**<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>**

# DÜZGÜN OLMAYAN BİR YÜZEY ÜZERİNDEKİ CİSİMDEN ELEKTROMANYETİK SAÇILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ VE CİSMİN GÖRÜNTÜLENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tuba ALPAY**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Telekomünikasyon Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2012**

**<u>İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ</u>**

# DÜZGÜN OLMAYAN BİR YÜZEY ÜZERİNDEKİ CİSİMDEN ELEKTROMANYETİK SAÇILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ VE CİSMİN GÖRÜNTÜLENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tuba ALPAY**
**504091382**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Telekomünikasyon Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN**

**HAZİRAN 2012**

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091382 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Tuba ALPAY**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"DÜZGÜN OLMAYAN BİR YÜZEY ÜZERİNDEKİ CİSİMDEN ELEKTROMANYETİK SAÇILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ VE CİSMİN GÖRÜNTÜLENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

| | | |
|---|---|---|
| **Tez Danışmanı :** | **Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ............................. |
| **Jüri Üyeleri :** | **Prof. Dr. Ali YAPAR**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ................ |
| | **Yrd. Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ ERGENE**<br>İstanbul Teknik Üniversitesi | ................ |

**Teslim Tarihi : 04 Mayıs 2012**
**Savunma Tarihi : 08 Haziran 2012**

***Aileme ve sevdiklerime,***

## ÖNSÖZ

Dört seneye yakın bir süredir bilgi ve deneyimleri ile bugün geldiğim noktada en büyük paya sahip olan değerli hocalarımdan, tez danışmanım Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN'a ve Prof. Dr. Ali YAPAR'a, verdikleri destek ve harcadıkları zaman için teşekkürü borç bilirim.
Tez çalışmamda her türlü yardım ve katkılarından dolayı Yük. Müh. Tolga Ulaş GÜRBÜZ'e; yirmi altı yıl boyunca benim için hiçbir maddi, manevi desteği esirgemeyen aileme; iyi gün kötü gün ayrımı yapmadan hep yanımda olan başta Oğuzhan ÖZDEŞ olmak üzere tüm arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.
Son olarak, desteği için TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Mayıs 2012

Tuba Alpay
Telekomünikasyon Mühendisi

## İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

## KISALTMALAR

| | |
|---|---|
| **GKFY** | **:** Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyonları Yöntemi |
| **GPOF** | **:** Generalized Pencil of Function |
| **MoM** | **:** Method of Moments |
| **SPM** | **:** Small Perturbation Method |
| **GPR** | **:** Ground Penetrating Radar |
| **DCIM** | **:** Discrete Complex Image Method |
| **MPIE** | **:** Mixed Potential Integral Equation |
| **SVD** | **:** Single Value Decomposition |
| **CSI** | **:** Contrast Source Inversion |
| **CSI** | **:** Burried Object Approach |
| **KKY** | **:** Kontrast Kaynak Yöntemi |

## SEMBOL LİSTESİ

| | |
|---|---|
| $\varepsilon_0$ | : Boş uzay dielektrik sabiti |
| $\mu_0$ | : Boş uzay manyetik geçirgenliği |
| $\sigma_0$ | : Boş uzay iletkenliği |
| $\varepsilon_i$ | : i. ortama ilişkin dielektrik sabiti |
| $\mu_i$ | : i. ortama ilişkin manyetik geçirgenliği |
| $\sigma_i$ | : i. ortama ilişkin iletkenliği |
| $k_i$ | : i. ortama ilişkin dalga sayısı |
| $\omega$ | : Açısal frekans |
| $\varphi_0$ | : Geliş açısı |
| $\chi$ | : İletim açısı |
| $u_i$ | : Aydınlatma sonucu oluşan elektrik alan |
| $u_0$ | : $x_2 = 0$ ile ayrılmış iki parçalı uzayda toplam alan |
| $u_s$ | : Düzgün olmayan yüzeyi tanımlayan cisimlerden saçılan alan |
| $u$ | : Düzgün olmayan yüzey durumunda toplam alan |
| $\tilde{u}$ | : Cismin varlığında toplam alan |
| $\tilde{u}_s$ | : Cismin varlığında cisimden saçılan alan |
| $G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ | : Düzgün arakesitli iki parçalı uzay Green Fonksiyonu |
| $\bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ | : Düzgün olmayan arakesitli iki parçalı uzay Green fonksiyonu |
| $\upsilon_R$ | : Düzgün olmayan yüzeye ilişkin cisim fonksiyonu |
| $\upsilon_N$ | : Cisme ilişkin cisim fonksiyonu |
| $e_n$ | : GKFY üstel terimi |
| $B_n$ | : GKFY katsayı terimi |

**ŞEKİL LİSTESİ**

**Sayfa**

## DÜZGÜN OLMAYAN BİR YÜZEY ÜZERİNDEKİ CİSİMDEN ELEKTROMANYETİK SAÇILMA PROBLEMİNİN İNCELENMESİ VE CİSMİN GÖRÜNTÜLENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada düzgün olmayan bir yüzeyle ayrılmış iki parçalı uzaydan saçılma probleminin çözümüne yönelik bir öneri sunulmuştur. Çözülecek elektromanyetik saçılma problemi, düzgün olmayan bir yüzeyle ayrılmış olan, iki farklı yarı uzaydan üst yarı uzaydaki bir D bölgesi içinde yer alan bir cisimden saçılan alanın bulunması, bu saçılan alan kullanılarak Kontrast Kaynak Yöntemi (CSI) aracılığıyla elektromanyetik görüntüleme yapılması şeklinde özetlenebilir.

Öncelikle literatürde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Tabakalı ortamları inceleyen çalışmalara bakıldığında, cisim ve ölçüm noktalarının bulunduğu ortamların birbirinden farklı olduğu durumlar, bir başka deyişle üst yarı uzayda yapılan bir aydınlatma için tabakaların altında gömülü cisimlerin tespiti ve görüntülenmesi gibi saçılma problemleri, oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu problemlere ek olarak, son 20 yılda yapılan çalışmalarda deniz yüzeyinde yer alan gemileri, yer yüzeyi üzerinden uçan uçakları, okyanus yüzeyini konu alan saçılma problemlerine rastlanmaktadır. Ortamları ayıran yüzeylerin düzgün olduğu ve olmadığı durumlarda farklı yaklaşımlar kullanılarak saçılma problemlerine çözüm aranmaktadır. Yapılan literatür taraması sonucu düzgün olmayan yüzeyler için farklı çözümler sunan çalışmaların yanı sıra, bu tez çalışmasında uygulanan Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyonları Yöntemi (GPOF) ve dolaylı olarak kullanılan Ayrık Karmaşık Görüntü Yöntemini (DCIM) içeren çalışmalardan örnekler sunulmuştur.

Literatür çalışmasının ardından problem, adım adım ele alınmıştır. İlk adımda sadece ortamlar arasında var olan düzgün olmayan yüzeyin katkısı incelenmiştir. Bu adımda, düzgün olmayan yüzeye, düzlemsel arakesite sahip iki parçalı uzay içerisinde gömülü olan 2N adet cisim gibi davranılmıştır. Düzgün arakesitin üzerinde yer alan tümsek bölgesindeki N adet cisim, alt yarı uzay parametrelerine sahipken, arakesitin altında kalan çukur bölgesindeki N adet cisim ise üst yarı uzayın parametrelerine sahiptir. Bu durumdaki düz problem çözümü için, düzgün arakesitli iki parçalı boş uzaya ilişkin Green Fonksiyonu tanımlanmıştır. Sonraki adımda ise üst yarı uzayda bir D cisim bölgesi belirlenmiş, bu bölgenin toplam alana olan katkısı ile sadece D cisim bölgesinden saçılan alan ifadesi elde edilmiştir. Bu adımda, düzgün olmayan arakesite sahip iki parçalı boş uzaya ilişkin Green Fonksiyonu tanımlanmıştır.

Green Fonksiyonları elde edildiğinde içerisinde görülen Sommerfeld integralleri, sonsuz integrallerdir, yavaş bir şekilde sönümlenerek sıfıra ulaşır. Bu niteliklerinden dolayı hesaplanmaları uzun zaman alır. Green Fonksiyonları hesaplanırken, birtakım yaklaşımlarla daha etkin ve hızlı çözümler elde edilebilir. Bu çalışmada Green Fonksiyonunun yansıyan ve iletim terimlerine ilişkin integral ifadelerinde yer alan terimler, birer seri toplamı şekline getirilerek işlemsel kolaylık sağlanmıştır. İntegral

çekirdeklerinde yer alan fonksiyonların yapısı ile Hankel fonksiyonunun spektral gösterimi birbirlerine oldukça benzemektedir. Bu benzerlik kullanılarak integral çekirdeklerindeki fonksiyonlar, Hankel fonksiyonunun katsayı ve argümanının uygun bir şekilde değiştirilmesi sonucu yaklaşık olarak elde edilebilir. Bunun için Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyonları Yöntemi (GKFY) kullanılarak integral çekirdeklerindeki fonksiyonlar, belirli sayıda birer katsayı terimi ve gerçel üstel terimin çarpımının toplamı şeklinde elde edilmiştir. Bu işlem, yansıyan terimler için doğrudan yapılabilirken, iletim terimlerinin hesaplanmasında gözlem noktasının her ordinat değeri için tekrar tekrar gerçekleştirilmelidir. GKFY, Green Fonksiyonunun her iki durumda hesaplanması sırasında sayısal integrasyona göre oldukça önemli bir zaman getirisi sağlamaktır.

Green Fonksiyonlarının elde edilmesinden sonra, düzgün olmayan yüzeyin üzerinde bulunan cisme ilişkin saçılan alan bulunur. Bulunan saçılan alan verisi kullanılarak Kontrast Kaynak Yöntemi (KKY) yardımıyla cismin görüntülenmesi gerçekleştirilir. Bu yöntemde, bir hata fonksiyoneli tanımlanır ve bu fonksiyonelde belirli bir hata oranının altına inene kadar yinelemeler gerçekleştirilir. Bu yinelemeler sonucunda hata fonksiyonelinin gerçel ve sanal kısımlarından elde edilen, cismin görüntülenmesini sağlayacak dielektrik geçirgenlik ve iletkenlik terimleri, cisme ait gerçek değerlerle karşılaştırılarak elektromanyetik görüntüleme gerçekleştirilir.

Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlara ilişkin sayısal örneklerden bazıları sunulmuş, her bir örnek için değiştirilen parametreler belirtilmiştir. Bu sayısal örneklerden yola çıkılarak varılan bazı çıkarımlar; problemdeki kısıtlamalar, problemin çözümünde yapılabilecek iyileştirmeler ve bu çalışmadan sonra yapılabilecek geleceğe yönelik öneriler sonuç bölümünde verilmiştir.

**ELECTROMAGNETIC SCATTERING FROM AN OBJECT ABOVE A ROUGH SURFACE AND IMAGING THE OBJECT**

**SUMMARY**

In this study, a new approach for the scattering problem, including rough surface, is given. The scattering problem is determined as follows: the whole space consists of two layers that have different electromagnetic properties; i.e dielectric constant and conductivity. These two layers are separated with a rough interface. Finally, an object is placed above the rough surface, in other words, inside the upper half space. According to this definition of problem, it is aimed to solve the scattered field from the object. Later on, Contrast Source Inversion (CSI) method will be applied to the scattered field and as a result of CSI, reconstructed dielectric constant and conductivity parameters are obtained. These reconstructed parameters are compared with the exact values in order to verify whether the scattering problem is solved with valid results.

First of all, previous studies about the topic are observed. A huge percent of the studies with layered media and rough surface have dealt with objects under the surface. This interest comes from the practical applications like detection of mines, underground pipes, determination of earthquake lines, non-destructive testing, ground penetrating radar (GPR), medical imaging, etc… However, if the studies in the last 20 years are searched, it is possible to see some problems that include scattering from objects located over a layered media. Ships over the sea, planes flying above the earth surface, oceanic scattering problems can be given as example to the scattering problems with the defined concept. After the problem type is defined, numerical methods that are used in scattering problems are searched. There are some example studies that involve Generalized Pencil of Functions (GPOF), Discrete Complex Image Method (DCIM) for the solution of rough surface scattering problems. These are the methods that will be used in the thesis, but there are more methods like Mixed Potential Integral Equations (MPIE).

After the literature search, the defined problem is discussed step by step. In first step, the effect of the rough surface that separates two different media is analysed. The object, which will be reconstructed, is not added yet. The rough surface is defined as a single valued partial function of the axis $x_1$ and is supposed to be like 2N buried objects; N of them are in the lower part and the other N are in the upper part. The objects in the lower part have the dielectric properties of upper medium, and the ones in the upper part have the properties of lower medium. In this first step, it is assumed that the media are separated with a linear interface. The Green's Functions for two layered media with a planar interface are calculated in this forward problem solution. Incoming field and total field satisfy the homogenous Helmholtz equation, i.e reduced wave equation under radiation conditions. The rough surface's contribution to the total field is the scattered field from the surface and it satisfies the inhomogenous reduced wave equation under the radiation and boundary conditions. Inhomogenous part of the equation is formed by the object function V, which is

non – zero inside the objects (rough surface parts) and zero outside. Green's functions are formed with the integral representation, and the scattered field from the rough surface is formulated according to a Method of Moments – based solution. The object, which will be reconstructed, is added to the geometry of problem in the next step. The scattered field from the object D is defined to be the difference between the total field including the object D and the field with only the rough surface. The Green's functions for the final geometry are defined as the functions for two layered media with a rough interface. Total field and the initial field again satisfy the homogenous reduced wave equation under the radiation condition. Scattered field from the object satisfies reduced wave equation under the radiation condition and boundary conditions. Here, the object function of the object is re-defined. Scattered field from the object above the rough surface is obtained in the same manner with the previous step.

While the Green's functions are calculated, there are Sommerfeld integrals that are infinite, slowly decaying to zero and time consuming. Some methods to accelerate the computations of Green's functions should be taken into account. These methods aim to replace the integral statements with summation of limited number of terms. In this concept, the Hankel function's spectral equivalent is an advantageous notation. Hankel function's integral equation shows a great structural similarity with the Green's function's integral notations. Both of them include a coefficient as a function of square root functions of the media ($\gamma_1$ and/or $\gamma_2$ ), real exponential term and complex exponential term. The GPOF method is used in this study for both reflection and transmission terms. This method takes a function as an input, i.e. the multiplication of the coefficient and the real exponential term. After some straightforward operations, the input function is represented as a sum of M terms in the form of multiplication of a coefficient and exponential. The method can be summarized as follows: The input function, which is the Green's Function's integral seed, will be represented as a sum of M terms. For the output summation, the coefficients will be complex residues and exponential terms will be the complex poles. The number of terms in summation, M should be determined. For this aim, the complex integration path value, $\upsilon$ is sampled with a pre-defined N value. Two information vectors from the input function are formed with L = N/2 length. Singular Value Decomposition (SVD) is applied and singular value matrice S is formed. The elements of this matrice is compared with the first element of it, when the ratio is under one, the index of the matrice S is the M discrete number of terms. Matrice of complex poles are formed with SVD matrices and second information vector. Eigenvalues of the complex pole matrice are evaluated. Finally complex residues are solved as a linear matrix equation solution. Green's functions' reflection terms can easily be converted to a summation, because the real exponential terms only consist of the square root function $\gamma_1$ or $\gamma_2$, so the input function of the GPOF method can be directly formed. However, transmission terms could not be converted as easy as reflection terms, because the real exponential terms consist of both of the square root functions $\gamma_1$ and $\gamma_2$.The transmitted terms are calculated with every ordinate values of the observation points with the same GPOF constant and exponential terms. Moreover, the real exponential term is enlarged with an appropriate parameter in order to provide a suitable input for the GPOF algorithm. As a result of the GPOF operation, Green's functions are represented in a series sum notation; in the form of multiplication of the coefficient, real exponential term and Hankel function. The Hankel function's argument is now the multiplication of the wavenumber and the complex distance term. This complex distance term is seen in the apcissa of the observation point. Despite the disadvantage of transmitted term, relative to the reflected term; it can be said that the GPOF method is much more faster than the traditional integration.

After the computation of Green’s functions is finished, the scattered field from the object is calculated. The whole geometry is separated into six different regions – object, measurement, hump, hole regions, up and down regions that do not include any other region – and every calculation is done according to appropriate combinations of source and observation points. Also the GPOF parameters for those different regions differ from each other. The solution of the scattering problem can be summarized as follows: Initial and total field equations for object, measurement, hump and hole regions are formed according to the line source illumination. Object functions are written for humps and holes. Green’s functions of two part space with linear interface are written according to the source and observation points for all regions. Later, Green’s functions of two part space with rough interface are written according to the source and observation points for all regions. Scattered field from the object is obtained. With the help of this scattered field, electromagnetic imaging can be applied to the object via Contrast Source Inversion(CSI) method. In this method, a cost functional is defined and some iterations are performed to minimize the cost functional, until the difference between the current and previous values of the cost is lower than a pre-defined error value. After the iterations, the dielectric permittivity and the conductivity are obtained from the contrast function and these reconstructed values are compared with the original values. The electromagnetic imaging is applied in the sense of this comparison.

