

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAMALZEME KAPLI İLETKEN CİSİMDEN SAÇILAN ALANI EN AZA
İNDİREN PARAMETRİK DEĞERLERİN MATEMATİKSEL BİR YÖNTEM
İLE HESAPLANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Eda KONAKYERİ**

Anabilim Dalı : Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Programı : Telekomünikasyon Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ali YAPAR

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**METAMALZEME KAPLI İLETKEN CİSİMDEN SAÇILAN ALANI EN AZA
İNDİREN PARAMETRİK DEĞERLERİN MATEMATİKSEL BİR YÖNTEM
İLE HESAPLANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Eda KONAKYERİ
(504081308)**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 02 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ali YAPAR (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İbrahim AKDUMAN (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Lale TÜKENMEZ
ERGENE (İTÜ)**

HAZİRAN 2010

Aileme,

ÖNSÖZ

Yapılan bu çalışmada deneyimini ve bilgisini benle paylaştığı, her konuda destek verdiği ve danışmandan öte arkadaşça yaklaşımı için Sayın Doç. Dr. Ali YAPAR'a, desteğini hiç esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Özgür ÖZDEMİR'e, yıllardır her konuda hem aile hem de arkadaş olarak hep arkamda olan canım annem Sevim KONAKYERİ ve canım babam Mehmet KONAKYERİ'ne ve herşeyini benimle paylaşan biricik ablam Müh. Seda KONAKYERİ'ne sonsuz teşekkür ederim.

Mayıs 2010

Eda Konakyeri

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
SEMBOL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY.....	xvii
1. GİRİŞ	1
2. METAMALZEMELER.....	3
2.1 Metamalzemelerin Yapısal Özellikleri.....	3
2.2 Metamalzemelerin Geometrik Yapısı.....	6
3. DİELEKTRİK MALZEME KAPLI MÜKEMMEL İLETKEN CİSİMDEN SAÇILMA	9
3.1 Tek Katmanlı Dielektrik Malzeme Kaplı Mükemmel İletken Cisimden Saçılma	9
3.2 İki Katmanlı Dielektrik Malzeme Kaplı Mükemmel İletken Cisimden Saçılma	12
3.3 Sayısal Sonuçlar	15
4. FARKLI PARAMETRELERİN TEK KATMANLI DİELEKTRİK MALZEME KAPLI MÜKEMMEL İLETKEN CİSİMDEN SAÇILMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	21
5. NEWTON YÖNTEMİ İLE OPTİMUM PARAMETRELERİN HESAPLANMASI.....	25
5.1 Newton Yönteminin Tek Katmanlı Metamalzeme Kaplı Mükemmel İletken Cisimden Saçılan Alana Uygulanması.....	25
5.2 Sayısal Sonuçlar	27
6. SONUÇLAR.....	29
KAYNAKLAR.....	31

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : $\varepsilon_1=-2.9$ ve $h=2$ başlangıç koşulları için iterasyon sonuçları.....	27
Çizelge 5.2 : Farklı başlangıç koşulları için iterasyon sonuçları..	27

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Sol elli ortamlar için Snell yasası.	6
Şekil 2.2 : SRR ve tel şeritten oluşan bir metamalzeme birim yapısı.	6
Şekil 3.1 : Dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken cisim.	9
Şekil 3.2 : İki katmanlı dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken cisim.	12
Şekil 3.3 : Tek katmanlı dielektrik/metamalzeme kaplı cismin saçılma genişliği.	16
Şekil 3.4 : İki katmanlı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.	18
Şekil 3.5 : İki katmanlı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.	19
Şekil 3.6 : İki katmanlı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.	19
Şekil 4.1 : Dielektrik kaplı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.	22
Şekil 4.2 : Metamalzeme kaplı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.	22

SEMBOL LİSTESİ

n	: Kırılma indeksi
ε	: Dielektrik sabiti
μ	: Manyetik geçirgenlik
ε_0	: Boş uzayın dielektrik sabiti
μ_0	: Boş uzayın manyetik geçirgenliği
ε_r	: Bağlı dielektrik sabiti
μ_r	: Bağlı manyetik geçirgenlik
k	: Dalga sayısı
ω	: Açısal frekans
c	: Işık hızı
η	: Dalga empedansı
E	: Elektrik alan vektörü
H	: Manyetik alan vektörü
S_w	: Poynting vektörü
D	: Mükemmel iletken silindir
C	: Mükemmel iletken silindiri kaplayan malzeme
G	: İki katmanlı yapıda dış yüzeydeki kaplama malzemesi
∂D	: Mükemmel iletken silindirin sınırı
∂C	: Mükemmel iletken silindiri kaplayan malzemenin sınırı
∂G	: İki katmanlı yapıda dış yüzeydeki kaplama malzemesinin sınırı
u^i	: Gelen alan
u^s	: Saçılan alan
u	: Toplam alan
$H_n^{(1)}$	: Birinci çeşit Hankel fonksiyonu
J_n	: Bessel fonksiyonu
h	: Yarıçaplar oranı

METAMALZEME KAPLI İLETKEN CİSİMDEN SAÇILAN ALANI EN AZA İNDİREN PARAMETRİK DEĞERLERİN MATEMATİKSEL BİR YÖNTEM İLE HESAPLANMASI

ÖZET

Metamalzemeler yıllardır bir çok çalışmaya konu olmuş, doğada bulunmayan ve yapay olarak elde edilen malzemelerdir. Bu malzemeler negatif kırılma indeksi, negatif faz hızı gibi özellikleri ile doğadaki malzemelerden ayrılmaktadırlar. Bir çok araştırmacı bu malzemeler ile elektromanyetik dalga etkileşimini incelemiş ve bu malzemelerin elektromanyetik dalga yayınımları üzerine bir çok çalışma yapılmıştır.

Bu çalışmada metamalzeme kaplı mükemmel iletken bir silindirden saçılan alanı en aza indirme üzerine analizler yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle tek katmanlı ve çift katmanlı yapılar incelenmiştir. Tek katmanlı yapılarda mükemmel iletken cismin kaplamasının dielektrik olma durumu ile metamalzeme olma durumu karşılaştırılmıştır. Çift katmanlı yapılarda her katmanın ayrı ayrı dielektrik ve metamalzeme seçilme durumları incelenmiş ve sonuçlar tek katmanlı yapı ile kıyaslanmıştır.

Elde edilen sonuçlar kullanılarak çözümü etkileyen bazı parametrelerin saçılan alan üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Bu amaçla, kaplama malzemesinin bağli dielektrik sabiti ve kaplama malzemesinin yarıçapının cismin yarıçapına oranına göre saçılma genişliği incelenmiştir. Bu analiz sonucunda saçılmayı en aza indirecek parametrik değerler elde edilmiştir.

Saçılmayı en aza indirecek parametrik değerleri daha matematiksel bir yöntemle elde etmek için iteratif Newton yöntemi önerilmiştir. Bu amaçla, saçılma genişliğinin türevi alınarak bağli dielektrik sabiti ve yarıçaplar oranının oluşturduğu minimum noktaları elde edilmiştir. Birden fazla değişkenli iki doğrusal olmayan denklemin oluşturduğu sistemi doğrusal yaklaşım ile çözmek için Newton yöntemi kullanılmış ve istenen parametreleri elde edebilmek için iteratif bir yöntem uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, parametrik analizdeki sonuçlar ile karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

CALCULATION OF PARAMETRIC VALUES MINIMIZING SCATTERING FIELD BY A CONDUCTING OBJECT COATED WITH METAMATERIAL BY A MATHEMATICAL METHOD

SUMMARY

Metamaterials, which have been used in a lot of researches for years, are not naturally occurring materials and are formed artificially. These materials are distinguished by properties such as negative refraction index, negative phase velocity from materials in nature. A lot of researchers examined interaction between these materials and electromagnetic waves and a lot of studies were done on the electromagnetic wave radiation of these materials.

In this study, analyses were done on minimizing scattering field from a perfect electric conductor cylinder coated with metamaterial. For this purpose, firstly, single layer and double layer structures were examined. In single layer structures, it was compared with dielectric coating and metamaterial coating of PEC object. In double layer structures, it was examined each layer selected as dielectric and metamaterial separately and the results were compared with single layer structures.

Effects on scattering field of some parameters affecting the solution were observed by using obtained results. For this purpose, bistatic echo width was examined with regard to relative permittivity of coating material and the ratio of radius of coating material to radius of the object. At the result of this analysis, the parametric values which would minimize the scattering were obtained.

Iterative Newton method was recommended to obtain the parametric values minimizing the scattering by a more mathematical method. For this purpose, minimum points consisting of relative permittivity and the ratio of radius were obtained by differentiating bistatic echo width. Newton method was used to solve the system consisting of two nonlinear equations with more than one variable with linear approximation and an iterative method was applied to obtain desired parameters. Obtained results were compared with results in parametric analysis and it was seen that the results were consistent.

1. GİRİŞ

Elektromanyetik dalga yayılımını etkileyen en önemli parametreler, ortamın ya da dalga ile etkileşen cismin dielektrik sabiti ϵ ve manyetik geçirgenlik μ değerleridir. Metamalzemeler, bu parametrelerin farklı elektromanyetik özellikler kattığı malzemelerden olup doğada bulunmazlar. Engheta ve Ziolkowski [1] tarafından elektromanyetik özellikleri ayrıntılı olarak incelenen bu malzemeler genel olarak negatif dielektrik sabiti ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip yapılar olarak bilinir. Ircı [2], bu malzemeleri dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliklerinin işaretlerine bağlı olarak dört grupta incelemiştir. Bu çalışmada ağırlıklı olarak çift negatif (Double Negative (DNG)) metamalzemeler üzerine analizler yapılmıştır.

