İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY EMPEDANSI YÖNTEMİ İLE DUVAR ARKASI CİSİM TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinem AVCI

Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN

Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim

Programı : Herhangi Program

HAZİRAN 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY EMPEDANSI YÖNTEMİ İLE DUVAR ARKASI CİSİM TESPİTİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sinem AVCI
(504111334)

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Telekomünikasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim
Programı : Herhangi Program

MAYIS 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111334 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Sinem AVCI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **" YÜZEY EMPEDANSI YÖNTEMİ İLE DUVAR ARKASI CİSİM TESPİTİ "** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Ali YAPAR İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Ar. Gör. Ethem GÜRER İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihİ : **03 Mayıs 2013**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2013**

Tüm Sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Tezimi hazırlama aşamasında yardımlarını, bilgi ve ilgilerini eksik etmeyen değerli danışman hocam Prof.Dr. İbrahim Akduman' a teşekkür ederim.
Çalışmalarımda, yardıma ihtiyaç duyduğum her anda sorularımı cevaplayan Onan Güren'e ve İstanbul Teknik Üniversitesi Elektromanyetik Araştırma Grubu çalışanlarına teşekkür ederim.
Son olarak, bu süreçte her zaman yanımda olan arkadaşlarıma ve benden desteğini ve ilgisini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Haziran 2013

Sinem Avcı
(Elektronik ve Haberleşme Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **iii**
ÖZET ..... **vii**
SUMMARY ..... **ix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 1
1.2 Literatür Çalışması 2
2. DUVAR ARKASINA YERLEŞTİRİLEN CİSİMLERİN TESPİTİ İÇİN ANALİTİK ÇÖZÜM **5**
2.1 Problemin Geometrisi ve Formülasyonu 5
2.2 Üç Katmanlı Düzlemde Green Fonksiyonu İfadesi 8
2.3 Moment Metodu (MoM) ile Saçılan Alanın Hesaplanması 13
2.4 Cisimlerin Tespit Edilmesinde Empedans Sınır Koşulunun Kullanılması 15
3. DUVAR ARKASINA YERLEŞTİRİLEN CİSİMLERİN TESPİTİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR **17**
3.1 Ölçüm Düzeneği 17
3.2 Problemin Geometrisi ve Gösterimi 18
3.3 Ölçülen Elektrik Alanın Yüzeye Taşınması 19
4. İÇ ÇARPIM ve YÜZEY EMPEDANS BİLGİSİNİN İÇ ÇARPIMI **21**
5. SAYISAL SONUÇLAR **23**
5.1 Green Fonksiyonlarının Doğrulanması 23
5.2 Referans Obje ile Verilerin Oluşturulması 24
5.3 Referans Objenin Empedans Bilgisi ile Ölçüm Sonuçları ile Elde Edilen Empedans Bilgilerinin Çarpımı 26
5.4 Test Verilerinin Oluşturulması 29
5.5 Referans Objenin Empedans Bilgisi ile Oluşturulan Test Verilerinin Empedans Bilgilerinin Çarpımı 30
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **35**
KAYNAKLAR **37**
ÖZGEÇMİŞ **38**

KISALTMALAR

SAR	**:** Syntetic Aperture Radar
UWB	**:** Ultra- Wide Band
MoM	**:** Method of Moments
SIBC	**:** Standard Impedance Boundary Condition
TWI	**:** Through Wall Imaging
FEM	**:** Finite Elements Method

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Düz saçılım probleminin geometrisi……... 3
Şekil 2.2 : Üç katmanlı Green fonksiyonun elde edilmesi……... 5
Şekil 2.3 : Kompleks ϑ düzleminde $\widehat{G}$ regülerlik bandı……..... 9
Şekil 2.4 : MoM ile sayısallaştırma yapılırken kullanılan hücre yapısı……... 10
Şekil 3.1 : Kurulan ölçüm düzeneğinden bir görünüm……..... 14
Şekil 3.2 : Kurulan ölçüm düzeneğinin geometrik gösterimi……... 19
Şekil 5.1 : G_{11}fonksiyonunun analitik çözümüyle simülasyon çözümünün karşılaştırılması……..... 24
Şekil 5.2 : Ölçüm sonuçlarının 3.0 GHz'e ait yüzey empedans grafiği…….. 25
Şekil 5.3 : Referans objenin 3.0 GHz'e ait yüzey empedans……... 26
Şekil 5.4 : 1.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu……..... 27
Şekil 5.5 : 2.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu…….. 27
Şekil 5.6 : 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu……..... 28
Şekil 5.7 : Referans objenin farklı dielektrik sabitleri ile hesaplanmış yüzey empedans bilgileri ile ölçüm sonuçlarının empedans bilgisinin 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu…… 29
Şekil 5.8 : Oluşturulan test sisteminin 3.0 GHz'e ait yüzey empedans grafiği… 30
Şekil 5.9 : Farklı dielektrik sabitlerine sahip $\varepsilon_{obj} = 5{,}9{,}9$ objelerin, dielektrik sabiti $\varepsilon_{ref} = 4$ ve $\varepsilon_{ref} = 6$ olan referans objeler ile 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu…… 31
Şekil 5.10: Farklı dielektrik sabitlerine sahip $\varepsilon_{obj} = 7{,}4{,}4$ objelerin, dielektrik sabiti $\varepsilon_{ref} = 6$ ve $\varepsilon_{ref} = 9$ olan referans objelerin ile 3.0 GHz'e ait yüzey empedans bilgilerinin iç çarpım sonucu……. 32
Şekil 5.11: Oluşturulan test sistemde $\varepsilon_{obj} = 9$ olduğu durumda 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonuçları…… 33
Şekil 5.12: Oluşturulan test sistemde referans objenin şeklinin konumlandırılan şekil üzerindeki etkisinin 2.0 GHz'e ait iç çarpım sonuçları……. 34

YÜZEY EMPEDANSI YÖNTEMİ İLE DUVAR ARKASI CİSİM TESPİTİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında, duvar arkasına yerleştirilen objelerin tespit edilmesi ve yerlerinin belirlenmesi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntem için öncelikle deneysel bir düzenek kurulmuş, duvarın arkasına objeler yerleştirilmiş ve yerleştirilen bu objelerin yüzeyde oluşturduğu yüzey empedans verileri hesaplanmıştır. Daha sonra referans bir obje tanımlanmış ve ölçüm çizgisi üzerinde belirli aralıklarla hareket eden bu objenin her bir konumu için analitik olarak yüzey empedans verileri hesaplanmıştır. Ele alınan yöntem, hesaplanan bu iki empedans bilgilerinin birbirleriyle iç çarpım yöntemini temel alan bir metotla çarpılmasına dayanır.

Yüzey empedansı, doğrudan standart empedans sınır koşulu ile hesaplanır. Problemin çözümünde empedans sınır koşulunun kullanılmasının sebebi, gömülü / yerleştirilmiş cisimlerin yüzey empedansı üzerinde etkisinin olması ve bu katkılar yardımıyla cisimlerin algılanıp, yerlerinin bulunabilmesidir. Empedans sınır koşulu için gerekli bilgiler ise yüzeydeki elektrik alan ve türevi bilgisidir.

Elektromanyetik saçılma çalışmalarında ele alınan problemler düz ve ters saçılma problemi olarak ikiye ayrılmıştır. Düz saçılma problemlerinde dalga kaynağının, ortamın ve cismin tüm fiziksel özellikleri bilinir ve saçılan alan hesaplanır. Tek bir çözümü vardır ve "well posed" problem olarak adlandırılır. Ters saçılma problemi ise, dalga kaynağı ve ilgilenilen bölgedeki alan dağılımının bilinip, ortamın ya da cismin fiziksel ve geometrik özelliklerinin bulunmasına dayanır. Saçılma problemleri, uzaktan algılama ve elektromanyetik çalışmalarda oldukça önemli bir yere sahiptir. Plastik mayın tespiti, yer altı tünellerini görüntüleme, duvar arkasına görüntüleme, boru hatları, jeofizik v.b. gibi bir çok uygulamada kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, referans obje için yapılan analitik hesaplamalarda düz saçılma problemi ele alınmıştır. Oluşturulan katmanların, objelerin fiziksel ve elektromanyetik özellikleri bilinmektedir, cismin toplam alana etkisi incelenmektedir.

İlk önce deneysel ölçümler için hava/ duvar/ hava olmak üzere üç katmanlı bir ölçme sistemi oluşturulmuştur. Anten sistemi, düz ve yüzeye paralel bir çizgi üzerinde hareket ettirilmektedir. TM polarizeli çizgisel bir kaynakla verici anten tarafından aydınlatılan objeler, duvarın arkasına konumlandırılmıştır. Objelerin duvarın arkasında bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için toplam alan değerleri ölçülmştür. Problemde, empedans sınır koşulunun uygulanabilmesi için ölçülen alanın hava/duvar arayüzünde hesaplanması gerekmektedir. Fourier dönüşümü yardımıyla, duvardan h kadar uzaklıkta ölçülen alanlar yüzey üzerine analitik olarak devam ettirilerek, yüzeydeki toplam elektrik alan bilgisi elde edilir ve empedans sınır koşulu ile objelerin bulunmadığı ve bulunduğu durum için yüzey empedansları

hesaplanır. Hesaplanan iki empedansın farkı, objelerin yüzey empedansına katkısını verecektir.

Analitik hesaplamalar için, iki boyutlu uzayda hava/duvar/hava katmanlarından oluşan üç katmanlı sistem oluşturulmuş, sistem üçüncü boyutta sonsuz uzun ve homojen olduğu varsayılmış ve referans obje kare olarak alınmıştır. Obje, duvara bitişik olarak konumlandırılmış ve yüzeye paralel ve düz bir çizgi üzerinde hareket eden anten sistemi tarafından "gaussian beam" ile aydınlatılmıştır. Problem, hesaplanan üç katmanlı green fonksiyonu aracılığıyla, ikinci tip bir Fredholm integral denklemine indirgenmiştir. Bu karmaşık denklem sisteminin, doğrusal denklem sistemine indirgenmesi, bilinen bir sayısal teknik olan, MoM (Method of Moments) moment yöntemi ile gerçekleştirilir. Ölçüm çizgisi üzerinde belirli aralıklarla hareket ettirilen referans objenin her bir konumu için elektrik alan verileri ve normal türevleri moment metodu yardımıyla hesaplanır. Yüzey üzerinde hesaplanan elektrik alan bilgisi kullanılarak, standart empedans sınır koşulu ile objelerin bulunduğu ve bulunmadığı durum için yüzey empedansları bulunur ve farkları cismin empedansını verir.

Referans objelere ait elde edilen yüzey empedansları ile bir set tanımlanır. Bu set bir fonksiyon uzayının alt kümesi olarak kabul edilebilir. Gerçek ölçüm sisteminde duvar arkasına yerleştirilmiş bir objeden saçılan elektrik alan değerinin analitik devam yöntemiyle yüzey üzerinde hesaplanan yüzey empedansının, tanımlanmış setin her bir elemanı ile iç çarpım değeri hesaplanır. İç çarpım sonucunda elde edilen skaler değer iki empedans değerinin birbirine benzerliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Böylece setin tüm elemanları ile deney empedansının iç çarpımı sonucunda elde edilen en büyük değer, deneysel hesaplamada duvar arkasına yerleştirilen objenin konumu gösterir. Böylece duvar arkasına konumlandırılmış dielektrik özellikleri bilinmeyen herhangi bir cismin veya cisimlerin konum bilgileri rahatlıkla hesaplanabilir.

Bir sonraki adım olarak, duvar arkasına konumlandırılan objelerin dielektrik özellikleri, şekilleri ve boyutları hakkında bilgi edinmenin olası olup olmadığını anlamak için duvarın arkasına dielektrik özellikleri, şekilleri bilinen üç obje konumlandırılarak objelerin yüzey empedansı analitik olarak hesaplanır. Hesaplanan empedans bilgisi, referans obje ile oluşturulan yüzey empedans bilgileri ile çarpılarak, çarpım değerleri kaydedilir. Yapılan test denemeleri ile duvarın arkasındaki objelerin konum bilgisi tespit edilmiş, ancak diğer özellikleri hakkında kesin olarak bir bilgiye ulaşılamamıştır.

THROUGH-WALL-DETECTION OF OBJECTS BY SURFACE IMPEDANCE METHOD

SUMMARY

In this thesis study, a new approach is presented for detection and localization of objects hidden behind a wall. In the first step of this study, an experimental setup has been built, where objects are placed behind a wall, and surface impedance data has been evaluated for these objects. Then, a reference object has been selected and while moving the object along a measurement line with specific intervals, surface impedance data have been calculated analytically for each position of this object. The approach is based on the multiplication of these two impedance data by a method called inner product.

Surface impedance is directly acquired from impedance boundary conditions. The reason for the utilization of impedance boundary conditions in the solution of the presented problem is that the buried / placed objects affect the surface impedance and this contribution can be used to detect and localize the objects. The necessary information for the impedance boundary conditions are the electric field and the its normal derivative, on the surface.

The scattering problems in the context of electromagnetic theory is classified in two categories: direct and inverse scattering problems. In a direct scattering problem, all the physical attributes of the wave source, the medium and the objects are known and the scattered field is calculated. These type of problems have a single solution and are called "well-posed" problems. On the other hand, in an inverse scattering problem, the wave source and the electric field in the region under investigation is known and the physical and geometrical attributes of the medium or the objects are calculated. These scattering problems play an important role in the electromagnetic and remote sensing studies. Detection of plastic landmines, imaging of underground tunnels, through wall imaging, pipe line maintenance, and geophysics are some examples of the application areas.

In the presented study, a direct scattering problem is considered when calculating analytic solutions for the reference object. The physical and electromagnetic properties of the constructed layers and objects are known and the contribution of the object to the total field is investigated.