Some numerical results are shown in the final part and the parameters that are changed in the configuration are stated. The effect of geometry, dielectric constant and conductivity of the object, noise, roughness of the surface are discussed, the scattered field from the object and the reconstruction results are shown. In the conclusion, the effects of the parameters on the result are presented and some constraints about the problem are also stated. Some guiding issues are also presented, which includes the current problem and what can be done in the future work.

# 1. GİRİŞ

Düzgün olmayan yüzeylerle ayrılmış, parçalı uzay geometrilerine ilişkin, elektromanyetik saçılma problemleri; uygulama alanlarının gerekliliği ve sıklığı gibi etkenler göz önünde bulundurularak son yirmi yılda oldukça ilgi çekici ve üzerinde çalışılması gereken problemler olarak görülmektedir. Elektromanyetik teori temel alınarak ve yeni matematiksel yöntemler veya yaklaşımlar kullanılarak yeni çözüm yöntemleri elde edilmektedir. Bu çalışmada düzgün olmayan bir yüzey ile ayrılmış iki parçalı uzay geometrisinde, yüzeyden yukarıda bulunan üst yarı uzayda konumlandırılmış olan bir cisimden elektromanyetik saçılma problemi incelenecektir. Bu problemde saçılan alan hesaplamasında kullanılan Green Fonksiyonlarının sayısal integralleri yerine belirli sayıda ayrık üstel terimin toplandığı yeni bir çözüm önerisi sunulacaktır. Cisimden saçılan alan kullanılarak elektromanyetik görüntüleme gerçekleştirilecek, böylelikle saçılma probleminde kullanılan çözüm önerisinin doğruluğu gerçeklenecektir.

Bu bölümde, tanımlanan düzgün olmayan yüzeyden saçılma problemi ve kullanılacak diğer yöntemler ile ilgili daha önce yapılmış çalışmalardan bahsedilerek, problemin tanımı ve çözüm yöntemi belirtilecektir.

## 1.1 Literatür Araştırması (Düzgün Olmayan Yüzeyden Saçılma)

Elektromanyetik saçılma problemlerinin büyük bir çoğunluğunu, çok katmanlı uzayları içeren yapılarda gömülü cisimlerin tespiti ve görüntülenmesi başlığı altında toplamak mümkündür. Düzgün olmayan yüzeylerden saçılma problemlerine örnek olarak yeraltına gömülü mayınların tespiti, yere nüfuz eden radar uygulamaları, duvar arkası cisimlerin görüntülenmesi ve vücut içerisindeki tümörlü dokuların tespiti gibi problemler gösterilebilir. Özellikle son yirmi yılda yapılan çalışmalara bakıldığında, düzgün olmayan yüzeylerden saçılma probleminin çözümü için çeşitli yöntemler önerilmiştir. Bunlardan bir kısmı, SPM (Small Perturbation Method) temelli yöntemlerdir, düşük frekans bandında, engebeli ve mükemmel iletken yüzeyler için etkili bir çözümdür [1-3]. Düzgün olmayan yüzeyin yukarısında kalan yarı uzayda konumlandırılmış cisimden saçılma probleminde, Kirchhoff yaklaşımı kullanılarak düzgün olmayan yüzeye ilişkin Green Fonksiyonları hesaplanabilmektedir [4].

Düzgün olmayan yüzeylere yönelik bazı çalışmalarda, parçalı uzayın düzlemsel bir arakesite sahip olduğu varsayılmıştır ve düzgün olmayan yüzey ile düzlemsel arakesit arasındaki kalan bölgelere Gömülü Cisim Yaklaşımı (BOA) uygulanarak etkin sonuçlar elde edilmiştir [5-8].

Son 10 yılda yapılan bazı çalışmalarda, sadece tabakaların altında değil, düzgün olmayan yüzeylerin üzerinde konumlanmış cisimlerden saçılma problemleri de ele alınmıştır. Deniz üzerinde yer alan gemiler, havada uçan uçaklar ve düzgün olmayan yer yüzeyinden gerçekleşen saçılma getirisi, örnek olarak düşünülebilecek bazı problemlerdir. Deniz veya okyanus yüzeyinde veya belirli bir yükseklik üzerinde var olan cisimlerin tespiti ile ilgili problemlere yönelik çözüm önerilerinin varlığı gözlenmiştir [9-12].

Tabakalı ortamlara ilişkin Green Fonksiyonları oluşturulurken Sommerfeld integrallerinin hesaplanması gerekir ki bu integraller, içerdiği Bessel fonksiyonlarının yavaş sönümlenir nitelikte olması nedeniyle hesaplanmaları uzun zaman alır ve işlemci üzerinde yüksek miktarda işlemsel yük oluşturur. Yapılan bazı çalışmalarda, bu integrallerin yerine kullanılabilecek bazı yaklaşımlar önerilmektedir. Bu yaklaşımlara örnek olarak MPIE (Mixed Potential Integral Equation), GPOF (Generalized Pencil of Functions) ve DCIM (Discrete Complex Image Method) verilebilir [13-17]. Bu türden yaklaşımlarla, sonsuz integrallerin hesaplanmasının yerini alabilecek, doğru ve daha etkin yöntemler oluşturulur.

### 1.2 Tezin Amacı

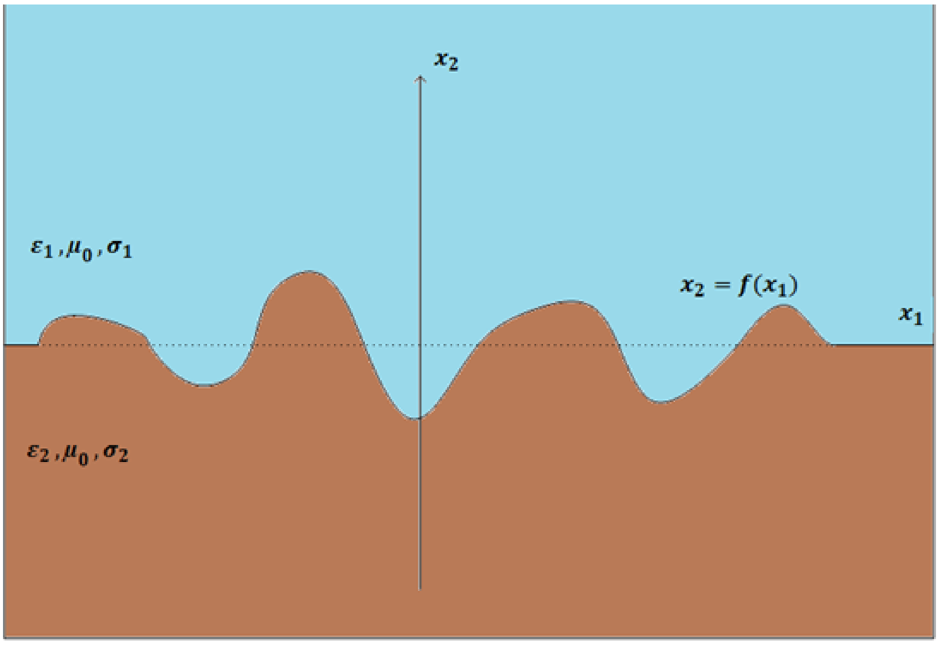
Tabakalı uzayları içeren elektromanyetik saçılma problemlerinin büyük bir kısmı, elektromanyetik aydınlatmanın yapıldığı tabakanın altında gömülü cisimlerin tespitini içermekle birlikte, üst tabakadaki cisimlerin varlığı durumu da göz önünde bulundurulmalıdır. Örnek olarak deniz altında bir geometri ele alınacak olursa, deniz – kaya düzgün olmayan arakesitinden belirli bir yükseklikte ve yine denizin içinden yapılan bir aydınlatma durumunda ölçümlerin aydınlatma çizgisi ile düzgün olmayan yüzey arasında bir konumda yapılacağı düşünülebilir. Bu durumda deniz altında yer alan, düzgün olmayan yüzey üzerine temas etmeyen bir cismin varlığı, bu cisimden saçılan elektromanyetik alanın bulunması ve bu cismin görüntülenmesi, bahsedilen tanımda bir probleme uygun olacaktır. Bu çalışmada öncelikle cismin var olmadığı durum ele alınarak, düzgün olmayan yüzeylere Gömülü Cisim Yaklaşımı (BOA) uygulanarak Green Fonksiyonları hesaplanacaktır. Ardından ortamdaki cismin de katkısı sonucu oluşacak elektromanyetik alan farkı, cisimden saçılan alan olacaktır [18]. Bu saçılan alandan yola çıkarak yinelemeli bir yöntem olan Kontrast Kaynak Yöntemi (KKY) kullanılacak, cisme ilişkin kontrast fonksiyonu oluşturulacak ve elektromanyetik parametreler yeniden elde edilecektir. Cismin gerçek konumu ve parametreleri ile kullanılan sayısal yöntemler sonucu elde edilen konumu ve parametreleri karşılaştırılacak; cismin görüntülenmesi gerçekleştirilecektir. Bölüm 2'de iki boyutlu saçılma probleminin tanımı ve Green Fonksiyonlarının hesaplanması, Bölüm 3'te iki boyutlu Green Fonksiyonları hesaplanırken kullanılacak ayrık yöntem olan Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyonları Yöntemi (GKFY) algoritması anlatılacaktır. Bölüm 4'te Green Fonksiyonları yardımıyla saçılan alan ifadesi elde edilecek, saçılan alan ve cisme ilişkin kontrast fonksiyonu kullanılarak KKY uygulanacaktır. Bölüm 5'te elde edilen sonuçlardan bir kısmına, son bölümde ise tanımlı problem için ileriye yönelik yapılabilecek iyileştirmelere ve bu problemin nasıl uygulanabileceğine yönelik önerilere yer verilecektir.

# 2. ELEKTROMANYETİK DALGALARIN DÜZGÜN OLMAYAN BİR YÜZEYLE AYRILAN İKİ PARÇALI UZAYDAN VE BU UZAYDAKİ BİR CİSİMDEN SAÇILMASI

Bu çalışmada, düzgün olmayan bir yüzeyle ayrılmış iki parçalı uzaydan elektromanyetik dalgaların saçılması ile ilgili bir problem ele alınacaktır. Problemin çözümünde sonsuz integrallerin yerine, yeni sayısal bir yöntem kullanılacaktır. Bu bölümde elektromanyetik saçılma için genel bir formülasyon verilecek, sonraki bölümde ise saçılma probleminin çözümü için yeni bir yaklaşım olan Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyonları Yönteminin (GKFY) nasıl kullanılacağı açıklanacaktır.

## 2.1 Problemin Geometrisi ve Tanımı

Ele alınacak saçılma problemine ilişkin geometri Şekil 2.1'de verilmiştir. Bu problemin kurulumunda, elektromanyetik özellikleri farklı olan iki yarı uzay, düzgün olmayan bir Γ yüzeyi ile ayrılmıştır, aradaki yüzeye ilişkin fonksiyon $x_2 = f(x_1)$ ile belirtilmiştir. Burada tekil değerli bir fonksiyon olan $f(x_1)$ aynı zamanda $x_1$ değerlerinin en büyük ve en küçük değerleri aralığında belirli uzunluklardaki bölgeler için farklı katsayılarla hesaplanarak elde edilen parçalı bir fonksiyondur. Parçalı fonksiyonlar kullanılabileceği gibi, Γ yüzeyi rastlantısal bir yüzey olarak da seçilebilir, bu durumda kullanılan parametreler karesel ortalama karekök (RMS) yüksekliği $\sigma_r$, korelasyon uzunluğu $l_c$ olmak üzere bir korelasyon fonksiyonu, düzgün olmayan yüzey fonksiyonu olarak belirlenir [7].



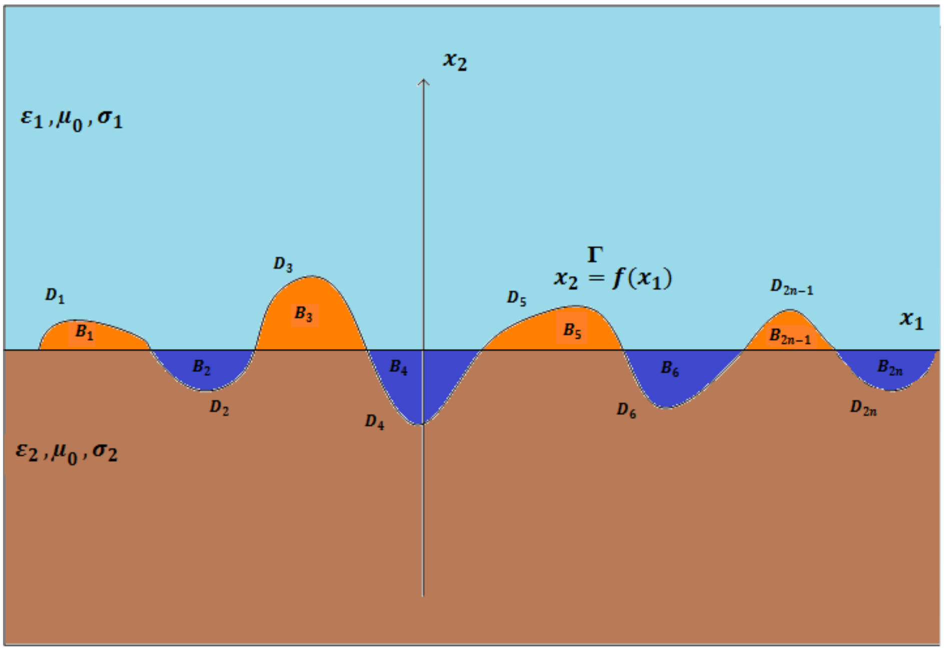

**Şekil 2.1 :** Düzgün olmayan yüzey ile ayrılmış iki parçalı uzay.

$x_2 > f(x_1)$ ve $x_2 < f(x_1)$ bölgeleri, dielektrik sabiti ve iletkenliği sırasıyla $\varepsilon_1$ , $\sigma_1$ ve $\varepsilon_2$ , $\sigma_2$ olan, manyetik olmayan $(\mu_1 = \mu_2 = \mu_0)$ kayıplı malzemelerden oluşmaktadır. Bu problemdeki esas amaç, cisim ve aydınlatmanın aynı ortamda $(x_2 > f(x_1))$ olduğu bir geometride düzgün olmayan Γ yüzeyinin etkisinin incelenmesidir ve bunun için saçılma problemi adım adım ele alınacaktır. İlk önce sadece düzgün olmayan yüzey ve toplam elektrik alana katkısı belirlenecek, sonrasında ise üst yarı uzaya eklenen cismin getireceği elektrik alan, yani cisimden saçılan alan bulunacaktır.

## 2.2 Düzgün Olmayan Yüzey Tanımı

Şekil 2.1’de yer alan geometriden yola çıkarak düzgün olmayan yüzeyden saçılan alanın incelenmesi için, öncelikle D bölgesindeki cismin yer almadığı durum ele alınır. Düzgün olmayan yüzey ise $x_2 = 0$ düzlemi ile ayrılmış olan, düzgün arakesitli iki parçalı uzayın $x_2 > 0$ ve $x_2 < 0$ bölgeleri ile $x_2 = f(x_1)$ fonksiyonunun sınırlandırdığı bölgelerde 2N adet gömülü cisim gibi düşünülebilir. Bu 2N adet cisimden $D_{2n-1}, n = 1,2, \dots, N$ ile adlandırılmış olanlar $x_2 > 0$ bölgesine gömülüdür ve elektromanyetik parametreleri $\varepsilon_2$ , $\sigma_2$ dir. $D_{2n}, n = 1,2, \dots, N$ ile adlandırılmış olanlar ise $x_2 < 0$ bölgesine gömülüdür ve elektromanyetik parametreleri $\varepsilon_1$ , $\sigma_1$ dir.

$D_m$ , $m = 1,2,\ldots 2N$ cisimlerinin $Ox_1x_2$ düzlemi ile kesit alanları da $B_m$ , $m = 1,2,\ldots,2N$ olmaktadır. Bu duruma ilişkin geometri Şekil 2.2'de görülmektedir.




