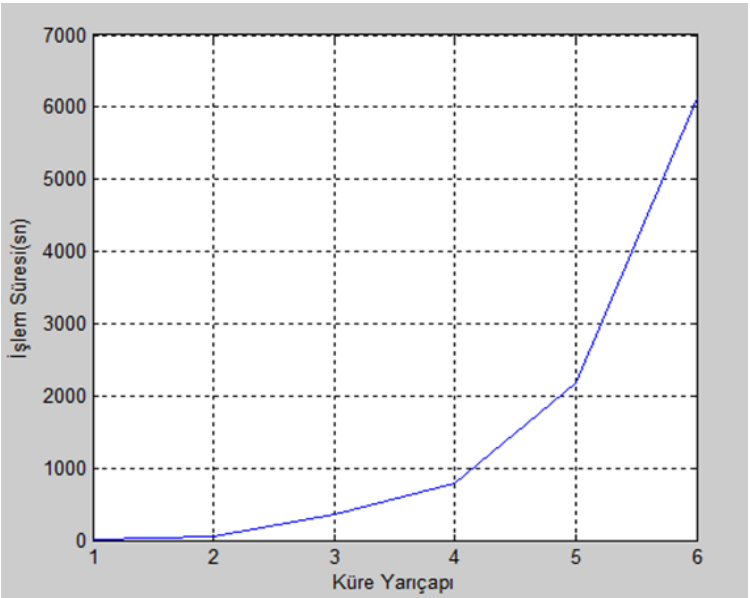
Saçıcı boyutunun değişimiyle beraber problemin MoM çözümünde gereken işlem zamanı ve bellek gereksinimi değişiminin görülebilmesi için bir kürenin farklı elektriksel büyüklüklerde nasıl sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Saçıcı kürenin yarıçap değerlerinin değiştirilmesi durumunda bellek gereksinimindeki değişimler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil.4.10. Küre yarıçapının artmasıyla beraber kullanılan bellek miktarının değişimi

Şekil.4.10'da, saçıcı kürenin yarıçap değerinin arttırılmasıyla beraber kullanılan bellek miktarındaki artış gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de sunulan veriler kullanılarak hazırlanan bu grafik, elektromanyetik saçılım problemlerinin MoM ile çözümünde saçıcı boyutlarının büyümesiyle beraber matris denklemlerinin çözümü için gereksinim duyulan bellek miktarının oldukça artış gösterdiğini ispatlamaktadır.

Saçıcı bir kürenin yarıçap değerinin arttırılmasıyla beraber işlem süresindeki değişimler ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil.4.11. Küre yarıçapının artmasıyla beraber gerekli işlem süresinin değişimi

Şekil.4.11'de, saçıcı kürenin yarıçap değerinin arttırılmasıyla beraber problemin çözümü için gerekli işlem süresindeki artış gösterilmiştir. Çizelge 4.1'de sunulan veriler kullanılarak hazırlanan bu grafik, elektromanyetik saçılım problemlerinin MoM ile çözümünde saçıcı boyutlarının büyümesiyle beraber matris denklemlerinin çözümü için gerekli işlem süresinin oldukça artış gösterdiğini ispatlamaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektromanyetik saçılım problemlerinin nümerik yöntemlerle çözümünde saçıcının elektriksel boyutlarının büyümesi bilinmeyen sayısını arttırmakta ve bu da çözümün çok daha fazla zaman almasına ve önemli miktarda bellek kullanımına neden olmaktadır. Bu durum, elektromanyetik saçılım problemlerinde büyük saçıcılar için moment metodunun kullanımını zorlaştırmaktaydı. Fakat günümüzde bilgisayar teknolojisinin büyük bir hızla gelişmesi elektromanyetik saçılım problemlerinin nümerik yöntemlerle çözümü konusunu tekrar cazip hale getirmiştir. Artan bellek miktarları ve hızlanan işlemciler daha büyük saçıcıların çözümüne olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada, üç boyutlu saçıcılarda elektromanyetik saçılım problemleri bir integral denklemi yöntemi olan moment metodu ile çözülmüştür. Farklı elektriksel büyüklüklere sahip küre, kutu ve silindirik saçıcıların formülasyonu, diskritizasyonu gerçekleştirilmiş, taban ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonu kullanılmış, moment metodu denklemleri ile empedans matrisi elde edilmiş ve son olarak empedans matrisi kullanılarak yüzey akım dağılımları bulunmuştur. Saçıcı boyutları mevcut bilgisayarın çözebileceği son büyüklüğe kadar kademeli olarak arttırılmış ve problemin çözümü için gerekli işlem zamanı ve bellek miktarının tespiti sağlanmıştır.