A three layer measurement system, arranged as air / wall / air, has been constructed for experimental measurements. Two broadband horn antennas, one used as a receiver and one as a transmitter, has been used in the system. A wall made of YTONG blocks has been constructed parallel to the antenna system. Stone, wood and candle have been used as objects and positioned behind and adjacent to the wall, 50 cm. away from each other. The objects have been illuminated by the transmitter antenna having a linear source with TM polarization and the scattered field data has been measured by the receiver antenna of the system. Measurements are performed on a line, lying 2.6 m away and parallel to the wall, at 801 points in the frequency range of [1 - 2.1] GHz with frequency intervals of 100 MHz. The complex S_{21}

parameter has been measured via the ports of network analyzer. The antenna system has been designed to be moved on a straight line parallel to the surface. In the beginning, measurements have been performed without placing the objects to calculate the contribution of the wall to the scattered field. In order to apply impedance boundary conditions on the air / wall interface, the electric field must be calculated on this interface. However, it is impossible to measure the electric field on the wall. The electric field data on the wall is gained by reconstructing the electric field, which is measured by the system at a height h, on the surface by using Fourier transformation. Then, by using impedance boundary conditions, surface impedance is calculated for the case which only comprises the wall contribution where objects are absent.

Same procedure is repeated by placing objects behind the wall. Then, it is possible to calculate the collective impedance data contributed by the wall and the objects. At the end of these calculations, one can look at the difference of these results and the previously calculated wall contribution to the impedance to gain the impedance data contributed by objects only. In the configuration where objects are present, the locations of the targets can easily be deduced by observing the peaks in surface impedance, which would coincide with the coordinates that the objects have been placed.

The three layer system comprising air / wall / air configuration has been constructed again for the numerical calculations. To simplify the system, surfaces has been assumed to be 1-D and the object has been selected as a square. The objects has been placed adjacent to the wall and illuminated by a gaussian beam generated by the antenna system, which may be moved freely along a straight and horizontal line. The Helmholtz wave equation is initially solved by using the boundary conditions specific to the problem.

In layered spaces, the solution of Helmholtz wave equation for the Green function is performed by Fourier type integrals. Layered spaces are inhomogeneous in one dimension. Hence, one of the dimensions is more effective on the variation of wave behaviour than the other one. The main idea behind the solution by the Fourier integrals is to identify the wave behaviour in the inhomogenous dimension and suppress it on the other dimension, and then adding the behaviour of this dimension by using inverse transformation. To evaluate the Green function, boundary conditions must be provided by using the geometry of the medium and the position of the source. These boundary conditions are radiation, Dirichlet, and Neumann type boundary conditions. This method results in the evaluation of Green function by solving the lineer equation system constructed on the said boundary conditions.

Utilizing a three layer Green function, the problem has been reduced to Fredholm integral equation of the second kind. Simplification of such complex equation system into a linear equation system is achieved by a well known numerical scheme called Method of Moments(MoM). The main formulation of the method are the integral equations derived by using Green function. First, the Green function for the investigated geometry must be derived analytically. Then, the surface current on the this structure is calculated numerically. The structure is divided into small parts(called segments) and surface currents are solved after embedded to a matrix system. In this study, the dimensions of each segment is assumed to be $\lambda/20$. The data of the electric field and its normal derivative on the surface is calculated by the method of moments for every position of the object which can be moved along the

measurement line by intervals of 5 cm. Using the electric field data which was computed on the surface, and implementing standard surface boundary conditions, the surface impedance can be calculated. This calculation is performed for both the configuration where objects are present and not present. Subtracting the surface impedance of the latter and the former results in the surface impedance of the objects. The observable peaks in the surface impedance which, in fact, coincides with the positions of the objects, can be interpreted to localize the objects.

First, a set is created, comprising the evaluated surface impedance of the reference objects. This set can be recognized as a subset of a function space. Then surface impedance of the electric field scattered from the object placed behind the wall in the experimental test setup is calculated by reconstruction on the surface. This surface impedance is multiplied by each element of the previously defined reference set by inner product method. The scalar result of the inner product is an indication of similarity of the two impedance values. This means that the largest result of the multiplications of the elements and the experimental surface impedance actually shows the location of the object. Hence, the information on the location of object, or objects, can be determined even if the dielectric properties of the objects are not known.

Next, the possibility to determine the dielectric properties, shapes and dimensions of the objects placed behind the wall is investigated. To achieve this goal, three objects with known dielectric properties, shapes and dimensions has been placed behind the wall, and the surface impedance of these objects is evaluated analytically. This calculated impedance data is multiplied by the surface impedance of the reference object and the results are stored. The performed test runs have shown that it is possible to determine the locations of the objects, however, no accurate information has been gained about other properties of these objects.

1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile saçılma problemleri, uzaktan algılama ve elektromanyetik çalışmalarda oldukça önemli bir yere gelmiştir. Plastik mayın tespiti, yer altı tünellerini görüntüleme, duvar arkasını görüntüleme, güvenlik v.b. gibi bir çok uygulamada saçılma problemleri kullanılmaktadır.

Duvar arkası görüntüleme (TWI) saklı veya ulaşılamayan objelerin elektromanyetik dalgalar sayesinde görüntülenmesi esasına dayanır. Saklı objelerin tespit edilmesi ve yerlerinin belirlenmesinin öneminden sivil veya askeri pek çok uygulamada bahsedilmektedir. Bu da duvar arkası görüntülemenin son yıllarda oldukça fazla ilgi çektiğini bize göstermektedir.

Bu tez çalışmasının birinci bölümünde tezin amacı ve tez süresi boyunca yapılan literatür araştırmalarına yer verilecektir. Bölüm 2'de düz saçılma probleminin geometrisi verilerek, problemi çözmek için gerekli olan üç katmanlı Green fonksiyonunun ifadeleri çıkartılacak, problem lineer olmayan integral denklem çözümüne indirgenecektir. Bu denklemler moment metoduyla (MoM) doğrusal denklem sistemine indirgenerek çözülecek ve empedans sınır koşuluna ait bilgiler verilecektir. Bölüm 3'te, problem için hazırlanan deney düzeneği tanıtılacak ve problemin kısa tanımı yapılacaktır. Bölüm 4'te kullanılan yöntemin tanımı yapılacak ve Bölüm 5'te de sayısal uygulamalara yer verilecektir.

Tüm çalışmalar boyunca zaman faktörü olarak e^{-iwt} alınmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, duvar arkasına yerleştirilen objeleri tespit etmek ve yerlerini belirlemektir. Önerilen yöntem sayesinde, duvar arkasına konumlandırılmış elektromanyetik ya da fiziksel özellikleri bilinmeyen objelerin konum bilgileri tespit edilebilecektir.

Bu amaç için, hava/duvar/hava bölümlerinden oluşan üç katmanlı bir sistem kurulmuş, duvarın arkasına objeler konularak, anten sistemi ile ölçümler alınmış ve

ölçülen elektrik alan bilgileri yardımıyla yüzey empedans verileri hesaplanmıştır. Daha sonra ölçüm çizgisi üzerinde belirli aralıklarla hareket eden referans objenin her bir konumu için analitik olarak yüzey empedans verileri hesaplanmış ve hesaplanan bu iki empedans bilgisi birbirleriyle iç çarpım yöntemini temel alan bir yöntemle çarpılmıştır. Empedans bilgilerinin iç çarpımı sonucunda elde edilen en büyük değer, deneysel hesaplamada duvar arkasına yerleştirilen objelerin konumu gösterir. Böylece duvar arkasına konumlandırılmış dielektrik özellikleri bilinmeyen herhangi bir objenin veya objelerin konum bilgileri rahatlıkla hesaplanabilir.

İkinci bir adım olarak, duvarın arkasına konumlandırılan objelerin dielektrik özellikleri, şekilleri hakkında bilgi edinebilmek için, duvarın arkasına elektromanyetik ve fiziksel özellikleri bilinen objeler yerleştirilmiş, analitik olarak yüzey empedans bilgileri hesaplanarak, farklı özelliklere sahip referans objelerle farklı frekanslardaki davranışı incelenerek çarpım bilgileri oluşturulmuş ancak iç çarpım sonucunda elde edilen skaler değerlerle objelerin elektromanyetik ya da fiziksel özellikleri hakkında kesin bir bilgi elde edinilememiştir.

1.2 Literatür Çalışması

Elektromanyetik problemlerde görüntüleme/ hedef bulma çalışmalarına bakıldığında, gömülü/ konumlandırılmış objelere ait çalışmalar son otuz yıllık dönemde yoğun bir şekilde ele alınmıştır. Hem mühendislik uygulamalarında hem de temel bilimlerde bir çok araştırmaya konu olmuştur. Bunun sebebi, problem sonuçlarının doğrudan uygulama alanlarına sahip olmasıdır: petrol yataklarının tespiti, duvar arkası görüntüleme, tıbbi görüntüleme, güvenlik v.b.

Duvar arkası görüntüleme (TWI) ve duvar arkası hedef belirleme konularında literatür araştırması yapıldığında bu kapsamda genel olarak, objelerin düzlemsel yüzeylerle birbirinden ayrılmış tabakalara gömüldüğü görülmektedir. Yüzeylerin düzlemsel seçilmesinin temel sebebi, problemin çözümüne getirdiği kolaylık ve daha karmaşık yüzeyler içeren ortamlara ilişkin problemlerin çözümünde girdi olarak kullanabilmesidir.

Genel olarak, elektromanyetik problemlerde gömülü cisim/obje tespit etmede görüntüleme (imaging) alanında çalışmalar daha fazla görülmektedir. Ters problem çözümünde kullanılan farklı algoritmalarla (Born yaklaşımı, Newton İterasyonu,

Konjuge Gradyen) performans değerlendirilmeleri yapılmış, çözünürlükleri, hızları v.b. karşılaştırılmış; bu yöntemlerle objelerin fiziksel ve elektromanyetik özelliklerinin elde edilip edilemeyeceğini anlamaya yönelik çalışmalarda bulunulmuştur.

Objelerin yüzeyde oluşturduğu empedans yardımıyla konum bilgisinin elde edilmesi daha önce, iki katmanlı gömülü cisim uygulamalarında kullanılmış ve başarılı sonuç vermiştir. Bu yöntem sayesinde duvar arkasına konumlandırılan objelerin konumu ve fiziksel büyüklükleri tespit edilebilmiştir.

Gömülü/yerleştirilmiş objelerin konumlarını belirlemede radar temelli sistemlerin kullanımı pratikte oldukça fazladır. SAR (Syntetic Aperture Radar) sistemleri de standart radarların pratikte sağlayamadığı yüksek çözünürlüğü, uyguladıkları veri toplama ve veri işleme algoritmalarıyla sağlayabilmektedir ve bu özellikleri sayesinde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptirler: her türlü hava koşulunda ve gece/gündüz yer, araç tespiti ve yer gözetleme v.b. UWB radar kullanılarak duvar arkasındaki objelerin tespit edilmesi, geliştirilmiş algoritmalar içeren SAR yöntemi gerçekleştirildiğinde objelerin konum bilgisinin elde edilmesinde ve yüksek çözünürlüklü görüntülemede başarılı olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda yüksek UWB, düşük kayıplı duvarlarda maksimum çözünürlüğü sağlamak için kullanılırken, alçak UWB bandı ise yüksek kayıplı duvarlarda duvar arkasındaki zayıflatmayı minimize etmek için kullanılmıştır.

Bir sonraki bölümde problemin çözümü için gerekli olan üç katmanlı yapının iki boyutlu Green fonksiyonu ifadelerinin çıkartılmarak problemin integral denklemlerine indirgenmesi ve bu denklemlerin Moment metodu ile çözümü verilmiştir.

2. DUVAR ARKASINA YERLEŞTİRİLEN CİSİMLERİN TESPİTİ İÇİN ANALİTİK ÇÖZÜM

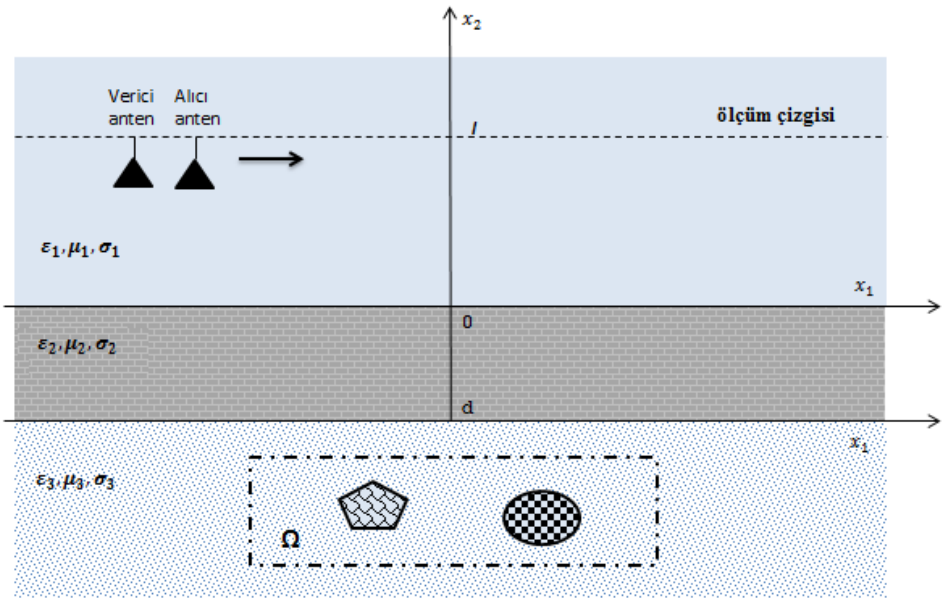
2.1 Problemin Geometrisi ve Formülasyonu

İki boyutlu, üç katmanlı düz saçılma problemine ilişkin geometri Şekil 2.1 'de verilmiştir. $x_2 > 0$, $x_2 \epsilon (0, d)$ ve $x_2 < d$ olarak parçalanmış uzay, sırasıyla, ε_1 , ε_2 ve ε_3 dielektirik ve μ_1 , μ_2 ve μ_3 manyetik ve σ_1, σ_2 ve σ_3 kayıp sabitlerine sahiptir. Parçalanmış uzayların dalga sayıları, k,

$$k_j^2 = \omega^2 \varepsilon_j \mu_j + i\omega\sigma_j\mu_j \qquad j = 1,2,3. \tag{2.1}$$

ile ifade edilir.