**Şekil 2.2 :** Düzgün ara kesitli iki parçalı uzay ve gömülü cisimler.

Şekil 2.2'deki geometriye ilişkin toplam elektrik alan, $\boldsymbol{x} = (x_1,\ x_2) \in R^2$ ile tanımlı bir konum olmak üzere, $x_2 = 0$ düzlemi ile ayrılmış boş uzaya ilişkin elektrik alan $u_0\,(\boldsymbol{x})$ ve gömülü cisimlerden saçılan alan $u_s\,(\boldsymbol{x})$ toplamı şeklinde ifade edilmelidir, yani

$$u(\boldsymbol{x}) = u_0\,(\boldsymbol{x}) + u_s\,(\boldsymbol{x}) \qquad \textbf{(2.1)}$$

eşitliği geçerlidir ve bu toplam alan ifadesi, aşağıdaki indirgenmiş dalga denklemini $|\boldsymbol{x}| \to \infty$ için uygun radyasyon koşulu altında sağlamalıdır [19,20].

$$\Delta u + k^2(\boldsymbol{x})\,u = 0 \qquad \textbf{(2.2)}$$

Burada

$$k_i^{\,2} = \omega^2 \varepsilon_i\,\mu_0 + iw\,\sigma_i\,\mu_0 \quad ,i = 1,2 \qquad \textbf{(2.3)}$$

dalga sayısı ifadesi, üst ve alt ortamlar için tanımlanacak olursa

$$k^2(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} {k_1}^2, & x_2 > f(x_1) \\ {k_2}^2, & x_2 < f(x_1) \end{cases} \tag{2.4}$$

dalga sayısı fonksiyon olur. Parçalı boş uzaya ilişkin elektrik alan $u_0\,(\boldsymbol{x})$ de indirgenmiş dalga denklemini sağlamaktadır, yani

$$\Delta u_0 + k^2(x_2)\, u_0 = 0 \tag{2.5}$$

ifadesi geçerlidir. Bu durumdaki dalga sayısı fonksiyonu $k^2(x_2)$ aşağıdaki şekilde tanımlıdır.

$$k^2(x_2) = \begin{cases} {k_1}^2, & x_2 > 0 \\ {k_2}^2, & x_2 < 0 \end{cases} \tag{2.6}$$

Denklem (2.5) de görülen diferansiyel denklem çözümü

$$u_0\,(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} u_i(\boldsymbol{x}) + Re^{-ik_1(x_1 \cos\varphi_0 - x_2 \sin\varphi_0)}, & x_2 > 0 \\ Te^{-ik_2(x_1 \cos\chi + x_2 \sin\chi)}, & x_2 < 0 \end{cases} \tag{2.7}$$

ile verilir, bu çözümde $u_i(\boldsymbol{x})$, aydınlatmanın düzlem dalga ile yapıldığı kabul edilirse, düzlem dalgaya ilişkin elektrik alan ifadesidir, $u_i\,(\boldsymbol{x}) = e^{-ik_1(x_1 \cos\varphi_0 + x_2 \sin\varphi_0)}$ ile tanımlıdır, $\varphi_0$ geliş açısı, $\chi$ ise ikinci ortama geçen dalganın iletim (transmisyon) açısıdır ve Snell yasasına uygun olarak

$$k_1 \cos\varphi_0 = k_2 \cos\chi \tag{2.8}$$

ile hesaplanır. $R$ ve $T$ katsayıları , $x_2 = 0$ yüzeyinden yansıma ve iletim katsayılarıdır ve

$$R = \frac{k_1 \sin\varphi_0 - k_2 \sin\chi}{k_1 \sin\varphi_0 + k_2 \sin\chi} \quad , \quad T = \frac{2\,k_1 \sin\varphi_0}{k_1 \sin\varphi_0 + k_2 \sin\chi} \tag{2.9}$$

olarak hesaplanır. Buna göre $D_m$, $m = 1,2, \dots 2N$ gömülü cisimlerinin yarattığı elektrik alan ifadesi $u_s\,(\boldsymbol{x})$, aşağıdaki indirgenmiş dalga denklemini sağlayacaktır.

$$\Delta u_s(\boldsymbol{x}) + k^2(x_2)\, u_s(\boldsymbol{x}) = -k^2(x_2)\; \upsilon_R(\boldsymbol{x})\, u(\boldsymbol{x}) \tag{2.10}$$

$\upsilon_R(\boldsymbol{x})$ , ortamdaki cisimlerin varlığından dolayı oluşan, sadece cisimler üzerinde sıfırdan farklı, cisimler dışında sıfıra eşit olan cisim fonksiyonu olarak adlandırılan tanımlanmış bir fonksiyondur:

$$\upsilon_R(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \upsilon_1 = \dfrac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} - 1, & \boldsymbol{x} \in B_{2n-1}, n = 1,2,\dots,N \\ \upsilon_2 = \dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} - 1, & \boldsymbol{x} \in B_{2n}, n = 1,2,\dots,N \\ 0, & cisimlerin\ dışında \end{cases} \tag{2.11}$$

Denklem 2.10'da yer alan diferansiyel denklemin çözümünü ikinci türden bir Fredholm integral eşitliği şeklinde yazmak için düzgün ara kesitli iki parçalı uzay Green fonksiyonu $G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ kullanılarak

$$\begin{aligned} u_s(\boldsymbol{x}) = {} & {k_1}^2\, \upsilon_1 \sum_{n=1}^{N} \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\, \big(u_0(\boldsymbol{y}) + u_s(\boldsymbol{y})\big) d\boldsymbol{y} \\ & + {k_2}^2\, \upsilon_2 \sum_{n=1}^{N} \int_{B_{2n}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\, \big(u_0(\boldsymbol{y}) + u_s(\boldsymbol{y})\big) d\boldsymbol{y} \end{aligned} \tag{2.12}$$

elde edilir. Bir sonraki bölümde Green Fonksiyonu'nun iki parçalı uzay ifadesinin açık ifadesi verilecektir.

### 2.2.1 Düzgün arakesitli parçalı uzay Green Fonksiyonunun açık ifadesi

$G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ Green fonksiyonu tanım olarak aşağıdaki eşitliği sağlayacaktır.

$$\Delta G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) + k^2(x_2)\; G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = -\delta(\boldsymbol{x} - \boldsymbol{y}) \tag{2.13}$$

Burada, $\boldsymbol{y} \in R^2$ düzleminde herhangi bir nokta, $\delta$ ise Dirac delta dağılımıdır. Bu denklemin çözümü olan $G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ için öncelikle $x_1$ e göre Fourier dönüşümü uygulanır. $\upsilon$, Fourier Dönüşümüne ilişkin integrasyon değişkeni olmak üzere

$$\widehat{G}_0(\upsilon, x_2; \boldsymbol{y}) = \int_{-\infty}^{\infty} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\; e^{-i\upsilon x_1}\, dx_1 \tag{2.14}$$

elde edilir. Denklem 2.13'te $\Delta$ operatörünün ve denklem 2.14'te tanımı verilen Fourier dönüşümünün uygulanması durumunda

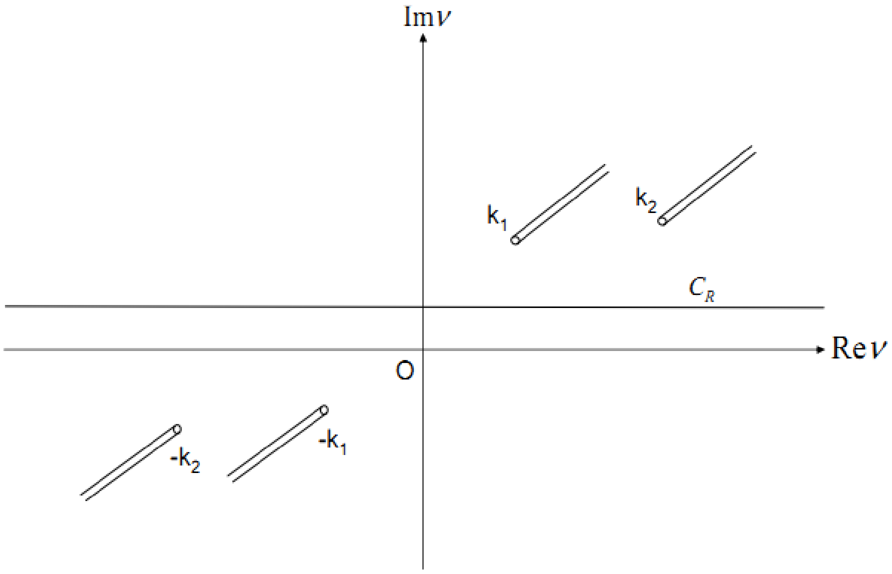
$$\frac{d^2\hat{G}_0}{d{x_2}^2} - \left(\upsilon^2 - {k_j}^2\right)\hat{G}_0 = e^{-i\upsilon y_1}\,\delta(x_2 - y_2)\ ,j = 1{,}2 \quad ;\ \upsilon \in C_R \qquad \textbf{(2.15a)}$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Bu diferansiyel denklemi

$$x_2 = 0\ \ da\ \ \hat{G}_0\ ve\ \frac{\partial\,\hat{G}_0}{\partial x_2}\ s\ddot{u}reklidir \qquad \textbf{(2.15b)}$$

$$|\boldsymbol{x}|\ \to \infty\ iken\left|\,\hat{G}_0\right|\ \to 0 \qquad \textbf{(2.15c)}$$

sınır koşulları altında çözülür. Şekil 2.3'te görülen $C_R$ çizgisi, kompleks $\upsilon$ düzleminde Fourier dönüşümünün yapıldığı, $\hat{G}_0$ ın süreksizlik noktalarından geçmeyen yatay bir integrasyon yolu olarak tanımlıdır.




**Şekil 2.3 :** Karmaşık $\upsilon$ düzlemi ve $\hat{G}_0$dönüşümü için süreksizlik çizgisi [18].

Denklem 2.14'te tanımlanmış olan Fourier dönüşümünden geriye giderek ters Fourier dönüşümü ile

$$G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R}\hat{G}_0(\upsilon, x_2;\boldsymbol{y})\ e^{i\upsilon x_1}\,d\upsilon \qquad \textbf{(2.16)}$$

ifadesi yazılır. Sınır koşulları göz önünde bulundurularak yapılan işlemler sonucunda $G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ Green fonksiyonunun açık ifadesi elde edilir.

$$G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \begin{cases} \frac{i}{4}\, H_0{}^{(1)}(k_1|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}|) + G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y});\ x_2 > 0, y_2 > 0 \\ G_{0T}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y});\ x_2 < 0, y_2 > 0 \\ G_{0T}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y});\ x_2 > 0, y_2 < 0 \\ \frac{i}{4}\, H_0{}^{(1)}(k_2|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}|) + G_{0R}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y});\ x_2 < 0, y_2 < 0 \end{cases} \qquad \textbf{(2.17)}$$

Burada

$H_0{}^{(1)}$, sıfırıncı derece birinci türden Hankel fonksiyonu, diğer fonksiyonlar ise

$$G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R} \frac{1}{2\,\gamma_1}\,\frac{\gamma_1-\gamma_2}{\gamma_1+\gamma_2}\, e^{\gamma_1(x_2+y_2)} e^{iv(x_1-y_1)}\, dv \qquad \textbf{(2.18a)}$$

$$G_{0T}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R} \frac{1}{2\,\gamma_1}\,\frac{2\gamma_1}{\gamma_1+\gamma_2}\, e^{-\gamma_1 y_2+\gamma_2 x_2} e^{iv(x_1-y_1)}\, dv \qquad \textbf{(2.18b)}$$

$$G_{0T}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R} \frac{1}{2\,\gamma_2}\,\frac{2\gamma_2}{\gamma_1+\gamma_2}\, e^{\gamma_2 y_2-\gamma_1 x_2} e^{iv(x_1-y_1)}\, dv \qquad \textbf{(2.18c)}$$

$$G_{0R}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R} \frac{1}{2\,\gamma_2}\,\frac{\gamma_2-\gamma_1}{\gamma_1+\gamma_2}\, e^{\gamma_2(x_2+y_2)} e^{iv(x_1-y_1)}\, dv \qquad \textbf{(2.18d)}$$

olarak tanımlıdır. $\gamma_i\,, i = 1{,}2$ fonksiyonları kompleks $v$ düzleminde tanımlı karekök fonksiyonlarıdır,

$$\gamma_1(v) = \sqrt{v^2 - k_1{}^2}, \quad \gamma_2(v) = \sqrt{v^2 - k_2{}^2} \qquad \textbf{(2.19)}$$

radyasyon koşuluna göre kompleks $v$ düzleminde $v = 0$ da

$$\gamma_j(0) = -ik_j\,, \qquad j = 1{,}2 \qquad \textbf{(2.20)}$$

olmaktadır.

### 2.2.2 Düzgün olmayan yüzey için integral eşitliği çözümü

Denklem 2.12'de verilen eşitlikten yola çıkarak $u_s(\boldsymbol{x})$ in elde edilmesi için MoM benzeri yaklaşımlar kullanılarak işleme başlanabilir. Öncelikle denklem 2.12, kısaltılmış bir biçimde yeniden ifade edilirse

$$(I - A)u_s(\boldsymbol{x}) = \bar{u}(\boldsymbol{x}) \tag{2.21}$$

elde edilir. Buradaki A, lineer bir operatör olmak üzere aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$\begin{aligned} Au_s(\boldsymbol{x}) = \sum_{n=1}^{N} [\, {k_1}^2\, \upsilon_1 \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\, u_s\,(\boldsymbol{y})\, d\boldsymbol{y} \\ + \; {k_2}^2\, \upsilon_2 \int_{B_{2n}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\, u_s\,(\boldsymbol{y})\, d\boldsymbol{y}\, ] \end{aligned} \tag{2.22}$$

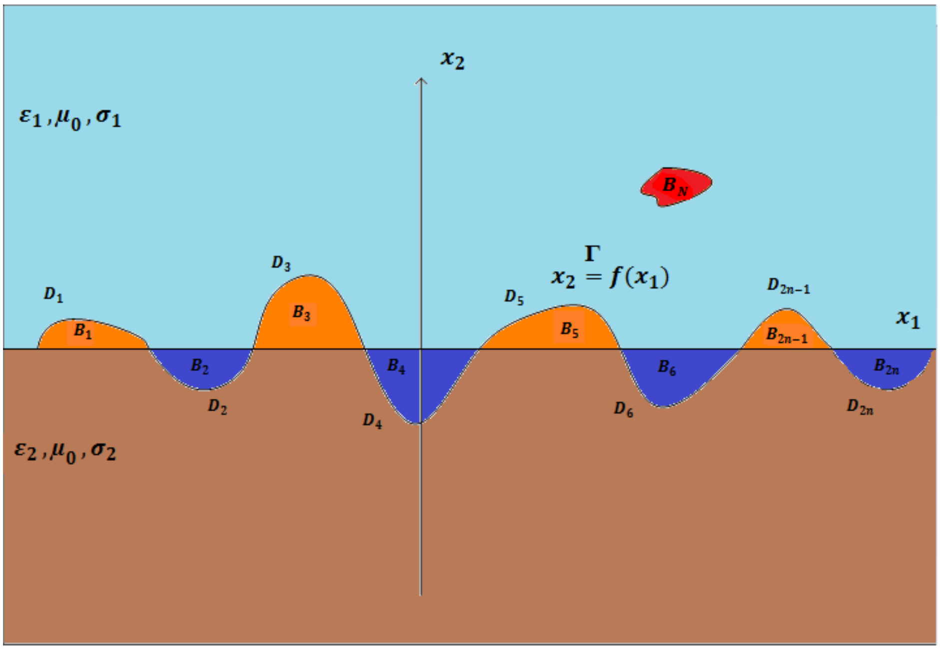
Eşitliğin sağ tarafındaki $\bar{u}(\boldsymbol{x})$ fonksiyonu ise

$$\begin{aligned} \bar{u}(\boldsymbol{x}) = \sum_{n=1}^{N} [\, {k_1}^2\, \upsilon_1 \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\, u_0\,(\boldsymbol{y})\, d\boldsymbol{y} \\ + \; {k_2}^2\, \upsilon_2 \int_{B_{2n}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\, u_0\,(\boldsymbol{y})\, d\boldsymbol{y}\, ] \end{aligned} \tag{2.23}$$

olmaktadır. Saçılan alanın çözümü için literatürde çeşitli çözümler mevcuttur [21,22].

## 2.3 Düzgün Olmayan Yüzey Üzerine Konumlanmış Cisimden Saçılma

Bölüm 2.2'de, $x_2 = 0$ düzleminin altında ve üstünde $D_m$, $m = 1,2,\dots 2N$ bölgelerinde var olduğu düşünülen cisimlerden yola çıkarak düzgün olmayan yüzey tanımlaması yapılmış, sonrasında ise ortamda gömülü cisimlerin (çukur ve tümseklerin) var olmadığı durum için düzgün arakesitli iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonu tanımlanmıştır. Bu bölümde ise ortamda bir başka cismin varlığı durumunda saçılan alan ifadesi elde edilecektir. Düzgün olmayan yüzey üzerinde bir cismin varlığı durumunda Şekil 2.4'teki geometri kullanılacaktır. Şekil 2.2'den farklı olarak üst yarı uzaydaki cisim ve bu cismi içeren N bölgesi de ele alınacaktır.




