

**KAYDIRILMIŞ FREKANSTA İÇ EŞDEĞERLİK
METODUNUN İKİ BOYUTLU
KAYIPLI CİSİMLERE UYGULANMASI**

**APPLICATION OF THE SHIFTED FREQUENCY
INTERNAL EQUIVALENCE TO
TWO DIMENSIONAL LOSSY OBJECTS**

BUĞRA AYDEMİR

Prof. Dr. ADNAN KÖKSAL
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

BUĞRA AYDEMİR'in hazırladığı "Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik Metodunun İki Boyutlu Kayıplı Cisimlere Uygulanması" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK VE ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Birsen SAKA

Başkan



Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Danışman



Prof. Dr. Çiğdem Seçkin GÜREL

Üye



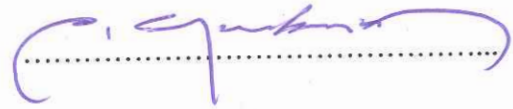
Prof. Dr. Özlem ÖZGÜN

Üye



Prof. Dr. Asım Egemen YILMAZ

Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☒ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

18/06/2018


Buğra AYDEMİR

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı bütün bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

18/06/2018

Buğra AYDEMİR

ÖZET

KAYDIRILMIŞ FREKANSTA İÇ EŞDEĞERLİK METODUNUN İKİ BOYUTLU KAYIPLI CİSİMLERE UYGULANMASI

Buğra AYDEMİR

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Haziran 2018, 60 Sayfa

Cisimlerin elektromanyetik dalgalar ile etkileşiminin öngörülmesi mühendislik çalışmalarının tasarım, üretim ve test süreçlerinde önem arz eder. Karmaşık cisimlerin analizlerinde kullanılan nümerik yöntemlerden Moment Metodu'nda (MM) öncelikle geometri ayrık hale getirilir. Sonra bu geometri üzerinde açılım fonksiyonları tanımlanır. Son aşamada ise test fonksiyonları kullanılarak bulunan integral denklemler test edilir. Sonuç olarak bu yöntemler cisim üzerindeki Maxwell denklemlerinin çözümünü bulur ve cisim üzerindeki elektromanyetik alanlarla cismin Radar Kesit Alanı (RKA) hesaplamaları yapılabilir. Bir cismin farklı frekanslardaki davranışlarını önceden kestirebilmek için yapılan benzetim çalışmaları anlatılan bu yöntemi gerekli her bir frekansta uygular. Özellikle karmaşık yapıların incelendiği, geometriyi ayırıklaştıran eleman sayısının fazla olduğu ve analiz edilen frekans sayısının arttığı durumlarda geleneksel yöntemlerin zaman ve bellek kullanımları çok yükselmektedir.

Cismi ayrık hale getiren elemanlar yüzey ve hacim elemanları olarak gruplandırılabilir. Teorik ispatı yapılan, Moment Metodu ve bazı analitik sonuçlarla karşılaştırması başarıyla gerçekleştirilen Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik (KFİE) metodu, bir frekans için bulunan empedans matrisinin hacim elemanlarının diğer frekanslarda yalnızca basit cebirsel işlemlerle tekrardan kullanılabilirdiğini göstermiştir. Böylece bir cismin hacim elemanlarının oranının

artması KFİE metodunun verimini artırmaktadır. Ek olarak incelenen frekans sayısındaki artış KFİE metodunu daha avantajlı duruma getirmektedir.

Bu tezde daha önce kayıpsız cisimler için incelenen KFİE metodunun homojen ve homojen olmayan kayıplı cisimlerdeki performansı incelenmiştir. Bu sayede teorinin çalışma alanı genişletilip gerçek modellere daha çok yaklaşması amaçlanmıştır. Dielektrik malzemelerin elektrik geçirgenlik katsayılarının sanal kısmı cismin iletkenliğini yani kayıp oranını etkiler. Kayıp oranındaki değişim cisim üzerindeki elektromanyetik alanların dağılımının farklılaşmasına, bu farklılaşma da Radar Kesit Alanı grafiklerinin değişmesine neden olur.

Bu tez kapsamında ilk olarak KFİE metodu için sanal elektrik geçirgenlik katsayısı tanımlanmış ve iletken cisimler için geçerli deri etkisi olgusu çeşitli parametreler için incelenmiştir. Ardından KFİE algoritmasının avantajlı olduğu geniş bant çalışmaları yapılmıştır. Geniş bant çalışmalarında MM ile fark oranları RKA için dereceye ve frekansa bağlı olarak hesaplanmış, elektromanyetik alanlar için de frekansa bağlı fark grafikleri çıkartılmıştır. Son olarak fark oranlarının cisim üzerindeki dağılımlarını göstermek için cismi ayırklaştırmada kullanılan her bir elemanın fark oranı hesaplanıp frekans, öz iletkenlik katsayısı ve elektriksel boyut parametrelerinin MM ile fark oranlarına olan etkisi gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İletkenlik, Saçılma Problemi, Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik, Moment Metodu, Kayıplı Ortam

ABSTRACT

APPLICATION OF THE SHIFTED FREQUENCY INTERNAL EQUIVALENCE TO TWO DIMENSIONAL LOSSY OBJECTS

Buğra AYDEMİR

Master of Science, Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

June 2018, 60 Pages

The prediction of the interaction of objects with electromagnetic waves is important in the design, production and testing processes in engineering. Method of Moments (MoM) can be used to analyze behavior of complex structures. First of all, geometry of the structure is discretized in this method and then basis functions are defined on the geometry. Final step is to test the integrals via test functions. As a result, these methods find the solution of the Maxwell equations on the structure. Electromagnetic waves on the structure and Radar Cross Section (RCS) calculations can be done with solutions of Maxwell equations. If it is required to find the solutions of the equations for several frequencies, this method is applied for each frequency. Time and memory requirements are high if the investigated structure is complex; the number of discretization elements is high or the number of analysis frequencies increases.

Elements that discretize the structure can be grouped as volume and surface elements. It is already shown that Shifted Frequency Internal Equivalence (SFIE) principle can use the volume components of impedance matrix at a frequency for another one with some basic algebraic manipulations. Therefore, increasing the ratio of the volume components would also increase the efficiency of SFIE method. In addition, SFIE is more advantageous if the number of frequencies increases.

This thesis investigates the performance of SFIE method in homogeneous and non-homogeneous lossy media. The aim is to widen the area that SFIE can be used and to make SFIE closer to real modeling. Imaginary component of electrical permittivity in dielectric media affects conductivity hence loss in structure. Changing loss coefficient changes the distribution of electromagnetic waves and this modifies RCS plots.

In this thesis, an imaginary electrical permittivity coefficient is defined and skin effect phenomenon is studied for different parameters. Afterwards, wide band study is done where SFIE is advantageous. In wide band studies differences between MOM and SFIE are calculated with respect to observation angle and frequency for RCS, and difference plots regarding frequency are drawn for electromagnetic waves. Finally; to be able to show distribution of differences on the structure, difference between MOM and SFIE results of each discretizing element is calculated. Then effect of frequency, conductivity and size of the structure on difference is shown.