Duvardan l kadar uzaklıkta bulunan ölçme düzeneğinde ise, aralarında α mesafesi bulunan verici ve alıcı antenleri bulunmaktadır. ε_v, μ_v ve σ_v elektromanyetik özelliklere sahip cisimler, $x_2 < d$ bölgesinde Ω bölgesinde konumlandırılmıştır. Problemin amacı, elektromanyetik özellikleri bilinen gömülü cisimden saçılan alanın bulunmasıdır.



Şekil 2.1 Düz saçılım probleminin geometrisi

Şimdi genel formülasyonu verilen problemin sonuçlar bölümünde $x_2 > 0$ ve $x_2 < d$ bölgelerinin dielektrik katsayıları aynı ($\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon_0$), manyetik olmayan ($\mu_1 = \mu_3 = \mu_0$), kayıpsız ($\sigma_1 = \sigma_3 = 0$) olacak şekilde özel durumu verilecektir.

Cisim yüzeye paralel bir kaynakla aydınlatılmış, kaynak olarak gaussian beam kullanılmıştır[1]. Ox_3 eksenine paralel olan kaynağın elektrik alan vektörü

$$\overrightarrow{E_\iota} = \left(0,0,u_i(x_1,x_2)\right) \tag{2.2}$$

şeklindedir. Problem Ox_3 ekseni boyunca homojendir, dolayısıyla toplam elektrik alan vektörü de aynı doğrultuda olacaktır. $x = (x_1, x_2)$ olmak üzere toplam elektrik alan,

$$\vec{E} = \left(0,0,u(x)\right) \tag{2.3}$$

biçimindedir. $u(x)$ toplam elektrik alan ifadesi Helmholtz dalga denklemini sağlar ve kendisi ve birinci dereceden türevi katman yüzeyleri ve Ω ile sınırlandırılmış bölgedeki cisimlerin yüzeyi boyunca süreklidir.

$$\Delta u + k^2(x)u = 0 \tag{2.4}$$

Cismin $x_2 < d$, bölgesinde cismin gömülü olduğu durumda, dalga sayısı, k,

$$k^2(x) = \begin{cases} k_1^2 = \omega^2\varepsilon_1\mu_1 + i\omega\sigma_1\mu_1 & x_2 > 0 \\ k_2^2 = \omega^2\varepsilon_2\mu_2 + i\omega\sigma_2\mu_2, & x_2 \in (d,0) \\ k_3^2 = \omega^2\varepsilon_3\mu_3 + i\omega\sigma_3\mu_3 & x_2 < d,\ x \notin \Omega \\ k_\vartheta^2 = \omega^2\varepsilon_\vartheta\mu_\vartheta + i\omega\sigma_\vartheta\mu_\vartheta & x_2 < d,\ x \in \Omega \end{cases} \tag{2.5}$$

şeklinde hesaplanır. $u(x)$ toplam elektrik alanı, içerisinde cisimlerden saçılan alanı da, $u_s(x)$, içerir. $u_0(x)$, $x_2 < d$ bölgesinde gömülü bir cismin bulunmadığı durumdaki toplam elektrik alandır. Dolayısıyla $u(x)$ elektrik alanı, iki alanın toplamı cinsinden yazılabilir.

$$u(x) = u_0(x) + u_s(x) \tag{2.6}$$

Cismin $x_2 < d$, bölgesinde cismin gömülü olmadığı durumda, dalga sayısı, k,

$$k^2(x) = \begin{cases} k_1^2, & x_2 > 0 \\ k_2^2, & x_2 \in (d, 0) \\ k_3^2, & x_2 < d \end{cases} \quad \textbf{(2.7)}$$

şeklinde ifade edilir. $u_0(x)$, Helmholtz dalga denklemini sağlar ve $x_2 = 0$ ve $x_2 = d$ sınırlarında süreklidir, radyasyon koşulunu sağlar.

$$\Delta u_0 + k^2(x_2)u_0 = 0 \quad \textbf{(2.8)}$$

k_b, cisimlerin bulunduğu ortamın dalga sayısıdır. $\vartheta(x)$, ε_v, μ_v ve σ_v elektromanyetik özelliklerine cisim fonksiyonu olarak ifade edilirse,

$$\vartheta(y) = \begin{cases} \frac{k_{obj}^2}{k_b^2} - 1, & x \in D \\ 0, & x \notin D \end{cases} \quad \textbf{(2.9)}$$

u_s fonksiyonu cisimden saçılan, cismin toplam alana katkıda bulunduğu elektrik alan olmak üzere, indirgenmiş dalga denklemini sağlar.

$$\Delta u_s(x) + k^2(x_2)u_s(x) = -k^2(x_2)\vartheta(x)u(x) \quad \textbf{(2.10)}$$

(2.10)'da yer alan diferansiyel denklemin çözümünü, integral denklemine dönüştürmek için

$$\mathrm{G(x;y)} \;/\; \Delta u_s(x) + k^2(x_2)u_s(x) = -k^2(x_2)\vartheta(x)u(x) \quad \textbf{(2.11)}$$

$$u_s(x) \;/\; \Delta G(x;y) + k^2(x_2)G(x;y) = -\delta(x-y) \quad \textbf{(2.12)}$$

$$\begin{aligned} &G(x;y)\Delta u_s(x) - u_s(x)\Delta G(x;y) \\ &= -k^2(x_2)\vartheta(x)u(x)G(x;y) + u_s(x)\delta(x-y) \end{aligned} \quad \textbf{(2.13)}$$

(2.13)'ün her iki tarafının integrali alınırsa,

$$\iint (G(x;y)\Delta u_s(x) - u_s(x)\Delta G(x;y))dxdy$$
$$= \iint (-k^2(x_2)\vartheta(x)u(x)G(x;y) + u_s(x)\delta(x-y))dxdy \quad \textbf{(2.14)}$$

Radyasyon koşulundan (2.14)'ün sol tarafının sıfır olduğu görülür.

$$\iint (-k^2(x_2)\vartheta(x)u(x)G(x;y) + u_s(x)\delta(x-y))dxdy = 0 \quad \textbf{(2.15)}$$

Buradan, $u_s(x)$,

$$u_s(x) = k_b^2 \int_S G(x;y)v(y)u(y)ds(y) \quad \textbf{(2.16)}$$

hesaplanabilir. (2.16)'nın her iki tarafına $u_0(x)$ eklendiğinde

$$u(x) = u_0(x) + k_b^2 \int_S G(x;y)v(y)u(y)ds(y) \quad \textbf{(2.17)}$$

olur. $u_s(x)$, ikinci tür Fredholm integral denklemi ile ifade edilir, bilinmeyen hem integralin içinde hem de dışında bulunduğundan denklemin analitik olarak çözümü mümkün değildir. Çözüm için Green fonksiyonu ifadeleri tanımlanıp, MoM (Methods of Moments) ile sayısallaştırma yapılarak saçılan alan bulunacaktır.

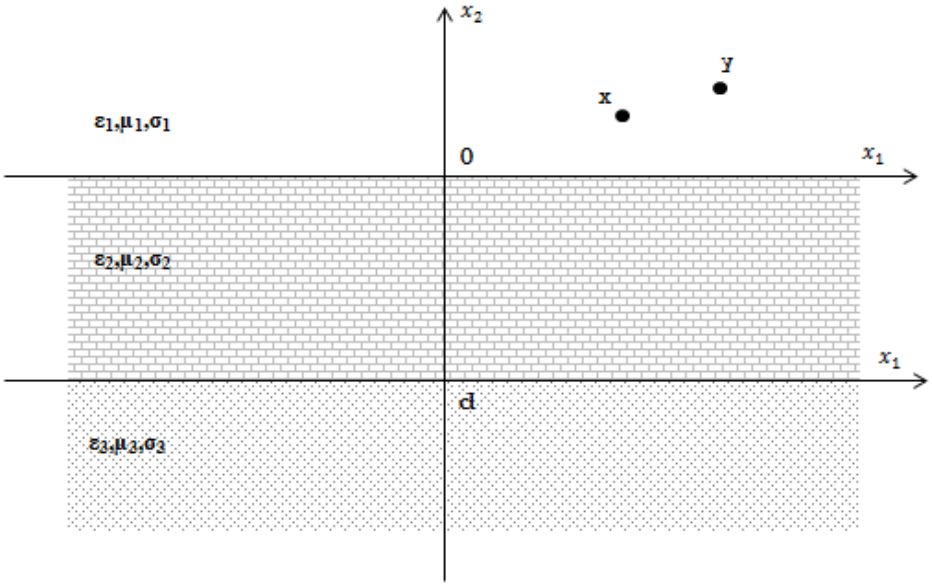
2.2 Üç Katmanlı Düzlemde Green Fonksiyonu İfadesi

Şekil 2.2'de Green fonksiyonunun açık ifadesini elde etmek için kurulan düzenek şekilde görülmektedir**.** *x* gözlem noktası, *y* ise kaynak olarak tanımlanmaktadır.

Green fonksiyonu olarak tanımlanan $G(x;y)$, radyasyon koşulları altında

$$\Delta G(x;y) + k^2(x_2)G(x;y) = -\delta(x-y) \quad \textbf{(2.18)}$$

(2.18)'i sağlar. Bu denklemde y , R^2 düzleminde herhangi bir nokta olarak ifade edilir. δ, dirac delta fonksiyonudur.



Şekil 2.2 Üç katmanlı Green fonksiyonun elde edilmesi

$G(x;y)$ fonksiyonunun bir çözümünü bulmak için öncelikle, fonksiyonun x_1'e göre Fourier dönüşümü alınır.

$$\hat{G}(\vartheta, x_2; y) = \int_{C_R} G(x;y)\, e^{-i\vartheta x_1} dx_1 \qquad \textbf{(2.19)}$$

Dönüşümün ardından (2.1) numaralı denkleme sınır koşulları ve

$$\hat{G}(x;y)\ ve\ \frac{d\hat{G}(x;y)}{dx_2}, \quad x_2 = 0'da\ ve\ x_2 = d'de\ sürekli \qquad \textbf{(2.20a)}$$

$$\left|\hat{G}\right| \to 0\,, \qquad |x| \to \infty \qquad \textbf{(2.20b)}$$

Sommerfeld radyasyon koşulu uygulandığında,

$$\lim_{|x|\to\infty} \left(\frac{d\hat{G}(x;y)}{d|x|} - ik \right) \hat{G}(x;y) = 0 \qquad \textbf{(2.21)}$$

(2.1) numaralı denklem düzenlenerek tekrar yazıldığında denklem (2.22)'ye indirgenir.

$$\frac{d^2\hat{G}}{dx_2^2} - \left(\vartheta^2 - k_j^2\right)\hat{G} = -e^{-i\vartheta y_1}\delta(x-y), \qquad j = 1,2,3, \quad \vartheta \epsilon C_R \tag{2.22}$$

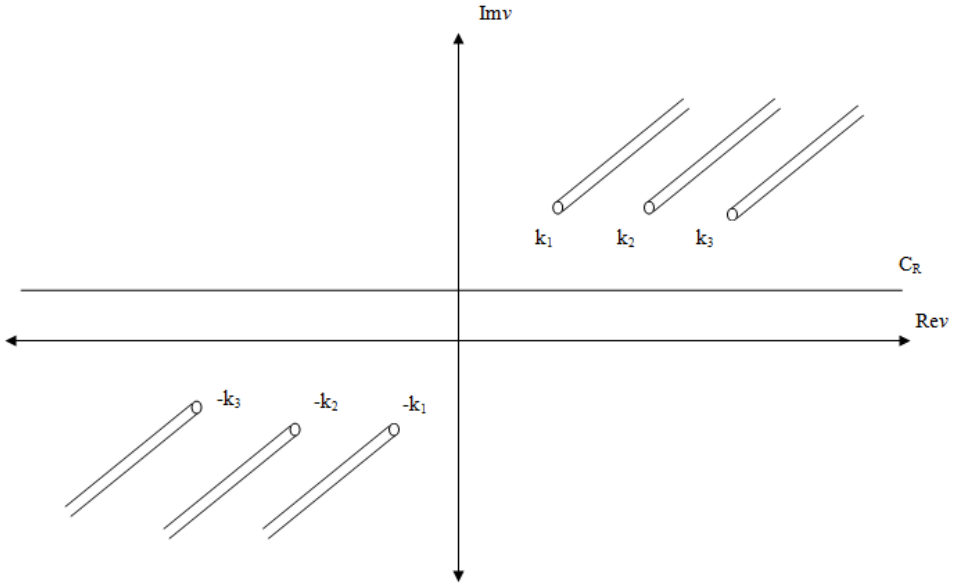
şeklinde kompleks ϑ düzleminde karakök, γ fonksiyonları tanımlanır.[1]

$$\gamma_i(\vartheta) = \begin{cases} -i\sqrt{k_i^2 - \vartheta^2} & |\vartheta| < k_i \\ \\ \sqrt{\vartheta^2 - k_i^2} & |\vartheta| > k_i \end{cases} \qquad i = 1,2,3 \tag{2.23}$$

$\vartheta = 0$ 'da radyasyon koşuluna göre, karakök fonksiyonu

$$\gamma_j(0) = -ik_j, \quad j = 1,2,3. \tag{2.24}$$

ile ifade edilir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi C_R çizgisi, kompleks ϑ düzleminde Fourier dönüşümünün yapıldığı integral yoludur. [2]



Şekil 2.3 Kompleks ϑ düzleminde $\hat{G}$ regülerlik bandı

Kaynağın, birinci ortamda bulunduğu durumda, $y_2 > 0$ için, $x_2 = 0$ ve $x_2 = d$ için sınır koşulları uygulandığında sistemin çözümü şu şekilde yazılabilir.