Çalışmada, üç boyutlu saçıcıların yüzeyleri delaunay yöntemi kullanılarak üçgensel olarak bölmelendirilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için “iso2mesh” açık kaynak kodu kullanılmıştır. Hem açık hem de kapalı geometrilere uygulanabildiğinden dolayı formülasyon için EFIE yöntemi tercih edilmiştir. İşlem kolaylığı sağlaması açısından saçıcılar mükemmel iletken seçilerek hacim akımları yerine yüzey akım denklemlerinin kullanımı sağlanmıştır. Taban ve test fonksiyonu olarak RWG fonksiyonu kullanılmıştır. RWG fonksiyonları ile genişletilen integral denklemleri moment metodu ile lineer denklemlere dönüştürülerek matris denklemi formu elde edilmiştir. Küre, kutu ve silindir saçıcıların matris denklemlerinin çözülmesi ile yüzey akım dağılımları hesaplanmıştır. Farklı büyüklüklerdeki saçıcılarda empedans matrisinin elde edilmesi için geçen işlem süreleri ve gereksinim duyulan bellek miktarları tespit edilmiştir. Saçıcı boyutlarının büyümesi ile beraber saçılım

probleminin çözümü için moment metodunun oldukça fazla işlem süresi ve bellek kullanımı gerektirdiği görülmüştür.

Bu çalışmanın devamı olarak üç boyutlu saçıcılar mükemmel iletken yerine farklı elektriksel ve manyetik geçirgenliğe sahip malzemelerden seçilebilirler. Bu durumda optimum sonuçlar için problemin formülasyonunun nasıl yapılacağı araştırılabilir. Farklı taban fonksiyonları kullanılarak saçılım probleminin çözümünde işlem süresi ve bellek gereksiniminin nasıl değiştiği, seyrek matris elde etmek için problemin tabiatına uygun taban fonksiyonlarının nasıl seçileceği ve kullanılacağı ile ilgili çalışmalar yapılabilir. İntegral denklemlerine geleneksel moment metodu uygulandıktan sonra elde edilen empedans matrislerine veri sıkıştırma ve indirgeme amacıyla dalgacık dönüşümü gibi işaret işleme teknikleri uygulanarak yoğun matrislerin seyrek matrislere dönüştürülmesi ve bunun bellek gereksinimiyle çözüm süresine katkısı araştırılabilir.

6. KAYNAKLAR

Arfken, G.B. ve Weber, H.J. 1995. Mathematical Methods for Physicsts, San Diego, Academic Press.

Catedra, M.F. ve Torres, R.F., et al. 1995. CG-FFT Method: Application of signal processing techniques to electromagnetics, , Artech House incor., pages 105-186.

Chew, W.C., Jiw, J.M., Lu, C.C., Michielssen, E., ve Song, J.M. 1997. Fast solution methodein Electromagnetics, IEEE Trans. on Antennas and Propagation, vol. 45, no. 3, pp. 533-543.

Eibert, T. F. ve Hansen, V. 1995. On the calculation of potential integrals for linear source distributions on triangular domains, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-43, no. 12, pp. 1499-1502.

Fang, Q. 2012. iso2mesh: a 3D surface and volumetric mesh generator for MATLAB/Octave. Erişim: [http://iso2mesh.sourceforge.net/cgi-bin/index.cgi]. Erişim Tarihi: 22.06.2014.