Keywords: Conductivity, Scattering Problem, Shifted Frequency Internal Equivalence, Method of Moments, Lossy Media

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca beni en iyi şekilde yönlendiren, görüş ve düşüncelerini hayatım boyunca kendime rehber edineceğim saygıdeğer tez danışmanım Prof. Dr. Adnan KÖKSAL'a,

Çalışmalarım için desteğini esirgemeyen iş arkadaşlarıma,

Beni bu günlere getiren aileme,

Her konuda olduğu gibi bu tez çalışmasının tamamlanmasındaki güven kaynağım sevgili eşim Sabiha'ya

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER.....	vii
1.GİRİŞ.....	1
2.METOT.....	5
3.SONUÇLAR.....	12
3.1. Kod Doğrulaması.....	12
3.2. Dalga Boyu Cinsinden Sabit Saçıcının Öz İletkenlik Katsayısına Göre İncelenmesi.....	13
3.3. Gerçek Boyutları Sabit Saçıcının Öz İletkenlik Katsayısına Göre İncelenmesi.....	17
3.4. Gerçek Boyutları Sabit, Homojen Olmayan Kare Saçıcının Öz İletkenlik Katsayısına Göre İncelenmesi.....	19
3.5. Dalga Boyu Cinsinden Boyutları ve Öz İletkenlik Katsayısı Sabit Bir Saçıcının Değişen Frekansa Göre İncelenmesi.....	25
4.SONUÇ VE TARTIŞMA.....	56
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	59

ŞEKİLLER

Sayfa

Şekil 2.1.	Orijinal Problem.....	5
Şekil 2.2.	İç Eşdeğerlik Prensibi.....	5
Şekil 2.3.	Dış Eşdeğerlik Prensibi.....	5
Şekil 3.1.	Kayıpsız cisimler için kullanılan KFİE algoritması ile kayıplı cisimler için kullanılan KFİE algoritmasının $\sigma=0$ parametresi ile karşılaştırılması.....	12
Şekil 3.2.	Dalga boyu cinsinden boyutu sabit saçıcının σ değişirken davranışı (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0556$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.6667$, (f) $\sigma=2.2222$, (g) $\sigma=2.7778$, (h) $\sigma=5.5556$ için alan dağılımları.....	14
Şekil 3.3.	σ artışının cisim üzerindeki alan dağılımlarına etkisi ve deri etkisinin gözlemlenmesi (a) $\sigma=0.5556-1.6667$, (b) $\sigma=0.5556-2.2222$, (c) $\sigma=0.5556-2.2778$, (d) $\sigma=0.5556-2.2778$	15
Şekil 3.4.	σ değişiminin RKA üzerine etkisi.....	16
Şekil 3.5.	Gerçek boyutları sabit saçıcının σ değişirken davranışı (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0556$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.6667$, (f) $\sigma=2.2222$, (g) $\sigma=2.7778$, (h) $\sigma=5.5556$ için alan dağılımları.....	18
Şekil 3.6.	Homojen olmayan kare problemi.....	19

Şekil 3.7.	Gerçek boyutları sabit, homojen, kare saçıcının 0 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0278$ (d) $\sigma=0.0556$, (e) $\sigma=0.2778$, (f) $\sigma=0.5556$ için alan dağılımları.....	21
Şekil 3.8.	Gerçek boyutları sabit, homojen, kare saçıcının 45 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0278$ (d) $\sigma=0.0556$, (e) $\sigma=0.2778$, (f) $\sigma=0.5556$ için alan dağılımları.....	22
Şekil 3.9.	Gerçek boyutları sabit, homojen olmayan, kare saçıcının 0 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0278$ (d) $\sigma=0.0556$, (e) $\sigma=0.2778$, (f) $\sigma=0.5556$ için alan dağılımları.....	23
Şekil 3.10.	Gerçek boyutları sabit, homojen olmayan, kare saçıcının 45 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0278$ (d) $\sigma=0.0556$, (e) $\sigma=0.2778$, (f) $\sigma=0.5556$ için alan dağılımları.....	24
Şekil 3.11.	Kayıpsız cismin geniş bant RKA sonuçları.....	25
Şekil 3.12.	1 GHz ve 100 MHz frekanslarında kayıpsız cismin RKA sonuçları....	26
Şekil 3.13.	1 λ yarıçaplı saçıcının σ değişirken (a) $\sigma=0.0556$, (b) $\sigma=0.2778$, (c) $\sigma=0.5556$, (d) $\sigma=1.1111$, (e) $\sigma=2.7778$, (f) $\sigma=5.5556$ geniş bant sonuçları.....	27
Şekil 3.14.	Yüksek öz iletkenlik değerine sahip saçıcının elektriksel boyutunun artışının (a) 0.5λ (b) 1λ (c) 1.5λ (d) 2λ , (e) 2.5λ yarıçap için RKA üzerindeki etkisi.....	28

Şekil 3.15.	1 λ yarıçapındaki cismin (a) 1 GHz (b) 800 MHz (c) 600 MHz (d) 400 MHz (e) 200 MHz (f) 100 MHz için KFİE ve MM ile bulunan RKA sonuçlarının karşılaştırması.....	30
Şekil 3.16.	1.5 λ yarıçapında $\sigma=0.2778$ değerinde kayıplı cismin (a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz için KFİE ve MM ile bulunan RKA sonuçlarının karşılaştırması.....	31
Şekil 3.17.	2.5 λ yarıçapında $\sigma=5.5556$ değerinde kayıplı cismin (a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz için KFİE ve MM ile bulunan RKA sonuçlarının karşılaştırması.....	32
Şekil 3.18.	0.5 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları.....	33
Şekil 3.19.	1 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları.....	34
Şekil 3.20.	1.5 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları.....	35
Şekil 3.21.	2 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları.....	36

Şekil 3.22.	2.5 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları.....	37
Şekil 3.23.	0.5 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları.....	39
Şekil 3.24.	1 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları.....	40
Şekil 3.25.	1.5 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları.....	41
Şekil 3.26.	2 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları.....	42
Şekil 3.27.	2.5 λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları.....	43
Şekil 3.28.	0.5 λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi.....	46
Şekil 3.29.	1 λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi.....	47
Şekil 3.30.	1.5 λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi.....	48

Şekil 3.31.	2 λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi.....	49
Şekil 3.32.	2.5 λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi.....	50
Şekil 3.33.	0.5 λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi.....	51
Şekil 3.34.	1 λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi.....	52
Şekil 3.35.	1.5 λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi.....	53
Şekil 3.36.	2 λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi.....	54