$$\hat{G}_0(\vartheta, x_2; y) = \begin{cases} A(\vartheta)e^{-\gamma_1 x_2} + B(\vartheta)e^{\gamma_1 x_2} & x_2 > y_2, \quad y_2 > 0 \\ C(\vartheta)e^{-\gamma_2 x_2} + D(\vartheta)e^{\gamma_2 x_2} & x_2 \in (0, y_2), \quad y_2 > 0 \\ E(\vartheta)e^{-\gamma_2 x_2} + F(\vartheta)e^{\gamma_2 x_2} & x_2 \in (d, 0), \quad y_2 > 0 \\ G(\vartheta)e^{-\gamma_3 x_2} + H(\vartheta)e^{\gamma_3 x_2}, & x_2 < d, \quad y_2 > 0 \end{cases} \tag{2.25}$$

Radyasyon sınır koşullarından, $B(\vartheta) = 0$ ve $G(\vartheta) = 0$ olduğu görülür ve sınır koşulları yardımıyla kurulan 6 bilinmeyenli 6 denklem çözülerek katsayılar bulunur. Ters fourier dönüşümü yapılarak,

$$G(x; y) = \int_{C_R} \hat{G}(\vartheta, x_2; y)\, e^{i\vartheta x_1} d\vartheta \tag{2.26}$$

bulunan katsayılar yerlerine konulduğunda

$$G(x; y) = \begin{cases} G_{11}(x; y) + \dfrac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1|x - y|), & x_2 > 0, \quad y_2 > 0 \\ G_{12}(x; y), & x_2 \in (d, 0), \quad y_2 > 0 \\ G_{13}(x; y), & x_2 < d, \quad y_2 > 0 \end{cases} \tag{2.27}$$

elde edilir. Yansıma ve iletim katsayıları,

$$T_{ij}(\theta, \chi) = \frac{2k_i \sin\theta}{k_i \sin\theta + k_j \sin\chi}, \quad i, j = 1,2,3. \tag{2.28}$$

$$R_{ij}(\theta, \chi) = \frac{k_i \sin\theta - k_j \sin\chi}{k_i \sin\theta + k_j \sin\chi}, \quad i, j = 1,2,3. \tag{2.29}$$

olmak üzere, $\theta, \chi = 90°$ için, $G_{11}(x; y)$, $G_{12}(x; y)$ ve $G_{13}(x; y)$ katsayıları sırasıyla,

$$G_{11}(x; y) = \frac{1}{2\pi} \int_{C_R} \frac{T_{23} T_{12} e^{(\gamma_2 - \gamma_3)d}}{1 - R_{21} R_{23} e^{2\gamma_2 d}} \frac{1}{2\gamma_1} e^{\gamma_1 x_2} e^{-\gamma_1 y_2} e^{i\vartheta(x_1 - y_1)} \partial\vartheta \tag{2.29a}$$

$$G_{12}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\left(\frac{T_{12}R_{23}e^{2\gamma_2 d}e^{-\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{T_{12}e^{\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\right)e^{-\gamma_1 y_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.29b}$$

$$G_{13}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\frac{T_{23}T_{12}e^{(\gamma_2-\gamma_3)d}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\,\frac{1}{2\gamma_1}\,e^{\gamma_3 x_2}\,e^{-\gamma_1 y_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.29c}$$

olarak ifade edilir.

Kaynağın, ikinci ortamda bulunduğu durumda, $y_2 \in (d,0)$ için sistemin green fonksiyonunun çözümü,

$$G(x;y)=\begin{cases} G_{21}(x;y), & x_2>0, \quad y_2\in(d,0) \\ G_{22}(x;y)+\dfrac{i}{4}H_0^{(1)}(k_1|x-y|), & x_2\in(d,0), \quad y_2\in(d,0) \\ G_{23}(x;y), & x_2<d, \quad y_2\in(d,0) \end{cases} \tag{2.30}$$

olmak üzere

$$G_{21}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\left(\frac{T_{21}e^{\gamma_2 y_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{T_{21}R_{23}e^{-\gamma_2 y_2}e^{2\gamma_2 d}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\right)\frac{1}{2\gamma_2}\,e^{-\gamma_1 x_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.30a}$$

$$G_{22}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\left(\frac{R_{23}e^{-\gamma_2 y_2}e^{2\gamma_2 d}e^{-\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{R_{21}e^{\gamma_2 x_2}e^{\gamma_2 y_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{R_{23}R_{21}e^{2\gamma_2 d}e^{-\gamma_2 y_2}e^{\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{R_{23}R_{21}e^{2\gamma_2 d}e^{\gamma_2 y_2}e^{-\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\right)\frac{1}{2\gamma_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.30b}$$

$$G_{23}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\left(\frac{T_{23}e^{(\gamma_2-\gamma_3)d}e^{-\gamma_2 y_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{T_{23}R_{21}e^{(\gamma_2-\gamma_3)d}e^{\gamma_2 y_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\right)\frac{1}{2\gamma_2}\,e^{\gamma_3 x_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.30c}$$

şeklindedir.

Kaynağın, üçüncü ortamda bulunduğu durumda, $y_2<d$ için sistemin Green fonksiyonunun çözümü

$$G(x;y)=\begin{cases}G_{31}(x;y) & x_2>0, \quad y_2<d\\ G_{32}(x;y), & x_2\in(d,0), \quad y_2<d\\ G_{33}(x;y)+\dfrac{i}{4}H_0^{(1)}(k_3|x-y|), & x_2<d, \quad y_2<d\end{cases} \tag{2.31}$$

olmak üzere,

$$G_{31}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\frac{T_{32}T_{21}e^{(\gamma_2-\gamma_3)d}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\,\frac{1}{2\gamma_3}\,e^{-\gamma_1 x_2}\,e^{\gamma_3 y_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.31a}$$

$$G_{32}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\left(\frac{T_{32}e^{(\gamma_2-\gamma_3)d}e^{-\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{R_{21}T_{32}e^{(\gamma_2-\gamma_3)d}e^{\gamma_2 x_2}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\right)\frac{1}{2\gamma_3}\,e^{\gamma_3 y_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.31b}$$

$$G_{33}(x;y)=\frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\left(\frac{R_{32}e^{-2\gamma_3 d}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}+\frac{R_{21}e^{2\gamma_2 d}e^{-2\gamma_3 d}}{1-R_{21}R_{23}e^{2\gamma_2 d}}\right)\frac{1}{2\gamma_3}\,e^{\gamma_3 x_2}e^{\gamma_3 y_2}\,e^{i\vartheta(x_1-y_1)}\,\partial\vartheta \tag{2.31c}$$

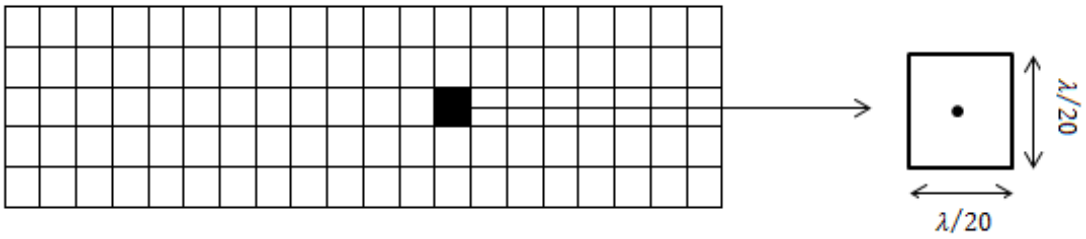
şeklinde bulunur.

2.3 Moment Metodu (MoM) ile Saçılan Alanın Hesaplanması

MoM yöntemi karmaşık integral denklemlerinin doğrusal denklem sistemine indirgenip çözülmesi prensibine dayanır. Yöntemin ana formülasyonu, Green

fonksiyonları kullanılarak elde edilen integral denklemidir. Ele alınan yapıya ait Green fonksiyonları analitik olarak bulunur ve bu yapı üzerinde oluşan yüzey akımları sayısal olarak hesaplanır. Yapı, şekil 2.4'te görüldüğü gibi küçük parçalara(segment) ayrılır ve yüzey akımları matris sistemi şeklinde yazılıp çözülür.

MoM yöntemi ile sayısallaştırma yapılırken, hücreler küçük kare eş parçalara bölünür. Hücre boyutları için seçilen değerler $\lambda/_{20}$, $\lambda/_{30}$ civarlarındadır.



Şekil 2.4 MoM ile sayısallaştırma yapılırken kullanılan hücre yapısı

Genel olarak ifade edilen saçılan alan denklemini, MoM metoduyla $n = 1,2 \dots M$ olmak üzere, B_n bölgesinin, M parçaya bölündüğü düşünülürse, cismin içinde oluşan alan elde edilir [3,4].

$$u_s(x_m) = \sum_{n=1}^{M} k_b^2 \int_{B_n} G(x;x_n)v(x_n)u(x_n)dx_n \quad m,n = 1,2 \dots M. \tag{2.32}$$

$$u_s(x_m) = k_b^2 \sum_{n=1}^{M} v(x_n)u(x_n) \int_{B_n} G(x;x_n)dx_n \quad m,n = 1,2 \dots M. \tag{2.32a}$$

(2.32a), (2.6)'da yerine konursa,

$$u(x_m) = u_0(x_m) + k_b^2 \sum_{n=1}^{M} v(x_n)u(x_n) \int_{B_n} G(x;x_n)dx_n \quad m,n = 1,2 \dots M. \tag{2.33}$$

elde edilir. Oluşan lineer denklem sisteminin çözümü, matris formunda yazılıp,

$$[g_{mn}] \begin{bmatrix} u(x_1) \\ u(x_2) \\ . \\ . \\ . \\ u(x_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_0(x_1) \\ u_0(x_2) \\ . \\ . \\ . \\ u_0(x_M) \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

katsayılar bulunur [5].

$$u = g_{mn}^{-1} u_0 \tag{2.35}$$

$$g_{mn} = \begin{cases} 1 - k_b^2 \upsilon(x_n) \iint_{B_n} G(x; x_n) dx_n & n = m \\ k_b^2 \upsilon(x_n) \iint_{B_n} G(x; x_n) dx_n & n \neq m \end{cases}, \quad m, n = 1,2 \dots M \tag{2.35a}$$

$$\iint_{B_n} G(x; x_n) dx_n = \begin{cases} \dfrac{i}{2k_b^2} \left| \pi k_b a H_1^{(1)}(k_b a) + 2i \right| & n = m \\ \dfrac{i\pi a}{2k_b} J_1(k_b a) H_0^{(1)}(k_b |x_n - x_m|) & n \neq m \end{cases} \tag{2.35b}$$

$$n, m = 1,2 \dots M$$

2.4 Cisimlerin Tespit Edilmesinde Empedans Sınır Koşulunun Kullanılması

MoM ile hesaplanan saçılan alan, u_s yardımıyla katmanlar arasındaki birinci arayüz üzerinde empedans sınır koşulu kullanılarak yüzey empedansı hesaplanabilir. Empedans sınır koşulunun hesaplanabilmesi için, arayüz üzerindeki elektrik alan ve yüzey üzerindeki normal türevi bilgisi gereklidir.

Şekil 2.1'deki geometri göz önüne alınarak, arayüzdeki, $z = 0$'daki, yüzey empedansı tanımlanırken, duvarın arkasında objelerin bulunduğu durum için yüzey empedans sınır koşulu,

$$i\omega\mu_0 u(x_1, 0) - Z_\omega(x_1) \frac{\partial u(x_1, 0)}{\partial x_2} = 0 \tag{2.36}$$

ile ifade edilir [6]. $Z_\omega(x_1)$, içerisinde hem objelerin hem de duvarın özelliklerini kapsayan birinci arayüzdeki yüzey empedansıdır. Objelerin bulunmadığı, sadece duvarın özelliklerini kapsayan durum için yüzey empedansı, Z_0 şu şekilde tanımlanır:

$$i\omega\mu_0 u_0(x_1, 0) - Z_0(x_1) \frac{\partial u_0(x_1, 0)}{\partial x_2} = 0 \tag{2.37}$$

(2.6)'da verildiği üzere, objelerin bulunduğu durumda ölçülen toplam alan, objelerden saçılan alanla, duvarın katkısından oluşmaktadır. Buradan, objelere ait yüzey empedansı, Z_b,

$$Z_b = Z_\omega - Z_0 \tag{2.37}$$

olarak yazılabilir.

Z_0, duvar içeren bir konfigürasyonun elektromanyetik saçılımının nümerik bir yöntemle çözülmesi veya arkasında obje içermeyen bir duvarın yüzeyinden ölçümler alınması sayesinde bulunur.

Bir sonraki bölümde oluşturulan deney düzeneği açıklanıp, problemin tanımı yapılacak, alanların analitik olarak devamı için Fourier serisinin kullanımı gösterilecektir.

3. DUVAR ARKASINA YERLEŞTİRİLEN CİSİMLERİN TESPİTİ İÇİN YAPILAN DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Ele alınan problemin amacı yüzey empedansı ile objeleri tespit etmek ve objelerin yerlerini belirlemektir. Bu bölümde , Bölüm 2'de sayısal olarak çözülen problemin, kurulan bir sistem yardımıyla deneysel metotla çözümü yapılmıştır. Problemin çözümünde empedans sınır koşulu kullanılmaktadır. Kurulan deney düzeneği yardımıyla ölçülen toplam elektrik alanın analitik devamlılığı ile yüzey üzerindeki elektrik alan ve normal türevi bulunarak, sınır üzerindeki empedans değerleri hesaplanabilir.

Bu amaçla, İstanbul Teknik Üniversitesi elektromanyetik laboratuvarlarında duvar arkası cisim görüntüleme için elektrik alan ölçümleri yapılmıştır. Bu bölümde kurulan ölçüm düzeneği hakkında bilgi verilmiş, problemin tanımı yapılarak alanların bulunması anlatılmıştır.