Bugüne kadar metamalzemeler bir çok çalışmaya konu olmuştur. Metamalzemeler ile ilgili ilk çalışma Veselago [3] tarafından gerçekleştirilmiş olup burada ϵ ve μ parametrelerinin aynı anda negatif olduğu durum için elektromanyetik dalga yayılımı ve bu özelliklere sahip bir ortama gelen dalganın kırılımı ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Bu inceleme bir çok çalışmaya ışık tutmuş ve Ayrık Halkalı Rezonatör (Split Ring Resonator (SRR)) olarak bilinen ve yapay olarak elde edilen yapılar üzerine çalışmalar yapılmıştır. Özellikle [4, 5]'te elde edilen SRR yapısındaki metamalzemeler üzerine incelemeler bulunmaktadır.

İlerleyen yıllarda çalışmalar daha çok bu çeşit malzemeler ile elektromanyetik dalgaların etkileşimi üzerine yoğunlaşmıştır. Ziolkowski ve Heyman [6], negatif dielektrik sabiti ve manyetik geçirgenliğe sahip ortamlardaki dalga yayılımını incelemiştir. Devamında bu yapıdaki malzemelere ve bu malzemeler ile kaplı cisimler üzerine gönderilen elektromanyetik dalgaların analizleri üzerine çalışmalar yapılmıştır [7-14]. Daha sonra benzer bir çalışma çok katmanlı yapılar için çizgisel kaynak kullanılarak denenmiştir [15].

Bu çalışmada öncelikle daha önce yapılan çalışmalardan destek alınarak metamalzemeler ile ilgili kısa bilgiler verilecektir. Devamında dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken silindirden saçılan alan incelenecek ve dielektrik malzeme yerine çift negatif metamalzeme kullanıldığında saçılan alanın değişimi

gözlemlenecektir. Aynı çalışma iki katmanlı mükemmel iletken silindir için de yapılacak ve silindir üzerindeki katmanların dielektrik ve çift negatif metamalzeme olma kombinasyonları ayrı ayrı karşılaştırılacaktır.

Bölüm 4'te tek katmanlı yapı için kaplama malzemesinin cismin merkezinden olan yarıçapının mükemmel iletken cismin yarıçapına oranı ve kaplama malzemesinin bağıl dielektrik sabitinin saçılan alan üzerindeki etkisi gözlemlenecek ve bu parametrelerin saçılan alanı minimum yapacak değerleri belirlenecektir.

Bölüm 5'te bir önceki bölümde yapılan analiz yardımıyla çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken silindirden saçılan alanı en aza indirecek olan yarıçaplar oranı ve kaplama malzemesinin bağıl dielektrik sabitini belirleyebilmek için iteratif Newton yöntemi kullanılacaktır. Saçılan alanı en aza indirecek olan minimum noktalarının belirlenebilmesi için saçılma genişliğinin türevinden faydalanılacaktır. Elde edilen denklem sistemi doğrusal olmadığından sistem Newton anlamında lineerleştirilerek çözülecektir.

Son olarak Bölüm 6'da sonuçlar verilecektir.

2. METAMALZEMELER

2.1 Metamalzemelerin Yapısal Özellikleri

Dielektrik sabiti ε ve manyetik geçirgenlik μ , elektromanyetik dalga yayılımını etkileyen temel karakteristik parametrelerdir. Bunun sebebi, bu parametrelerin dispersiyon eşitliğindeki tek maddesel parametreler olmasıdır. İzotropik bir madde için dispersiyon eşitliğinin basit hali $n^2 = \varepsilon\mu$ olmak üzere,

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} n^2 \quad (2.1)$$

şeklindeir. (2.1)'de verilen eşitlikte ω açısal frekans ve c ışık hızı olmak üzere n^2 , kırılma indeksinin karesini ifade etmektedir. Kayıpların dikkate alınmadığı ve ε ve μ parametrelerinin gerçel sayılar olduğu düşünüldüğünde bu parametrelerin işaretlerinin aynı anda değişmesi kırılma indeksinin karesi üzerinde herhangi bir etki yaratmayacaktır. Ancak ε ve μ parametrelerinin aynı anda negatif olma durumu bazı temel doğa kuralları ile çelişebilmektedir. Sonuç olarak, negatif ε ve μ parametrelerine sahip maddelerin pozitif ε ve μ parametrelerine sahip maddelerden bazı farklı özellikleri olduğu kabul edilebilir [3].

Bu çalışmada mükemmel iletken cisimlerin kaplanması kullanılacak olan malzeme çeşidi negatif ε ve μ parametrelerine sahip olan metamalzemelerdir. Bunlar, genel olarak (elektromanyetik özellikler bakımından) doğada bulunmayan ve yapay olarak elde edilen malzemelerdir [6]. Elektromanyetik özellikleri açısından incelendiğinde bu malzemelerin efektif dielektrik sabitleri ve/veya efektif manyetik geçirgenlikleri negatif olmalıdır. Söz konusu olan efektif karmaşık temel parametrelerin işaretleri onların gerçel kısımlarının işaretlerine dayandırılmıştır. Sanal kısımları, sırasıyla, elektrik ya da manyetik kayıpları belirtmektedir. Bu nedenle, metamalzemeler temel parametrelere bağlı olarak,

Çift Pozitif (DPS: Double Positive): $\text{Re}\{\varepsilon\} > 0, \text{Re}\{\mu\} > 0$

Çift Negatif (DNG: Double Negative): $\text{Re}\{\varepsilon\} < 0, \text{Re}\{\mu\} < 0$

Mu Negatif (MNG: Mu Negative): $\text{Re}\{\varepsilon\} > 0, \text{Re}\{\mu\} < 0$

Epsilon Negatif (EPS: Epsilon Negative): $\text{Re}\{\varepsilon\} < 0, \text{Re}\{\mu\} > 0$

şeklinde dört grupta sınıflandırılır [2].

DNG bir ortamda ilgili temel parametreler,

$$\varepsilon = |\varepsilon| e^{i\phi_\varepsilon}, \phi_\varepsilon \in (\pi/2, \pi] \quad (2.2)$$

$$\mu = |\mu| e^{i\phi_\mu}, \phi_\mu \in (\pi/2, \pi] \quad (2.3)$$

şeklinde verilir [6]. Benzer şekilde, zaman faktörü $e^{-i\omega t}$ olarak seçildiği durumda ortamın dalga sayısı (k), dalga empedansı (η) ve kırılma indeksi (n),

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon} = |k| e^{i\phi_k}, \phi_k = \frac{1}{2}(\phi_\mu + \phi_\varepsilon) \in (\pi/2, \pi] \quad (2.4)$$

$$\eta = \sqrt{\mu / \varepsilon} = |\eta| e^{i\phi_\eta}, \phi_\eta = \frac{1}{2}(\phi_\mu - \phi_\varepsilon) \in (-\pi/4, \pi/4) \quad (2.5)$$

$$n = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r} = |n| e^{i\phi_n}, \phi_n = \frac{1}{2}(\phi_\mu + \phi_\varepsilon) \in (\pi/2, \pi] \quad (2.6)$$

olarak ifade edilir [2, 6].

Bu çalışmada ağırlıklı olarak kullanılacak olan DNG malzemeler, negatif kırılma indeksi, negatif faz hızı ve negatif Doppler kayması gibi elektromanyetik/optiksel özellikleri nedeniyle sol elli malzemeler olarak da adlandırılmaktadırlar [2]. Böyle malzemeler için Maxwell ve bünye denklemleri kullanılırsa z ekseninde ilerleyen ve zaman faktörü $e^{-i\omega t}$ olan tek frekanslı bir dalga için elektrik ve manyetik alanlar,

$$[kE] = \frac{\omega}{c} \mu H \quad (2.7)$$

$$[kH] = -\frac{\omega}{c} \varepsilon E \quad (2.8)$$

eşitliklerini sağlarlar. Bu son eşitliklerden E, H ve k vektörlerinin $\varepsilon > 0$ ve $\mu > 0$ için sağ eli, $\varepsilon < 0$ ve $\mu < 0$ için ise sol eli üç vektör takımı olduğu görülebilir [3]. Bu üç vektör arasına Poynting vektörü dahil edildiğinde farklı bir sonuç elde edilir. Bir elektromanyetik alanın enerji akısını tanımlayan Poynting vektörü ele alındığında her zaman bu vektörün sağ eli olarak biçimlendiği görülür.

$$S_w = \frac{1}{2} \text{Re} \{ E \times H^* \} \quad (2.9)$$

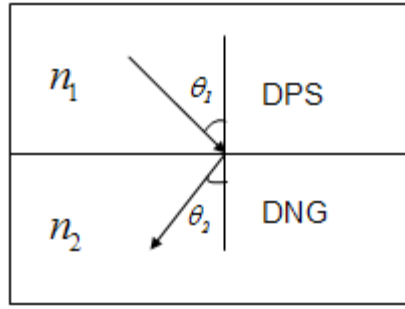
Bundan dolayı, sağ eli maddeler için S_w ve k aynı yönde, sol eli maddeler için zıt yönde olurlar [3]. Bu durumda DNG ortamlar için $E = [E_0, 0, 0] e^{i(kz - \omega t)}$, $H = [0, H_0, 0] e^{i(kz - \omega t)}$ ve $k = \hat{k}k$ olmak üzere,

$$E \perp H \perp \text{Re } k \text{ ve } S_w \cdot \text{Re } k < 0 \quad (2.10)$$

elde edilir [6]. (2.10)'da $\hat{k}$ yayılma yönündeki birim vektörü göstermektedir. Ayrıca,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.11)$$

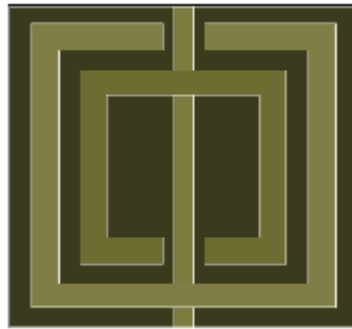
şeklindeki Snell yasası dikkate alındığında bu iki negatif işaretli parametrenin oluşturduğu kırılma indeksinin (n) etkisi daha net görülebilir. İki farklı ortam arasındaki kırılma etkisini belirten bu yasa, Şekil 2.1'de incelendiği üzere ikinci ortam $\varepsilon < 0$ ve $\mu < 0$ parametrelerine sahip bir ortam olarak seçilirse gelen dalganın ikinci ortama geçiş etkisi, ikinci ortamın $\varepsilon > 0$ ve $\mu > 0$ olarak seçilmesi durumundan farklı olacaktır. Nedensellik ilkesi, ε ve μ parametreleri negatif olduğunda kırılma indeksinin işaretinin negatif seçilmesini gerektirmektedir [16].