Harrington, R.F. 1968. Field computation by moment methods, Mcmillan, New York, (reprinted by IEEE Press, 1993).

Makarov, S.N. 2002. Antenna and EM modeling with matlab. John Wiley and Sons Inc, 273, New York.

Mautz J. R. ve Harrington R. F. 1978. H-field, E-field, and combined-field solutions for conducting bodies of revolution,"*AE¨U*, vol. 32, pp. 157–164.

Peterson, A.F., Scott, R.L. ve Mittra, R. 1998. Computational methods of electromagnetic scattering, IEEE Computer Society Press, pages 415-459.

Poggio, A.J. ve Miller, E.K. 1973. "Integral equation solutions of three-dimensional scattering problems" in Computer techniques for electromagnetics, Ed. Mittra, R., ch. 4, pages 159-264, Pergamon, Oxford.

Poulsen, S. 1999. Notes for seminars on computational electromagnetics: The method of moments.

6. KAYNAKLAR

Rao, S.M., Wilton, D. R., ve Glisson, A. W. 1982. Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape, *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-30, no. 3, pp. 409-418.

EKLER

Ek-1. Elektrik alan integral denklemlerinin RWG taban fonksiyonu kullanılarak MoM ile çözümünün sağlanması için kullanılan Matlab kodlarıdır. "RWG1"," RWG2", "RWG3", "RWG4", "RWG5" skriptlerini; impmet ve Bellek_Hesapla fonksiyonlarını içermektedir.

RWG1.m

```
%RWG1 Geometrik Hesaplamalar
%   Girdi olarak iso2mesh kullanılarak oluşturulan mesh dosyalarını kullanır (Örneğin:
%kure_1.mat)
%
%   İlk kenar düğüm numarası            Edge_(1,1:EdgesTotal)
%   ikinci kenar düğüm numarası         Edge_(2,1:EdgesTotal)
%   Artı üçgen numarası                    TrianglePlus(1:EdgesTotal)
%   Eksi üçgen numarası                    TriangleMinus(1:EdgesTotal)
%   Kenar uzunluğu                        EdgeLength(1:EdgesTotal)
%   Üçgen alanı                             Area(1:TrianglesTotal)
%   Üçgen merkezi                  Center(1:TrianglesTotal)
%

clear all

load('kure_2');

tic;

TrianglesTotal=length(t);

% Farklı üçgenlerin alanlarını hesapla
for m=1:TrianglesTotal
  N=t(1:3,m);
  Vec1=p(:,N(1))-p(:,N(2));
  Vec2=p(:,N(3))-p(:,N(2));
  Area(m) =norm(cross(Vec1,Vec2))/2;
  Center(:,m)=1/3*sum(p(:,N),2);
end

sum(Area)
length(t)
% Tüm kenar elemanlarını bul
Edge_=[];
n=0;
for m=1:TrianglesTotal
   N=t(1:3,m);
   for k=m+1:TrianglesTotal
      M=t(1:3,k);
      a=1-all([N-M(1) N-M(2) N-M(3)]);
      if(sum(a)==2)
         n=n+1;
         Edge_=[Edge_ M(find(a))];
         TrianglePlus(n)=m;
```

```
          TriangleMinus(n)=k;
       end;
    end
end
EdgesTotal=length(Edge_);


%Kenar uzunluğunu hesapla
for m=1:EdgesTotal
  EdgeLength(m)=norm(p(:,Edge_(1,m))-p(:,Edge_(2,m)));
end

toc

%Sonuçları kaydet
save mesh1  p ...
          t ...
          Edge_ ...
          TrianglesTotal ...
          EdgesTotal ...
          TrianglePlus ...
          TriangleMinus ...
          EdgeLength ...
          Area ...
          Center
```