3.1 Ölçüm Düzeneği

Kurulan deney düzeneği, $2x3\ m^2$ tarama alanına sahip ORBIT düzlemsel yakın-alan tarayıcısı, bir adet Agilent RF yükseltici, bir adet Agilent PNA-tipi network analizör, iki adet genişbantlı Shwarzbeck $0.8-5\ GHz$ horn anten, $4\ m$ uzunluğunda düşük kayıplı RF kablodan oluşmaktadır.

TWI deneyi için $1.3x3x0.3\ m^3$ boyutlarında sahip YTONG blok duvar, anten sistemine (tarayıcıya) paralel olarak örülmüştür.

Ölçüm sisteminde, kalibrasyon için, referans hedef olarak $1.2x3\ m^2$ boyutlarında bir bakır plaka kullanılmıştır. İlk olarak, boş odada yapılan ölçümler daha sonra bakır plaka, anten düzeneğine paralel olacak şekilde konumlandırılıp tekrarlanmıştır. Sistemin kalibrasyon parametreleri, ölçülen veri ile teorik verinin karşılaştırılmasıyla bulunmuştur.

Şekil 3.1'de ölçümlerin yapıldığı deney düzeneği gösterilmiştir.



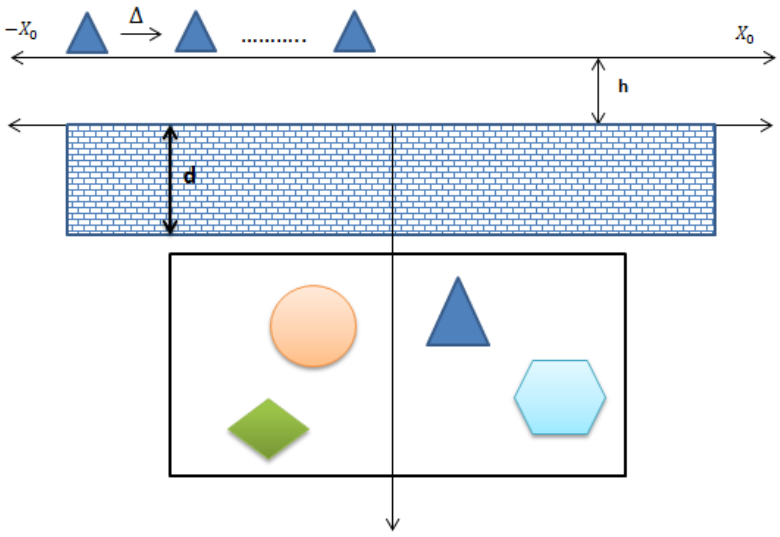
Şekil 3.1 Kurulan ölçüm düzeneğinden bir görünüm

3.2 Problemin Geometrisi ve Gösterimi

Şekil 3.1'de görülen duvar arkası cisim görüntüleme amacıyla oluşturulan düzenekte birinci bölümde genel formülasyonu verilen problemin özel durumu olarak, katmanların hepsi için manyetik geçirgenliği aynı, boş uzayın manyetik geçirgenliğine eşit olan durumu, μ_0, ele alınmış, birinci ve üçüncü ortamın dielektrik sabiti de boş uzay olarak, ε_0, kabul edilmiştir. İkinci katman için, duvarın kalınlığı $d = -0.2$, iletkenliği $\sigma = 0.1$ ve dielektrik katsayısı $\varepsilon_2 = 4\varepsilon_0$ alınmıştır. Arka plan, üç katmanlı $1D$ homojen bir ortam kabul edilmiştir.

Sistemde duvarın arkasına konumlandırılan objeler taş, tahta ve mum olmak üzere ölçüm çizgisi üzerinde konumlandırıldığı yerler sırasıyla $x_{taş} = -0.5\, m$, $x_{tahta} = 0\, m$ ve $x_{mum} = 0.5\, m$'dir.

Kaynağın gelen alan bileşeni, E_{inc}, TM polarizasyonlu çizgisel kaynak olarak modellenmiştir. Alıcı/verici anten sistemi, $z = 0$' daki hava/duvar arayüzünden h kadar uzaklıkta, $\Sigma[-X_0, X_0]$ gözlem çizgisi üzerinde hareket etmektedir. Saçılan alan, E_s, verici antenden sabit bir ofset, Δ, uzaklıkta bulunan bir alıcı anten tarafından toplanır.



Şekil 3.2 Kurulan ölçüm düzeneğinin geometrik gösterimi

Bu çalışmada, biri alıcı biri verici olarak kullanılan iki horn anten aralarında, $\Delta = 0.45\ m$ ofset uzunluğuna sahip, bistatik konfigürasyona göre yerleştirilmiştir. Antenlerin duvar/hava arayüzeyine olan uzaklığı, $h = 0.265\ m$' dir.

Deney sırasında ölçülen parametre, network analizörün portlarından okunan kompleks S_{21} parametresidir. Ölçümler $2.6\ m$ uzunlukta duvara paralel bir çizgi üzerinde, $[1-3]\ GHz$ frekans aralığında, 100 MHz aralıklı frekans değerleri için 801 noktada yapılmıştır. Duvarın arkasına, duvara bitişik olacak şekilde çeşitli objeler asılmıştır.

3.3 Ölçülen Elektrik Alanın Yüzeye Taşınması

Toplam elektrik alan, duvar yüzeyinde ölçülemez. Sistem tarafından, $z = -h$ taki alan $\Sigma[-X_0, X_0]$ boyunca ölçülür. [6]' da gösterildiği gibi, gereken yüzey alan fonksiyonu ölçülen verinin, $E(x_s, -h)$, duvar sınırına, $z = 0$, analitik olarak devam ettirilmesiyle elde edilir [7]. Burada,

$$E(x_s, 0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega_0 h} \hat{E}(\alpha, -h)\, e^{-j\alpha x_s} d\alpha \qquad \textbf{(3.1)}$$

$$\frac{\partial E}{\partial z}|_{z=0} = \frac{-j}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \omega_0(\alpha) e^{-j\omega_0(\alpha)h}\, \hat{E}(\alpha, -h) e^{-j\alpha x_s} d\alpha \qquad \textbf{(3.2)}$$

$\omega_0(\alpha) = \sqrt{k_0^2 - \alpha^2}$ olmak üzere, $\hat{E}(\alpha, -h)$, ölçülen verinin Fourier dönüşümüdür ve $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ boş uzaydaki dalga sayısıdır.

Yüzeydeki elektrik alan bilgileri hesaplandıktan sonra Bölüm 2.4'te verilen standart empedans sınır koşulları uygulanarak, yüzey üzerindeki empedans bilgisi hesaplanır.

Bir sonraki bölümde deney düzeneği oluşturularak hesaplanan yüzey empedans bilgisiyle, Bölüm 2'de analitik olarak çözümü verilen empedans bilgisinin çarpımı için kullanılması hedeflenen yöntemden bahsedilecektir.

4. İÇ ÇARPIM ve YÜZEY EMPEDANS BİLGİSİNİN İÇ ÇARPIMI

Matematikte, nokta çarpım veya iç çarpım, değer olarak iki vektör alan ve sonuç olarak skaler bir değer döndüren işleme denir.

Eğer $x, y \in R$ olmak üzere, x ve y

$$x = [x_1, x_2, \dots., x_n], \quad y = [y_1, y_2, \dots., y_n] \tag{4.1}$$

olsun. Bu iki vektörün iç çarpımı

$$< x, y > = \sum_{i=1}^{n} x_i y_i = x_1 y_1 + x_2 y_2 + \cdots + x_n y_n \tag{4.2}$$

şeklinde tanımlanır.

Kompleks elemanları olan vektörler için, iç çarpım, oldukça değişik sonuçlar vermektedir. Örneğin, kompleks bir vektörün kendisi ile olan nokta çarpımı vektör sıfır vektörü olmadığı halde sıfıra eşit olabilir. Bu karışıklıkları aşmak için y vektörünün eşleniği alınmaktadır. Böylece vektörlerin kendileriyle iç çarpımları, vektör sıfıra eşit olmadıkça, sıfırdan farklı pozitif bir sayı olacaktır. [8]

Dolayısıyla, $x, y \in C$ olarak tanımlanırsa, x ve y vektörlerinin iç çarpımı

$$< x, y > = \sum_{i=1}^{n} x_i \overline{y_i} = x_1 \overline{y_1} + x_2 \overline{y_2} + \cdots . + x_n \overline{y_n} \tag{4.3}$$

olur.

Bu yöntemin yüzey empedans bilgilerinin çarpımında kullanılması, duvarın arkasına konumlandırılmış fiziksel ya da elektromanyetik özellikleri bilinmeyen objelerin tespitinde işe yarayacaktır. Bu amaçla referans bir obje ele alınır ve ölçüm çizgisi üzerinde belirli aralıklarla hareket ettirilen bu objenin her bir konumu için yüzey empedans bilgisi hesaplanarak, bir set tanımlanır. Oluşturulan bu set bir fonksiyon uzayının alt kümesi olarak kabul edilebilir.

Deneysel ölçümlerden yararlanılarak hesaplanan yüzey empedans bilgisi ile tanımlanmış setin her bir elemanının iç çarpım değeri hesaplanır. İç çarpım sonucunda elde edilen skaler değer iki empedans değerinin birbirine benzerliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Referans obje ile hesaplanan setin tüm elemanları ile deney empedansının iç çarpımı sonucunda elde edilen en büyük değer, deneysel hesaplamada duvar arkasına yerleştirilen objelerin konum bilgisini verecektir.

Bir sonraki bölümde çalışma boyunca gerçekleştirilen sayısal sonuçlara yer verilecektir.

5. SAYISAL SONUÇLAR

Empedans yöntemiyle duvar arkasına konumlandırılmış cisimleri tespit etmek amacıyla analitik çözüm için Şekil 2.1'deki sistem oluşturulmuştur. Deneysel düzenekle aynı olmak üzere, birinci ve üçüncü katman $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$ ve $\sigma = 0$ özelliklerine sahip hava, ikinci katman ise $\varepsilon = 4\varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$ ve $\sigma = 0.1$ elektromanyetik özelliklere sahip duvar olarak tanımlanmıştır.

Bu bölümde, sisteme ilişkin üç katmanlı Green fonksiyonlarının, analitik hesaplama ve simülasyon ile elde edilen sonuçlarının karşılaştırması gösterilmiştir. Bu karşılaştırma sonrasında, farklı frekanslar için hesaplanan yüzey empedans veri setleri ile oluşturulan deney düzeneği ölçülen alanlar yardımıyla bulunan yüzey empedans verilerinin vektör iç çarpım sonuçları verilmiştir. İkinci bir adım olarak, objelerin dielektrik sabitleri, şekilleri ve büyüklükleri hakkında bilgi edinmenin mümkün olup olmadığını anlamak için elektromanyetik ve fiziksel özellikleri bilinen üç objenin duvar arkasına konumlandırıldığı bir sistem simülasyon ortamında hazırlanmıştır. Yapılan testlerle, kullanılan çarpım yönteminin objelerin dielektrik sabitlerinin ve fiziksel büyüklüklerinin tespit edilip edilemeyeceği saptanmaya çalışılmıştır.

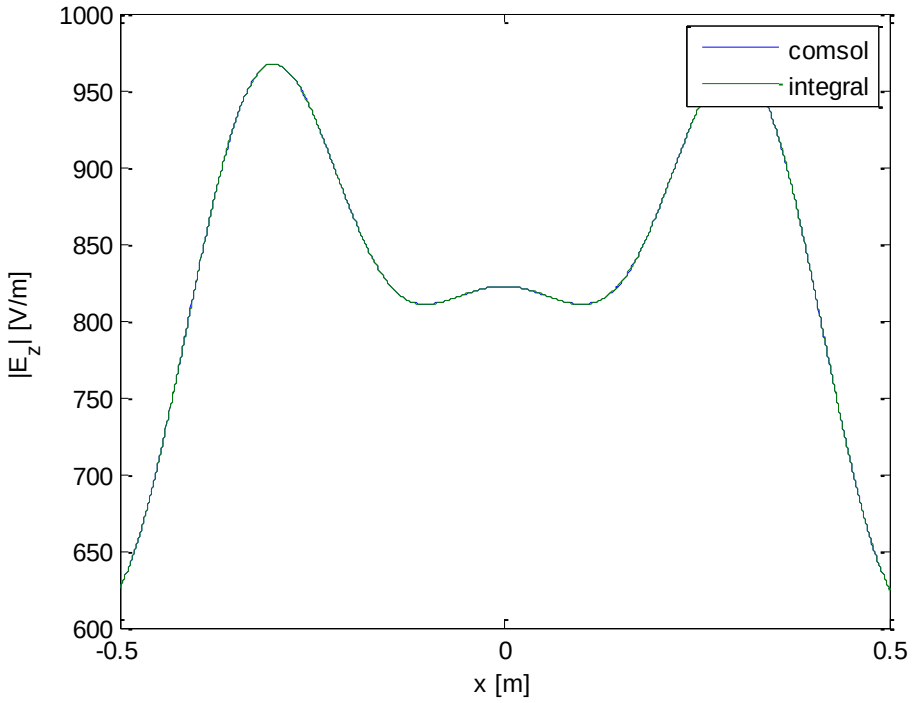
5.1 Green Fonksiyonlarının Doğrulanması

Bölüm 2'de formülasyonu verilen Green Fonksiyonlarının analitik olarak çözümü yapıldıktan sonra, doğruluğunu tespit etmek için COMSOL Multiphysics adlı simülasyon programı kullanılmıştır.

COMSOL Multiphysics temel olarak sonlu elemanlar analizi (FEM) ve çözümleri için kullanılan, içerisinde fizik, mühendislik v.b. uygulamalar için çeşitli simülasyon ve yazılımlar barındıran bir programdır. Programın MATLAB ve toolbox'larına bağlı geniş bir arayüzü vardır. Lineer sistemler için çeşitli direkt ve iteratif çözücüler, fizik problemleri içinse ayrıştırma metotlarının kullanıldığı çözücüler içermektedir [12].