Şekil 2.1 : Sol elli ortamlar için Snell yasası.

2.2 Metamalzemelerin Geometrik Yapısı

Daha önce belirtildiği gibi metamalzemeler yapay malzemelerdir. Farklı yapıların bir araya getirilmesiyle efektif olarak negatif dielektrik sabiti ve negatif manyetik geçirgenliğe sahip ortamların oluşturacağı elektromanyetik etkinin yaratıldığı yapılar elde edilmiştir. Bunlardan en önemlisi Ayrık Halkalı Rezonatör (Split Ring Resonator (SRR)) olarak bilinen yapıdır. Bu yapıda kullanılan birimler genel olarak birim hücre olarak bilinen kübik hücrelerdir. Şekil 2.2’de görüldüğü üzere SRR, iki dairesel ya da dikdörtgensel yapının birinin açık ucu diğerinin açık ucunun ters yönünde kalacak şekilde iç içe yerleştirilmiş halidir. Metamalzemeler için SRR yapı negatif efektif manyetik geçirgenliği, bu yapının ortasına oturtulmuş teller ise negatif efektif dielektrik sabitini sağlar. Manyetik alan SRR’lara dik, elektrik alan SRR’lara paralel olmalıdır [2].



Şekil 2.2 : SRR ve tel şeritten oluşan bir metamalzeme birim yapısı.

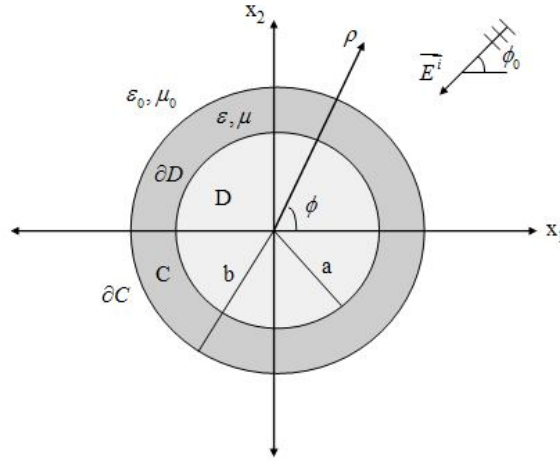
Pendry ve Smith [17], bu yapay malzemeyi oluşturmak için uygulanan elektromanyetik alana güçlü bir cevap vermesi amacıyla tekrarlı bir yapıya sahip elemanlardan oluşan bir derleme üzerine çalışmışlardır. Boyut ve elemanlar arasındaki boşluklar ilgilenilen elektromanyetik dalgaboylarından hayli küçük olduğu takdirde gelen ışınım bu yapıyı homojen bir malzemedan ayrı tutamaz. Düşük

frekanslarda iletkenlerin elektromanyetik alanlara cevabı oldukça büyük olduğundan yapay malzemeyi oluşturmak için iletkenler iyi birer seçenektirler. [17].

3. DİELEKTRİK MALZEME KAPLI MÜKEMMEL İLETKEN CİSİMDEN SAÇILMA

3.1 Tek Katmanlı Dielektrik Malzeme Kaplı Mükemmel İletken Cisimden Saçılma

Şekil 3.1’deki konfigürasyonu ele alalım.



Şekil 3.1 : Dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken cisim.

Bu konfigürasyonda D dairesel silindir şeklindeki mükemmel iletken cisim olup cismin sınırları ∂D ile gösterilmiştir. Mükemmel iletken cisim, C ile gösterilen ve sınırları ∂C ile belirtilen, ϵ ve μ parametrelerine sahip dielektrik bir malzeme ile kaplanmıştır. Dielektrik malzeme ile kaplanmış olan mükemmel iletken cisim, ortam parametreleri ϵ_0 ve μ_0 olan bir homojen uzay içerisinde olup TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılmıştır. Silindirik koordinatlarda $\phi \in (0, 2\pi)$ olmak üzere gelen dalgaya ilişkin elektrik alan vektörü,

$$\vec{E}^i = (0, 0, u^i(\rho, \phi)) \quad (3.1)$$

olarak yazılır. Burada,

$$u^i(\rho, \phi) = e^{-ik_0 \rho \cos(\phi - \phi_0)} \quad (3.2)$$

olup $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ ortamın dalga sayısını, ϕ_0 ise gelen dalganın geliş açısını göstermektedir.

Cisim sonsuz uzun ve x_3 eksenine paralel olduğundan toplam elektrik alan vektörü x_3 eksenine paralel olur. Gelen dalganın $\vec{E}^i$ şeklinde ifade edilmesinden dolayı toplam elektrik alan vektörü $\vec{E} = (0, 0, u(\rho, \phi))$ şeklinde ifade edilebilir. Böylelikle problem sadece skaler alanlar yardımıyla formüle edilebilir. Bu durumda,

$$u^i(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(k_0\rho) e^{in(\phi-\phi_0)} \quad (3.3)$$

gelen alanı ifade etmek üzere uzayın farklı ortamları için $\rho > b$ ve $a < \rho < b$ bölgelerindeki alanlar sırasıyla,

$$u^I(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(-i)^n J_n(k_0\rho) + C_n H_n^{(1)}(k_0\rho) \right] e^{in(\phi-\phi_0)}, \quad \rho > b \quad (3.4)$$

$$u^{II}(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[B_n J_n(k\rho) + A_n H_n^{(1)}(k\rho) \right] e^{in(\phi-\phi_0)}, \quad a < \rho < b \quad (3.5)$$

olarak verilir. Toplam alan ifadesi, u^s saçılan alan olmak üzere $u = u^i + u^s$ şeklinde yazılabilir. Şekil 3.1'de verilen problem için (3.4) dielektrik kaplama dışındaki toplam alanı ifade ederken (3.5) dielektrik kaplama ile mükemmel iletken cisim arasında kalan bölgedeki toplam alanı ifade etmektedir. Burada A_n , B_n ve C_n sınır koşulları dikkate alınarak belirlenecek olan bilinmeyen katsayılardır. Sınır koşullarından dolayı elektrik alanın teğet bileşeni ∂C yüzeyi üzerinde sürekli iken ∂D yüzeyi üzerinde sıfırdır. Yine sınır koşullarından ötürü manyetik alanın teğet bileşeni ∂C yüzeyi üzerinde sürekli olacaktır. Sonuç olarak çözüm için gerekli olan üç farklı eşitlik ortaya çıkar.

$$u^{II}(\rho, \phi) = 0, \quad \rho = a \quad (3.6)$$

$$u^{II}(\rho, \phi) = u^I(\rho, \phi), \quad \rho = b \quad (3.7)$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial u^{II}(\rho, \phi)}{\partial \rho} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial u^I(\rho, \phi)}{\partial \rho}, \quad \rho = b \quad (3.8)$$

Bu durumda (3.6), (3.7) ve (3.8) koşulları daha açık bir şekilde,

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[B_n J_n(ka) + A_n H_n^{(1)}(ka) \right] e^{in(\phi-\phi_0)} = 0 \quad (3.9)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[B_n J_n(kb) + A_n H_n^{(1)}(kb) \right] e^{in(\phi-\phi_0)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(-i)^n J_n(k_0b) + C_n H_n^{(1)}(k_0b) \right] e^{in(\phi-\phi_0)} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{\mu} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[B_n J'_n(kb) + A_n H_n^{(1)'}(kb) \right] e^{in(\phi-\phi_0)} = \frac{1}{\mu_0} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(-i)^n J'_n(k_0b) + C_n H_n^{(1)'}(k_0b) \right] e^{in(\phi-\phi_0)} \quad (3.11)$$

olarak yazılabilir. (3.9), (3.10) ve (3.11) denklemlerinde görüldüğü üzere üç bilinmeyenli üç denklem mevcuttur ve bu sistemin çözümü bilinmeyen katsayıları verecektir. Bu denklem sisteminin çözümü sonucunda,

$$C_n = \frac{A_n H_n^{(1)}(kb) + B_n J_n(kb) - (-i)^n J_n(k_0b)}{H_n^{(1)}(k_0b)} \quad (3.12)$$

$$M = \mu H_n^{(1)}(kb) H_n^{(1)'}(k_0b) - \mu_0 H_n^{(1)'}(kb) H_n^{(1)}(k_0b) \quad (3.13)$$

$$N = \mu_0 J'_n(kb) H_n^{(1)}(k_0b) - \mu J_n(kb) H_n^{(1)'}(k_0b) \quad (3.14)$$

$$B_n = \frac{\mu(-i)^n \left[J'_n(k_0b) H_n^{(1)}(k_0b) - J_n(k_0b) H_n^{(1)'}(k_0b) \right]}{\frac{J_n(ka)}{H_n^{(1)}(ka)} M + N} \quad (3.15)$$

$$A_n = -B_n \frac{J_n(ka)}{H_n^{(1)}(ka)} \quad (3.16)$$

katsayıları elde edilir. Bu katsayılar kullanılarak uzayın her bölgesi için toplam alan hesaplanabilir. Bu çalışmada ilgilenilen kısım homojen uzay içine yerleştirilmiş dielektrik kaplı mükemmel iletken bir cisimden saçılan alanın hesaplanmasıdır. Sonuç olarak homojen uzayda dielektrik kaplı cisimden saçılan alan ifadesi,

$$u^s(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n H_n^{(1)}(k_0\rho) e^{in(\phi-\phi_0)} \quad , \rho > b \quad (3.17)$$

şeklindedir.