RWG2.m

```
%RWG2 Geometrik hesaplamalar
%   RWG1'in ürettiği dosyayı girdi olarak alır (mesh1.mat).
%
%
%   Aşağıdaki RWG elemanlarını oluşturur:
%
%  "artı" üçgeninin serbest köşesinden üçgenin merkezine olan vektör,
%                              RHO_Plus(1:3,1:EdgesTotal)
%
%   "eksi" üçgeninin merkezinden üçgenin serbest köşesine olan vektör,
%                              RHO_Minus(1:3,1:EdgesTotal)
%
%   dokuz alt üçgenin merkez noktaları,
%                              Center_(1:3,1:9,1:TrianglesTotal)

% "artı" üçgenin serbest köşesinden dokuz altüçgenin orta noktalarına olan rho_c_plus vektör
%                           RHO__Plus(1:3,1:9,1:EdgesTotal)


% dokuz altüçgenin orta noktlarından "eksi" üçgenin serbest köşesine olan rho_c_minus vekt.
%                           RHO__Minus(1:3,1:9,1:EdgesTotal)
%

clear all
```

```
% veriyi yükle
load('mesh1')
%dokuz alt üçgenin merkez noktalarını bul
tic;
IMT=[];
for m=1:TrianglesTotal
   n1=t(1,m);
   n2=t(2,m);
   n3=t(3,m);
   M=Center(:,m);
   r1=    p(:,n1);
   r2=    p(:,n2);
   r3=    p(:,n3);
   r12=r2-r1;
   r23=r3-r2;
   r13=r3-r1;
   C1=r1+(1/3)*r12;
   C2=r1+(2/3)*r12;
   C3=r2+(1/3)*r23;
   C4=r2+(2/3)*r23;
   C5=r1+(1/3)*r13;
   C6=r1+(2/3)*r13;
   a1=1/3*(C1+C5+r1);
   a2=1/3*(C1+C2+M);
   a3=1/3*(C2+C3+r2);
   a4=1/3*(C2+C3+M);
   a5=1/3*(C3+C4+M);
   a6=1/3*(C1+C5+M);
   a7=1/3*(C5+C6+M);
   a8=1/3*(C4+C6+M);
   a9=1/3*(C4+C6+r3);
   Center_(:,:,m)=...
      [a1 a2 a3 a4 a5 a6 a7 a8 a9];
end
%artı
for m=1:EdgesTotal
   NoPlus=TrianglePlus(m);
   n1=t(1,NoPlus);
   n2=t(2,NoPlus);
   n3=t(3,NoPlus);
   if((n1~=Edge_(1,m))&&(n1~=Edge_(2,m))) NODE=n1; end;
   if((n2~=Edge_(1,m))&&(n2~=Edge_(2,m))) NODE=n2; end;
   if((n3~=Edge_(1,m))&&(n3~=Edge_(2,m))) NODE=n3; end;
   FreeVertex=p(:,NODE);

   RHO_Plus(:,m)   =+Center(:,NoPlus)-FreeVertex;
   % "artı" üçgenin 9 adet rho'su
   RHO__Plus(:,:,m)  =...
      +Center_(:,:,NoPlus)-repmat(FreeVertex,[1 9]);
end
%eksi
for m=1:EdgesTotal
```

```
   NoMinus=TriangleMinus(m);
   n1=t(1,NoMinus);
   n2=t(2,NoMinus);
   n3=t(3,NoMinus);
   if((n1~=Edge_(1,m))&(n1~=Edge_(2,m))) NODE=n1; end;
   if((n2~=Edge_(1,m))&(n2~=Edge_(2,m))) NODE=n2; end;
   if((n3~=Edge_(1,m))&(n3~=Edge_(2,m))) NODE=n3; end;
   FreeVertex=p(:,NODE);

   RHO_Minus(:,m)   =-Center(:,NoMinus) +FreeVertex;
   % "eksi" üçgenin 9 adet rho'su
   RHO__Minus(:,:,m)=...
      -Center_(:,:,NoMinus)+repmat(FreeVertex,[1 9]);
end
toc
%Sonuçları kaydet
save mesh2  p ...
         t ...
         TrianglesTotal ...
         EdgesTotal ...
         Edge_ ...
         TrianglePlus ...
         TriangleMinus ...
         EdgeLength ...
         Area ...
         RHO_Plus ...
         RHO_Minus ...
         RHO__Plus ...
         RHO__Minus ...
         Center ...
         Center_
```