1.GİRİŞ

Yapıların elektromanyetik dalgalar ile etkileşiminin gözlenmesi mühendislik çalışmalarının tasarım, üretim ve test aşamalarında büyük önem taşır. Benzetim ortamında cisimlerin nasıl davranacağını önceden kestirimi hem zaman hem de kaynak kullanımı açısından faydalıdır. Basit cisimlerin elektromanyetik dalgaların bulunduğu ortamlarda nasıl davranacağını analitik çözümleri mevcuttur. Ancak bu çözümler sınırlı sayıdaki geometrik cisimlere uygulanabilir. Daha karmaşık yapıların analizleri için nümerik yöntemlere başvurulmalıdır. Hem analitik hem de nümerik yöntemler 1.1-1.4 denklemleri ile verilen integral veya diferansiyel Maxwell denklemlerinin çözümünü bulur:

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} + \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho dV = Q$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.1 \text{ a-b})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (1.2 \text{ a-b})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1.3 \text{ a-b})$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (1.4 \text{ a-b})$$

Maxwell integral denklem çözümlerinin kullanıldığı Moment Metodu'nda (MM) öncelikle denklemler açılım ve test fonksiyonları kullanılarak ayrık hale getirilir ve matris formuna dönüştürülür. Frekans bölgesi çözümlerinde her bir frekans için empedans matrisi hesaplanır. Geniş bant çözümlerinin gerekli olduğu uygulamalarda bu empedans hesaplarının her frekansta uygulanması gerekmektedir. Bu işlem hem zaman hem de bellek gereksinimleri açısından pahalı bir yoldur. Yeni ve etkili bir yöntem olan Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik (KFİE) yöntemi ise bir frekans için bulunan empedans matrisi kullanılarak diğer frekanslardaki empedans matrislerinin daha az işlemle bulunmasına olanak vermektedir. Şimdiye kadar yapılan KFİE çalışmaları ideal ve kayıpsız cisimlerin analizlerini ve bunların hata ve MM ile olan fark oranlarını konu almaktadır. Ancak pratikte kullanılan bütün cisimler kayıplı olduklarından ve de iletkenler dalga yayılımında dielektrik malzemelerden farklı davranış ve sonuçlar gösterdiklerinden bu yöntemin kayıplı cisimler için test edilmesi teoremin varsayımlarını azaltacak ve gerçeğe uygunluğunu artıracaktır.

Maxwell denklemleri içinde cisimlerin başta manyetik ve elektrik geçirgenlik olmak üzere bazı özellikleri kullanılır. Bu özellikler cisimlerin elektromanyetik dalgalara nasıl tepki vere-

ceklerini belirler. Teorik çalışmalar yapılırken denklemlerdeki karışıklıkların önüne geçmek ve denklemlerin anlaşılmasını kolaylaştırmak için ideal koşullar incelenir. Ancak bu koşullar yaklaşık sonuçları verse de gerçek değerlere daha çok yaklaşılması için ideal koşullarda ihmal edilen etkenlerin hesaba katılması gerekmektedir. Elektromanyetikteki ideal koşullardan birisi kayıpların ihmal edilmesidir. Daha önce teorik ispatı yapılmış Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik metodunun literatürde kullanılan Momentler Metodu (MM) ile kıyaslanması iki çözüm yönteminin de ideal koşullarda verdiği sonuçlar ele alınarak yapılmıştır. KFİE yöntemi ile kayıpsız cisimlerin saçılım problemleri büyük bir bant genişliğinde çözülmüş, sonuçlar MM ve analitik sonuçlarla karşılaştırılmış ve bunların doğruluğu gösterilmiştir. Literatüre kazandırdığı analiz süresi ve işlemci gücündeki artıları ile KFİE yöntemi daha ilgi çekici hale gelmiş ve kayıplı cisimler için yöntemin incelenmesi arzu edilir hale gelmiştir.

Elektromanyetik problemlerde kayıp, öz iletkenlik katsayısı ile ilintilidir. Bir dielektrik cisme uygulanan elektrik alan (**E**) cismin içindeki atom ve molekülleri kutuplar ve bu da toplam yer değiştirme akımını (**D**) artıran elektrik dipol momentleri oluşumuna neden olur. Bu kutuplanma vektörü (**P_e**) elektrik kutuplanma olarak adlandırılır ve

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_e \quad (1.5)$$

biçiminde formüle edilir.

Bu tezde de kabul edilen doğrusal ortamlarda elektrik kutuplanma ve elektrik alan arasında

$$\mathbf{P}_e = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E} \quad (1.6)$$

doğrusal ilişkisi bulunur

Burada χ_e ortamın elektrik hassasiyetidir. Bu durumda elektrik akı yoğunluğu dielektrik katsayısı ile

$$\mathbf{E} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}_e = \varepsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1.7)$$

haline dönüşür. Eğer ortam kayıplı ise bu bir iletkenlik ile modellenebilir. İletkenlik veya kayıp var olduğunda $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ denklemi ile verilen bir akım oluşur. Böylece yukarıda verilen Amper denklemi

$$\begin{aligned}
\nabla \times \mathbf{H} &= j\omega \mathbf{D} + \mathbf{J} \\
&= j\omega \varepsilon \mathbf{E} + \sigma \mathbf{E} \\
&= j\omega \varepsilon \mathbf{E} + \sigma \mathbf{E} \\
&= j\omega \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \right) \mathbf{E}
\end{aligned} \tag{1.8}$$

biçimini alır [1].

Bu denklemin sanal kısmı toplam kaybı gösterir. İletkenlik akımının dielektrik yer değiştirme akımına oranı malzemenin ne kadar iyi iletken olduğunun bir ölçüsüdür. Bu ölçü sıkça kayıp tanjantı olarak bilinen

$$\tan \delta = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \tag{1.9}$$

olarak tanımlanır. Kolaylıkla anlaşılabilceği gibi kayıp tanjantı ne kadar büyükse malzeme o kadar kayıplı yani iyi iletkenidir.

Mikrodalga frekanslarında maddeler genellikle gerçek elektrik geçirgenlik katsayısı $\varepsilon' = \varepsilon_r \varepsilon_0$ ve belirli frekansta verilen kayıp tanjantı ile tanımlanır. Böylelikle kayıpsız dielektrik denklemleriyle çözülen bir problem için kayıp, gerçek elektrik geçirgenlik katsayısı yerine Denklem 1.10'da görüldüğü gibi karmaşık katsayı kullanılarak hesaba katılabilir [2].

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon'(1 - j \tan \delta) = \varepsilon_0 \varepsilon_r (1 - j \tan \delta) \tag{1.10}$$

Benzer şekilde manyetik alan da cisim içinde manyetik dipol momenti ve buna bağlı manyetik kutuplanma oluşumuna neden olacaktır. Manyetik malzemelerdeki kayıplarda dielektrik karşılığındakine benzer şekilde karmaşık μ ile modellenabilir. Bu tez kapsamında çalışılan cisimlerin elektrik geçirgenlikleri sanal kısma sahip olsa da manyetik geçirgenliklerinin yalnızca gerçel olduğu, yani manyetik kayıpların var olmadığı kabul edilmiştir.

Düzlem dalgaların ortam katsayılarına bağlı davranışları dalga ya da Helmholtz denklemi

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{H} = 0 \tag{1.11}$$

ile açıklanabilir.