Uzak alan ifadesi, Hankel fonksiyonunda büyük argüman yaklaşımı kullanıldıktan sonra hesaplanır. Gelen alanın TM polarize düzlem dalga olduğu durumda dalga bileşeninin normalize saçılma genişliği,

$$\frac{\sigma}{\lambda_0} = \frac{2}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2 \quad (3.18)$$

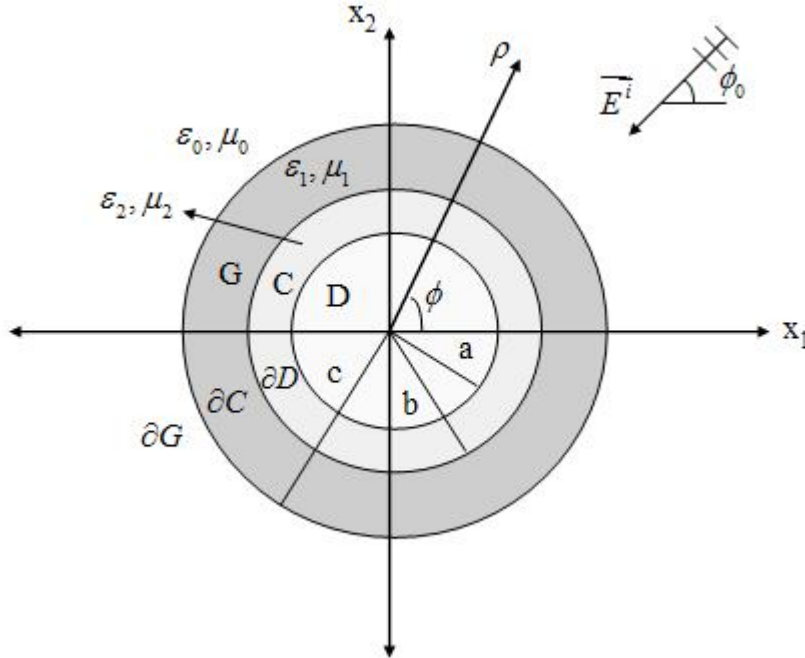
olarak verilir [10, 18]. Hankel ve Bessel fonksiyonlarının türevleri alınırken,

$$\frac{d}{dx} I_n(x) = I_{n-1}(x) - \frac{n}{x} I_n(x) \quad (3.19)$$

eşitliği dikkate alınmıştır.

3.2 İki Katmanlı Dielektrik Malzeme Kaplı Mükemmel İletken Cisimden Saçılma

Şekil 3.2’deki konfigürasyonu ele alalım.



Şekil 3.2 : İki katmanlı dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken cisim.

Bu konfigürasyonda D mükemmel iletken cisim olup cismin sınırları ∂D ile gösterilmiştir. Mükemmel iletken cisim, C ile gösterilen ve sınırları ∂C ile belirtilen,

ϵ_2 ve μ_2 parametrelerine sahip dielektrik bir malzeme ile kaplanmıştır. Dielektrik malzeme kaplı cisim, G ile gösterilen ve sınırları ∂G ile belirtilen, ϵ_1 ve μ_1 parametrelerine sahip farklı bir dielektrik malzeme ile tekrar kaplanmıştır. Dielektrik malzemeler ile kaplanmış olan mükemmel iletken cisim, ortam parametreleri ϵ_0 ve μ_0 olan bir homojen uzay içerisinde olup TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılmıştır.

Silindirik koordinatlarda $\phi \in (0, 2\pi)$ olmak üzere gelen elektrik alan vektörü (3.1)'deki gibi ifade edilir. Toplam elektrik alan vektörünün $\vec{E} = (0, 0, u(\rho, \phi))$ şeklinde yazılması sonucu,

$$u^I(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n J_n(k_0 \rho) e^{in(\phi - \phi_0)} \quad (3.20)$$

gelen alan olmak üzere uzayın farklı ortamları için $\rho > c$, $b < \rho < c$ ve $a < \rho < b$ bölgelerindeki alanlar sırasıyla,

$$u^I(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[(-i)^n J_n(k_0 \rho) + E_n H_n^{(1)}(k_0 \rho) \right] e^{in(\phi - \phi_0)} \quad , \quad \rho > c \quad (3.21)$$

$$u^{II}(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[D_n J_n(k_1 \rho) + C_n H_n^{(1)}(k_1 \rho) \right] e^{in(\phi - \phi_0)} \quad , \quad b < \rho < c \quad (3.22)$$

$$u^{III}(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[B_n J_n(k_2 \rho) + A_n H_n^{(1)}(k_2 \rho) \right] e^{in(\phi - \phi_0)} \quad , \quad a < \rho < b \quad (3.23)$$

olarak verilir. Toplam alan ifadesi, u^s saçılan alan olmak üzere $u = u^I + u^s$ şeklinde yazılabilir. Şekil 3.2'de verilen problem için (3.21) dielektrik kaplamalar dışındaki, (3.22) en dıştaki dielektrik kaplama ile içteki dielektrik kaplama arasında kalan bölgedeki ve (3.23) içteki dielektrik kaplama ile mükemmel iletken cisim arasında kalan bölgedeki toplam alanı ifade etmektedir. Burada A_n , B_n , C_n , D_n ve E_n sınır koşulları dikkate alınarak belirlenecek olan bilinmeyen katsayılardır. Sınır koşullarından dolayı elektrik alanın teğet bileşeni ∂C ve ∂G yüzeyleri üzerinde sürekli iken ∂D yüzeyi üzerinde sıfırdır. Yine sınır koşullarından ötürü manyetik alanın teğet bileşeni ∂C ve ∂G yüzeyleri üzerinde sürekli olacaktır. Sonuç olarak çözüm için gerekli olan beş denklem,

$$u^{III}(\rho, \phi) = 0, \quad \rho = a \quad (3.24)$$

$$u^{III}(\rho, \phi) = u^{II}(\rho, \phi), \quad \rho = b \quad (3.25)$$

$$\frac{1}{\mu_2} \frac{\partial u^{III}(\rho, \phi)}{\partial \rho} = \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial u^{II}(\rho, \phi)}{\partial \rho}, \quad \rho = b \quad (3.26)$$

$$u^{II}(\rho, \phi) = u^I(\rho, \phi), \quad \rho = c \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial u^{II}(\rho, \phi)}{\partial \rho} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial u^I(\rho, \phi)}{\partial \rho}, \quad \rho = c \quad (3.28)$$

şeklinde. Bu durumda (3.24), (3.25), (3.26), (3.27) ve (3.28) koşulları daha açık bir şekilde,

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} [B_n J_n(k_2 a) + A_n H_n^{(1)}(k_2 a)] e^{in(\phi - \phi_0)} = 0 \quad (3.29)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} [B_n J_n(k_2 b) + A_n H_n^{(1)}(k_2 b)] e^{in(\phi - \phi_0)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [D_n J_n(k_1 b) + C_n H_n^{(1)}(k_1 b)] e^{in(\phi - \phi_0)} \quad (3.30)$$

$$\frac{1}{\mu_2} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [B_n J'_n(k_2 b) + A_n H_n^{(1)'}(k_2 b)] e^{in(\phi - \phi_0)} = \frac{1}{\mu_1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} [D_n J'_n(k_1 b) + C_n H_n^{(1)'}(k_1 b)] e^{in(\phi - \phi_0)} \quad (3.31)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} [D_n J_n(k_1 c) + C_n H_n^{(1)}(k_1 c)] e^{in(\phi - \phi_0)} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(-i)^n J_n(k_0 c) + E_n H_n^{(1)}(k_0 c)] e^{in(\phi - \phi_0)} \quad (3.32)$$

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} [D_n J'_n(k_1 c) + C_n H_n^{(1)'}(k_1 c)] \frac{e^{in(\phi - \phi_0)}}{\mu_1} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [(-i)^n J'_n(k_0 c) + E_n H_n^{(1)'}(k_0 c)] \frac{e^{in(\phi - \phi_0)}}{\mu_0} \quad (3.33)$$

olarak yazılabilir. Yukarıda görüldüğü üzere beş bilinmeyenli beş denklem mevcuttur ve bu sistemin çözümü bilinmeyen katsayıları verecektir.

Bu denklem sisteminin çözümü sonucunda uzayın farklı noktalarındaki toplam alan ifadelerinde yer alan A_n , B_n , C_n , D_n ve E_n katsayıları hesaplanabilir. Bu çalışmada ilgilenilen kısım homojen uzay içine yerleştirilmiş iki tabakalı dielektrik kaplı mükemmel iletken bir cisimden saçılan alanın hesaplanmasıdır. Bu bölgede saçılan alan ifadesindeki E_n katsayısı $\xi_2 = \mu_1 / \mu_0$ olmak üzere,

$$E_1 = J_n(k_0 c) J'_n(k_0 c) - \xi_2 J'_n(k_0 c) J_n(k_1 c) \quad (3.34)$$

$$E_2 = J_n(k_0 c) H_n^{(1)'}(k_1 c) - \xi_2 J'_n(k_0 c) H_n^{(1)}(k_1 c) \quad (3.35)$$

$$E_3 = -H_n^{(1)}(k_0 c) J'_n(k_1 c) + \xi_2 H_n^{(1)'}(k_0 c) J_n(k_1 c) \quad (3.36)$$

$$E_4 = H_n^{(1)}(k_0 c) H_n^{(1)'}(k_1 c) - \xi_2 H_n^{(1)'}(k_0 c) H_n^{(1)}(k_1 c) \quad (3.37)$$

$$E_n = \frac{(-i)^n \left[E_1 - \frac{Z}{Q} E_2 \right]}{E_3 + \frac{Z}{Q} E_4} \quad (3.38)$$

olarak elde edilir. Burada Z ve Q , Bessel ve Hankel fonksiyonları ve $\xi_1 = \mu_2 / \mu_1$ parametresinden oluşan karmaşık ifadelerdir. Yapı karmaşık olduğundan parametrik gösterim tercih edilmiştir.