**Şekil 2.4 :** Düzgün olmayan yüzey üzerindeki cismi içeren geometri.

Literatürdeki çoğu çalışma, yüzey altında gömülü cisimleri konu alan saçılma problemlerini incelemektedir. Ancak bu çalışmada, cisim bölgesi, uygulama alanı daha kısıtlı olsa da $x_2 > f(x_1)$ de konumlandırılmış bir cismin varlığı durumunda cisimden saçılma problemi incelenecektir. Bu cisim B kesit alanlı D cismi olarak adlandırılacaktır. $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2) \in R^2$ olmak üzere elektromanyetik parametreleri $\varepsilon = \varepsilon(\boldsymbol{x})$ , $\sigma = \sigma(\boldsymbol{x})$ yani konuma bağlı olan cisim, ölçüm noktasında elde edilen toplam elektrik alana katkıda bulunacaktır. Artık saçılma problemi, D cisminin varlığı ve düzgün olmayan yüzey durumlarında saçılan alan üzerindeki etkiyi gözlemlemektir. $\tilde{u}(\boldsymbol{x})$, D cisminin varlığı durumunda ölçüm noktasındaki toplam alan fonksiyonu olmak üzere

$$\tilde{u}(\boldsymbol{x}) = u(\boldsymbol{x}) + \tilde{u}_s(\boldsymbol{x}) \quad \textbf{(2.24)}$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte $u(\boldsymbol{x})$, daha önce denklem 2.1'de tanımlanmış olup, düzgün olmayan yüzey varlığında ölçülen toplam alanı ifade ederken, $\tilde{u}_s(\boldsymbol{x})$ ise D bölgesinin eklenmesinden dolayı D bölgesindeki cisimden saçılan elektrik alanı belirtmektedir. $\tilde{u}(\boldsymbol{x})$ toplam elektrik alanı, indirgenmiş dalga denklemini sağlayacaktır.

$$\Delta\tilde{u} + \bar{k}^2(\boldsymbol{x})\,\tilde{u} = 0 \quad \textbf{(2.25)}$$

Burada $\bar{k}^2(\boldsymbol{x})$, tüm uzaya ilişkin dalga sayısını ifade etmektedir. Cisimden saçılan alan $\tilde{u}_s(\boldsymbol{x})$ ise

$$\Delta\tilde{u}_s + k^2(x_2)\,\tilde{u}_s = -{k_2}^2\,\upsilon_N(\boldsymbol{x})\,\tilde{u} \qquad \textbf{(2.26)}$$

eşitliğini Sommerfeld radyasyon koşulu altında sağlamaktadır. Bu denklemde yer alan $\upsilon_N(\boldsymbol{x})$ D bölgesindeki cisme ilişkin cisim fonksiyonudur ve tanım olarak

$$\upsilon_N(\boldsymbol{x}) = \frac{\varepsilon(\boldsymbol{x}) + \dfrac{i\sigma(\boldsymbol{x})}{\omega}}{\varepsilon'(\boldsymbol{x}) + \dfrac{i\sigma'(\boldsymbol{x})}{\omega}} - 1 \qquad \textbf{(2.27)}$$

şeklindedir, cisim dışında sıfır değerine sahiptir. Denklem 2.27'de görülen tanımda yer alan $\varepsilon'(\boldsymbol{x})$ ve $\sigma'(\boldsymbol{x})$ fonksiyonları

$$\varepsilon'(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \varepsilon_1, & x_2 > f(x_1) \\ \varepsilon_2, & x_2 < f(x_1) \end{cases}, \quad \sigma'(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \sigma_1, & x_2 > f(x_1) \\ \sigma_2, & x_2 < f(x_1) \end{cases} \qquad \textbf{(2.28)}$$

değerlerini almaktadır. Bölüm 2.1'de düzgün olmayan yüzeyden saçılan alana ilişkin diferansiyel denklem ve bu diferansiyel denklemin ikinci türden Fredholm integrali şeklinde ifade edilmesini sağlayacak düzgün arakesitle ayrılmış iki parçalı uzay Green Fonksiyonu tanımlanmıştı. Yeni durumda ise cisimden saçılan alanın diferansiyel denklem ifadesi bulunmaktadır ve yine bir Fredholm integrali ifadesine ulaşmak için artık düzgün olmayan yüzeyle ayrılmış olan parçalı uzay Green Fonksiyonu $\bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ tanımlanır. bu fonksiyon kullanılarak saçılan alana ilişkin aşağıdaki eşitlik oluşturulur.

$$\tilde{u}_s(\boldsymbol{x}) = {k_1}^2 \int_B \bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})\,\upsilon_N(\boldsymbol{y})\,\big(u(\boldsymbol{y}) + \tilde{u}_s(\boldsymbol{y})\big)d\boldsymbol{y} \qquad \textbf{(2.29)}$$

Bir sonraki bölümde, düzgün olmayan bir yüzeyle ayrılmış iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonunun açık ifadesi verilecektir.

### 2.3.1 Düzgün olmayan yüzeyle ayrılmış iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonu

Şekil 2.4'te verilmiş Γ düzgün olmayan yüzeyi ile ayrılan iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonu $\bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ olmak üzere

$$\Delta\bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) + k^2(\boldsymbol{x})\,\bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = -\delta(\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}) \tag{2.30}$$

eşitliği

$$\Gamma \text{ yüzeyinde } \bar{G} \ \ ve\ \frac{\partial\bar{G}}{\partial n}\ s\ddot{u}reklidir.$$

koşulu altında geçerlidir. Bu aşamada Bölüm 2.2.1'de bahsedilen, düzgün arakesitli parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonu da göz önünde bulundurulduğunda, düzgün olmayan yüzeyi oluşturan $D_m$, $m = 1,2,\ldots 2N$ bölgelerinin, boş uzay Green Fonksiyonlarına katkısı $G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ olarak düşünülürse

$$G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) - G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$$

elde edilir ve $G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ indirgenmiş dalga denklemini

$$\Delta G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) + k^2(x_2)\,G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = -k^2(x_{\boldsymbol{2}})\ \upsilon_R(\boldsymbol{x})\,\bar{G}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) \tag{2.31}$$

şeklinde sağlamaktadır. $\upsilon_R(\boldsymbol{x})$ cisim fonksiyonu daha önce denklem 2.11'de tanımlanmıştır. $G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ fonksiyonu yardımıyla denklem 2.31'de görülen diferansiyel denklem, aşağıdaki gibi ikinci türden bir Fredholm integraline dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) \ &= \ {k_1}^2\,\upsilon_1 \sum_{n=1}^{N} \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})\,(G_0(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y}) + G_s(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y}))\,d\boldsymbol{z} \\ &+ \ {k_2}^2\,\upsilon_2 \sum_{n=1}^{N} \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})\,(G_0(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y}) + G_s(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y}))\,d\boldsymbol{z} \end{aligned} \tag{2.32}$$

Buradan da Bölüm 2.2.2'de yapıldığı gibi bir kapalı form ifadesi oluşturulur.

$$(I-K)G_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = g(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) \tag{2.33}$$

elde edilir. Buradaki K, lineer bir operatör olmak üzere aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$KG_s(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \sum_{n=1}^{N} [\, {k_1}^2\, \upsilon_1 \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})\; G_s(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y})\; d\boldsymbol{z}$$
$$+\;\; {k_2}^2\, \upsilon_2 \int_{B_{2n}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})\; G_s(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y})\; d\boldsymbol{z}\,] \tag{2.34}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki $g(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ fonksiyonu ise

$$g(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) = \sum_{n=1}^{N} [\, {k_1}^2\, \upsilon_1 \int_{B_{2n-1}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})\; G_0(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y})\; d\boldsymbol{z}$$
$$+\;\; {k_2}^2\, \upsilon_2 \int_{B_{2n}} G_0(\boldsymbol{x};\boldsymbol{z})\; G_0(\boldsymbol{z};\boldsymbol{y})\; d\boldsymbol{z}\,] \tag{2.35}$$

olarak ifade edilir. Buradan sonra ise MoM benzeri çözümler yapılarak saçılma probleminin çözümü için gerekli olan düzgün olmayan iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonu elde edilir [18,21,22].

## 3. GREEN FONKSİYONLARININ HESAPLANMASINDA GKFY KULLANILMASI

Bir önceki bölümde elde edilen Green Fonksiyonlarının hesaplanması için kompleks $\upsilon$ düzleminde, $C_R$ sonsuz uzunluktaki integrasyon yolu üzerinde integral alınması gerekmektedir. Bu bölümde, bu integralin sayısal olarak hesaplanması yerine daha hızlı çözüm verecek olan bir yöntem kullanılacaktır. Bu yöntemde öncelikle Hankel Fonksiyonunun spektral gösterimi ele alınır. Hankel fonksiyonu; $\boldsymbol{x}$ gözlem noktası, $\boldsymbol{y}$ kaynak noktası ve bunlar arasındaki uzaklık

$$|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}| = \sqrt{(x_1-y_1)^2 + (x_2-y_2)^2} \qquad \textbf{(3.1)}$$

olmak üzere

$$\frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}|) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R} \frac{1}{2\,\gamma_1}\; e^{\gamma_1|\,x_2-y_2|} e^{i\upsilon(x_1-y_1)}\, d\upsilon \qquad \textbf{(3.2a)}$$

$$\frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_2|\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}|) = \frac{1}{2\pi}\int_{C_R} \frac{1}{2\,\gamma_2}\; e^{\gamma_2|\,x_2-y_2|} e^{i\upsilon(x_1-y_1)}\, d\upsilon \qquad \textbf{(3.2b)}$$

olarak tanımlanır. Denklem 3.2'lerde görülen eşitliklerin sağ tarafındaki integral çekirdekleri iki parça halinde incelenecek olursa, $e^{i\upsilon(x_1-y_1)}$ kompleks üstel terimi ve öncesindeki diğer terimler $\frac{1}{2\,\gamma_i} e^{\gamma_i|\,x_2-y_2|}, i = 1,2$ elde edilir. Denklem 2.18'de belirtilen Green Fonksiyonlarının sağ tarafında bulunan integral ifadeleri de denklem 3.2'lerdeki integral ifadeleri ile benzerlik göstermektedir. Denklem 2.18'de birinci ve dördüncü denklemlerde yer alan $G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ ve $G_{0R}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ fonksiyonları, denklem 3.2'lerin sağ tarafı şeklinde kolayca ifade edilebilir. Yansıyan terimlerdeki üstel terimlerin reel kısımları, denklem 3.2'ler ile aynı yapıdadır. $G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ sadece $\gamma_1$ e, $G_{0R}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ ise sadece $\gamma_2$ ye bağlıdır. Benzer durum ikinci ve üçüncü denklemlerde aynı kolaylıkta değildir çünkü hem $\gamma_1$, hem de $\gamma_2$ ye bağlı terimler mevcuttur, dolayısıyla birinci ve dördüncü denkleme göre daha farklı bir yaklaşım kullanılmalıdır.

### 3.1 Genelleştirilmiş Kalem Fonksiyonları Yöntemi

Bu bölümde, Green Fonksiyonlarının içerisinde yer alan sonsuz integrallerin sayısal olarak hesaplanması yerine daha hızlı çözüm üreten GKFY'nden bahsedilecektir. Bu yöntemde, belirli bir ε hata oranı ile yaklaşık aynı sonucu oluşturacak seri toplamlar kullanılacaktır. Bu serilerin genel yapısı aşağıdaki gibi olacaktır.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{N} B_n \, e^{e_n \, \delta_x \, x} \tag{3.3}$$

$f(x)$ fonksiyonu, N adet terim içerisinde $B_n$ katsayısı ve $e_n$ üstel terimi, belirli bir tolerans ile yaklaşık olarak elde edilecektir. Bu yöntem açıklanmasına, bir elektromanyetik dalganın geçici çözümü için yapılacak yaklaşımla başlanır [23-25].

$$y_k = \sum_{i=1}^{M} b_i \, e^{s_i \, \delta t \, k} \quad , k = 0,1, \dots , N-1 \tag{3.4}$$

Burada $b_i$ kompleks rezidü değerleri, $s_i$ kompleks kutup değerleri, $\delta t$ ise örnekleme aralığıdır. Gösterim kolaylığı açısından

$$z_i = e^{s_i \, \delta t} \tag{3.5}$$

yazılarak Z düzlemindeki kök değerleri elde edilir. Aşağıda GKFY'nde kullanılan algoritma, ana hatlarıyla açıklanacaktır. $\delta t = 1$ alınmıştır.

i. N üstel terim sayısı, karmaşık nü düzleminin örneklenme sayısı olarak seçilir.

ii. L = N/2 GKFY parametresi ve $y_i = [y_i, y_{i+1}, \dots , y_{i+N-L-1}]^T$enformasyon vektörü [25] olmak üzere $Y_1 = [y_0, y_1, \dots , y_{L-1}]$ ile $Y_2 = [y_1, y_2, \dots , y_L]$ matrisleri oluşturulur.

iii. $Y_1$ matrisine tekil değer ayrıklaştırması (SVD) uygulanır, burada tekil değerleri tutan matris S olmak üzere, L adet tekil değerden, birinci tekil değer ile oranına bakılarak bu oranın, belirlenen tolerans değerinden küçük olduğu ilk tekil değerin indisi, toplamda oluşacak seri toplamının kaç adet terimden oluşacağını belirtir.

iv. M değeri belirlendikten sonra tekil değer ayrıklaştırması sonucu elde edilen U,S ve V matrislerinin, M köşegen matrisleri oluşturulur.

v. Karmaşık kutuplara ilişkin matris elde edilir.

$$Z = S^{-1}\, U^{H}\, Y_2\, V \qquad \textbf{(3.6)}$$

Burada $D^{-1}$, tekil değer matrisinin tersi, $U^{H}$ ise üniter $U$ matrisinin konjüge transpozunu ifade eder.

vi. $z$ değerleri Z matrisinin özdeğerleri olmak üzere $e = log(z)$ üstel terimleri elde edilir.

vii. $b$ kompleks rezidü değerleri aşağıdaki matris denkleminden elde edilir.

$$[zz][b] = [y] \qquad \textbf{(3.7)}$$

$zz$ matrisinin elemanları $z^{i-1}, i = 1, .., N-1$ ve $y$ köşegen matris olmak üzere

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_M \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_M^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.8)}$$

$$[b] = [zz]_{N\times M}^{-1}[y]_{M\times M} \qquad \textbf{(3.9)}$$

çözümü elde edilir.

## 3.2 Yansıyan Terimlere İlişkin GKFY

İlk önce üst yarı uzaydaki duruma bakılacak olursa, hem gözlem, hem kaynak noktaları $k_1$ dalgasayılı üst ortamda bulunmaktadır. Bu durumda denklem 2.18'de yer alan $G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ eşitliği kullanılmalıdır. Bu eşitlikte yer alan $\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$ terimi, üstel terimler cinsinden yazılmalıdır. Böylelikle elde edilecek katsayılar kullanılarak, Hankel fonksiyonunun içeriği düzenlenecek, sayısal integralin alınmasına gerek kalmadan belirli bir sayıda üstel terimin toplanması yeterli olacaktır. Burada, $e^{-\gamma_1(x_2 + y_2)}$ teriminin işleme katılmadığı görülecektir, ancak üstel terimde yer alan $\gamma_1$ terimi hem gözlem, hem de kaynak noktaları için ortaktır, Hankel fonksiyonunun argümanı içerisinde mutlak değer ifadesinde uygun biçimde yazılarak kullanılacaktır.

Benzer şekilde alt yarı uzaydaki duruma bakılacak olursa; hem gözlem, hem kaynak noktaları $k_2$ dalgasayılı alt ortamda bulunmaktadır. Bu durumda $G_{0R}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ eşitliği kullanılacak ve bu eşitlikte yer alan $\frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}$ terimi, üstel terimler cinsinden yazılacaktır. Yine elde edilecek katsayılar kullanılarak, Hankel fonksiyonunun içeriği düzenlenecek, böylelikle sayısal integralin alınmasına gerek kalmayacaktır. Yine $e^{\gamma_2(x_2+\,y_2)}$ terimi GKFY ne girdi olan fonksiyonda yer almamaktadır. Hankel fonksiyonunun argümanı içerisinde yer alan mutlak değer ifadesi uygun biçimde yazılarak kullanılacaktır. Örnek olarak hem gözlem, hem de kaynak noktasının üst yarı uzayda olduğu duruma ilişkin Green fonksiyonu için

$$G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) \approx \sum_{n=1}^{N_u} \frac{i}{4} B_{n_u}\, e^{\frac{-\min v_u}{\Delta v} e_{n_u}} H_0^{(1)}\left(k_1\, \rho_{u_n}\right) \quad \textbf{(3.10)}$$

$$\rho_{u_n} = \sqrt{\left(x_1 - y_1 - \frac{i}{\Delta v}\, e_n\right)^2 + (x_2 + y_2)^2} \quad \textbf{(3.11)}$$

denklemlerindeki $v_u$ değeri, üst yarı uzay için kompleks $v$ düzleminin örnekleme aralığı, $\Delta v$ ise örnekleme noktaları arası uzaklıklığı göstermektedir. $\rho_u$ uzaklığı için dikkat edilmesi gereken iki unsurdan biri, uzaklık hesaplanırken görülen $-\frac{i}{\Delta v}\, e_n$ terimidir. Bu terim nedeniyle, bir tür ayrık kompleks görüntü yöntemi uygulanmaktadır; gözlem noktasının $y_1$ apsis değeri için kompleks düzlemde $N_u$ adet kompleks görüntüsü, uzaklık teriminin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bir diğer nokta ise ordinat terimi içerisindeki + işaretidir. Bu işaret reel $G_{0R}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ fonksiyonunun integral ifadesinde yer alan reel üstel terim içerisindeki ordinatlar arasındaki işaret ile aynıdır. Böylelikle Green fonksiyonunun yansıyan terimlerine ilişkin sonsuz integral hesaplaması yerine sınırlı sayıda üstel terimin toplanması gerçekleştirilerek zaman ve işlemci açısından önemli bir iyileştirme sağlanır.