Şekil 2.1'de görülen sistem, simülasyon programında gerçekleştirilmiş ve her katmana farklı ortam parametreleri seçilmiştir. Birinci ortam boş uzay, ikinci ortam kalınlığı $d = -0.5\,m$, elektromanyetik özellikleri $\sigma = 0.012$, $\mu = \mu_0$ ve $\varepsilon = 2\varepsilon_0$ olan bir duvar ve üçüncü ortam parametreleri de $\sigma = 0.015$, $\mu = \mu_0$ ve $\varepsilon = 3\varepsilon_0$ olarak seçilmiştir.

Şekil 5.1'de (2.29a)'da verilen Green fonksiyonu ifadesinin analitik çözümü ve simülasyon sonucunun karşılaştırılması verilmiştir.



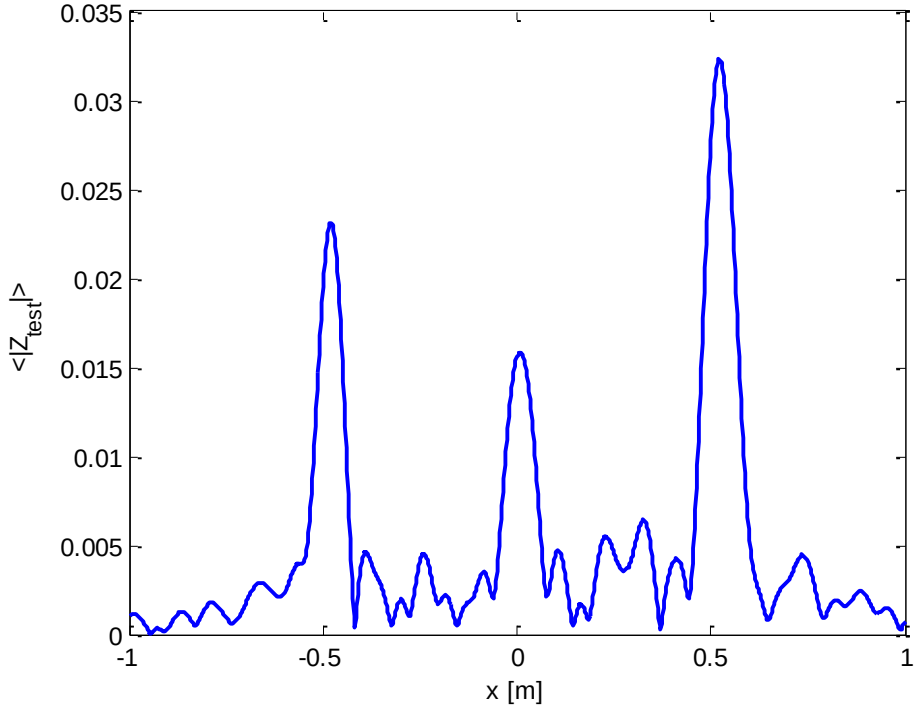
Şekil 5.1 G_{11} fonksiyonunun analitik çözümüyle simülasyon çözümünün karşılaştırılması

5.2 Referans Obje ile Verilerin Oluşturulması

Duvar arkasına konumlandırılmış objeleri tespit etmede kullanılacak çarpım yöntemi için, seçilen bir referans objeye ait yüzey empedans bilgisi gerekmektedir. Bu amaçla, $0.1x0.1\,m^2$ ebatlarında kare bir obje referans alınmıştır. Referans obje için $\varepsilon_{ref} = 2,4,6,9$ olmak üzere farklı değerler için empedans bilgileri oluşturulmuş ve kaydedilmiştir. Objenin iletkenliği $\sigma_{ref} = 0.02$ olarak seçilmiştir. Oluşturulan yüzey empedans setleri, ölçüm çizgisi üzerinde, $\Sigma[-1,1]\,m$ boyunca, $5\,cm$ aralıklarla hareket ettirilen objenin her bir konumu için 100 MHz aralıklarla $[1-3]$ GHz frekansları için analitik olarak hesaplanmıştır.

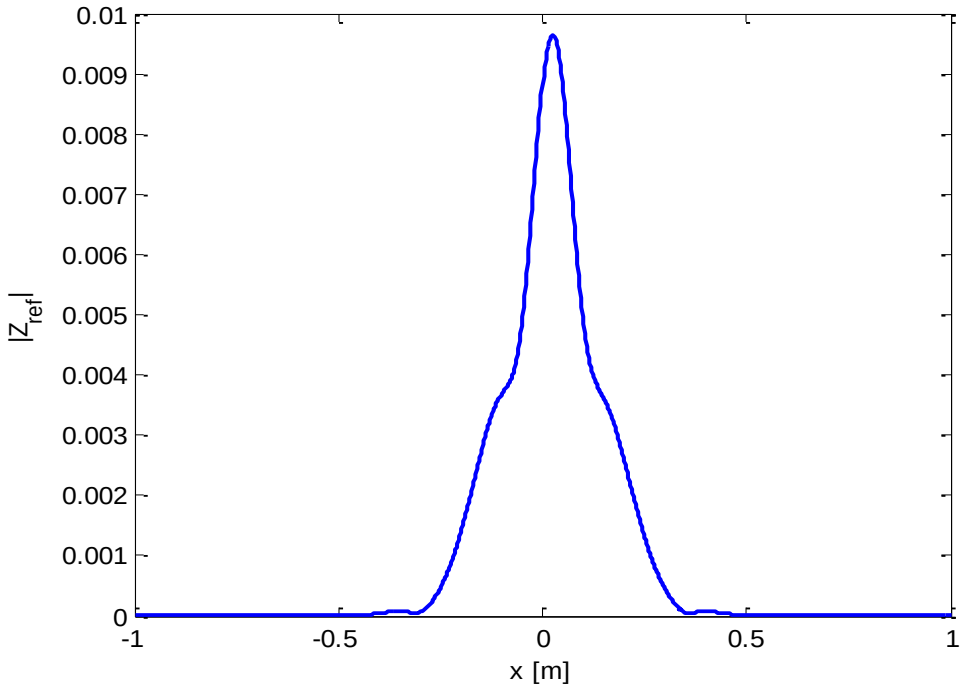
Sistemde duvarın arkasına konumlandırılan objelerin ölçüm çizgisi üzerinde konumlandırıldığı yerler sırasıyla $x_{taş} = -0.5\,m$, $x_{tahta} = 0$ ve $x_{mum} = -0.5\,m$'dir. Ölçümde kullanılan taşın, tahtanın ve mumun dielektirik sabitleri araştırılmış, referens objenin dielektrik katsayısı gerçek değerler baz alınarak seçilmiştir [13].

Şekil 5.2'de ölçüm sonuçları ile elde edilen empedans bilgisi, Z_{test}, verilmiştir ve objelerin konumlandırıldığı yerlerde empedans değerlerinde zıplamalar görülmektedir.



Şekil 5.2 Ölçüm sonuçlarının 3.0 GHz'e ait yüzey empedans grafiği

Şekil 5.3'te sayısal sonuçlarda kullanılan 3.0 GHz'e ait referans objenin empedans bilgisi, Z_{ref}, verilmiştir.



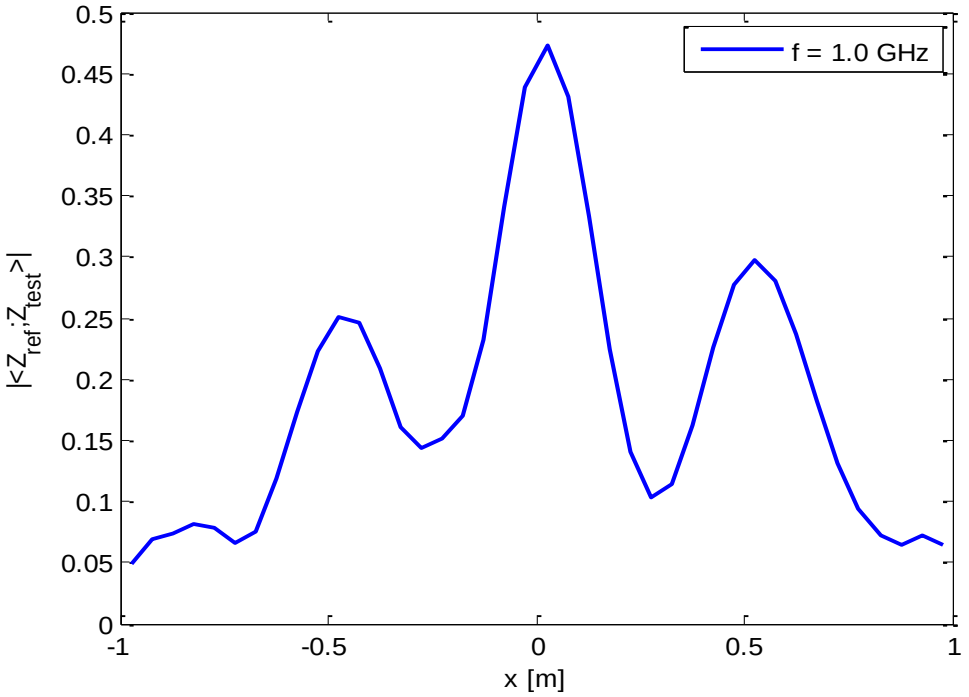
Şekil 5.3 Referans objenin 3.0 GHz'e ait yüzey empedans grafiği

5.3 Referans Objenin Empedans Bilgisi ile Ölçüm Sonuçları ile Elde Edilen Empedans Bilgilerinin Çarpımı

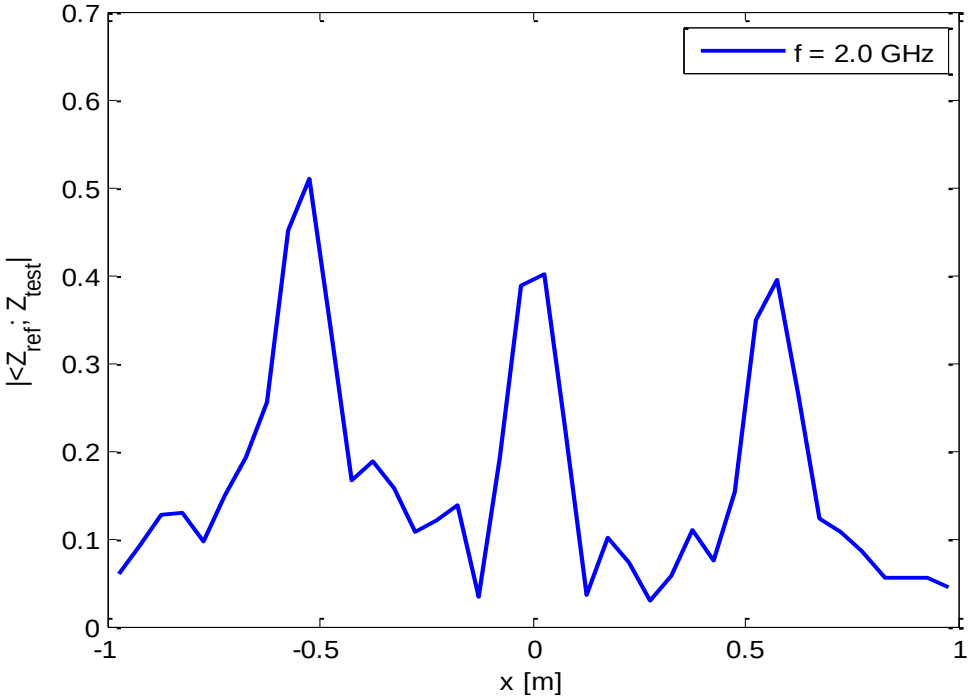
Şekil 5.3'te verilen referans objenin yüzey empedans bilgisi ile ölçüm sonuçlarının yüzey empedans bilgisinin çarpımından oluşan grafikler farklı frekanslar için hesaplanmıştır.

Çarpımlarda kullanılan referans objenin dielektrik sabiti $\varepsilon_{ref} = 9$ alınmış ve her frekans için empedans değerleri hesaplanmıştır.

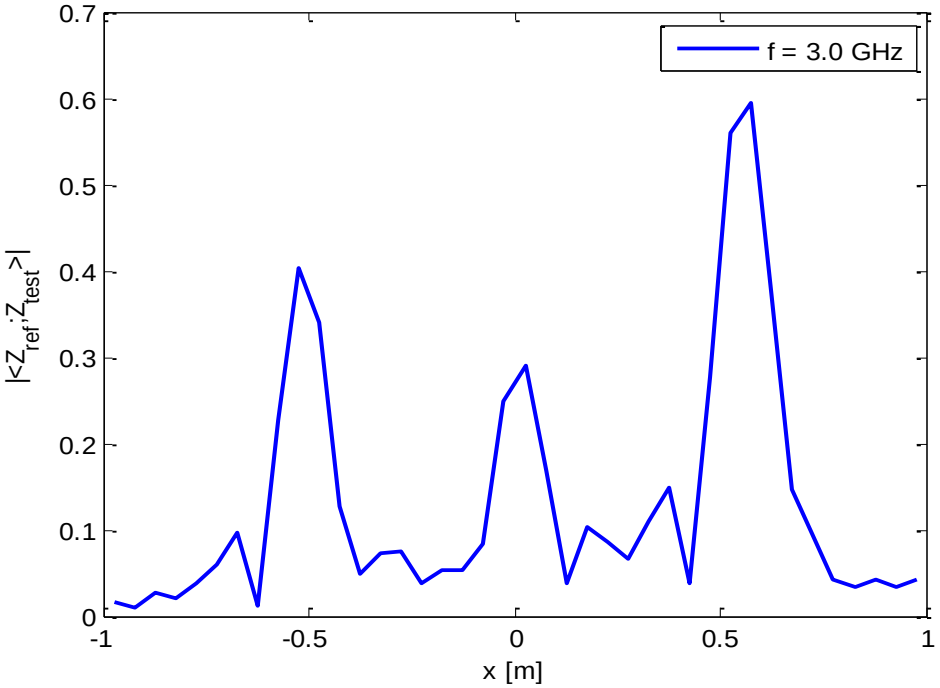
Şekil 5.4'te $1.0\,GHz$, Şekil 5.5'te $2.0\,GHz$ ve Şekil 5.6'da da $3.0\,GHz$ için hesaplanan iç çarpım sonuçları verilmiştir. Empedans bilgisinin, buna bağlı olarak da iç çarpım sonuçlarının frekansın artmasıyla birlikte gittikçe sivrilmesinin sebebi dalga boyunun azalmasıyla cisimlerden saçılan alanların birbirleriyle yaptıkları girişimin azalmasıdır.