Sonuç olarak dielektrik malzeme ile kaplı cisimden saçılan alanın ifadesi,

$$u^s(\rho, \phi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n H_n^{(1)}(k_0 \rho) e^{in(\phi - \phi_0)} \quad , \quad \rho > c \quad (3.39)$$

şeklindedir.

Uzak alan ifadesinin normalize saçılma genişliği,

$$\frac{\sigma}{\lambda_0} = \frac{2}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_n e^{in(\phi - \phi_0)} \right|^2 \quad (3.40)$$

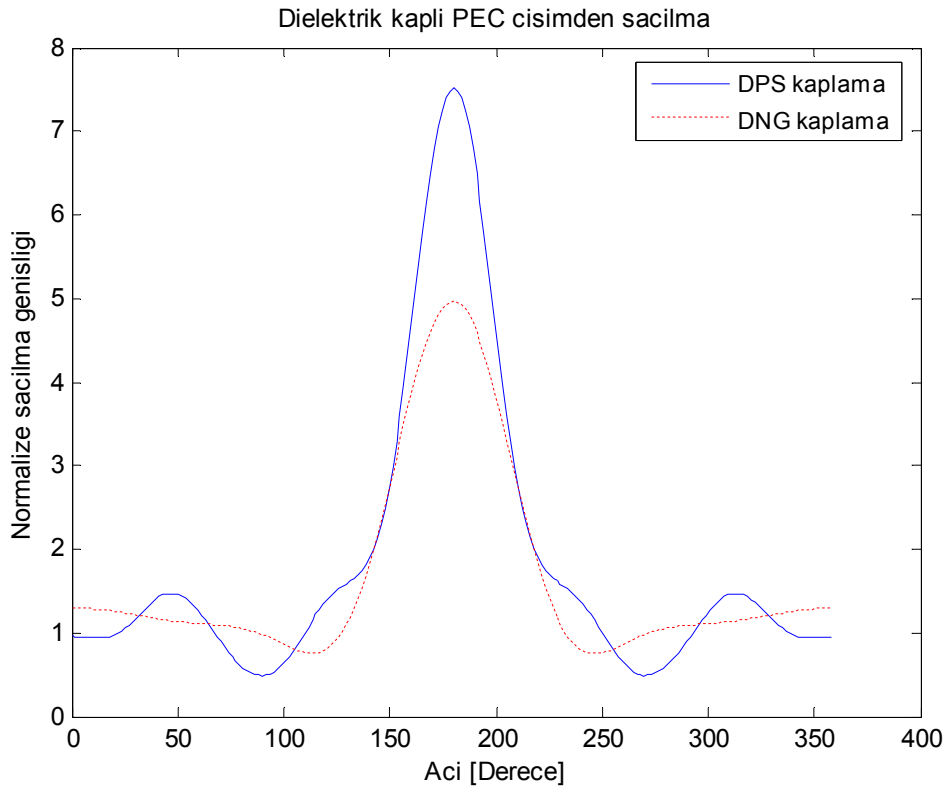
şekilde yazılabilir.

3.3 Sayısal Sonuçlar

Çalışmanın bu kısmında önce Bölüm 3.1’de belirtilen mükemmel iletken bir cismin çift pozitif türde dielektrik malzeme ve çift negatif türde metamalzeme ile kaplanması sonucu cisme gönderilen alanın saçılma davranışı gözlemlenecektir. Daha sonra aynı inceleme Bölüm 3.2’de verilen problem için yapılacaktır. Her iki

inceleme için çalışma frekansı 1GHz ve Bessel ve Hankel fonksiyonlarını içeren serilerdeki kesim sayısı $N=20$ olarak seçilmiştir.

Bu amaçla öncelikle yarıçapı 0.05m olan mükemmel iletken bir silindir, yarıçapı 0.1m olan dielektrik bir malzeme ile kaplanmıştır. Kaplama malzemesinin bağl dielektrik sabiti (ϵ_r) 9.8, bağl manyetik geçirgenliği (μ_r) 1 olarak belirlenmiştir. Dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken cisim, ortam parametreleri ϵ_0 ve μ_0 olan bir homojen uzay içerisine yerleştirilip geliş açısı 0° olan TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılmış ve cisimden saçılan alan incelenmiştir. Daha sonra, aynı mükemmel iletken cisim, bağl dielektrik sabiti -9.8, bağl manyetik geçirgenliği -1 olan bir çift negatif metamalzeme ile kaplanmış ve aynı ortam ve geliş açısında cisimden saçılan alan incelenmiştir. Şekil 3.3'te uzak alanın normalize saçılma genişliği her iki durum için 360° 'lik bir gözlem açısı boyunca verilmiştir.



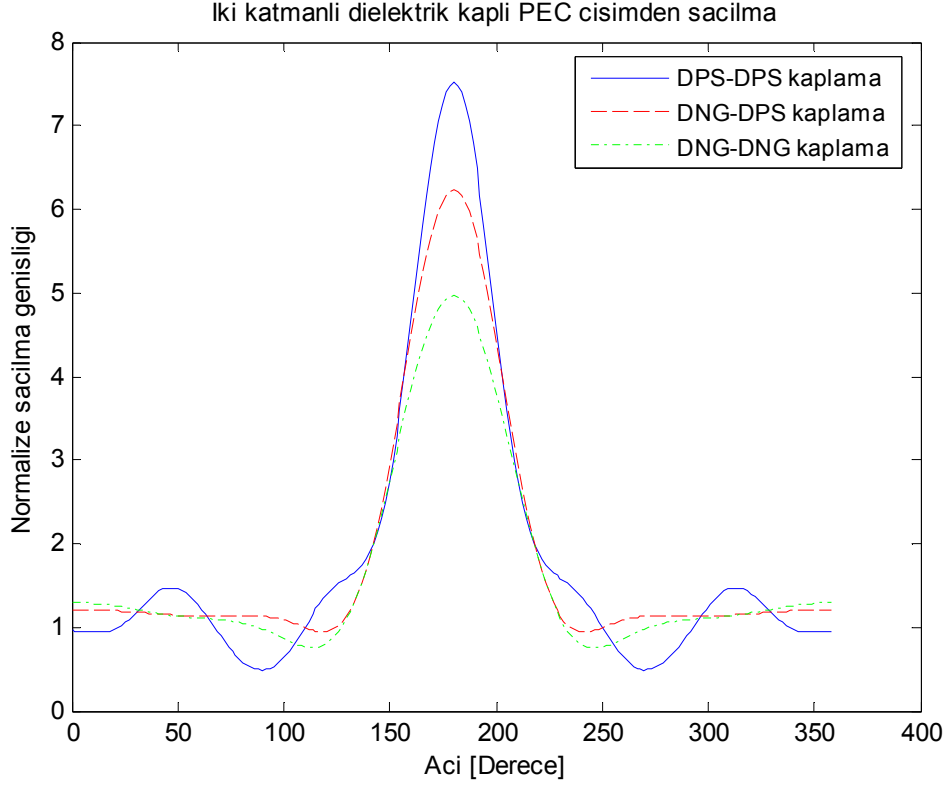
Şekil 3.3 : Tek katmanlı dielektik/metamalzeme kaplı cismin saçılma genişliği.

Görüldüğü üzere kaplama malzemesi saçılan alanı etkilemektedir. Dielektrik kaplama malzemesi mutlak değeri aynı olan parametrelere sahip çift negatif metamalzeme ile değiştirildiğinde saçılan alan bir miktar zayıflamaktadır. Sonuçların Li ve Shen [10]'in elde ettiği sonuçlar ile tutarlı olduğu görülmektedir.

Tek katmanlı yapıdan elde edilen sonuç sonrasında iki katmanlı yapı incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle yarıçapı 0.05m olan mükemmel iletken bir silindir cisim merkezinden itibaren yarıçapı 0.07m olan bir dielektrik malzeme ile kaplanmıştır. İlk katmandaki dielektrik kaplama malzemesinin bağıl dielektrik sabiti 9.8, bağıl manyetik geçirgenliği 1 olarak belirlenmiştir. Daha sonra bu kaplama tekrar cisim merkezinden itibaren yarıçapı 0.1m, bağıl dielektrik sabiti -9.8 ve bağıl manyetik geçirgenliği -1 olan bir çift negatif metamalzeme ile kaplanmıştır. İki katmanlı bir yapı ile kaplanan mükemmel iletken cisim, ortam parametreleri ϵ_0 ve μ_0 olan bir homojen uzay içerisine yerleştirilip geliş açısı 0° olan TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılmış ve cisimden saçılan alan incelenmiştir.

Dielektrik malzeme üzerine kaplanan çift negatif metamalzeme kaplamanın (DNG-DPS) etkisinin görülebilmesi için ikinci katmanda bulunan metamalzeme kaplama yerine ilk katmanda bulunan dielektrik malzeme ikinci katmana (DPS-DPS) ve aynı şekilde ikinci katmanda bulunan metamalzeme kaplama ilk katmana yerleştirilerek (DNG-DNG) tek katmanlı yapı davranışı elde edilmiş ve karşılaştırma bu iki yapıya göre yapılmıştır.

Şekil 3.4'te uzak alanın normalize saçılma genişliği üç farklı durum için 360° 'lik bir gözlem açısı boyunca verilmiştir. Görüldüğü üzere dielektrik kaplı mükemmel iletken bir cisim mutlak değer olarak aynı olan cisim parametrelerine sahip çift negatif metamalzeme ile kaplandığında, sadece dielektrik kaplanması durumuna göre, saçılan alan bir miktar zayıflamaktadır. Aynı şekilde sadece metamalzeme kaplı mükemmel iletken cisim ile dielektrik kaplama üzerine metamalzeme kaplanan mükemmel iletken cismin saçılan alan üzerindeki etkilerinin farklı olduğu görülmektedir. İlk katmana dielektrik malzeme yerleştirilmesi çift negatif metamalzemenin zayıflatıcı etkisini bir miktar azaltmıştır.