### 3.3 İletim Terimlerine İlişkin GKFY

Denklem 2.18'de görülen Green Fonksiyonları ifadelerinden gözlem ve kaynak noktalarının farklı bölgelerde olduğu durumlar için iletim terimlerini içeren fonksiyonları incelemek gerekir. Denklem 2.18'deki $G_{0T}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ ve $G_{0T}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$

eşitlikleri içinde yer alan, GKFY ile Hankel fonksiyonunun argümanı biçimine getirilmesi istenen fonksiyonlarda yer alan üstel terimlerde hem $\gamma_1$, hem de $\gamma_2$ ye bağlı ifadeler bulunmaktadır. Yani yansıma terimindeki gibi doğrudan doğruya bir dönüşüm yapmak mümkün değildir. Bu nedenle iletim terimlerinde, her bir ordinat için ayrı ayrı hesaplama yapılmalıdır. $G_{0T}^{(1)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ ve $G_{0T}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ eşitlikleri için GKFY ne girdi olacak fonksiyonlar sırasıyla aşağıdaki gibidir

$$\frac{2\,\gamma_1}{\gamma_1 + \gamma_2}\, e^{\gamma_2 x_2 - \gamma_1\, par_d} \tag{3.12}$$

$$\frac{2\,\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}\, e^{-\gamma_1\, x_2 + \gamma_2\, par_u} \tag{3.13}$$

Bu fonksiyonlarda yer alan $par_d$ ve $par_u$ terimleri, yansıyan terimlerin GKFY ne girdi olacak kısmının ayarlanması için kullanılan parametrelerdir. Örnek olarak gözlem noktasının üst, kaynak noktasının alt yarı uzayda olduğu durumda $G_{0T}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y})$ Green fonksiyonu kullanılmalıdır. Bu fonksiyonun yaklaşık ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$G_{0T}^{(2)}(\boldsymbol{x};\boldsymbol{y}) \approx \sum_{n=1}^{N_d} \frac{i}{4} B_{n_d}\, e^{\frac{-\min v_d}{\Delta v} e_{n_d}} H_0^{(1)}\left(k_1\, \rho_{d_n}\right) \tag{3.14}$$

$$\rho_{d_n} = \begin{cases} \sqrt{\left(x_1 - y_1 - \frac{i}{\Delta v}\, e_n\right)^2 + (\,x_2 - par_{down})^2} & ,\max(x_2) < 0 \\ \sqrt{\left(x_1 - y_1 - \frac{i}{\Delta v}\, e_n\right)^2 + \left(par_{up} - x_2\right)^2} & ,\min(x_2) > 0 \end{cases} \tag{3.15}$$

bu durum için $\rho_d$ uzaklığının ikinci değeri kullanılır. GKFY ne ilişkin kullanılan fonksiyon, iletim terimleri için gözlem noktalarının tüm ordinatları için birer kere çağrılmalıdır. Buna rağmen, sayısal integral alındığı duruma göre daha etkin bir çözüm olacağı açıktır, özellikle artan gözlem nokta sayısı için yöntem daha etkin hale gelmektedir.

# 4. PROBLEM ÇÖZÜM ADIMLARI VE GKFY'NİN KULLANIMI

Bir önceki bölümde, hem düzgün, hem de düzgün olmayan arakesitli iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonlarının elde edilmesinde GKFY nin nasıl uygulanacağı açıklanmıştır. Bu bölümde ise elde edilecek Green Fonksiyonları yardımıyla üst yarı uzayda bulunan bir cisimden saçılan alan ifadesi oluşturulacaktır. Saçılan alandan yararlanarak KKY aracılığıyla cisme ilişkin elektromanyetik parametreler oluşturulacak, bulunan değerler ile cismin gerçek değerleri karşılaştırılarak elektromanyetik görüntüleme gerçekleştirilecektir.

## 4.1 Saçılma Probleminin Çözümü

Tanımlanmış elektromanyetik saçılma problemi için fiziksel örnek verilmesi gerekirse, hava – yeryüzü arakesiti üzerinde havada bulunan bir cisim ele alınabilir. Benzer şekilde deniz altında yer alan herhangi bir nesne, dip kısmı düzgün kesitli olmayan bir deniz – toprak arakesitinin üzerinde, şekli ve kesin yeri bilinmeyen bir yerde bulunmakta, ölçüm noktaları ise yine deniz içinde yerleştirilmiş bir sistem düşünülebilir. Aydınlatmanın çizgisel kaynakla yapıldığı düşünülerek verilen geometri için çözüme başlamadan önce sistemde elektrik alan ölçümlerinin yapılacağı, Green Fonksiyonlarının hesaplanacağı bölgeler aşağıdaki gibi açıklanabilir;

i) N: cismi içeren, cisim bölgesi

ii) M: yalnızca ölçüm çizgisini içeren, ölçüm bölgesi

iii) $N_{up}$: Düzgün olmayan yüzey ile $x_2 > 0$ 'ı sağlayan hücrelerin (tümseklerin) oluşturduğu tümsek bölgesi

iv) $N_{down}$: Düzgün olmayan yüzey ile $x_2 < 0$ 'ı sağlayan hücrelerin (çukurların) oluşturduğu çukur bölgesi

v) R1 : $x_2 > 0$ bölgesinde ancak $N_{up}$ bölgesinde olmayan, üst bölge

vi) R2 : $x_2 < 0$ bölgesinde ancak $N_{down}$ bölgesinde olmayan, alt bölge

Verilen bu bölgeler için hesaplanacak Green Fonksiyonları'nda kullanılan GKFY parametreleri ($\min \upsilon, \Delta\upsilon, par_u, par_d$), R1 ve R2 bölgelerine ait olanlar aynı olmak üzere, toplamda beş ayrı değere sahiptir ve bu değerler, belirli bir oranda keyfidir. GKFY uygulanırken bu parametrelerin seçimi, sonucun doğruluğu üzerinde belirleyici etkiler göstermektedir. GKFY uygulanarak bu altı bölge için $B_n, e_n$ katsayı ve üstel terimleri elde edilir. Bu üstel terimler kullanılarak N, M, $N_{up}$ ve $N_{down}$ bölgelerine ilişkin Green Fonksiyonları, Denklem 3.10 ve denklem 3.14'e uygun olacak şekilde oluşturulur. ($N_{down}$ bölgesi için iletim, diğerleri için ise yansıyan terimler kullanılır.)

Green Fonksiyonları belirlendikten sonra iki parçalı uzayın $x_2 = 0$ ile ayrıldığı duruma ilişkin toplam alan, Green Fonksiyonları yardımıyla oluşturulur.

$$u_{0_{up}} = E_n \frac{i}{4} H_0^{(1)}\left(k_1\, \rho_{up}\right) + E_n G_{up} \quad \textbf{(4.1a)}$$

$$u_{0_N} = E_n \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1\, \rho_N) + E_n G_N \quad \textbf{(4.1b)}$$

$$u_{0_M} = E_n \frac{i}{4} H_0^{(1)}(k_1\, \rho_M) + E_n G_M \quad \textbf{(4.1c)}$$

$$u_{0_{down}} = E_n G_{down} \quad \textbf{(4.1d)}$$

Bu denklem takımında yer alan $E_n$, çizgisel kaynağın genliğidir, tüm ortamlar için sabit katsayı olarak kullanılır. $\rho$ değerleri, toplam alanın hesaplandığı bölgedeki noktalar ile aydınlatma noktaları arasındaki uzaklığı temsil etmektedir. $G$ ise ilgili bölgeye ait Green Fonksiyonudur. Sadece çukurlara ilişkin bölgede yansıyan terimin kullanıldığı Green Fonksiyonu yer alırken, diğer bölgelerde ise doğrudan aydınlatma kaynağından gelen alanlar ve ilgili bölgeden yansıyan terimi içeren Green Fonksiyonu bulunmaktadır.

Çukur ve tümsek bölgeleri için cisim fonksiyonları yazılır. Tümsek bölgesi için çukurlar ve alt yarı alt ortam ile bu ortamlara ilişkin parametreler, çukur bölgesi için ise tümsekler üstteki ortam ve parametreleri, cisim olarak ele alınmalı ve cisim fonksiyonları aşağıdaki gibi oluşturulmalıdır.

$$V_{up} = \frac{\omega\varepsilon_2 + i\sigma_2}{\omega\varepsilon_1 + i\sigma_1} - 1 \quad \textbf{(4.2a)}$$

$$V_{down} = \frac{\omega\varepsilon_1 + i\sigma_1}{\omega\varepsilon_2 + i\sigma_2} - 1 \quad \textbf{(4.2b)}$$

Çukur, tümsek, cisim ve ölçüm bölgelerine ilişkin, iki parçalı uzayın $x_2 = 0$ ile ayrıldığı durumda bu bölgelerin katkısı sonucu bu bölgelerden saçılan alan hesaplaması düz problem çözümü ile yapılır. Denklem 2.12 ve denklem 2.21'e uygun olacak şekilde

$$U_{s_{up}} = (I - {k_1}^2 \left(V_{up}\right)^T [G]_{up \times up})^{-1} \;\; u_{0_{up}} \quad \textbf{(4.3a)}$$

$$U_{s_{down}} = (I - {k_2}^2 \left(V_{down}\right)^T [G]_{down \times down})^{-1} \;\; u_{o_{down}} \quad \textbf{(4.3b)}$$

$$U_{s_N} = u_{o_N} + [G]_{N \times Ngup} \times \left({k_1}^2 V_{up} U_{s_{up}}\right) + [G]_{N \times down} \times \left({k_2}^2 V_{down}\, U_{s_{down}}\right) \quad \textbf{(4.3c)}$$

$$U_{s_M} = u_{o_M} + [G]_{M \times up} \times \left({k_1}^2 V_{up} U_{s_{up}}\right) + [G]_{M \times down} \times \left({k_2}^2 V_{down}\, U_{s_{down}}\right) \quad \textbf{(4.3d)}$$

saçılan alan ifadeleri elde edilir. $[G]_{g \times k}$ (g: gözlem, k: kaynak) ifadeleri, düzgün arakesitli iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonunun integral ifadeleridir.

Cisme ilişkin düzgün olmayan yüzey de hesaba katılarak, düzgün olmayan yüzeyle ayrılmış iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyon matrisleri elde edilir. Denklem 2.29 ve denklem 2.33'e göre

$$[G_R]_{up \times N} = (I - {k_1}^2 \left(V_{up}\right)^T [G]_{up \times up})^{-1} [G]_{up \times N} \quad \textbf{(4.4a)}$$

$$[G_R]_{down \times N} = (I - {k_2}^2 \left(V_{down}\right)^T [G]_{down \times down})^{-1} [G]_{down \times N} \quad \textbf{(4.4b)}$$

$$[G_R]_{M \times N} = [G]_{M \times N} + [G]_{M \times up} \times \left[V_{up}\, {k_1}^2 [G_R]_{up \times N}\right] + [G]_{M \times down} \times \left[V_{down}\, {k_2}^2 [G_R]_{down \times N}\right] \quad \textbf{(4.4c)}$$

$$[G_R]_{N\times N} = [G]_{N\times N} + [G]_{N\times up} \times \left[V_{up}\, {k_1}^2\, [G_R]_{up\times N}\right] + [G]_{N\times down} \times \left[V_{down}\, {k_2}^2\, [G_R]_{down\times N}\right] \quad \textbf{(4.4d)}$$

$$[G_R]_{up\times M} = \left(I - {k_1}^2\, \left(V_{Ngup}\right)^T [G]_{up\,\times\, up}\right)^{-1} [G]_{up\,\times\, M} \quad \textbf{(4.4e)}$$

$$[G_R]_{down\times M} = \left(I - {k_2}^2\, (V_{down})^T [G]_{down\,\times\, down}\right)^{-1} [G]_{down\,\times\, M} \quad \textbf{(4.4f)}$$

$$[G_R]_{N\times M} = [G]_{N\times M} + [G]_{N\times up} \times \left[V_{Ngup}\, {k_1}^2\, [G_R]_{up\times M}\right] + [G]_{N\times down} \times \left[V_{Ngdown}\, {k_2}^2\, [G_R]_{down\times M}\right] \quad \textbf{(4.4g)}$$

Green fonksiyonları elde edilir.

$[G_R]_{g\times k}$ (g: gözlem, k: kaynak) ifadeleri, düzgün olmayan yüzey ile ayrılmış iki parçalı uzaya ilişkin Green Fonksiyonunun integral ifadeleridir.

Tüm uzaya ilişkin Green Fonksiyonları elde edildikten sonra artık N bölgesinde yer alan cisimden saçılan alanı elde etmek mümkündür. Bunun için, $k_N$ Cisim bölgesi için dalga sayısı olmak üzere

$$k_N = \sqrt{\omega^2 \varepsilon_N \mu_N + i\omega\sigma_N \mu_N} \quad \textbf{(4.5)}$$

olarak ifade edilir. N cisim bölgesi için cisim fonksiyonu

$$V_N = \frac{\omega\, \varepsilon_{obj} + i\, \sigma_{obj}}{\omega\varepsilon_0 + i\, \sigma_0} - 1 \quad \textbf{(4.6)}$$

şeklindedir. Cisim fonksiyonu kullanılarak, cisimden saçılan alan

$$U_s = [G_R]_{N\times M}{}^T \times \left[{k_1}^2 V_N\, U_{temp}\right] \quad \textbf{(4.7)}$$

olarak elde edilir, bu denklemde

$$U_{temp} = \left(I - {k_1}^2\, (V_N)^T [G_R]_{N\,\times\, N}\right)^{-1}\ U_{s_N} \quad \textbf{(4.8)}$$

olmaktadır.

## 4.2 Kontrast Kaynak Yöntemi (KKY) Aracılığıyla Cismin Görüntülenmesi

Denklem 4.7'de görülen, N bölgesindeki cisimden saçılan alan ifadesi kullanılarak KKY uyarınca aşağıda tanımı verilen, hata fonksiyoneli ifadesini minimize edecek yinelemeler uygulanır [26, 27].

$$F = \left( \frac{\sum_j \left\| U_{s_j} - ([G_R]_{M\times N})_j \, J_j \right\|_S^2}{\sum_j \left\| U_{s_j} \right\|_S^2} + \frac{\sum_j \left\| V_j \left(U_{s_N}\right)_j - J_j + V_j \left([G_R]_{N\times N}\right)_j \, {k_N}^2 J_j \right\|_D^2}{\sum_j \left\| V_j \left(U_{s_N}\right)_j \right\|_D^2} \right) \tag{4.9}$$

Bu hata fonksiyoneli tanımındaki ilk terim, veri denklemlerindeki, ikinci terim ise durum denklemlerindeki hatayı belirtir. Buradaki veri ve durum denklemleri

$$U_{s_j} = ([G_R]_{M\times N})_j \, J_j \tag{4.10}$$

$$V_j \left(U_{s_N}\right)_j = J_j - V_j \left([G_R]_{N\times N}\right)_j \, {k_N}^2 J_j \tag{4.11}$$

olarak tanımlıdır. Her yinelemede önce $J_j$ kontrast kaynak değerleri, ardından $V_j$ kontrast değerleri güncellenir ve her güncellemede F fonksiyoneli azalma eğilimi gösterir. Öncelikle yinelemelere başlangıç değerleri belirlenir. Başlangıçta hata fonksiyoneli sıfır değerindedir. Başlangıç değeri belirlenecek ilk ifade, kontrast kaynak fonksiyonu $J$ dir ve bu değer ters propogasyon sonucuna göre oluşturulur.

$$J_0 = \frac{\left\| {[G_R]_{N\times M}}^T \, U_s \right\|_D^2}{\left\| [G_R]_{M\times N} {[G_R]_{N\times M}}^T U_s \right\|_S^2} \, {[G_R]_{N\times M}}^T \, U_s \tag{4.12}$$

Cisim bölgesi N üzerindeki toplam alan

$$U_0 = U_{s_N} + [G_R]_{N\times N} \times ({k_N}^2 J_0) \tag{4.13}$$

olmak üzere kontrast fonksiyonuna ilişkin ilk değer olarak

$$V_0 = \frac{J_0}{U_0} \quad \textbf{(4.14)}$$

elde edilir. Durum ve veri hatalarına ilişkin ilk değerler

$$r_{j,0} = V_0 U_0 - J_0 \quad \textbf{(4.15)}$$

$$\rho_{j,0} = U_s - [G_R]_{M\times N}\, {k_N}^2 J_0 \quad \textbf{(4.16)}$$

olarak tanımlıdır. İlk değerler belirlendikten sonra yinelemeler başlatılır ve bu yinelemeler konjüge gradyan yöntemi ile belirlenen Polak-Ribiere yönleri kullanılarak yapılır. Bu yönler $v_n$ ile tanımlanırsa kontrast fonksiyonu

$$V_n = V_{n-1} + \alpha_n\, v_n \quad \textbf{(4.17)}$$

olarak güncellenir. Buradaki $\alpha_n$, denklem 4.9'daki hata fonksiyoneli ifadesini minimize edecek bir katsayıdır ve açık ifadesi [26] da görülebilir. Kontrast fonksiyonu güncellendikten sonra

$$U_n = U_{n-1} + \alpha_n [G_R]_{N\times N}\; {k_N}^2\, v_n \quad \textbf{(4.18)}$$

alan fonksiyonu da güncellenir. Her yineleme sonunda elde edilen durum ve veri hataları da

$$r_{j,n} = V_n U_n - J_n \quad \textbf{(4.19)}$$

$$\rho_{j,n} = U_s - [G_R]_{M\times N}\, {k_N}^2 J_n \quad \textbf{(4.20)}$$

şeklinde güncellenecektir.