Burada dalga sayısı ya da yayılma katsayısı olarak adlandırılan $k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ değeri tanımlanır ve cisim içindeki dalga boyu $\lambda = 2\pi/k$ denklemi ile bulunur.

Kayıp ile ilişkili olan σ değerinin dalga denklemine eklenmesi durumunda,

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon (1 - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon}) \mathbf{E} = 0 \quad (1.12)$$

eşitliği elde edilir.

Yukarıdaki iki denklem karşılaştırıldığında dalga sayısının $k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}$ değerinden $k^2 = \omega^2 \mu \varepsilon [1 - j(\sigma/\omega \varepsilon)]$ değerine dönüştüğü görülür. Bu durumda yayılım katsayısı hem gerçel hem de sanal kısma sahip olur ve

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega \sqrt{\mu \varepsilon} \sqrt{1 - j(\sigma/\omega \varepsilon)} \quad (1.13)$$

denklemleri ile gösterilir.

Burada α dalganın sönümlenme, β ise yayılım katsayısıdır. α ve β değerleri,

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right]^2} - 1 \right]}, \quad \beta = \omega \sqrt{\frac{\mu \varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left[\frac{\sigma}{\omega \varepsilon} \right]^2} + 1 \right]} \quad (1.14 \text{ a-b})$$

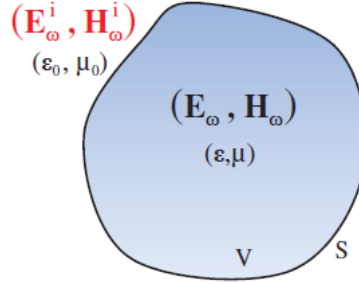
açık formülleriyle gösterilebilir [3].

Bu tezde kayıplı cisimlerdeki dalga davranışlarının incelenmesi için Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik metodu kullanılmıştır. Bu metodun kayıplı olmayan cisimler için uygulaması ve kayıplı cisimler için gerekli değişiklikler 2. kısımda anlatılmıştır.

Bu tez kapsamında ilk olarak öz iletkenlik katsayısının dalga boyu cinsinden sabit bir saçıcıya etkisi KFİE metodu ile incelenmiş ve deri etkisi gözlenmiştir. Ardından gerçel boyutları sabit homojen ve homojen olmayan cisimler incelenmiş ve son olarak da frekans değeri öz iletkenlik katsayısı sabit bir cisim için değiştirilmiş ve radar kesit alanı için geniş bant çözümü sağlanmıştır. Bu çalışmalar farklı büyüklüklerdeki cisimlere uygulanmış ve böylece KFİE metodunun kayıplı cisimler durumuna uygulaması gerçekleştirilmiştir.

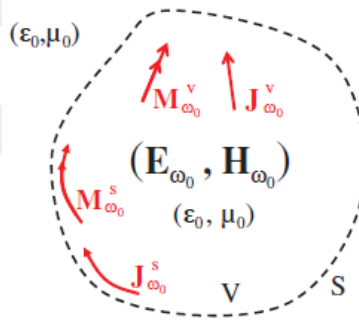
2.METOT

ε ve μ parametrelerine sahip homojen bir cisme Şekil 2.1’de gösterildiği gibi bilinen $\mathbf{E}_\omega^i$ ve $\mathbf{H}_\omega^i$ alanları gönderilsin.



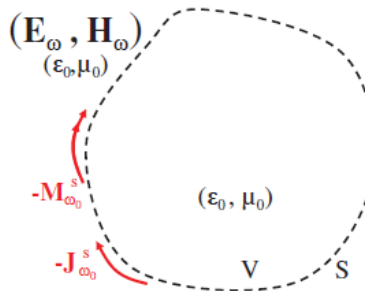
Şekil 2.1 Orijinal Problem

İç eşdeğerlik prensibine göre bu yapı boş uzayda hacim ve yüzeyde elektrik ve manyetik kaynaklar ile Şekil 2.2’deki gibi ifade edilebilir.



Şekil 2.2 İç Eşdeğerlik Prensibi

Benzer biçimde dış eşdeğerlik de saçıcının olmadığı durum Şekil 2.3’teki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.3 Dış Eşdeğerlik Prensibi

Teğet alanlar cismin yüzeyinde sürekli olacağı için orijinal problemin çözümünde iç ve dış eşdeğerlik denklemleri oluşturulup teğet alanları birbirine eşitlenir. Buradan çıkacak integral denklemlerin iç eşdeğerlik kısımları KFİE kullanılarak tek bir frekansta hesaplanacaktır.

Bilinen gelen alan değerleri saçıcının olmadığı durumlarda fazör formda

$$\nabla \times \mathbf{E}_\omega^i = -j\omega\mu_0\mathbf{H}_\omega^i \quad (2.1-a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_\omega^i = j\omega\varepsilon_0\mathbf{E}_\omega^i \quad (2.1-b)$$

Maxwell denklemlerini sağlar.

Saçıcının eklenmesiyle oluşacak olan $\mathbf{E}_\omega$, $\mathbf{H}_\omega$ toplam alanları ise cismin içinde cismin ortam parametrelerini içeren 2.2-a ve 2.2-b denklemleri sağlayacaktır.

$$\nabla \times \mathbf{E}_\omega = -j\omega\mu\mathbf{H}_\omega \quad (2.2-a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}_\omega = j\omega\varepsilon\mathbf{E}_\omega \quad (2.2-b)$$

Tanımlanan S yüzeyi ve V hacmindeki toplam alanlar aşağıdaki kaynaklar KFİE yöntemi ile uygulanarak bulunabilir.

$$\mathbf{J}_{\omega_0}^V = j(\omega\varepsilon - \omega_0\varepsilon_0)\mathbf{E}_\omega \quad (2.3-a)$$

$$\mathbf{M}_{\omega_0}^V = j(\omega\mu - \omega_0\mu_0)\mathbf{H}_\omega \quad (2.3-b)$$

$$\mathbf{J}_{\omega_0}^S = -\hat{n} \times \mathbf{H}_\omega \quad (2.3-c)$$

$$\mathbf{M}_{\omega_0}^S = \hat{n} \times \mathbf{E}_\omega \quad (2.3-d)$$

Burada $\hat{n}$ yüzey normal vektörü V hacminden dışarı doğru tanımlanır. Dış eşdeğerlik için $-\mathbf{J}_{\omega_0}^S$ ve $-\mathbf{M}_{\omega_0}^S$ yüzey kaynakları kullanılıp hacim ve yüzeyde

$$\mathbf{E}_{r\omega_0}(\mathbf{J}_{\omega_0}^V, \mathbf{M}_{\omega_0}^V, \mathbf{J}_{\omega_0}^S, \mathbf{M}_{\omega_0}^S) = \mathbf{E}_\omega \quad (2.4-a)$$

$$\mathbf{H}_{r\omega_0}(\mathbf{J}_{\omega_0}^V, \mathbf{M}_{\omega_0}^V, \mathbf{J}_{\omega_0}^S, \mathbf{M}_{\omega_0}^S) = \mathbf{H}_\omega \quad (2.4-b)$$