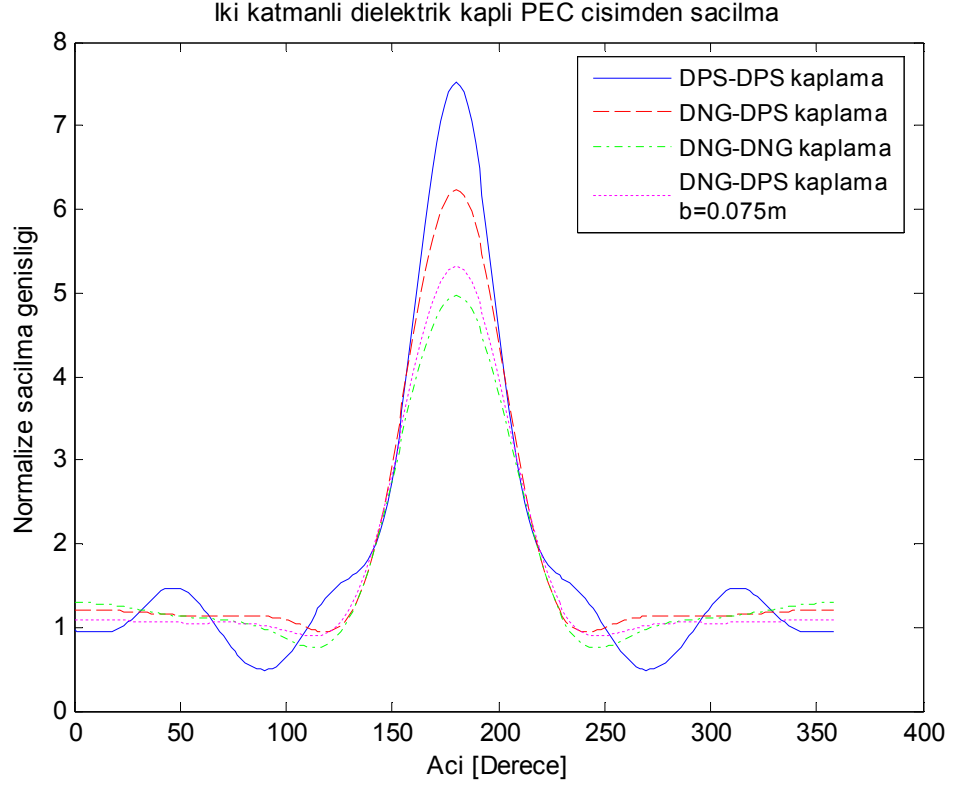


Şekil 3.4 : İki katmanlı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.

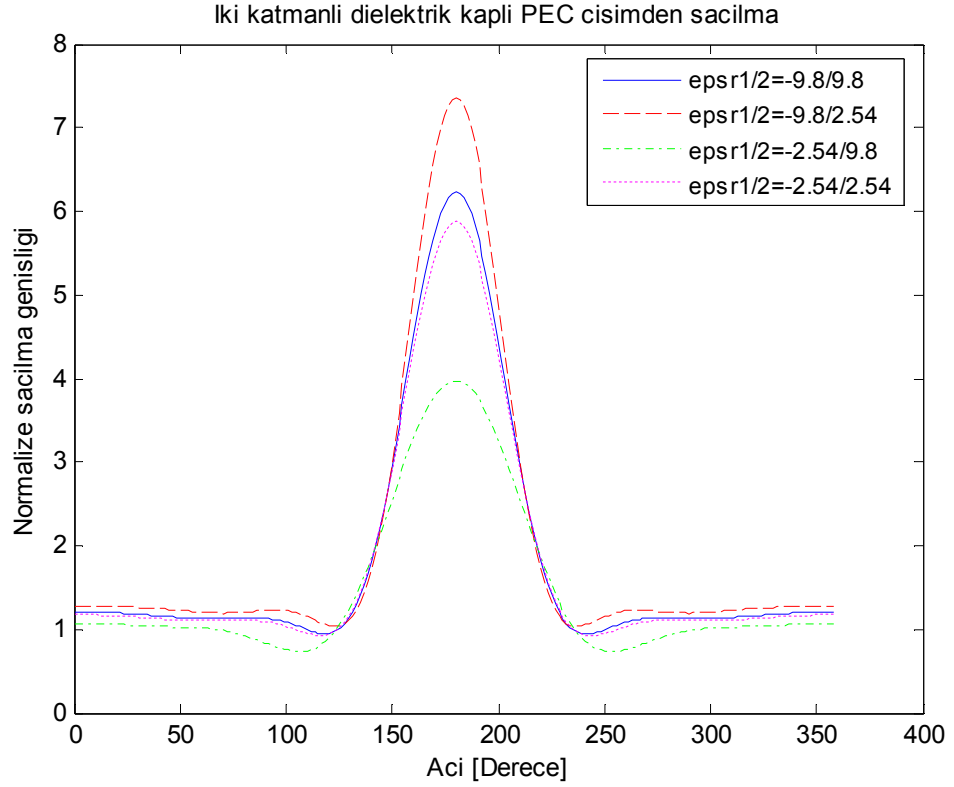
Daha sonra ilk katmandaki dielektrik kaplama malzemesinin yarıçapı küçük bir miktar artırılarak Şekil 3.5'teki analiz yapılmıştır. Bu analiz sırasında çift negatif metamalzeme kaplamanın cisim merkezinden itibaren olan yarıçapı değiştirilmemiştir. Ancak dielektrik kaplamanın yarıçapı bir miktar arttırıldığından metamalzeme kaplamanın kalınlığı da aynı miktarda azalmıştır. Kaplama malzemelerinin kalınlıklarının saçılan alan üzerinde farklı etkiler yaptığı görülmektedir.

Son olarak, kaplama malzemelerinin yarıçapları sabit tutularak farklı bağıl dielektrik sabitlerine göre saçılan alanın değişimi Şekil 3.6'da verilmiştir. Katmanlarda kullanılan bağıl dielektrik sabitleri -9.8, -2.54, 2.54 ve 9.8 seçilerek yapılan analizde farklı değerler için sonuçların değiştiği görülmektedir.

Daha ayrıntılı inceleme ilerleyen bölümlerde yapılacaktır.



Şekil 3.5 : İki katmanlı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.



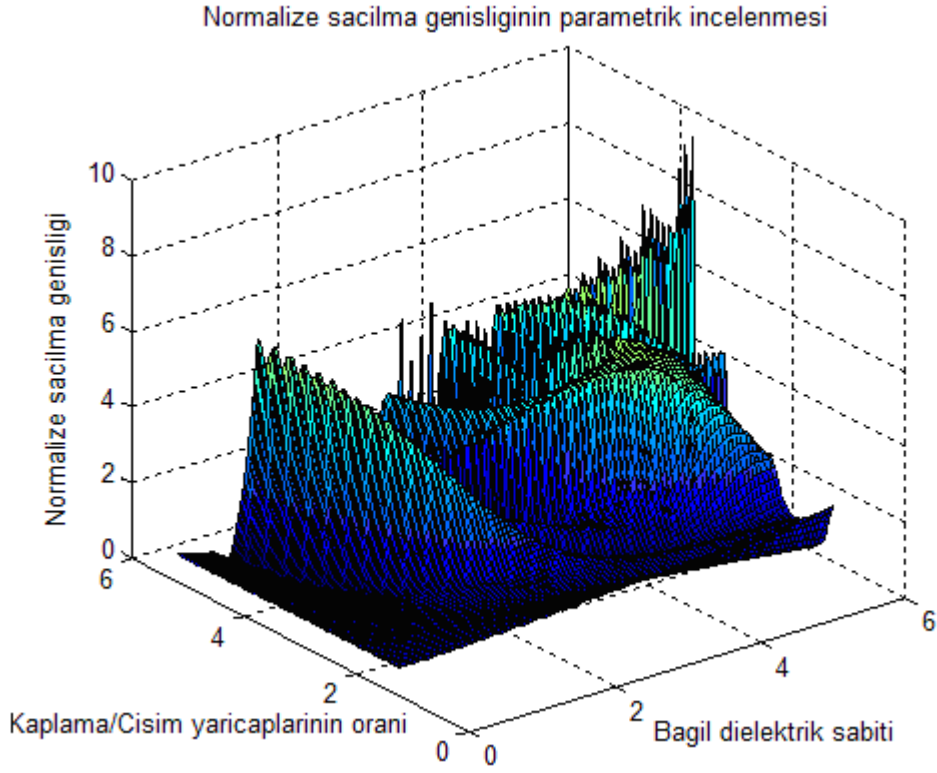
Şekil 3.6 : İki katmanlı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.