F fonksiyonelini küçültecek olan kısım olarak

$$F'_D = \|V_n\, u_n - J_n\|_D^2 \quad \textbf{(4.21)}$$

ifade edilir. (n). ila (n-1). yinelemelerde gerçekleşen güncellemelere göre F fonksiyoneli, belirli bir eşik hatanın altında kalıyorsa yinelemeler sona erer. Bir başka deyişle,

$$F_n - F_{n-1} < \epsilon \tag{4.22}$$

$\epsilon$ belirlenmiş hata kriteridir ve hata fonksiyonelinin 2 yineleme arasındaki fark bu kriterin üzerinde olduğu sürece yinelemeler devam etmektedir. Yine $K$ yineleme sayısının en büyük değeri belirleyici bir kriterdir, daha küçük $\epsilon$ yani daha yüksek doğruluk payı için yapılması gereken yineleme sayısı artacaktır. İterasyonlar sona erdiğinde elde edilen $V_n$ kontrast ifadesi

$$V_n = Re(V_n) + i\, Im(V_n) \tag{4.23}$$

açık ifadesi ile yazılabilir ve birtakım hesaplamalar sonucu bu ifadeden

$$Re(V_n) = \left(\frac{\left(Re\left(J_n\, conj(U_n)\right) /\ |U_n|\right)^2}{|U_n|^2}\right)^{1/2} \tag{4.24}$$

$$Im(V_n) = \left(\frac{\left(Im\left(J_n\, conj(U_n)\right) /\ |U_n|\right)^2}{\eta^2 |U_n|^2}\right)^{1/2} \tag{4.25}$$

reel ve sanal kısımları elde edilir. Buradaki $\eta$ değeri, ilk gelen dalganın, diğer gelen dalgalara oranıdır. Yinelemeler sonucu elde edilen, hata fonksiyonelini minimize eden $V_n$ kontrast fonksiyonundan yola çıkarak cisme ilişkin elektriksel geçirgenlik ve iletkenlik katsayıları aşağıdaki şekilde oluşturulur.

$$\varepsilon_{cisim} = \frac{\omega\, \varepsilon_N \left(real\ (V_n\ + 1)\right) - \sigma_N (imag(V_n))}{\omega} \tag{4.26}$$

$$\sigma_{cisim} = \frac{real\ (V_n\ + 1)\ (\omega^2\, {\varepsilon_N}^2 + {\sigma_N}^2) - \omega^2\, \varepsilon_N\, \varepsilon_{cisim}}{\sigma_N} \tag{4.27}$$

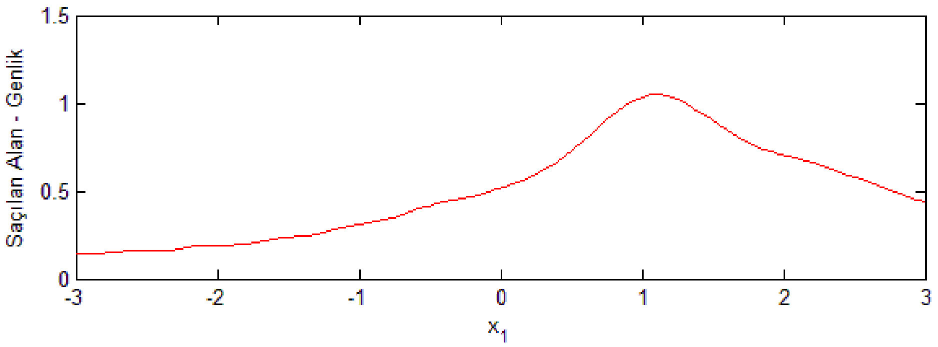
Bulunan bu değerler ile, cisme ilişkin gerçek elektromanyetik özellikler karşılaştırılarak görüntüleme gerçekleştirilir.

# 5. SAYISAL ÖRNEKLER

Önceki bölümlerde anlatılan yöntemler kullanılarak, iki parçalı uzayı ayıran düzgün olmayan yüzeyden saçılma ile ilgili sayısal örnekler verilecektir. İlk örnek için iki parçalı uzaya ait, üst ve alt yarı uzayın tanımı ve elektromanyetik parametreleri, cismin konumu ve elektromanyetik parametreleri, aydınlatma yapılan kaynağın türü, $x_2 = 0$ düzleminden olan uzaklığı, frekansı, ölçüm yapılacak olan doğrultunun $x_2 = 0$ düzleminden olan uzaklığı, gürültü oranı gibi birtakım parametreler belirtilecektir. Sonraki örneklerin her birinde ise fiziksel parametrelerin, saçılan alan ve KKY sonucunda elde edilen dielektrik sabiti değerleri üzerindeki değişim etkisi gözlenecektir.

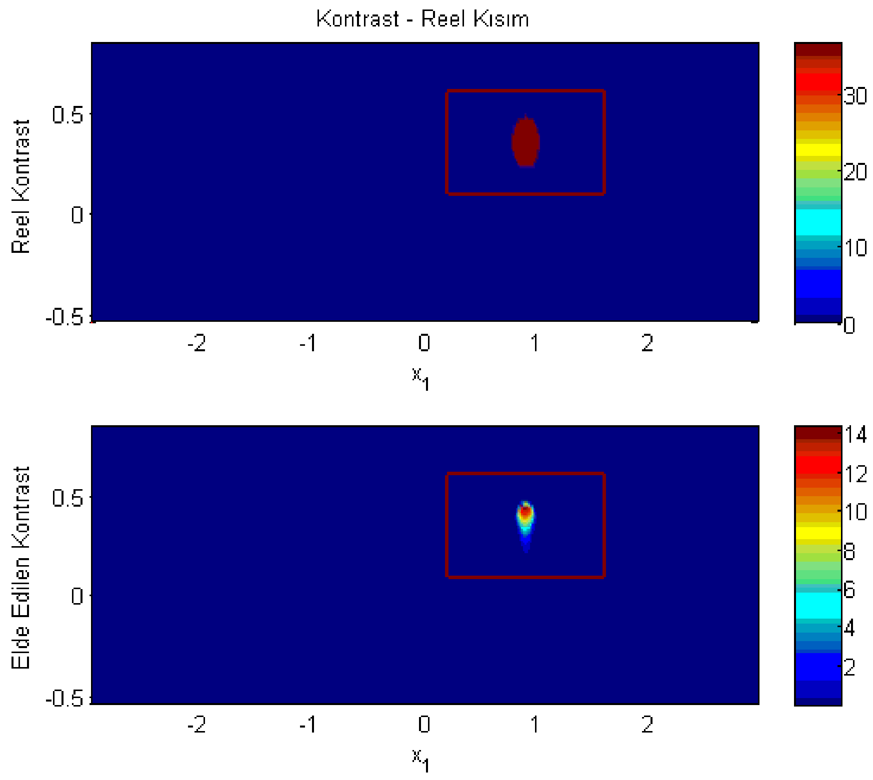
İlk örnekte, üst yarı uzay hava, alt yarı uzay ise düşük dielektrik katsayılı bir malzeme olan kuru toprak ile doludur ve elektromanyetik parametreleri $\varepsilon_2 = 3.6\,\varepsilon_0$ , $\sigma_2 = 0.0001\,S/m,\ \mu_2 = \mu_0$ şeklindedir. $r = 0.125\,\lambda$ yarıçaplı dairesel bir cisim $(0.9\,\lambda, 0.15\,\lambda)$ konumunda yer almaktadır ve elektromanyetik parametreleri $\varepsilon_c = 37.7\,\varepsilon_0$ , $\sigma_c = 0.1\,S/m,\ \mu_c = \mu_0$ şeklindedir. $x_2 = 0$ düzleminden $0.95\,\lambda$ yukarıda $100$ adet ölçüm noktası bulunmaktadır. $x_2 = 0$ düzleminden $1\,\lambda$ yukarıda $21$ adet çizgisel dalga kaynağı, $300$ MHz frekansı ile aydınlatma yapmaktadır. Ortam gürültüsüzdür.

Bu parametrelerle tanımlanmış iki parçalı uzayda, cisimden saçılan alana ilişkin grafik Şekil 5.1’de görülmektedir. Cismin bulunduğu bölgede alan dağılımı en büyük değerlerdedir. Böylelikle cismin yatay eksendeki konumu yaklaşık olarak belirlenebilir.

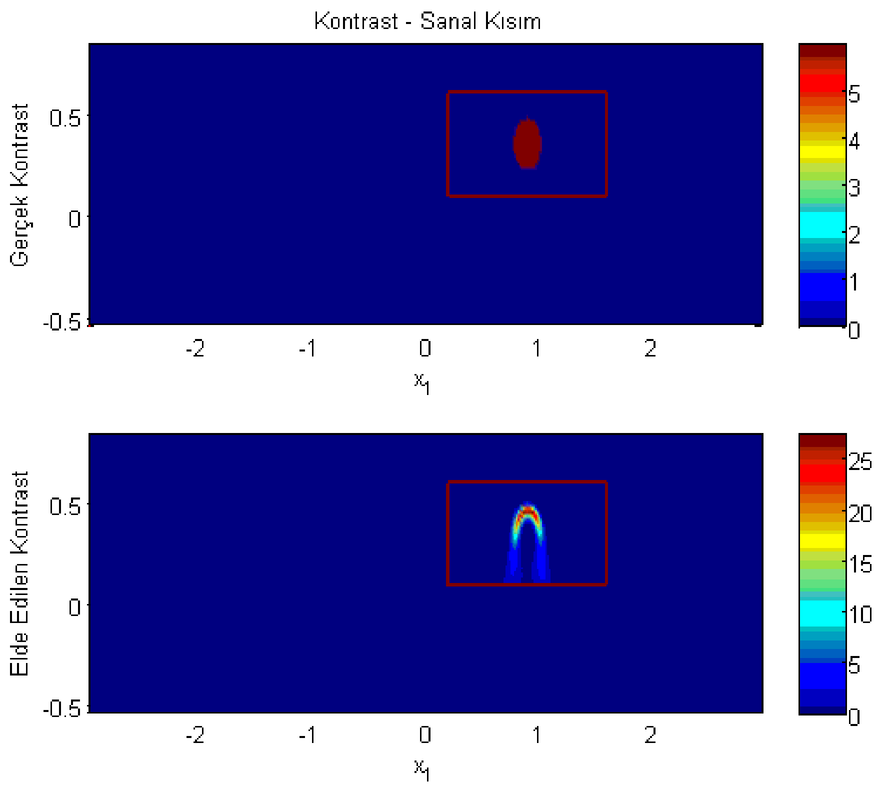



**Şekil 5.1 :** Örnek 1 için saçılan alan.

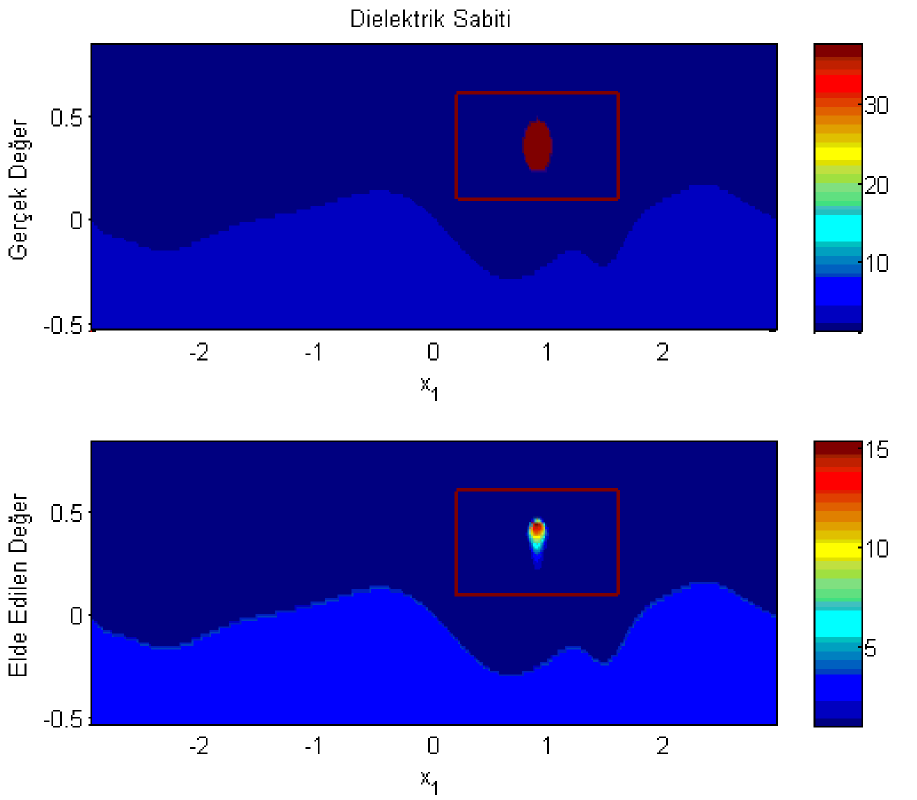
Saçılan alan verisi kullanılarak KKY sonucunda, uygun hata kriterine ulaşıldığı durumda elde edilen kontrast fonksiyonunun, gerçek kontrast fonksiyonu ile karşılaştırması, reel kısımlar için Şekil 5.2'de, sanal kısımlar için Şekil 5.3'te görülmektedir. KKY sonucunda elde edilen kontrast fonksiyonundan yola çıkılarak denkem 4.26 ve denklem 4.27 uyarınca, cisme ilişkin dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri hesaplanır. Bu hesaplamaların sonuçlarından dielektrik sabitinin gerçek ve elde edilen değerleri Şekil 5.4'te, iletkenlik değerleri için gerçek ve elde edilen değerleri ise Şekil 5.5'te görülmektedir. Dielektrik sabiti ve iletkenlik değerleri için yorum yapılacak olursa; cismin konumunu yaklaşık olarak doğru göstermektedir. Gerçek değerleri ile kıyaslandığında daha düşük değerler elde edilmektedir. Bunun sebebi olarak, iteratif bir yöntem olan KKY'nin getirdiği kısıtlama, düzgün olmayan yüzey varlığı,. gösterilebilir. Bu ve benzer etkiler, ilerleyen örneklerde ele alınacaktır.