$$\hat{n} \times [\mathbf{E}_{r\omega_0}(\mathbf{J}_{\omega_0}^V, \mathbf{M}_{\omega_0}^V, \mathbf{J}_{\omega_0}^S, \mathbf{M}_{\omega_0}^S)] \times \hat{n} = \hat{n} \times [\mathbf{E}_{r\omega}(-\mathbf{J}_{\omega_0}^S, -\mathbf{M}_{\omega_0}^S) + \mathbf{E}_\omega^i] \times \hat{n} \quad (2.4-c)$$

$$\hat{n} \times [\mathbf{H}_{r\omega_0}(\mathbf{J}_{\omega_0}^V, \mathbf{M}_{\omega_0}^V, \mathbf{J}_{\omega_0}^S, \mathbf{M}_{\omega_0}^S)] \times \hat{n} = \hat{n} \times [\mathbf{H}_{r\omega}(-\mathbf{J}_{\omega_0}^S, -\mathbf{M}_{\omega_0}^S) + \mathbf{H}_\omega^i] \times \hat{n} \quad (2.4-d)$$

denklemleri elde edilir. Denklem 2.4-a ve 2.4-b KFİE ile elde edilen hacim eşdeğerliğidir. Denklem 2.4-c ve 2.4-d saçıcının yüzeyinde iç ve dış teğet elektrik ve manyetik alanları birbirine eşitlemektedir.

r alt simgesi alanların boş uzaydaki değerlerini ifade eder. ω ve ω_0 alt simgelerine bakıldığında farklı frekanslardaki alanların, kaydırılmış frekanstaki kaynaklarla bulunabildiği görür.

Nümerik elektromanyetik problemlerin integral denklem çözümlerinde kullanılan Moment Metodu'nda öncelikle geometri ayrık hale getirilir. İki boyutlu problemler tipik olarak üçgenler kullanarak modellenir. Moment Metodu'nda ikinci aşama bu ayrıklaştırılan geometri üzerinde açılım fonksiyonlarının tanımlanmasıdır. En genel anlamda iki boyutta 3 elektrik alan 3 manyetik alan bilinmeyi olmak üzere 6 tane bilinmeyen vardır. Ancak problemler TE ve TM durumlarına ayrıldığında, özellikle de bu tez çalışmasında incelenen TM_z için her bir üçgende toplamda 3 ($\mathbf{E}_z$, $\mathbf{H}_x$, $\mathbf{H}_y$) alan bilinmeyi olur. Geometrinin yüzey kısımlarında eğer kullanılmışsa yüzey bilinmeyenleri tanımlanabilir. Bu çalışmada tanımlanan yüzey akımları her bir dış üçgen kenarı için 2 bilinmeyen ($\mathbf{J}_s$, $\mathbf{M}_s$) gerektirir. Dolayısıyla KFİE formülasyonunda toplam bilinmeyen sayısı $3m+2p$ olmaktadır. Geleneksel MM hacim formülasyonunda ise modellemede sadece $3m$ hacim bilinmeyi kullanılır [8].

KFİE'ye moment metodunun uygulanmasının üçüncü aşamasında hacim ve yüzey bilinmeyenleri için aynı sayıda test fonksiyonu kullanılarak integral denklemler test edilir. Böylelikle $3m+2p$ boyutunda bir kare empedans matrisi elde edilerek sonuçta $\mathbf{E}_\omega$ ve $\mathbf{H}_\omega$ alanları matris denklemi çözülerek elde edilir. KFİE prensibine göre hacimde hesaplanan alanlar ω_0 frekansına sahip kaynaklarca üretilmektedir. Yüzey kaynakları ise hem ω_0 hem de ω frekanslı kaynaklardır. Matrisin hacim ile ilgili kısımları her bir analiz frekansında sadece basit cebirsel işlemler kullanılarak güncellenir.

Genel olarak geometri büyüdükçe sınırda olmayan bilinmeyen sayısı yüzey bilinmeyenlerine göre çok daha fazla olacağından matrislerin tekrar çözümü yerine basit cebirsel işlemlerle kullanımı büyük işlem tasarrufu sağlayacaktır.

Bu tezde kullanılan KFİE algoritması aşağıdaki adımlarla uygulanır [9].

1-Kaydırılmış frekans ω_0 seçilir.

2-(2.4-a) ve (2.4-b) ile ilgili matris elemanları uygun kaydırılmış frekans eşdeğer akımları ile hesaplanır. Bu hesaplamalar yapılırken birim hacim kaynakları kullanılır.

3-(2.4-c) ve (2.4-d) ile ilgili olan matris elemanları ω_0 frekansında hesaplanır.

4-Gelen alan frekansı ω seçilir ve gelen alanlar hesaplanır.

5-(2.4-c) ve (2.4-d) ile ilgili olan matris elemanları ω_0 frekansında hesaplanır. Gerekli yerlerde 3 numaralı adımda elde edilmiş ω_0 frekansında tanımlı yüzey etkileşimleri de kullanılır.

6-2. adımda hesaplanan matris elemanları gerekli sabitler ile çarpılır. Bu çarpımda belirlenmiş olan ω_0 gelen alan frekans bilgisi kullanılır.

7-Matris denklemi elde edilir ve bilinmeyen ($\mathbf{E}_\omega$, $\mathbf{H}_\omega$) toplam alanları için çözülür.

8-Farklı bir frekans çözümü için 4 numaralı adıma geri dönülür.

KFİE yönteminin karşılaştırılmasında kullanılan Moment Metodu'nda kullanılan integral yöntemleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Şekil 2.1'de gösterilen yapı için cismin dışındaki toplam alanlar gelen ve yansıyan alanların toplamı biçiminde denklem 2.5-a ve 2.5-b biçiminde yazılabilir.

$$\mathbf{E}^T = \mathbf{E}^S + \mathbf{E}^i \quad (2.5-a)$$

$$\mathbf{H}^T = \mathbf{H}^S + \mathbf{H}^i \quad (2.5-b)$$

Toplam alanın bulunması için gereken gelen alan değerleri bilinmekte, saçılan alan değerleri ise eşdeğer kaynakların oluşturduğu alanlar olarak bulunmaktadır.

İkinci tip Hankel fonksiyonu 2 boyutlu elektromanyetik problemlerde Denklem 2.6'da gösterilen Green fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır.

$$G(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{4j} H_0^2(k|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \quad (2.6)$$

Bu fonksiyon ikinci tip Bessel fonksiyonları cinsinden

$$H_0^2(kR) = J_0(kR) - jY_0(kR) \quad (2.7)$$

biçiminde açılabilir. Burada k dalga numarası, R ise gözlem ve kaynak noktaları arasındaki uzaklığı gösterir. kR parametresinin sıfıra gittiği durumlarda oluşan tekillik sorunu için Green fonksiyonunda tekilliğe neden olan terim çıkarılıp tekrar eklenir ve gerekli matematiksel işlemler uygulanır.