RWG3.m

```
%RWG3  IMPMET fonksiyonunu kullanarak empedans matrisi hesaplar
%   Girdi olarak RWG2'nin oluşturduğu mesh2.mat dosyasını kullanır.
%
%   Frekans (Hz)                f
%   Dielektrik sabiti (SI)      epsilon_
%   Magnetik geçirgenlik (SI)   mu_
%

clear all
%veriyi yükle
load('mesh2');

%EM parametreleri (f=300 MHz)
f          =3e8;
epsilon_   =8.854e-012;
mu_        =1.257e-006;
%ışık hızı
c_=1/sqrt(epsilon_*mu_);
```

```
%boş uzay empedansı
eta_=sqrt(mu_/epsilon_);

%empedans matris hesaplamasında kullanılacak bazı parametreler;

omega       =2*pi*f;
k           =omega/c_;
K           =j*k;
Constant1   =mu_/(4*pi);
Constant2   =1/(j*4*pi*omega*epsilon_);
Factor      =1/9;

FactorA     =Factor*(j*omega*EdgeLength/4)*Constant1;
FactorFi    =Factor*EdgeLength*Constant2;

for m=1:EdgesTotal
   RHO_P(:,:,m)=repmat(RHO_Plus(:,m),[1 9]);   %[3 9 EdgesTotal]
   RHO_M(:,:,m)=repmat(RHO_Minus(:,m),[1 9]);  %[3 9 EdgesTotal]
end
FactorA=FactorA.';
FactorFi=FactorFi.';

%Z empedans matrisi
tic; %zamanlayıcıyı başlat

Z=  impmet( EdgesTotal,TrianglesTotal,...
          EdgeLength,K,...
          Center,Center_,...
          TrianglePlus,TriangleMinus,...
          RHO_P,RHO_M,...
          RHO__Plus,RHO__Minus,...
          FactorA,FactorFi);

toc  % geçen süre
ByteSize(Z);
%Gelen dalga
%Örnek: d=[0 0 -1] şeklinde olursa gelen dalga –z yönünde demektir
%düzlemsel - normal

d       =[0 0 1];
Pol     =[1 0 0];

k=omega/c_;
kv=k*d;

for m=1:EdgesTotal
  ScalarProduct=sum(kv.*Center(:,TrianglePlus(m))');
  EmPlus =Pol.'*exp(-j*ScalarProduct);
  ScalarProduct=sum(kv.*Center(:,TriangleMinus(m))');
  EmMinus=Pol.'*exp(-j*ScalarProduct);
  ScalarPlus =sum(EmPlus.* RHO_Plus(:,m));
  ScalarMinus=sum(EmMinus.*RHO_Minus(:,m));
  V(m)=EdgeLength(m)*(ScalarPlus/2+ScalarMinus/2);
```

```
End

ByteSize(Z);


%Sonuçları kaydet
%FileName='impedance.mat';
%save(FileName, 'f','omega','mu_','epsilon_','c_', 'eta_','Z');
```