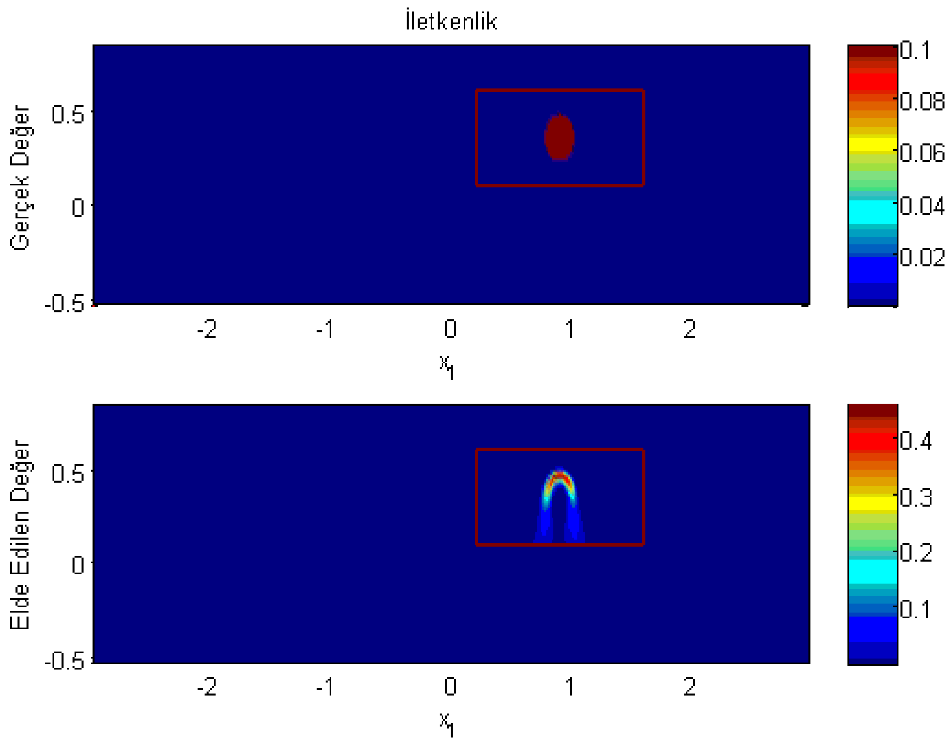

**Şekil 5.2 :** Örnek 1 için kontrast fonksiyonunun reel kısımlarının karşılaştırılması.




**Şekil 5.3 :** Örnek 1 için kontrast fonksiyonunun sanal kısımlarının karşılaştırılması.

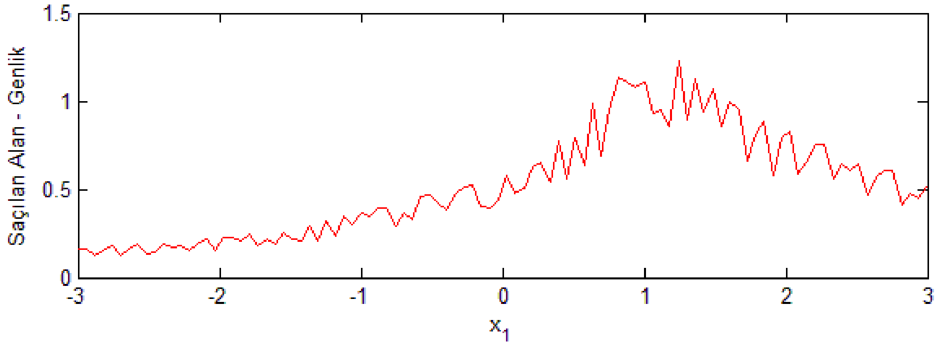



**Şekil 5.4 :** Örnek 1 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.



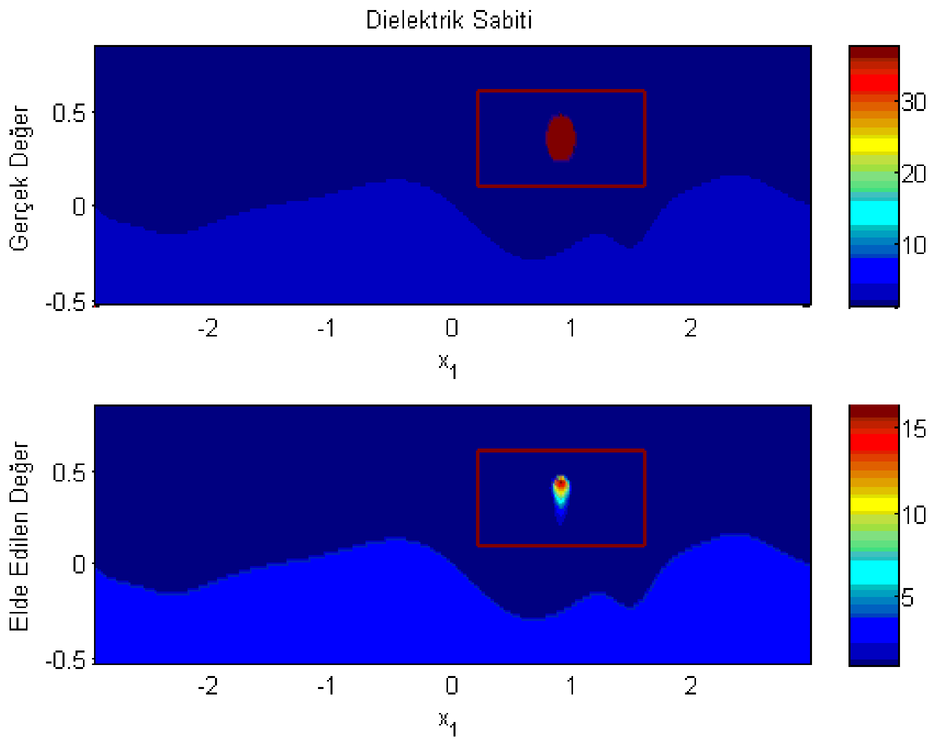

**Şekil 5.5 :** Örnek 1 için iletkenlik değerinin karşılaştırılması.

İkinci örnekte, ortama gürültü etkisi eklenmiştir. Bu etki sonucunda cisimden saçılan alan Şekil 5.6'da görülmektedir. Şekil 5.1 ile karşılaştırıldığında, gürültünün etkisi ile saçılan alan değerlerinde artış ve dalgalanmalar görülmektedir. Yine de cismin bulunduğu yer için fikir vermektedir.



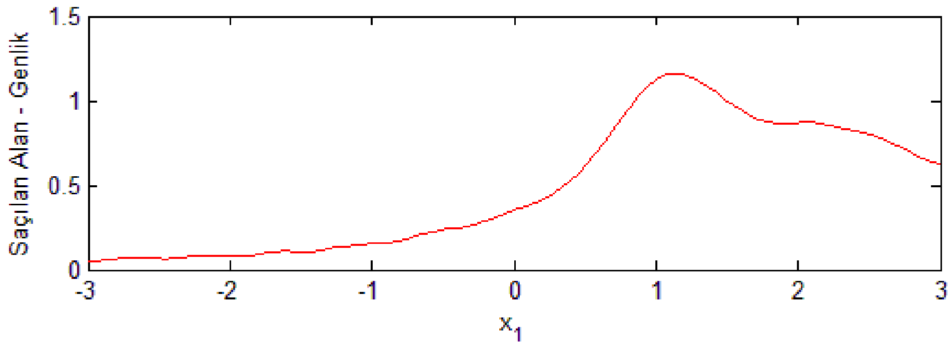

**Şekil 5.6 :** Örnek 2 için saçılan alan.

Örnek 2 için dielektrik sabitinin gerçek ve elde edilen değerleri Şekil 5.7'de görülmektedir. Şekil 5.4'te görülen gürültüsüz durum ile yaklaşık aynı sonuçlar görülmektedir.



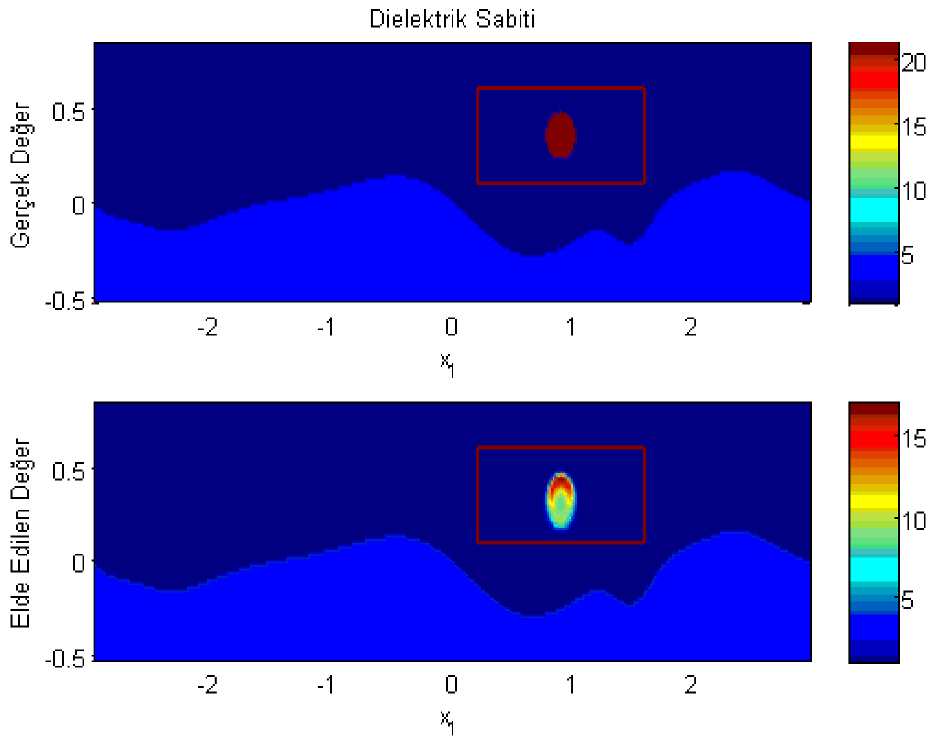

**Şekil 5.7 :** Örnek 2 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.

Üçüncü örnekte cisim değiştirilmiş, dielektrik sabiti . $\varepsilon_c = 21.2\, \varepsilon_0$ olan bir cisim, yine aynı konuma yerleştirilmiştir. Saçılan alan dağılımı Şekil 5.8'de görülmektedir. Şekil 5.1 ile karşılaştırılırsa, cismin sağ tarafında kalan bölgeden daha yüksek bir saçılan alan etkisi görülmektedir.



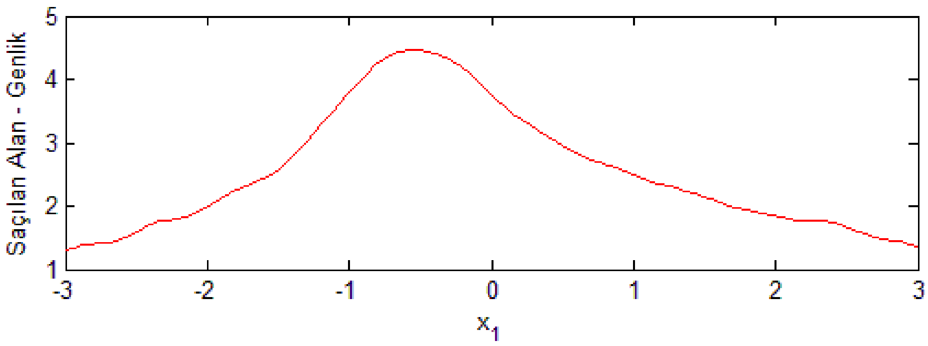

**Şekil 5.8 :** Örnek 3 için saçılan alan.

Gerçek ve elde edilen dielektrik sabiti karşılaştırması Şekil 5.9'da verilmektedir. Bu örnekteki dielektrik sabiti değeri, önceki iki örnekten daha düşüktür. Dielektrik sabiti şekilleri karşılaştırıldığında, elde edilen dielektrik sabiti, daha doğru olarak bulunmuştur, bunun sebebi ortam ile cisim arasındaki dielektrik sabit farkının daha az olması şeklinde yorumlanabilir.



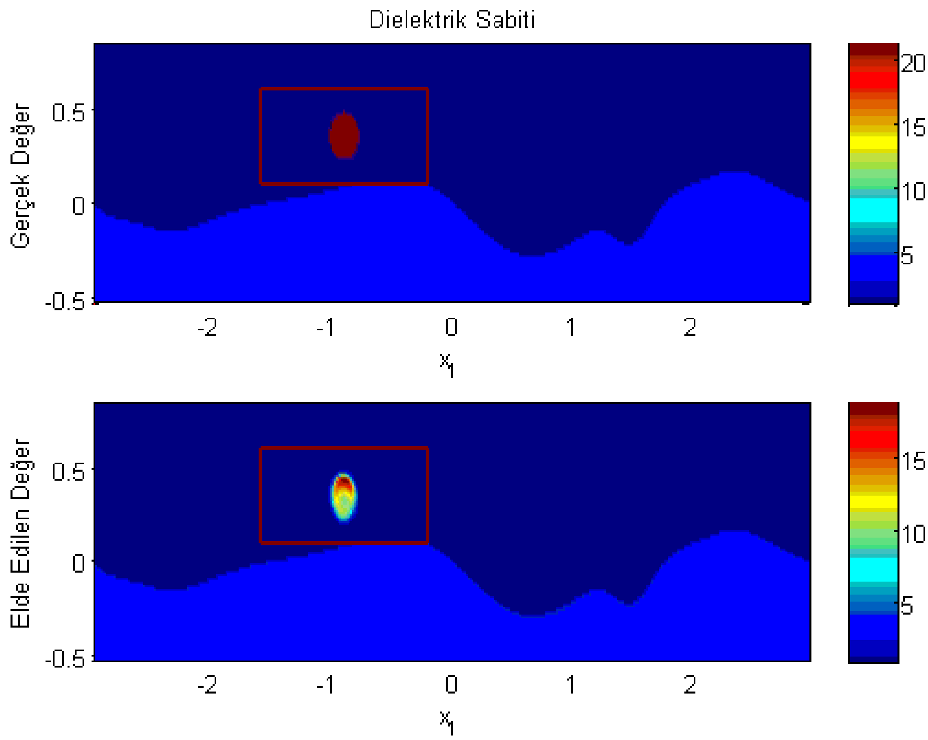

**Şekil 5.9 :** Örnek 3 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.

Dördüncü örnekte cismin konumu değiştirilmiş, merkezi, düzgün olmayan yüzeye daha yakın bir konum olan $(-0.9\,\lambda, 0.15\,\lambda)$ noktasına getirilmiştir. Bu durumda cisimden saçılan alana ilişkin elde edilen veri, Şekil 5.10'da görülmektedir. Bundan önceki örneklerle karşılaştırıldığında daha yüksek genlikli bir saçılan alan verisi gözlenir. Bunun sebebi de, cismin yüzeye yakınlığıdır.



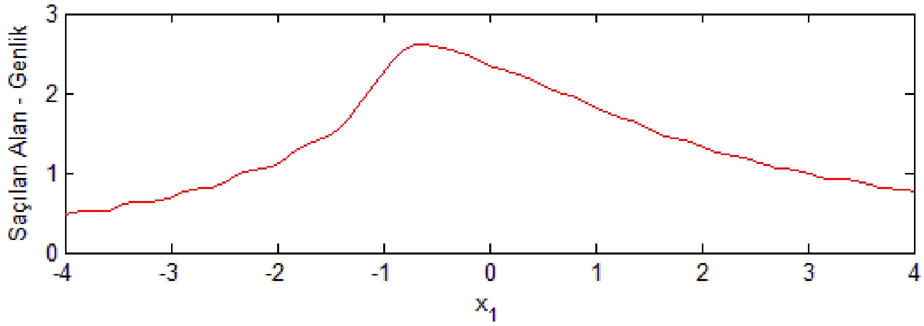

**Şekil 5.10 :** Örnek 4 için saçılan alan.

Aynı örneğe ilişkin dielektrik sabiti karşılaştırması Şekil 5.11'de görülmektedir. İterasyonlar sonucu elde edilen dielektrik sabiti, bir önceki örneğe kıyasla daha doğru bir şekilde bulunmuştur.



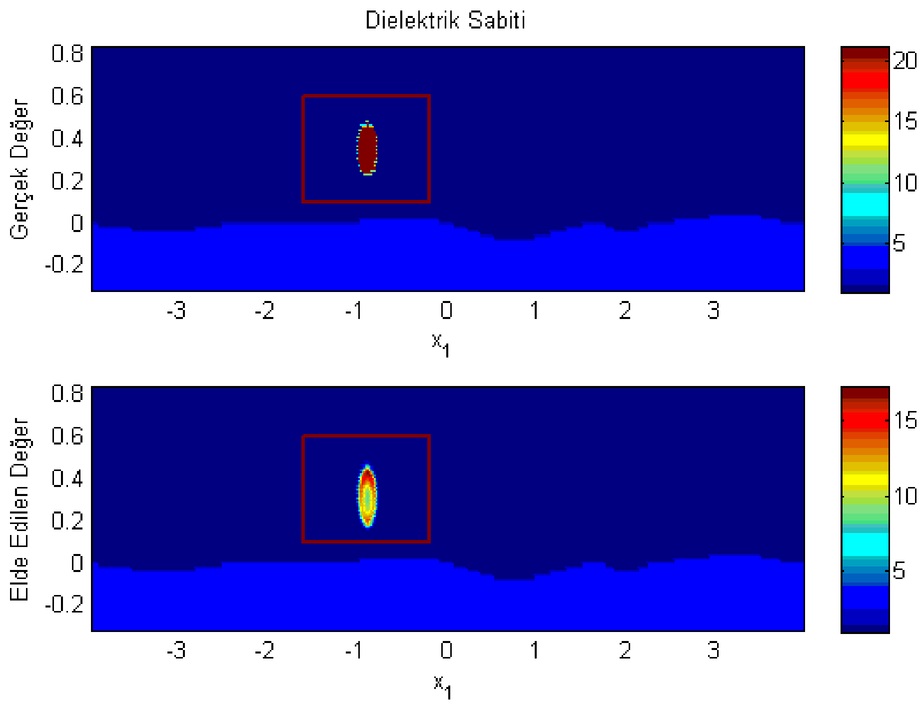

**Şekil 5.11 :** Örnek 4 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.

Beşinci örnekte, düzgün olmayan yüzey değiştirilmiş, daha az pürüzlü bir yüzey eklenmiş, cismin konumu aynı kalmıştır. Bu durumda bulunan saçılan alan verisi Şekil 5.12'de görülmektedir. Bir önceki duruma göre daha düşük bir saçılan alan verisi elde edilmiştir, çünkü cisim, yüzeyden uzaklaşmıştır.



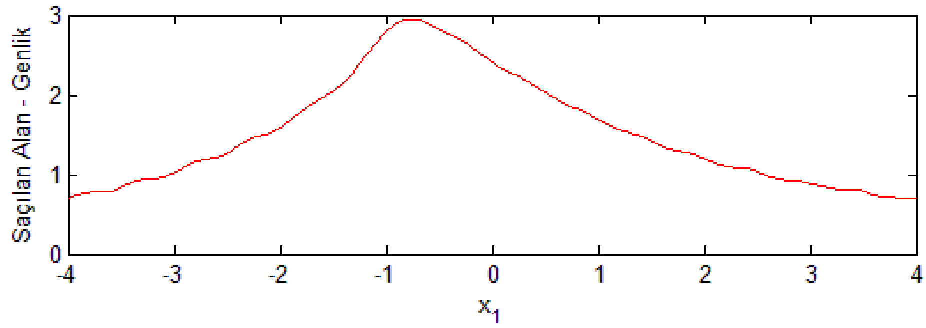

**Şekil 5.12 :** Örnek 5 için saçılan alan

Örnek 5 için gerçek ve elde edilen dielektrik sabiti değerleri Şekil 5.13'te görülmektedir. Önceki örneklerle kıyaslandığında elde edilen dielektrik sabiti değeri en yüksek doğrulukla görülebilir; yüzeyin pürüzlülüğü azaldıkça doğruluk payı artmaktadır.