Alanların bulunmasında elektrik ve manyetik potansiyeller, potansiyellerin bulunmasında ise elektrik ve manyetik akımlar Hankel fonksiyonu ile beraber kullanılmaktadır. Bu çözüm KFİE yönteminin karşılaştırıldığı referans olarak aşağıda çalışma prensibi gösterilen Moment Metodu'na uygulanmıştır.

Moment Metodu ile ayırıklaştırma işlemi

$$\int_{(\mathbf{r}') \in \Omega} f(\mathbf{r}') K(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\Omega = g(\mathbf{r}) \quad (2.8)$$

yapısındaki integral denklemlerine uygulanabilir.

$f(\mathbf{r}')$ bilinmeyen fonksiyon, K çekirdek ve son olarak g uyarım fonksiyonlarıdır. Ω bölgesi ise fonksiyonun tanımlı olduğu bölgeyi gösterir. Diferansiyel, integral ya da ikisinin birleşimi olan doğrusal bir L operatörü $f(\mathbf{r}')$ fonksiyonuna aşağıdaki gibi uygulanabilir.

$$L\{f(\mathbf{r}')\} = g(\mathbf{r}) \quad (2.9)$$

Bu tezde darbe fonksiyonları olarak kullanılan $b(\mathbf{r})$ açılım fonksiyonları $f(\mathbf{r}')$ fonksiyonunu belirli katsayılarla

$$f(\mathbf{r}') \approx \sum_{n=1}^N \alpha_n b_n(\mathbf{r}') \quad (2.10)$$

biçiminde açar. Ardından L operatörü bu fonksiyona uygulanırsa denklem

$$L\left\{\sum_{n=1}^N \alpha_n b_n(\mathbf{r}')\right\} = g(\mathbf{r}) \quad (2.11)$$

haline dönüşür. Denklem seti çözümünü için bu şekilde N bilinmeyenli N denklem gereklidir.

$$R(\mathbf{r}) = \left[\sum_{n=1}^N \alpha_n L\{b_n(\mathbf{r}')\} \right] - g(\mathbf{r}) \quad (2.12)$$

olarak tanımlanan $R(\mathbf{r})$ hata fonksiyonlarının en düşük değeri alacak şekilde bulunmasıyla gerçeğe en yakın sonuç elde edilir.

Daha önce bahsedilen test fonksiyonları $w_m(\mathbf{r})$ biçiminde tanımlanarak $R(\mathbf{r})$ hata fonksiyonu ile iç çarpım yapılır ve

$$\langle w_m(\mathbf{r}), R(\mathbf{r}) \rangle = \int_{\Omega} w_m(\mathbf{r}) \cdot R(\mathbf{r}) d\Omega \quad (2.13)$$

şeklini alır. Bu ifadenin açık hali

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n \langle w_m(\mathbf{r}), L\{b_n(\mathbf{r}')\} \rangle = \langle w_m(\mathbf{r}), g(\mathbf{r}) \rangle \quad (2.14)$$

olarak ifade edilebilir. İç çarpan yerine konduğunda yukarıdaki ifade

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n \int_{\Omega} w_m(\mathbf{r}) \cdot L\{b_n(\mathbf{r}')\} d\Omega = \int_{\Omega} w_m(\mathbf{r}) \cdot g(\mathbf{r}) d\Omega \quad (2.15)$$

haline gelir. Sonuç olarak N bilinmeyenli N denklem

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n Z_{mn} = v_m \quad (2.16)$$

matris formuna dönüştürülür. Burada Z_{mn} empedans matrisini, v_m uyarım vektörünü ifade eder. Burada m ve n alt simgeleri cisim ayırıştırıldığında ortaya çıkan elemanların birbiri ile etkileşimini verir. Bu durumda m ve n indislerinin birbirine eşit olduğu durumlar öz etkileşimlerdir ve de integrallerdeki Hankel fonksiyonlarında tekillığe yol açar ve bu sorun daha önce belirtilen yöntemle çözülebilir [4],[5].

Bu matrisin çözümü eleman sayısı, açılım ve uyarım fonksiyonlarına bağlı olarak gerçek sonuca en yakın α_n değerlerini verir. En temel açılım fonksiyonu darbe fonksiyonudur ve bu çalışmada hesaplamaların daha kolay yapılması amacıyla kullanılmıştır.

Denklemlerin bulunmasıyla test kısmına geçilir ve bunun için de delta fonksiyonları kullanılır. Bu şekilde dış integrallerdeki fonksiyonlar yalnızca tek bir noktada hesaplanır [6],[7].

$$w_m(\mathbf{r}) = \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_m) \quad (2.17)$$

Açılım ve test fonksiyonları uygulandıktan sonra $\mathbf{z}$ doğrultusundaki elektrik alanın $E_z(J_z)$, $E_z(M_x)$ ve $E_z(M_y)$ bileşenleri bulunur. Aynı prensiple $\mathbf{x}$ ve $\mathbf{y}$ doğrultusundaki manyetik alanın da $H_x(J_z)$, $H_y(J_z)$, $H_x(M_x)$, $H_y(M_x)$, $H_x(M_y)$, $H_y(M_y)$ olmak üzere 6 bileşeni elde edilir. Sonrasında bu alanlar Radar Kesit Alanı (RKA) ve cisim üzerindeki akım dağılımının bulunması için kullanılır [10].

Moment Metodu ve Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik Metodu kullanılarak bulunan sonuçlar Moment Metodu referans kabul edildiğinden aşağıdaki denklemle karşılaştırılacaktır:

$$Fark = 100 \times \frac{||RKA_{MM} - RKA_{KFIE}||}{||RKA_{MM}||} \quad (2.18)$$

3.SONUÇLAR

3.1.Kod Doğrulaması

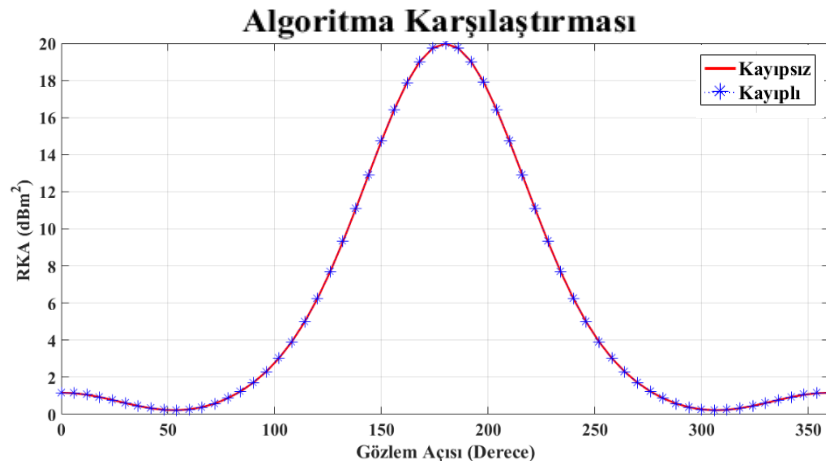
Daha önce belirtildiği gibi kayıp, yani öz iletkenlik katsayısı dalga boyunu ve de elektrik geçirgenlik katsayısını değiştirmektedir. Bu nedenle nümerik integral sonuçları ile alan ve akım dağılımları değişmektedir.