RWG4.m

```
%RWG4 Saçılım problemi için MoM denklemlerini çözer
%   Girdi olarak RWG2'den mesh2.mat dosyasını ve RWG3'ten impedance.mat dosyasını
%kullanır
%
%   Voltaj vektörü V'yi hesaplar;
%                                   V(1:EdgesTotal)

%   Gelen dalganın kartezyen koordinattaki yönü;
%                                   d(1:3);

%   Gelen düzlemsel dalgadaki elektrik alanın kartezyen koordinattaki yönü;
%                                     Pol(1:3);
%

clear all

% veriyi yükle
load('mesh2');
load('impedance');

%Gelen dalga
%Örnek: d=[0 0 -1] şeklinde olursa gelen dalga –z yönünde demektir
%düzlemsel - normal

d       =[1 0 0];
Pol     =[1 0 0];


k=omega/c_;
kv=k*d;

for m=1:EdgesTotal
   ScalarProduct=sum(kv.*Center(:,TrianglePlus(m))');
   EmPlus =Pol.'*exp(-j*ScalarProduct);
   ScalarProduct=sum(kv.*Center(:,TriangleMinus(m))');
   EmMinus=Pol.'*exp(-j*ScalarProduct);
   ScalarPlus =sum(EmPlus.* RHO_Plus(:,m));
   ScalarMinus=sum(EmMinus.*RHO_Minus(:,m));
   V(m)=EdgeLength(m)*(ScalarPlus/2+ScalarMinus/2);
```

```
end

tic;
% Sistemin çözümü
I=Z\V.';

toc;

FileName='current.mat';
save(FileName, 'f','omega','mu_','epsilon_','c_', 'eta_','I','V','d','Pol');
```

RWG5.m

```
%RWG5 yüzey akım büyüklüklerinin görsel olarak sunar
%   Girdi olarak RWG2'den mesh2.mat ve RWG4'ten current.mat dosyasını kullanır

clear all

%veriyi yükle
load('mesh2');
load('current');

t(4,:)=1;
Index=find(t(4,:)<=1);
Triangles=length(Index);

%Her üçgen için akım yoğunluğunu bul
for k=1:Triangles
   i=[0 0 0]';

   for m=1:EdgesTotal
      IE=I(m)*EdgeLength(m);
      if(TrianglePlus(m)==k)
         i=i+IE*RHO_Plus(:,m)/(2*Area(TrianglePlus(m)));
      end
      if(TriangleMinus(m)==k)
         i=i+IE*RHO_Minus(:,m)/(2*Area(TriangleMinus(m)));
      end
   end

   CurrentNorm(k)=abs(norm(i));
end


Jtotal=max(CurrentNorm);
MaxCurrent=strcat(num2str(Jtotal),'[A/m]')
klm = sum(CurrentNorm)
CurrentNorm1=CurrentNorm/max(CurrentNorm);
for m=1:Triangles
```

```
   N=t(1:3,m);
   X(1:3,m)=[p(1,N)]';
   Y(1:3,m)=[p(2,N)]';
   Z(1:3,m)=[p(3,N)]';
end
C=repmat(CurrentNorm1,3,1);


h=fill3(X, Y, Z,C); %lineer skala
colormap gray;
axis('equal');
rotate3d
```

impmet Fonksiyonu:

```
function [Z]=      impmet( EdgesTotal,TrianglesTotal,...
                   EdgeLength,K,...
                   Center,Center_,...
                   TrianglePlus,TriangleMinus,...
                   RHO_P,RHO_M,...
                   RHO__Plus,RHO__Minus,...
                   FactorA,FactorFi);

% IMPMET
%   Kompleks empedans matrisini döndürür [EdgesTotal x EdgesTotal]
%   Her üçgen için 9 integrasyon noktası vardır
%
%   Empedans matrisi ayrık üçgenlerin katkılarının toplanması ile hesaplanır
%

% Hafıza ayırma
Z   =zeros  (EdgesTotal,EdgesTotal)+j*zeros(EdgesTotal,EdgesTotal);


for p=1:TrianglesTotal

   Plus     =find(TrianglePlus-p==0);
   Minus    =find(TriangleMinus-p==0);

   D=Center_-repmat(Center(:,p),[1 9 TrianglesTotal]); %[3 9 TrianglesTotal]

   R=sqrt(sum(D.*D));                    %[1 9 TrianglesTotal]
   g=exp(-K*R)./R;                       %[1 9 TrianglesTotal]

   gP=g(:,:,TrianglePlus);               %[1 9 EdgesTotal]
   gM=g(:,:,TriangleMinus);              %[1 9 EdgesTotal]

   Fi=sum(gP)-sum(gM);                   %[1 1 EdgesTotal]
   ZF= FactorFi.*reshape(Fi,EdgesTotal,1);        %[EdgesTotal 1]
```

```
    for k=1:length(Plus)
        n=Plus(k);
        RP=repmat(RHO__Plus(:,:,n),[1 1 EdgesTotal]);          %[3 9 EdgesTotal]
        A=sum(gP.*sum(RP.*RHO_P))+sum(gM.*sum(RP.*RHO_M));
        Z1= FactorA.*reshape(A,EdgesTotal,1);
        Z(:,n)=Z(:,n)+EdgeLength(n)*(Z1+ZF);
    end

    for k=1:length(Minus)
        n=Minus(k);
        RP=repmat(RHO__Minus(:,:,n),[1 1 EdgesTotal]);         %[3 9 EdgesTotal]
        A=sum(gP.*sum(RP.*RHO_P))+sum(gM.*sum(RP.*RHO_M));
        Z1= FactorA.*reshape(A,EdgesTotal,1);
        Z(:,n)=Z(:,n)+EdgeLength(n)*(Z1-ZF);
    end
end
```