Şekil 5.4 1.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu



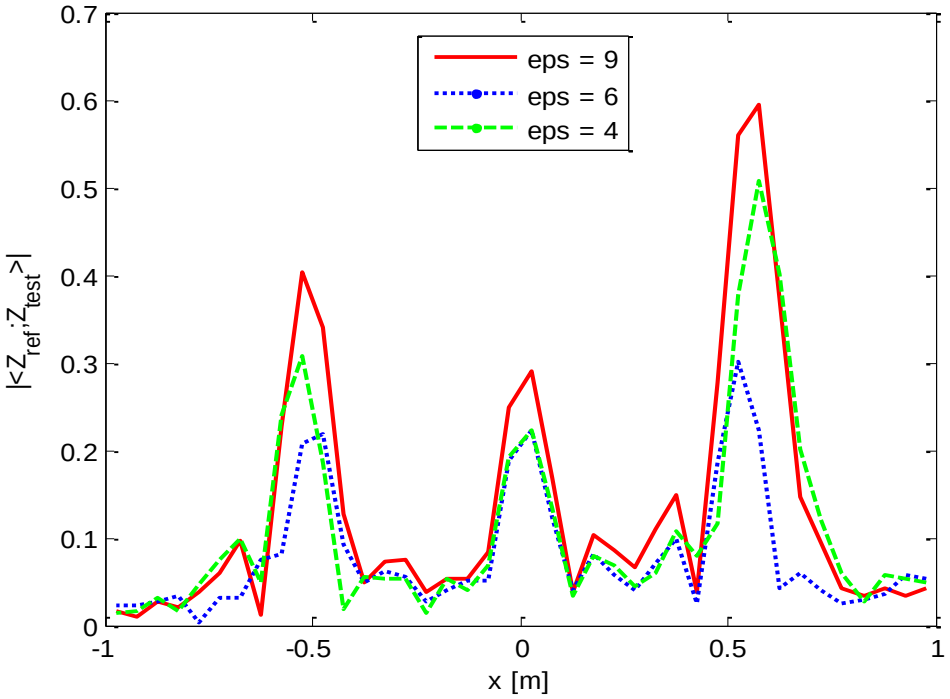
Şekil 5.5 2.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu



Şekil 5.6 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu

Şekil 5.7'de referans objenin farklı değerdeki dielektrik sabitleri ile hesaplanmış yüzey empedans bilgileri ile ölçüm sonuçlarının empedans bilgisinin 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu verilmiştir. Referans objenin dielektrik sabitinin değiştirilmesi ile objelere ait dielektrik sabiti bilgisine ulaşılmak amaçlanmıştır. Şekilde referans objenin dielektrik sabitinin artmasıyla çarpım sonucunun büyüdüğü görülmektedir ancak duvarın arkasına konumlandırılan objelerin tam olarak dielektrik sabitleri bilinemediğinden, referans objenin dielektrik sabitinin değişiminin konumlandırılmış objelerin dielektrik sabitleri üzerindeki etkisi hakkında bir fikir elde edilememiştir.

Bu amaçla deney düzeneğinden bağımsız bir sistem kurulmuş, oluşturulan bu sistemde dielektrik sabitleri, büyüklükleri ve şekilleri bilinen objelerin saçılan alanları ve yüzey empedans bilgileri simülasyon ortamında hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Referans objenin farklı dielektrik sabitleri ile hesaplanmış yüzey empedans bilgileri ile ölçüm sonuçlarının empedans bilgisinin 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu

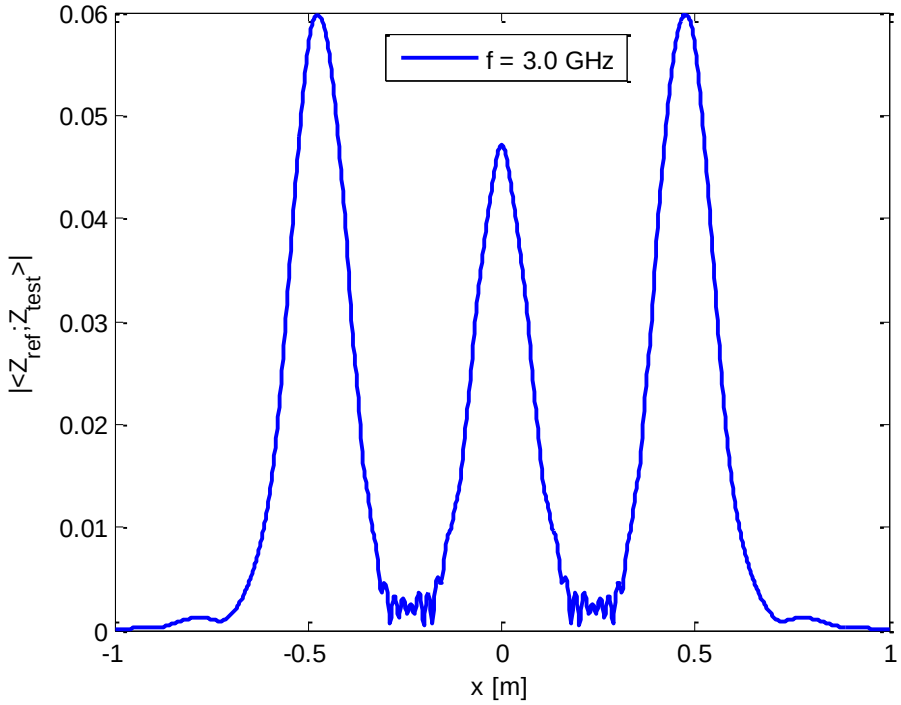
5.4 Test Verilerinin Oluşturulması

Duvarın arkasına konulan objelerin yerleri, dielektrik katsayıları, şekilleri ve büyüklükleri hakkında bilgi edinmenin mümkün olup olmadığını araştırmak için ölçüm sistemi ile elde edilen sonuçlarden bağımsız bir test sistemi hazırlanmıştır.

Sayısal simülasyonlara göre, yöntemin daha etkili olması için yerleştirilen referans obje birbirlerine çok yakın seçilmemiş ve duvara bitişik olması konumlandırılmıştır.

Bu amaçla, üç obje dielektrik katsayıları, şekilleri ve boyutları değiştirilerek duvarın arkasına bitişik olacak şekilde $x_1 = -0.5$ m, $x_2 = 0$ m ve $x_3 = 0.5$ m noktalarına konumlandırılmış, alanlar ve empedans bilgileri analitik olarak hesaplanmıştır. Objelerin boyutları referans obje ile aynı olacak şekilde $0.1x0.1\ m^2$ ebatlarında seçilmiştir.

Şekil 5.8'de oluşturulan test sistemi ile elde edilen empedans bilgisi ve referans objeye ait empedans bilgisi verilmiştir. Üç obje kare ve dielektrik sabitleri birbirlerine eş, $\varepsilon_{obj} = 9$ olarak seçilmiştir.

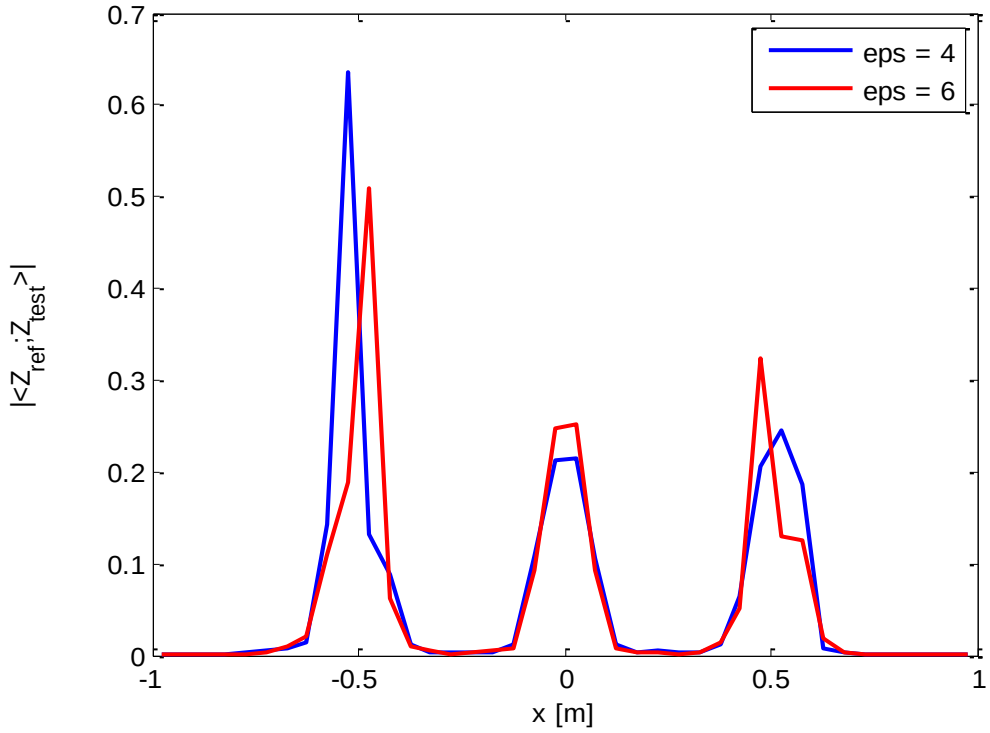


Şekil 5.8 Oluşturulan test sisteminin 3.0 GHz'e ait yüzey empedans grafiği

Şekil 5.8'de objelerin yerleştirildiği yerlerde görülen empedans değerlerinin sadece $x_1 = -0.5$ m ve $x_3 = 0.5$ m noktalarında simetrik çıkmalarının nedeni, $x_2 = 0$ m noktasında görülen empedans değerinde, diğer iki cisimden saçılan alanların etkisinin de bulunmasıdır.

5.5 Referans Objenin Empedans Bilgisi ile Oluşturulan Test Verilerinin Empedans Bilgilerinin Çarpımı

İlk olarak, referans objenin dielektrik sabitinin cismin yerini belirlemede ve yüzey empedansının genliği üzerinde etkili olup olmadığı durumunu incelemek için üç obje kare ve dielektrik sabitleri sırasıyla $\varepsilon_{obj} = 5,9,9$ olacak şekilde seçilmiştir. Dielektrik sabiti sırasıyla $\varepsilon_{ref} = 4,6$ olan referans objesiyle iç çarpım uygulanmış ve elde edilen iç çarpım sonucu 3.0 GHz için Şekil 5.9'da verilmiştir.

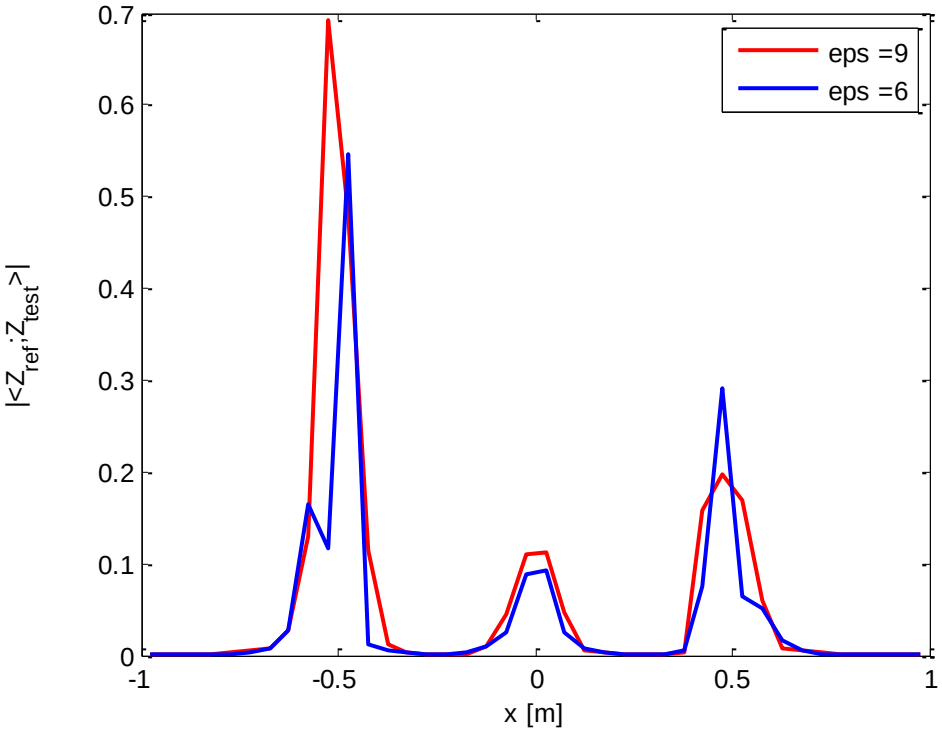


Şekil 5. 9 Farklı dielektrik sabitlerine sahip $\varepsilon_{obj} = 5{,}9{,}9$ objelerin, dielektrik sabiti $\varepsilon_{ref} = 4$ ve $\varepsilon_{ref} = 6$ olan referans objeler ile 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonucu

Hedeflenen yönteme göre, Şekil 5.9'da $x_1 = -0.5$ m noktasında konumlandırılan objenin yüzey empedansının, benzer dielektrik özelliklere sahip, $\varepsilon_{ref} = 4$ ve $\varepsilon_{ref} = 6$, referans objeye ait yüzey empedansı ile çarpımlarının sonucunda, $x_1 = -0.5$ m noktasında bulunan objeye ait çarpım bilgisinin daha yüksek çıkması beklenmiştir.