Kullanılan algoritmada ilk olarak materyal özelliklerinden bağımsız şekilde yalnızca geometri özellikleri ile empedans matrisi geçici olarak doldurulur ardından eleman sayısı kadar bir döngünün içinde empedans matrisi eşdeğerlik özelliklerine göre elektrik ve manyetik geçirgenlik katsayılarının etkisi ile güncellenir. Aynı mantıkla elektromanyetik özellikleri kullanılmadan yalnızca geometrik özellikleri ile hesaplanan alan vektörü için de bir döngü içerisinde elektrik ve manyetik geçirgenlik değerleri ile matris son halini alır [8].

$$\mathbf{J}_{\omega_0}^V = j(\omega\varepsilon - \omega_0\varepsilon_0)\mathbf{E}_\omega \quad (3.1-a)$$

$$\mathbf{M}_{\omega_0}^V = j(\omega\varepsilon - \omega_0\varepsilon_0)\mathbf{H}_\omega \quad (3.1-b)$$

Bu durumda herhangi bir geometri için kayıplı cisimlerde kullanılan KFİE algoritmasının öz iletkenlik katsayısının 0 olması durumunda bulunan sonuçlarla daha önce kullanılan KFİE algoritmasının vereceği sonuçların tamamen aynı olması beklenmektedir. Farklı geometriler çeşitli üçgen sayılarıyla tanımlanıp kayıpsız cisimler için oluşturulan KFİE algoritması ve kayıplı cisimler için oluşturulan KFİE algoritması $\sigma=0$ parametresi ile koşuturulduğunda elde edilen sonuçlar aynı olmaktadır. Örnek olarak Şekil 3.1’de 2 yöntem için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir ve tamamen aynıdır.



Şekil 3.1: Kayıpsız cisimler için kullanılan KFİE algoritması ile kayıplı cisimler için kullanılan KFİE algoritmasının $\sigma=0$ parametresi ile karşılaştırılması

3.2. Dalga Boyu Cinsinden Sabit Saçıcının Öz İletkenlik Katsayısına Göre İncelenmesi

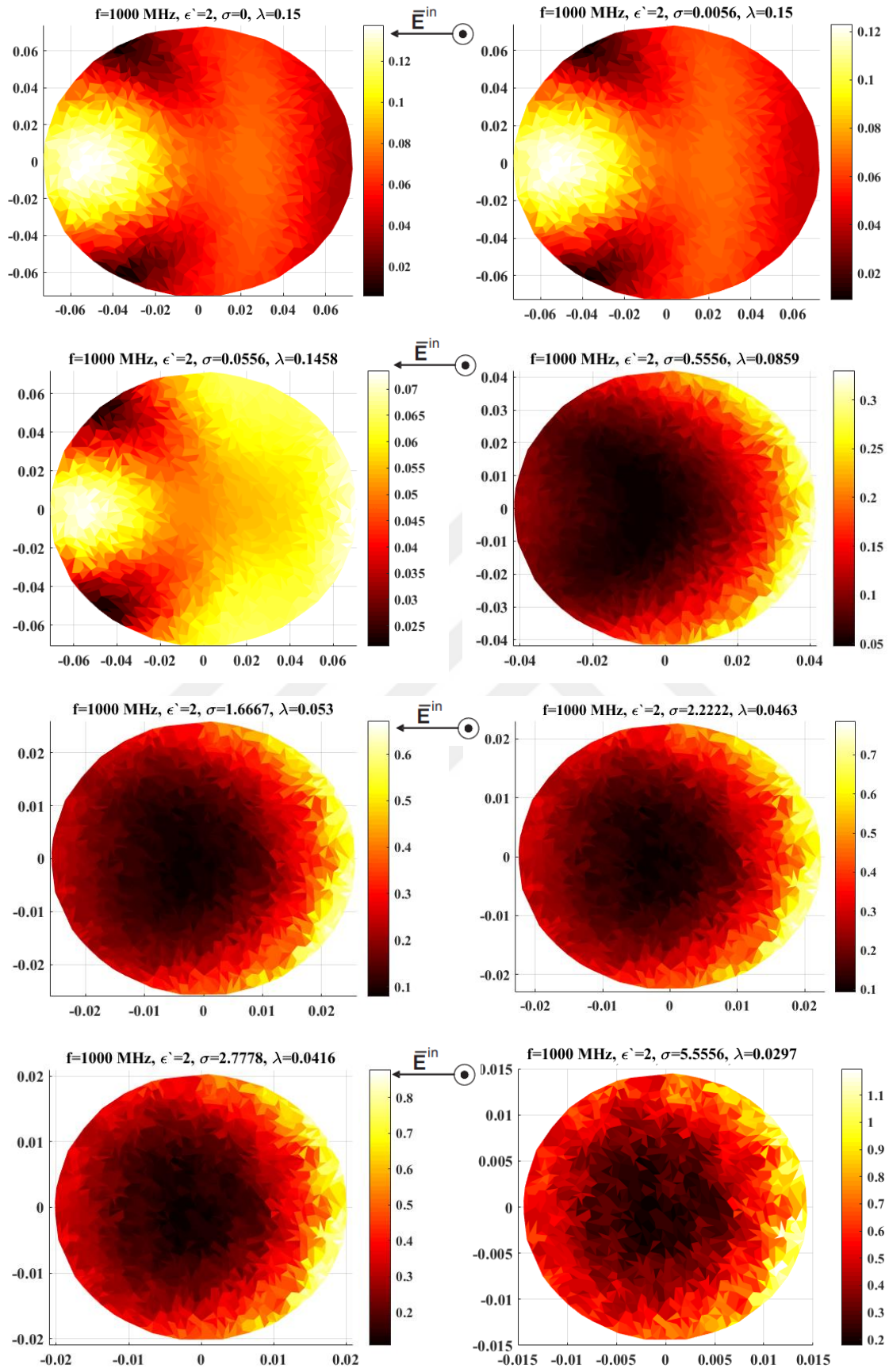
Bu bölümde öz iletkenlik katsayısı (σ) artırılarak cismin daha iletken hale gelmesi sağlanacak ve cisim üzerindeki alanların ve cismin radar kesit alanının değişimleri KFİE algoritması kullanılarak ortaya konacaktır. Ayrıca aynı parametreler için Moment Metodu ile testler yenilenecek ve bu sonuçlar referans kabul edilerek farklı üçgen sayıları için fark oranları hesaplanacaktır.