Bellek_Hesapla Fonksiyonu

```
function Bellek_Hesapla(in, fid)
% BYTESIZE Toplam bellek kullanım miktarını hesaplar

if nargin == 1 || isempty(fid)
    fid = 1;
end

s = whos('in');
fprintf(fid,[Bytes2str(s.bytes) '\n']);
end

function str = Bytes2str(NumBytes)

scale = floor(log(NumBytes)/log(1024));

switch scale
    case 0
        str = [sprintf('%.0f',NumBytes) ' b'];
    case 1
        str = [sprintf('%.2f',NumBytes/(1024)) ' kb'];
    case 2
        str = [sprintf('%.2f',NumBytes/(1024^2)) ' Mb'];
    case 3
        str = [sprintf('%.2f',NumBytes/(1024^3)) ' Gb'];
    case 4
        str = [sprintf('%.2f',NumBytes/(1024^4)) ' Tb'];
    case -inf

        str = 'Not Available';
    otherwise
```

```
        str = 'Over a petabyte!!!';
    end
    end
```

Ek-2. Bölmelendirme programı iso2mesh kütüphanesinden kullanılan fonksiyonlar bulunmaktadır. Bunlar meshasphere, meshacylinder ve meshabox fonksiyonlarıdır.

meshasphere Fonksiyonu:

```
function [node,face,elem]=meshasphere(c0,r,tsize,maxvol);
%
% bir küre için yüzeysel ve tetrahedral bölmelendirme yapar
%
%  Giriş parametreleri:
%   c0:  kürenin merkez koordinatları (x0,y0,z0)
%   r:   kürenin yarıçapı
%   tsize: küre üzerindeki maksimum üçgen alanı
%   maxvol: tetrahedral elemanın maksimum hacmi
%
%  Çıkış parametreleri:
%   node: sırasıyla x, y, z olmak üzere düğüm koordinatları
%   face: NB x 3 boyutlu olup, her satır  bir yüzey segmenti yüz elemanını verir
%   elem:NE x 4 boyutlu olup, her satır bir tetrahedronu ifade eder
%

if(nargin<3)
   error('you must at least provide c0, r and tsize');
end
if(nargin==3)
   maxvol=tsize*tsize*tsize;
end
if(nargout==3)
   [node,face,elem]=meshunitsphere(tsize/r,maxvol/(r*r*r));
else
   [node,face]=meshunitsphere(tsize/r);
end

node=node*r+repmat(c0(:)',size(node,1),1);
```