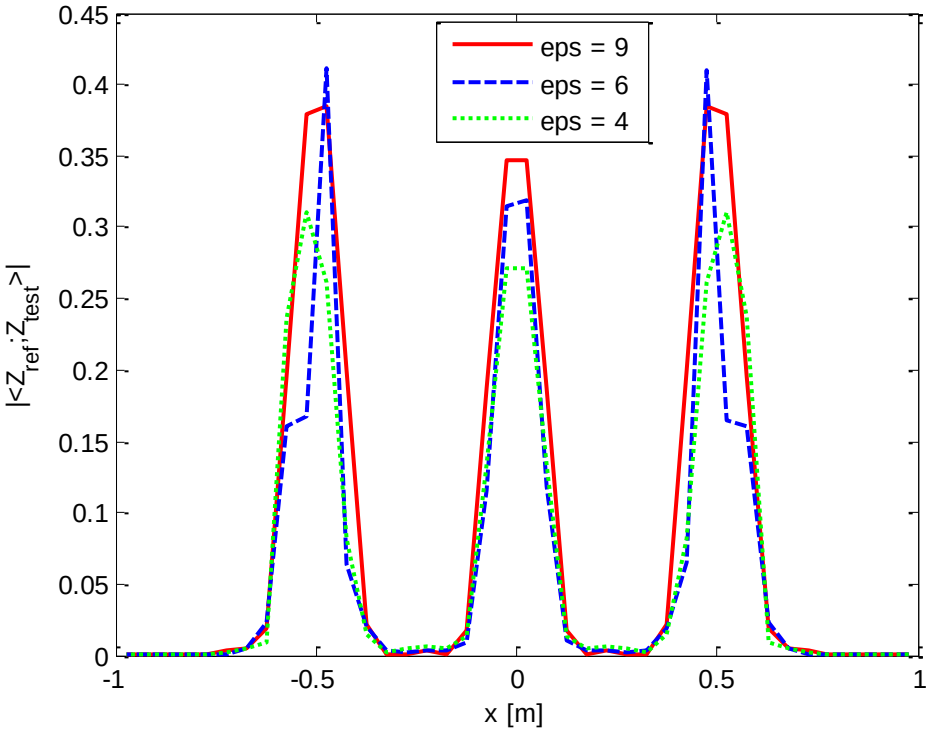
Aynı şekilde, dielektrik sabitleri sırasıyla $\varepsilon_{obj} = 7{,}4{,}4$ olan üç kare obje, duvarın arkasına konumlandırılmış ve dielektrik sabitleri $\varepsilon_{ref} = 6$ ve $\varepsilon_{ref} = 9$ olarak seçilen referans objenin yüzey empedansıyla çarpımı Şekil 5.10'da verilmiştir. $x_1 = -0.5$ m noktasına konumlandırılan $\varepsilon_{obj} = 7$ dielektrik sabitine ait objenin çarpım bilgisi referans objenin dielektrik sabitine benzerliği sebebiyle daha yüksektir.

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da referans objenin dielektrik sabiti ile duvar arkasına konumlandırılan objelerin dielektrik sabitinin benzerliğinin çarpım genliği üzerindeki değişimi incelenmiş ve referans objenin dielektrik sabitinin, konumlandırılan objenin dielektrik sabitine benzerliğinin, duvar arkasına yerleştirilmiş objenin dielektrik sabiti hakkında bilgi verebileceği görülmüştür.



Şekil 5.10 Farklı dielektrik sabitlerine sahip $\varepsilon_{obj} = 7{,}4{,}4$ objelerin, dielektrik sabiti $\varepsilon_{obj} = 6$ ve $\varepsilon_{obj} = 9$ olan referans objelerin ile $3.0\,GHz$'e ait yüzey empedans bilgilerinin iç çarpım sonucu

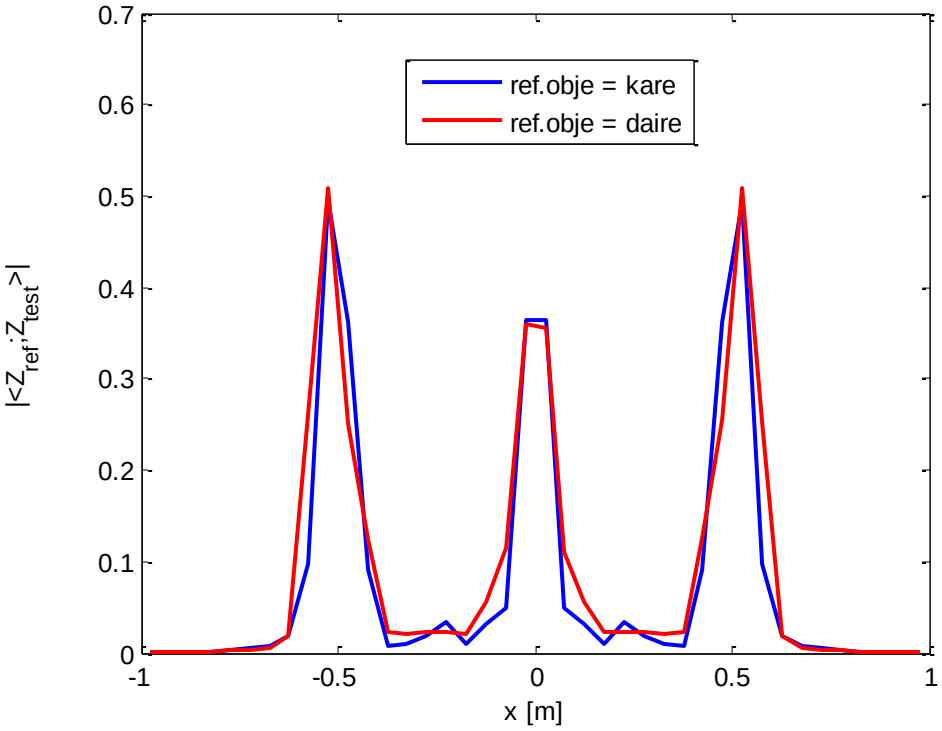
Şekil 5.11'de referans objenin dielektrik sabitinin konumlandırılan objenin dielektrik sabiti ile aynı olduğu, $\varepsilon_{obj} = 9$, durum için çarpım sonucunun genliğinin objelerin benzerlikleri göz önüne alınarak en yüksek olması beklenirken, $\varepsilon_{obj} = 6$ olduğu durumda da genlik değerinin yüksek çıkması, konumlandırılan objeyle, referans obje arasındaki dielektrik sabitinin benzerliğinin çarpım sonucunda etkili olmadığını, dolayısıyla konumlandırılan objenin dielektrik sabiti hakkında kesin bir şey söylenemeyeceğini göstermektedir. Çarpımların genlik bilgilerinden bu bilgi elde edilememesine rağmen, iç çarpım sonucları incelendiğinde, aynı dielektrik sabitine sahip objelerin benzer iç çarpım karakteristiği gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.11 Oluşturulan test sistemde $\varepsilon_{obj} = 9$ olduğu durumda 3.0 GHz'e ait iç çarpım sonuçları

Üç objenin dielektrik sabitleri eş, $\varepsilon_{obj} = 6$ ve şekilleri sırasıyla kare, kare, daireden oluşan test fonksiyonun empedans bilgileri hesaplanmış ve referans obje daire seçilerek hazırlanan empedans setlerinin dielektrik sabitinin $\varepsilon_{ref} = 6$ olarak alınarak 2.0 GHz için bu iki empedans bilgisinin iç çarpımı hesaplanmıştır. Şekil 5.12'de hesaplanan iç çarpım sonucunun hazırlanan test fonksiyonunun kareden oluşturulmuş empedans setleriyle çarpımından oluşan iç çarpım sonucuyla karşılaştırılması verilmiştir.

Şekil 5.12'de çarpım değerleri incelendiğinde, şekilleri farklı olan $x_3 = 0.5\,m$ konumuna yerleştirilen farklı şekillere sahip objelerin genlik değerlerinin referans objenin şekline göre farklılık gösterip göstermediği araştırılmış, referans objenin şeklinin objenin şeklini tespit etmede bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 5.12 Oluşturulan test sistemde referans objenin şeklinin konumlandırılan şekil üzerindeki etkisinin 2.0 GHz'e ait iç çarpım sonuçları

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, duvar arkasına konumlandırılan elektromanyetik ve fiziksel özellikleri bilinmeyen objelerin konum bilgilerini tespit etmek için iç çarpım yöntemini temel alan bir yöntem önerilmiştir.

Kurulan bir deneysel düzenek yardımıyla duvar arkasına konumlandırılan objelerin alanları ölçülerek, standart empedans sınır koşulu yardımıyla yüzey empedansları hesaplanır. Seçilen bir referans objenin ölçüm çizgisi boyunca belirli noktalarında yüzey empedans setleri oluşturulur. Bu yöntem, hesaplanan bu iki empedans bilgisinin çarpılmasını temel alır.

Sayısal simülasyonlara göre, yöntemin daha etkili olması için yerleştirilen objeler birbirlerine çok yakın seçilmemiş ve duvara bitişik olması konumlandırılmıştır.

Oluşturulan üç katmanlı ölçüm düzeneğinde, yüzey empedans bilgisinin hesaplanabilmesi için, yüzeydeki elektrik alan bilgisine ihtiyaç duyulur, bu da h kadar ötede ölçülen alanların Fourier dönüşümü yardımıyla analitik olarak devam ettirilmesi ile sağlanır. Referans objeye ait yüzey empedans setleri, üç katmanlı bir sistemde, ölçüm çizgisi boyunca hareket ettirilen objenin belirlenen noktalarda yüzey empedanslarının hesaplanmasıyla oluşturulur. Bu kapsamda problem, cisim fonksiyonunu saçılan alanın Fourier dönüşümüne bağlayan integral denkleminin çözümüne indirgenmiş ve Moment Metodu'na (MoM) dayalı bir çözüm önerilmiştir.

Oluşturulan yüzey empedans setinin tüm elemanları ile deney yoluyla hesaplanmış yüzey empedansının iç çarpımı sonucunda elde edilen en büyük değer, deneysel hesaplamada duvar arkasına yerleştirilen objelerin konumunu göstermiştir. İç çarpım sonucunda elde edilen skaler değer, iki empedans değerinin birbirine benzerliğinin bir ölçüsü olarak kabul edilebilir. Çalışmada iç çarpım metodu kullanılarak, empedans yöntemine kıyasla daha kesin sonuçlar sağlanmıştır.

Yerleri tespit edilen objelerin, elektromanyetik ve fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olmanın mümkün olup olmadığını tespit etmek için, duvar arkasına özellikleri bilinen objeler yerleştirilip, yüzey empedansları hesaplanmıştır. Oluşturulan farklı

dielektrik sabitine ya da farklı şekillere sahip referans obje empedans setleri kullanılarak, iç çarpım metodu hesaplanan empedanslara uygulanmıştır. Elde edilen skaler değer iki empedans değerinin benzerlikleri karşılaştırılarak objelerin dielektrik sabitlerinin ve şekillerinin hakkında bilgi vermesi beklenmiş, ancak bu metot kullanılarak objelerin özelliklerini tespit etmede kesin bir sonuca ulaşılamamıştır.

KAYNAKLAR

[1] Chew, W.C. (1988). Waves and Fields in Inhomogeneous Media, IEEE Press Series on Electromagnetic Waves, New York.

[2] Felsen, LB. and Marcuvitz, N. (1973). Radiation and Scattering of Waves, Printice Hall, New Jersey.

[3] Ishimaru, A. (1991). Electromagnetic Wave Propagation, Radiation and Scattering, Prentice Hall, New Jersey.

[4] Harrington, RF. (1968). Field Computation by Moment Methods, Macmillan, Newyork.

[5] J.A. Richmond. (1965). Scattering by a dielectric cylinder of arbitrary cross section shape, IEEE Trans. on Antennas and Prop, Vol.13 (3), pp.334-341.

[6] Altuncu Y., Akduman I. ve Yapar A. (2005). "*On the Scattering of Electromagnetic Waves by Bodies Buried in a Half-space with Locally Rough Interface*", International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Torino-Italy.

[7] Akduman I., Crocco L. ve Soldovieri F. (2011). **"***Experimental Validation of a Simple System for Through-the-Wall Inverse Scattering*" IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 8, No:2.

[8] Riley K. F. , Hobson M. P., Bence S. J. (2006). Mathematical Mehods for Physics and Engineering, Third Edition, Cambridge University Press, New York.

[9] Sahintürk, H., Yapar, A. ve Akduman I., (2004). "*On the use of surface impedance in the detection and location of buried objects*" AEU—Int. J. Electron. Commun., vol. 58, no. 4, pp. 249–255,

[10] Soldovieri F. ve Solimene R. (2007). "*Through-wall imaging via a linear inverse scattering algorithm*," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 4, no. 4, pp. 513–517.

[11] Sadiku, M.N.O. (2000). Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press. Florida.

[12]COMSOL Multiphysics. (t.y.) Wikipedia. Alındığı tarih: 07.04.2013, adres: http://en.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics

[13]Dielectic Chart. (t.y.) Alındığı tarih: 21.04.2013, adres: http://www.rafoeg.de/20,Dokumentenarchiv/20,Daten/dielectric_chart.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Sinem Avcı

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul / 08.08.1988

E-Posta: sinem_avci@hotmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

Mesleki Deneyim ve Ödüller: Arçelik A.Ş. ArGe Donanım Ailesi/ Mikrodalga
(12.2011-12.2012- 1 yıl)