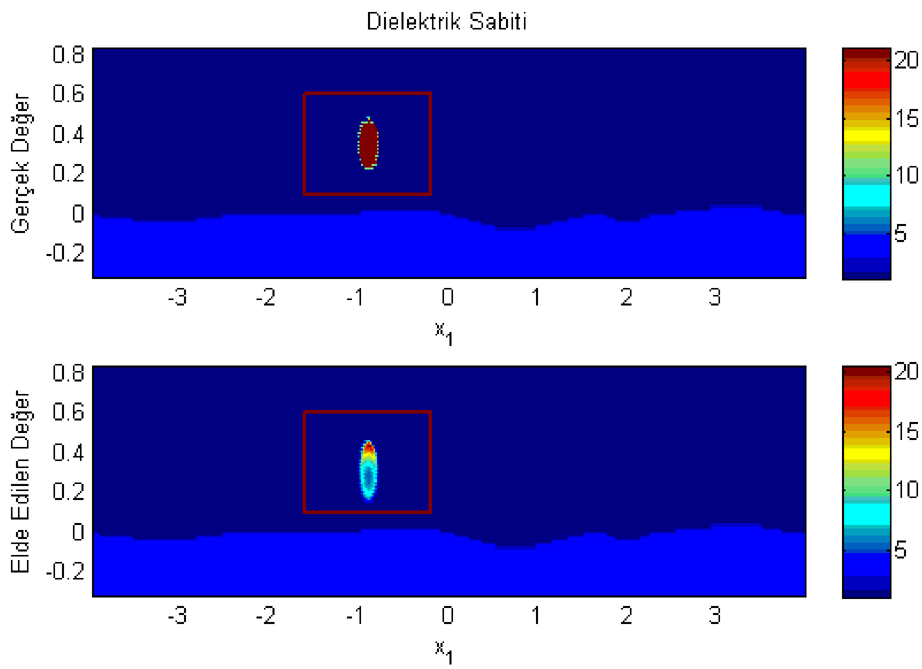

**Şekil 5.13 :** Örnek 5 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.

Altıncı örnekte, cismin iletkenliği arttırılarak $\sigma_c = 0.5\ S/m$ yapılmıştır. Bu durumda elde edilen saçılan alan verisi Şekil 5.14'te görülmektedir. Cismin bulunduğu yer, bu örnekte daha belirgin olarak gözlenebilmektedir, cismin bulunmadığı yerlerden gelen saçılan alan katkısı, önceki örneklere göre oldukça düşüktür.



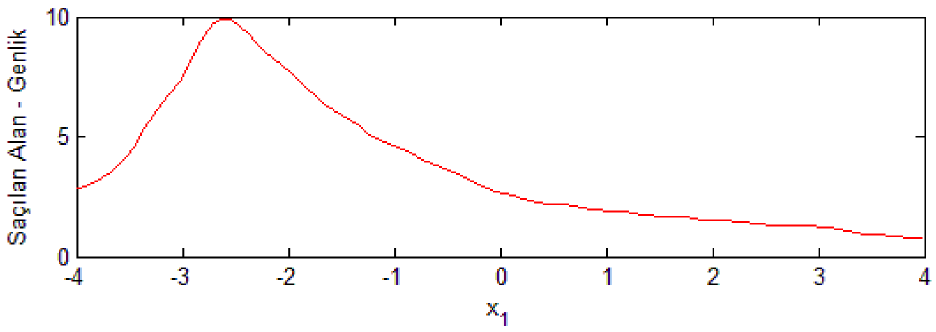

**Şekil 5.14 :** Örnek 6 için saçılan alan.

Aynı örnek için dielektrik sabiti karşılaştırması Şekil 5.15'te görülmektedir, iletkenliğin daha az olduğu durumlarla karşılaştırıldığında, elde edilen dielektrik sabiti, daha düşük doğrulukta bulunmuştur.

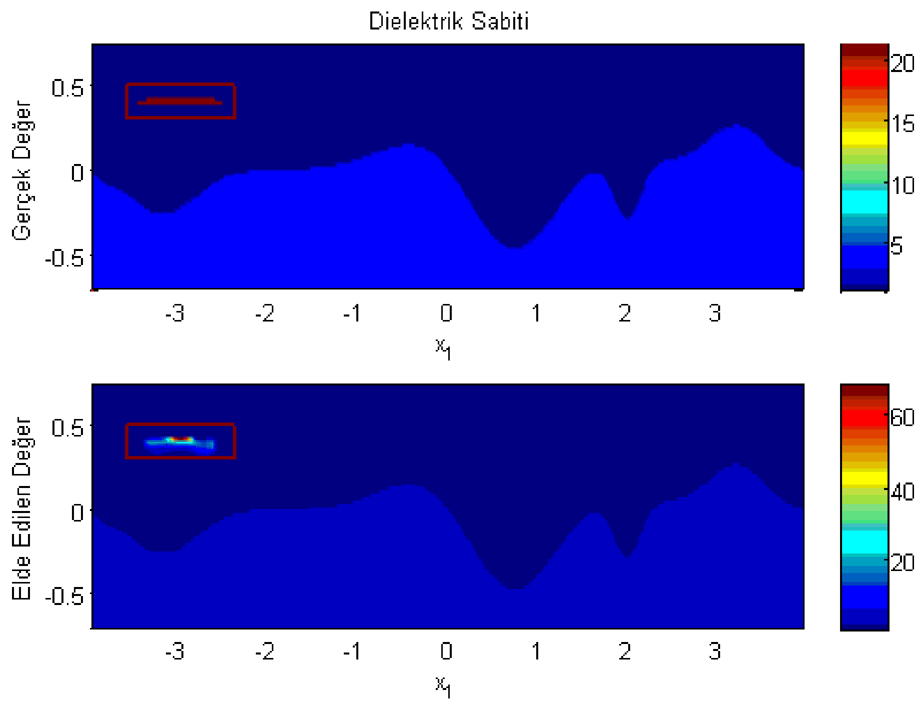



**Şekil 5.15 :** Örnek 6 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.

Yedinci örnekte, cismin geometrisi ve konumu değiştirilmiştir. Uzun yarıçapı $0.5\ \lambda$, kısa yarıçapı $0.02\ \lambda$ olan eliptik bir cisim $(-3\ \lambda, 0.4\ \lambda)$ konumundadır, iletkenliği $\sigma_c = 2\ S/m$ dir, ölçüm yüksekliği $0.7\ \lambda$ dir. Bu durum için elde edilen saçılan alan verisi ve dielektrik sabiti değerleri Şekil 5.16 ve Şekil 5.17'de görülmektedir.




**Şekil 5.16 :** Örnek 7 için saçılan alan.




**Şekil 5.17 :** Örnek 7 için dielektrik sabitinin karşılaştırılması.

Tüm örnekler için elde edilen veriler ile cismin konumu yaklaşık olarak görüntülenebilmektedir. Bu veriler, çalışma içerisinde temel bazı parametrelerin değişimleri kullanılarak oluşturulmuş olup, değişik parametreler ile daha farklı incelemeler yapmak mümkündür. Örneğin cismin daha farklı geometrilerde oluşu, daha yüksek çalışma frekansı, daha fazla sayıda cismin bulunması, artan yineleme sayısı, yinelemelerin sonlanacağı hata oranının değişmesi gibi farklı durumlar incelenebilir. Tüm bu incelemelerde, cismin bulunduğu tahmin edilen bölgelerde; yüzey, yüksek yansıtıcılık özellikli malzeme ile kaplanırsa, daha yüksek saçılan alan değerleri elde edilebilir.

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, düzgün olmayan bir arakesit ile ayrılmış iki parçalı uzayda Green Fonksiyonlarının hesaplanmasında işlemsel kolaylık sağlayacak bir yöntem olan GKFY tanıtılmış, bu yönteme uygun olarak da Green Fonksiyonunun yansıyan terimlere doğrudan olan katkısının gözlenmesi için örnek bir problem geometrisi oluşturularak sayısal örnekler elde edilmiştir. Bu çalışmada örnek olarak verilen geometriden farklı olarak, genel saçılma problemlerine daha uygun bir problem olan, alt yarı uzayda gömülü cisim ve bu cisimden saçılma problemi incelenebilir, bu durumda elde edilecek sonuçlar sayısal integrasyon sonucu ile elde edilen değerler ile karşılaştırılabilir. Yansıyan terim için doğrudan bulunan, GKFY çıkışı ile oluşturulan, Hankel fonksiyonu argüman arayışı, iletim terimleri için bu çalışmada yer almamış, iletim terimi, kaynak noktalarının ordinatları boyunca ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu işlem, yeterince yüksek bir performans artışı sağlamasa da sayısal integrasyona göre oldukça etkin bir yöntem sunmaktadır. GKFY'ne ilişkin uygun parametre seçimi, yöntemin doğruluğu ve hızı açısından önemli bir rol oynamaktadır. Sadece GKFY parametreleri değil, parçalı uzayı ayıran düzgün olmayan arakesitin türü (lokal veya rastgele pürüzlü yüzey), ölçüm yüksekliği, çalışma frekansı gibi değişkenler de, kullanılan yöntemin doğrulanması için kısıt oluşturmakta, değişen bu parametreler için GKFY parametreleri de güncellenmelidir. Bu çalışmada sadece iki tabakalı uzay için bir problem tanımlanmıştır, buna yönelik olarak, aydınlatma ile cisim aynı ortamda bulundurulmuştur. Yine deniz altı problemi düşünülecek olursa, aydınlatmanın deniz üzerinde yapıldığı durumda,. hava – deniz arakesiti de düzgün olmayan bir yüzey olarak ele alınırsa problem üç tabakalı uzaya ilişkin bir problem oluşturacaktır. Yine benzer bir uygulama olarak uçan nesnelerin görüntülenmesi ve takibi gibi problemler de oluşturulabilir. Bu durumda daha yüksek aydınlatma ve ölçüm noktaları ele alınmalıdır. Parametre bağımlı bir yöntem olmakla birlikte, GKFY'nin getireceği hız avantajı, tabakalı ortamlara ilişkin saçılma problemlerinin çözümü için uygun bir yöntem olarak nitelendirilebilir.

**KAYNAKLAR**

[1] **Soubret, A., Berginc, G. ve Bourrely, C.,** 2001: Backscattering enhancement of an electromagnetic wave scattered by two-dimensional rough layers. *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision.* **18**(11), 2778 – 2788.

[2] **Franceschetti, G., Iodice, A., Migliaccio, M. ve Riccio, D.,** 1999: Fractals and the small perturbation scattering model. *Radio Science*. **34**(5), 1043 – 1054.

[3] **Fuks, I.M. ve Voronovich, A.G.,** 2000: Wave diffraction by rough interfaces in an arbitrary plane-layered medium. *Waves in Random Media*. **10**(2), 253 – 272.

[4] **Guan, B., Zhang, J.F., Zhou, X.Y. ve Cui, T.J.,** 2009: Electromagnetic scattering from objects above a rough surface using the method of moments with half-space Green's function. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* **47**(10), 3399 – 3405.

[5] **Yildiz, S., Altuncu, Y., Yapar, A. ve Akduman, I.,** 2008: On the scattering of electromagnetic waves by periodic rough dielectric surfaces: a BOA solution. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* **46**(9), 2599 – 2606.

[6] **Altuncu,Y. ve Temel, R.,** 2011: A buried object approach (BOA) for the scattering of electromagnetic waves from 2D rough surfaces. *Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications*. 1113–1116, Sep 12 – 16.

[7] **Altuncu,Y., Akduman, I., Ozdemir, O. ve Yapar, A.,** 2006: Numerical computation of the Green's Function of a layered media with rough interfaces. *International Symposium on Antennas, Propogation & EM Theory.* 1–4, Oct. 26 – 29.

[8] **Altuncu,Y., Ozdemir, O., Akduman, I. ve Yapar, A.,** 2006: Imaging of dielectric objects buried under an arbitrary rough surface. *IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium.* 2969 – 2972, July 31 – Aug. 4.

[9] **Ozgun, O. ve Kuzuoglu, M.,** 2012: Monte-Carlo based characteristic basis finite element method (MC-CBFEM) for numerical analysis of scattering from on/above rough sea surface. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* **50**(3), 769 – 783.

[10] **Tao, R., Li, Y., Bai, X. ve Waheed, A.,** 2012: Fractional Weierstrass model for rough ocean surface and analytical derivation of its scattered field in a closed form. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* pp. 1 – 13 doi: 10.1109/TGRS.2012.2185505.

[11] **Ye, W., Wu Z., Li, H., Wang, X. ve Zhang, J.,** 2011: A study of composite electromagnetic scattering from a simple target above an oceanic surface. *IEEE Int. Conf. on Microwave Technology and Computational Electromagnetics.* 485 – 788, May 22 – 25.

[12] **Pino, R.M., Landesa, L., Rodriguez, J.L., Obelleiro, F**. **ve Burkholder, R.J.,** 1999: The generalized forward backward method for analyzing the scattering from targets on ocean – like rough surfaces. *IEEE Trans. Antennas and Propogation.* **47**(6), 961 – 969.

[13] **Yuan, M., Zhang, Y., De, A., Ji, Z. ve Sarkar, T.,** 2008: Two dimensional discrete complex image method (DCIM) for closed-form Green's function of arbitrary 3D structures in general multilayered media. *IEEE Trans. Antennas and Propogation.* **56**(5), 1350 – 1357.

[14] **Ye, H. ve Jin, Y.Q.,** 2010: Dual GPOF/DCIM for fast computation of Sommerfeld integrals and EM scattering from an object partially embedded in dielectric half space. *IEEE Trans. Antennas and Propogation.* **58**(5), pp. 1801 – 1807.

[15] **Blomme, K., Fache, N. ve De Zutter, D.,** 1993: A general calculation technique for the Green's functions in the mixed potential integral equation formulation of microstrip-slot circuits. *IEEE Int. Symposium on Antennas and Propogation.* **2**, 650 – 653, Jun. 28 – Jul. 2.

[16] **Karan, S., Erturk, V.B. ve Altintas, A.,** 2009: Closed form Green's function representations in cylindrically stratified media for Method of Moments applications. *IEEE Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications.* 473 – 476, Sept 14 – 18.

[17] **Alparslan, A., Aksun, M.I. ve Michalski K.A.,** 2010: Closed form Green's functions in planar layered media for all ranges and materials. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques.* **58**(5), 602 – 613.

[18] **Altuncu, Y.,** 2006: Buried Object Approach for Solving Electromagnetic Scattering Problems Involving Rough Surfaces, *Doktora Tezi*. İTÜ, İstanbul.

[19] **Idemen, M.,** 1973: Maxwell's Equations in the sense of distributions. *IEEE Trans. Antennas and Propogation.* **21**(5), 736 – 738.

[20] **Felsen, L.B. ve Marcuvitz, N.,** 1973: *Radiation and Scattering of Waves*. Prentice Hall, New Jersey, 924 pp.

[21] **Harrington, R.F.,** 1968: *Field Computation by Moment Methods*. Macmillan, Newyork, 240 pp.

[22] **Richmond, J.A.,** 1965: Scattering by dielectric cylinder of arbitrary cross section shape. *IEEE Trans. Antennas and Propogation.* **13**(3), 334 – 341.

[23] **Alparslan, A.,** 2008: Study of Green's Functions of Potentials and Fileds in Layered Media Composed of Left-Handed and Right-Handed Materials, *Yüksek Lisans Tezi*. Koç Üniversitesi, İstanbul.

[24] **Hua, Y. ve Sarkar, T.K.,** 1989: Generalized Pencil of Function Method for extracting poles of an EM system from its transient response. *IEEE Trans. Antennas and Propogation.* **37**(2), 229 – 234.

[25] **Jain, V.K., Sarkar, T.K. ve Weiner, D.D.,** 1983: Rational modeling by pencil-of-function method. *IEEE Trans. Acous. Speech, "Signal Processing*, **31**(3), 564 – 573.

[26] **Van den Berg, P.M. ve Kleinmann, R.E.,** 1997: A contrast source inversion method. *Inverse Problems.* **13**, 1607 – 1620.

[27] **Van den Berg, P.M.,** 2002: Nonlinear scalar inverse scattering: Algorithms and applications. *Scattering: Scattering and Inverse Scattering in Pure and Applied Science*, Pike,R. ve Sabatier,P., Academic Press, Chapter 142 – 161.

**ÖZGEÇMİŞ**

| | |
|---|---|
| **Ad Soyad** | **: Tuba ALPAY** |
| **Doğum Yeri ve Tarihi** | **: Şişli 26.10.1986** |
| **E-Posta** | **: alpaytuba@gmail.com** |
| **Lisans** | **: 2009 – İstanbul Teknik Üniversitesi Telekomünikasyon Mühendisliği** |