meshacylinder Fonksiyonu:

```
function [node,face,elem]=meshacylinder(c0,c1,r,tsize,maxvol,ndiv)
%
% [node,face]=meshacylinder(c0,c1,r,tsize,maxvol,ndiv)
%    ya da
% [node,face,elem]=meshacylinder(c0,c1,r,tsize,maxvol,ndiv)
%
%  3 boyutlu bir silindir için yüzeysel veya tetrahedral bölmelendirme gerçekleştirir
%
% Giriş:
%   c0, c1:  silindirin başlangıç ve bitiş noktaları
%   r:   silindir yarıçapı
%   tsize: maksimum yüzey üçgeni büyüklüğü
```

```
%   maxvol: tetrahedral elemanın maksimum hacmi
%   ndiv: 20 olarak kabul edilir
%
%  Çıkış:
%   node: sırasıyla x, y, z olmak üzere düğüm koordinatları
%   face: NB x 3 boyutlu olup, her satır  bir yüzey segmenti yüz elemanını verir
%   elem:NE x 4 boyutlu olup, her satır bir tetrahedronu ifade eder

if(nargin<3)
   error('you must at least provide c0, c1, and r');
end
if(r<=0 || all(c0==c1))
   error('invalid cylinder parameters');
end
c0=c0(:);
c1=c1(:);
len=sqrt(sum((c0-c1).*(c0-c1)));

v0=c1-c0;

if(nargin<6) ndiv=20; end

dt=2*pi/ndiv;
theta=dt:dt:2*pi;
cx=r*cos(theta);
cy=r*sin(theta);
p0=[cx(:) cy(:) zeros(ndiv,1)];
p1=[cx(:) cy(:) len*ones(ndiv,1)];
pp=[p0;p1];
no=rotatevec3d(pp,v0)+repmat(c0',size(pp,1),1);

count=1;
for i=1:ndiv-1
  fc{count}={[i i+ndiv i+ndiv+1 i+1],1}; count=count+1;
end
i=ndiv;
fc{count}={[i i+ndiv 1+ndiv 1],1}; count=count+1;
fc{count}={1:ndiv,2};count=count+1;
fc{count}={1+ndiv:2*ndiv,3};count=count+1;

if(nargin==3)
   tsize=len/10;
end
if(nargin<5)
   maxvol=tsize*tsize*tsize;
end
[node,elem,face]=surf2mesh(no,fc,min(no),max(no),1,maxvol,[0 0 1],[],0);
```

meshabox Fonksiyonu

```
function [node,face,elem]=meshabox(p0,p1,opt,nodesize)
%
```

```
% 3 boyutlu bir kutu için yüzeysel veya tetrahedral bölmelendirme gerçekleştirir
%
%   Giriş:
%   p0:  kutu köşegeninin bitiş noktalarından birinin koordinatları(x,y,z)
%   p1:  kutu köşegeninin diğer bitiş noktasının koordinatları(x,y,z)
%   opt: tetrahedral elemanların maksimum hacmi
%   nodesize: 1 ya da 8x1'lik dizi olmak üzere, her köşe noktasının yakınındaki elemanın
%büyüklüğü
%
%  Çıkış:
%   node: sırasıyla x, y, z olmak üzere düğüm koordinatları
%   face: NB x 3 boyutlu olup, her satır  bir yüzey segmenti yüz elemanını verir
%   elem:NE x 4 boyutlu olup, her satır bir tetrahedronu ifade eder
%

if(nargin<4)
  nodesize=1;
end
[node,elem,face]=surf2mesh([],[],p0,p1,1,opt,[],[],nodesize);
elem=elem(:,1:4);
face=face(:,1:3);
```

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı: Hüseyin ÖZMEN

Doğum Yeri: Güney/Denizli

Doğum Tarihi: 28.03.1987

Medeni Hali: Evli

Yabancı Dili: İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Çınar Lisesi / Çınar, 2004

Lisans: Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği /Diyarbakır,2009

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

Şırnak Üniversitesi

Araştırma Görevlisi (2010-2011), Şırnak

Batman Üniversitesi

Araştırma Görevlisi (2011-2014), Batman

Dicle Üniversitesi Üniversitesi

Araştırma Görevlisi (2014-Halen), Diyarbakır