4. FARKLI PARAMETRELERİN TEK KATMANLI DİELEKTRİK MALZEME KAPLI MÜKEMMEL İLETKEN CİSİMDEN SAÇILMA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

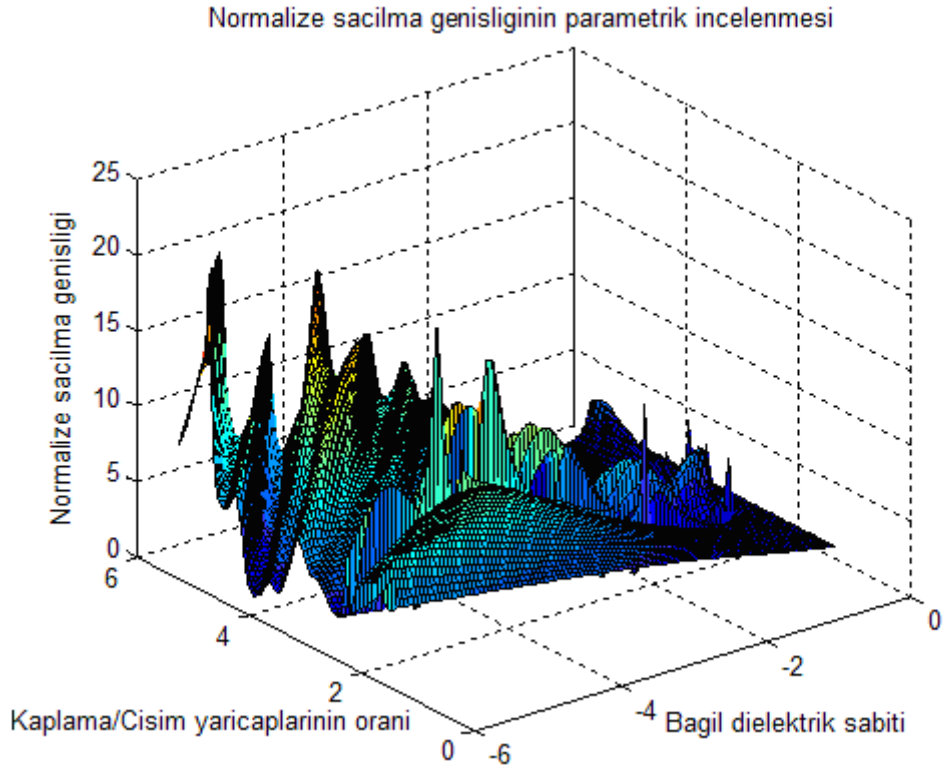
Bölüm 3.3'te kaplama kalınlığı ve bağıl dielektrik sabitinin saçılan alan üzerindeki etkisine birkaç örnek verilmiştir. Bu bölümde bu parametrelerin etkileri daha ayrıntılı olarak ele alınacaktır. İnceleme sırasında tek katmanlı dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken cisimden saçılma verileri kullanılacaktır. Farklı parametrelerin ayrı ayrı normalize saçılma genişliği üzerindeki etkileri daha önce farklı çalışmalara konu olmuştur [7, 10, 18, 19]. Bu çalışmada, birden fazla parametrenin aynı anda değişimi incelenecektir. Çalışma frekansı 1GHz ve $N=20$ olarak seçilmiştir.

Değişken parametreler olarak kaplama malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ve kaplama malzemesi ile mükemmel iletken cismin yarıçapları oranı ($h = b/a$) seçilmiştir. Bu amaçla, yarıçapı 0.05m olan mükemmel iletken bir cisim dielektrik bir malzeme ile kaplanmıştır. Tek katmanlı mükemmel iletken cisim, ortam parametreleri ϵ_0 ve μ_0 olan homojen bir uzay içerisine yerleştirilip geliş açısı 0° olan TM polarize bir düzlem dalga ile aydınlatılarak saçılan alan incelenmiştir.

Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de tek katmanlı dielektrik malzeme ve çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken cismin geliş açısı doğrultusundaki normalize saçılma genişliğinin kaplama malzemesinin bağıl dielektrik sabiti ve kaplama malzemesi yarıçapının mükemmel iletken cismin yarıçapına oranına göre değişimi verilmiştir.



Şekil 4.1 : Dielektik kaplı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.



Şekil 4.2 : Metamalzeme kaplı mükemmel iletken cismin saçılma genişliği.

Burada $0 < \varepsilon_r \leq 6$ iken $\mu_r=1$, $-6 \leq \varepsilon_r < 0$ iken ise $\mu_r=-1$ olarak seçilmiştir. Yarıçaplar oranı ise her iki durum için $1.3 \leq h < 5.3$ olarak belirlenmiştir. Bu yöntem ile normalize saçılma genişliğini en aza indirecek olan bağıl dielektrik sabiti ve yarıçaplar oranı elde edilmektedir.

Dielektrik malzeme kaplı 0.05m yarıçapındaki mükemmel iletken bir silindir için $\varepsilon_r=2.46$ ve $h=3.34$ olarak seçildiğinde normalize saçılma genişliği örnekleme aralığı içindeki değerlerle kıyaslandığında en düşük halini almaktadır. Aynı şekilde çift negatif metamalzeme kaplı 0.05m yarıçapındaki mükemmel iletken bir silindir için $\varepsilon_r=-3.66$ ve $h=1.5$ olarak seçildiğinde normalize saçılma genişliği örnekleme aralığı içindeki değerlerle kıyaslandığında en düşük halini almaktadır.

5. NEWTON YÖNTEMİ İLE OPTİMUM PARAMETRELERİN HESAPLANMASI

5.1 Newton Yönteminin Tek Katmanlı Metamalzeme Kaplı Mükemmel İletken Cisimden Saçılan Alana Uygulanması

Bu bölümde çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken silindirden saçılan alanı minimum yapacak parametrelerin iteratif yöntemle hesaplanması amaçlanmıştır. Bu amaçla (3.18)'de verilen eşitliğin minimum değeri aranacaktır.

$$\left\| \frac{2}{\pi} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in(\phi-\phi_0)} \right|^2 \right\| \rightarrow \min \quad (5.1)$$

Bu çalışmada minimum noktaları, bağıl dielektrik sabiti ve yarıçaplar oranına göre belirlenmiştir. Tek katmanlı yapıdan saçılan alanı en aza indirecek bağıl dielektrik sabiti ve yarıçaplar oranını bulabilmek için (3.18)'de verilen eşitliğin belirlenen parametrelere göre türevi alınarak aranılan minimum noktaları hesaplanacaktır. Minimumları oluşturacak olan parametreler (5.1)'deki C_n katsayısının parametreleri olduğundan,

$$G(\varepsilon_r, h) = \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\partial C_n}{\partial \varepsilon_r} \right| = 0 \quad (5.2)$$

$$V(\varepsilon_r, h) = \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\partial C_n}{\partial h} \right| = 0 \quad (5.3)$$

şeklinde iki ayrı türev ifadesi yazılabilir. C_n katsayısı ε_r ve h 'ye göre doğrusal olmayan bir fonksiyon olduğundan (5.2) ve (5.3)'teki ifadeler $G(\varepsilon_r, h)$ ve $V(\varepsilon_r, h)$ şeklinde doğrusal olmayan iki operatör ile tanımlanabilirler. Newton yöntemi kullanılarak (5.2) ve (5.3)'deki doğrusal olmayan iki eşitlik doğrusal sisteme çevrilebilir. Sonuçta, seçilen herhangi bir başlangıç değeri ikilisi (ε_r, h) için,

$$G(\varepsilon_r, h) + G_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r, h)\Delta\varepsilon_r + G_h(\varepsilon_r, h)\Delta h = 0 \quad (5.4)$$

$$V(\varepsilon_r, h) + V_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r, h)\Delta\varepsilon_r + V_h(\varepsilon_r, h)\Delta h = 0 \quad (5.5)$$

elde edilir. Burada, $G_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r, h)$ ve $V_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r, h)$ bağıl dielektrik sabitine göre, $G_h(\varepsilon_r, h)$ ve $V_h(\varepsilon_r, h)$ ise yarıçaplar oranına göre $G(\varepsilon_r, h)$ ve $V(\varepsilon_r, h)$ operatörlerinin türevlerini ifade etmektedir. (5.4) ve (5.5) denklemlerinde $\Delta\varepsilon_r$ ve Δh değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değerlerin elde edilmesi sonucunda $\varepsilon_r + \Delta\varepsilon_r$ ve $h + \Delta h$ şeklinde yeni birer bağıl dielektrik sabiti ve yarıçap oranı elde edilecektir. Bu işlem iteratif olarak devam ettirilir. Newton yönteminin oluşturduğu iteratif işlem,

$$G(\varepsilon_r^i, h^i) + G_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r^i, h^i)\Delta\varepsilon_r^{i+1} + G_h(\varepsilon_r^i, h^i)\Delta h^{i+1} = 0 \quad (5.6)$$

$$V(\varepsilon_r^i, h^i) + V_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r^i, h^i)\Delta\varepsilon_r^{i+1} + V_h(\varepsilon_r^i, h^i)\Delta h^{i+1} = 0 \quad (5.7)$$

şeklinde ifade edilir. Bu iterasyonlar, $\varepsilon_r^{i+1} = \varepsilon_r^i + \Delta\varepsilon_r^{i+1}$ ve $h^{i+1} = h^i + \Delta h^{i+1}$ yakınsama dizilerini elde etmek amacıyla yapılmaktadır [20].

(5.6) ve (5.7)'deki iki denklem, ortak çözümlerini kolaylaştırmak adına matris formunda yazılarak hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} G_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r^i, h^i) & G_h(\varepsilon_r^i, h^i) \\ V_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r^i, h^i) & V_h(\varepsilon_r^i, h^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_r^{i+1} \\ \Delta h^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G(\varepsilon_r^i, h^i) \\ -V(\varepsilon_r^i, h^i) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

(5.8)'deki sistemin çözümü sonucunda,

$$\begin{bmatrix} \Delta\varepsilon_r^{i+1} \\ \Delta h^{i+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r^i, h^i) & G_h(\varepsilon_r^i, h^i) \\ V_{\varepsilon_r}(\varepsilon_r^i, h^i) & V_h(\varepsilon_r^i, h^i) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -G(\varepsilon_r^i, h^i) \\ -V(\varepsilon_r^i, h^i) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

elde edilir. $|\Delta\varepsilon_r|$ ve $|\Delta h|$ değerleri için önceden seçilen bir eşik değerinin altına inildiğinde iterasyona son verilir.

5.2 Sayısal Sonuçlar

Şekil 4.2’de analiz edilen problemde yola çıkılarak iteratif Newton yöntemi ile farklı başlangıç koşulları için saçılma genişliğini minimum yapacak ϵ_r ve h değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Şekil 4.2’deki analiz sonuçları ($\epsilon_r=-3.66$ ve $h=1.5$) ile kıyaslanarak yorumlanmıştır. Bu bölümdeki analiz çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken silindir için yapılacaktır. Bu amaçla mükemmel iletken silindirin yarıçapı 0.05m, başlangıç koşulları ise $\epsilon_r=-2.9$ ve $h=2$ olarak belirlenmiştir. Çalışma frekansı 1GHz ve $N=20$ olarak seçilmiştir. İterasyon sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : $\epsilon_r=-2.9$ ve $h=2$ başlangıç koşulları için iterasyon sonuçları.

İterasyon adımı	ϵ_r	h
25	-3.0685	1.7693
50	-3.1630	1.6814
100	-3.3046	1.6072
150	-3.4128	1.5657
200	-3.5016	1.5367
250	-3.5763	1.5147
293	-3.6313	1.5000

Çizelge 5.1’de görülen sonuçlar, iterasyon sayısı arttıkça elde edilen değerlerin sonuç değerlere yakınsadığını göstermektedir. 293.iterasyon adımıyla elde edilen sonuç aranan sonuca oldukça yakındır. İteratif çözüm $N=20, 30, 40$ için tekrarlanmış ve sonuç değişmemiştir.

Buradaki sonuçlar üzerinde başlangıç koşullarının etkisini görebilmek amacıyla farklı koşullar için aynı analiz tekrarlanmıştır. Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere başlangıç koşulları değiştikçe iterasyonda farklılaşmalar ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 5.2 : Farklı başlangıç koşulları için iterasyon sonuçları.

İterasyon adımı (i+1)	ϵ_r^0	h^0	ϵ_r^{i+1}	h^{i+1}
247	-2.8	2	-3.51	1.52
243	-2.9	2	-3.56	1.52
234	-2.9	1.9	-3.52	1.52
229	-2.9	1.8	-3.5	1.52
195	-2.9	1.7	-3.43	1.53
197	-3	1.7	-3.49	1.53
225	-3	1.8	-3.55	1.52
228	-3	1.9	-3.56	1.52

İterasyon çözümlerinde sonuçlar başlangıç koşullarına bağlı olduğundan iterasyon sayısının seçilen başlangıç koşullarına göre değişimi beklenmektedir. Buradaki problemde değişken sayısı birden fazla olduğundan başlangıç koşullarının seçimi oldukça önemlidir. Aynı zamanda iterasyon sayısını belirleyen sonlandırıcı kriter ne kadar hassas seçilirse iterasyon sonucu gerçek sonuca o kadar yakınsayacaktır. Elde edilen sonuçlardan anlaşıldığı üzere Newton yöntemi başlangıç koşullarına karşı oldukça duyarlı bir yöntemdir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada TM polarize düzlem dalga ile aydınlatılan çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken silindirlerden saçılan alanı en aza indirecek parametrik değerlerin matematiksel bir yöntem ile tespit edilmesi problemi incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle dielektrik malzeme kaplı mükemmel iletken silindir ile çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken silindirden saçılan alanların analizleri yapılmıştır. Metamalzeme kaplamanın etkisini daha iyi görebilmek adına kaplama tabakasının sayısı ikiye çıkarılmış ve bu iki tabakada dielektrik malzeme ve çift negatif metamalzeme kaplamalar farklı kombinasyonlar ile kullanılmıştır. Tek katmanlı yapı için kaplama malzemesi olarak çift negatif metamalzeme kullanılmasıyla birlikte belirlenen çap ve geliş açısında saçılan alanın bir miktar azaldığı görülmüştür. Çift katmanlı yapı için aynı analiz tekrarlandığında mükemmel iletken cismin ilk katmanında dielektrik, ikinci katmanında metamalzeme kullanılmasının cismin sadece metamalzeme ile kaplanması durumuna göre saçılan alanda bir miktar artış yarattığı gözlemlenmiştir.

İlk katmanda dielektrik malzeme, ikinci katmanda çift negatif metamalzeme kullanılması durumunda katmanların kalınlıkları ve bağıl dielektrik sabitlerinin saçılan alana etkileri incelenmiş ve saçılan alanda belirgin değişim olduğu görülmüştür. Buradan yola çıkılarak tek katmanlı yapı için bağıl dielektrik sabiti ve kaplama malzemesi yarıçapının mükemmel iletken silindirin yarıçapına oranına göre normalize saçılma genişliği gözlemlenmiş ve farklı değerlerin saçılan alanı etkilediği belirlenmiştir. Bu inceleme yardımıyla bu değişkenlerin normalize saçılma genişliğini en aza indiren değerleri tespit edilmiştir.

İncelemeler sonucunda çift negatif metamalzeme kaplı mükemmel iletken silindirin normalize saçılma genişliğini en aza indirecek olan bağıl dielektrik sabiti ve yarıçaplar oranının tespiti için iteratif Newton yöntemi önerilmiştir. İteratif yöntem sonucu elde edilen veriler ile belirli bir aralıkta yapılan analizde elde edilen veriler karşılaştırıldığında yöntemin kabul edilebilir sonuçlar ürettiği görülmüştür. Sayısal sonuçlar iteratif yöntemin başlangıç koşullarına oldukça bağlı olduğunu ortaya

koymaktadır. Bu durum iteratif Newton yönteminin başlangıç koşullarına ne kadar duyarlı olduğunun bir göstergesidir. Sonuç olarak, metamalzeme kaplı mükemmel iletken bir silindirden saçılan alanı minimuma indirecek parametrik değerlerin belirlenebilmesi için iteratif Newton yönteminin alternatif bir yöntem olabileceği görülmüştür. Her ne kadar belirli bir aralıkta saçılan alan analiz edilerek minimum noktalarına ulaşılabilse de iteratif Newton yöntemi ile çalışma aralığı belirlenmeden uygun başlangıç koşulları ile aranılan minimum noktaları elde edilebilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Engheta, N., and Ziolkowski, R. W., 2006. *Metamaterials: Physics and Engineering Explorations*, Wiley-IEEE Pres, New Jersey.
- [2] Irci, E., 2007. Wave Propagation in Metamaterial Structures and Retrieval of Homogenization Parameters. *Master Thesis*, Bilkent University Department of Electrical and Electronics Engineering.
- [3] Veselago, V. G., 1968. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. **10**, no. 4, pp. 509-514.
- [4] Shelby R. A., Smith, D. R., and Schultz, S., 2001. Experimental verification of a Negative Index of Refraction. *Science*, Vol. **292**, no. 1, pp. 77-79.
- [5] Shelby, R. A., Smith, D. R., Nemat-Nasser S. C., and Schultz S., 2001. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial. *Applied Physics Letters*, Vol. **78**, no. 4, pp. 489-491.
- [6] Ziolkowski, R. W., and Heyman, E., 2001. Wave propagation in media having negative permittivity and permeability. *Physical Review*, Vol. **64**, no. 5, pp. 056625/1-15.
- [7] Ahmed, S., and Naqvi, Q. A., 2008. Electromagnetic scattering from a perfect electromagnetic conductor circular cylinder coated with a metamaterial having negative permittivity and/or permeability. *Optics Communications*, Vol. **281**, pp. 5664-5670.
- [8] Akgol, O., Erricolo, D., Uslenghi, P. L. E., Monopoli, D., and Zich, R. E., 2009. Electromagnetic Scattering by an Elliptic DNG Metamaterial Cylinder. *Electromagnetics in Advanced Applications, 2009. ICEAA'09*, pp. 833-836.
- [9] Hussein, M., I., 2008. Electromagnetic Scattering from Elliptical Structure Coated by a Metamaterial. *Microwave and Millimeter Wave Technology, 2008. ICMMT 2008*, pp. 58-61.
- [10] Li, C., and Shen Z., 2003. Electromagnetic scattering by a conducting cylinder coated with metamaterials. *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. **42**, no. 4, pp. 91-105.
- [11] Liu, Y., Wei, X., Wang, H., Li, Z., Yin, H., and Huang, P., 2008. Backscattering of Metamaterial Electromagnetic Cloak. *Metamaterials, 2008 International Workshop on*, pp. 335-337.
- [12] Meng, F., Liang, Y., Wu, Q., and Li, L., 2009. Invisibility of a metamaterial cloak illuminated by spherical electromagnetic wave. *Applied Physics A*, Vol. **95**, pp. 881-888.

- [13] **Mushref, M. A.**, 2006. Closed solution to electromagnetic scattering of a plane wave by an eccentric cylinder coated with metamaterials. *Optics Communications*, Vol. **270**, pp. 441-446.
- [14] **Zainud-Deen, S. H., Botros, A. Z., and Ibrahim, M. S.**, 2008. Scattering from Bodies Coated with Metamaterial Using FDFD Method. *National Radio Science Conference, 2008*, pp. 1-8.
- [15] **Qiu, C., Yao H., Burokur, S., Zouhdi S., and Li L.**, 2007. Electromagnetic Scattering Properties in a Multilayered Metamaterial Cylinder. *IEICE Trans. Commun.*, Vol. **E90-B**, no. 9, pp. 2423-2429.
- [16] **Pendry J. B.**, 2004. Negative refraction. *Contemporary Physics*, Vol. **45**, no. 3, pp. 191-202.
- [17] **Pendry, J. B., and Smith, D. R.**, 2004. Reversing Light With Negative Refraction. *Physics Today*, Vol. **57**, pp. 37-43.
- [18] **Ahmed, S., and Naqvi, Q. A.**, 2009. Scattering of Electromagnetic Waves by a Coated Nihility Cylinder. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahz Waves*, Vol. **30**, pp. 1044-1052.
- [19] **Irci, E., and Ertürk, V. B.**, 2007. Achieving transparency and maximizing scattering with metamaterial-coated conducting cylinders. *Physical Review*, Vol. **76**, no. 5, pp. 056603/1-15.
- [20] **Kelley, C. T.**, 1999. *Iterative Methods for Optimization*. SIAM, Philadelphia.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Eda Konakyeri

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 1985

Lisans Üniversitesi: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- **Konakyeri, E.**, Paker, S., and Palamutcuogullari, O., 2009. GPS Helix Antenna Design. *Istanbul University-Journal of Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 9, no. 2, pp. 935-941.