Daha önce belirtildiği gibi σ dalga boyunu etkiler ve böylelikle cismin elektriksel büyüklüğü değişir. Tek bir parametrenin analizi yapılırken diğer değişkenlerin sabit tutulması gerektiğinden tek bir frekansta ve elektriksel boyutu sabit bir saçıcı üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Denklem 1.11-b’de görüleceği gibi öz iletkenlik katsayısı, yayılım sabiti ve dolayısıyla dalga boyu doğrusal değişmemektedir. Bu durumda ilk olarak verilen σ ’ya bağlı β ve λ değerleri bulunmuş, ardından cisim MATLAB PDE Tool ile üçgenler kullanılarak ayrıklaştırılmış ve bu değişkenler içinde üçgenlerin kenar ve nokta parametrelerinin tutulduğu satırlar λ cinsinden sabit değerlere çekilmiştir. Bu nedenle geniş bir aralıkta incelenen öz iletkenlik katsayısı için kullanılan geometrilerin dalga boyu cinsinden büyüklükleri sabit alınsa da gerçek boyutlarında büyük değişimler gözlenmektedir.

-x yönünde bir düzlem dalga gönderilen, 1 GHz frekansında, reel elektriksel geçirgenlik katsayısı 2 ve yarıçapı 0.5λ olan bir dairenin 1052 üçgen ile modellenmesi durumunda çeşitli σ değerleri için alan dağılımları Şekil 3.2 (a-h)’de gösterilmiştir. Şekil a-h’de σ giderek artmaktadır. Bunun etkisi olarak akım yüzeye doğru yaklaşmakta ve son olarak tamamen yüzeyde kalarak, Şekil 3.2-h’de görüldüğü gibi, deri etkisini sergilemektedir. Alanların daha kolay görülmesi için şiddet ölçeği otomatik olarak ayarlanmıştır.

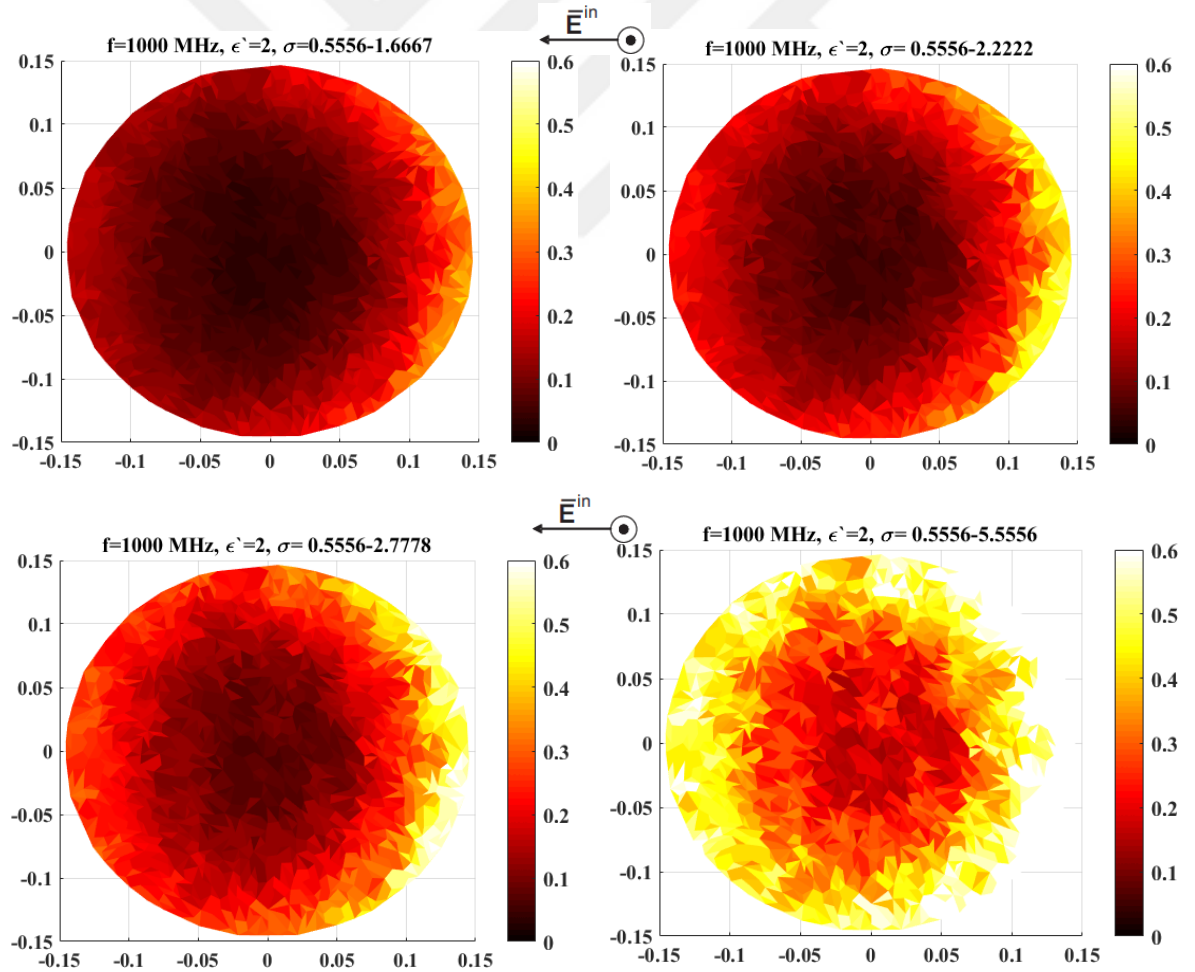
Elektrik alanı y yönünde kutuplanmış, -x yönünde ilerleyen bir düzlem dalgadır ve bu bilgi şekilde de belirtilmiştir. Kare problemin bir bölümü haricindeki tüm örneklerdeki gelen dalga aynı biçimde olacaktır.



Şekil 3.2: Dalga boyu cinsinden boyutu sabit saçıcının σ değişirken davranışı

(a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0056$, (c) $\sigma=0.0556$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.6667$,
 (f) $\sigma=2.2222$, (g) $\sigma=2.7778$, (h) $\sigma=5.5556$ için alan dağılımları

Bu grafiklerde σ değeri arttıkça dalga boyu artmakta ve sonuç olarak elektriksel boyutu sabit tutmak için gerçek yarıçapın küçültülmesi gerekmektedir. Şekil 3.2'deki grafiklerde şiddet ölçeğinin alt ve üst limitleri arasındaki farkın artışı deri etkisiyle uyumlu olsa da bu gerçeğin daha açık gözlenmesi için iki farklı σ değeri için bulunan alanlar birbirinden çıkarılmış ve gerçek boyut üzerinde Şekil 3.2'de sergilenmiştir. Şekil 3.3'de şiddet ölçeğinin alt ve üst limitleri sabit tutulduğundan deri etkisi görsel olarak daha açık bir biçimde görülebilmektedir. Şekil 3.3-a'de bu amaçla $\sigma=0.5556$ için bulunan sonuçlarla $\sigma=1.6667$ için bulunan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Etkinin giderek artışı sergilemek için aynı karşılaştırma $\sigma=0.5556$ ile $\sigma=2.2222$, 2.7778 , 5.5556 için de Şekil 3.3'(b-d) gösterilmektedir ve aynı biçimde yorumlanabilir.

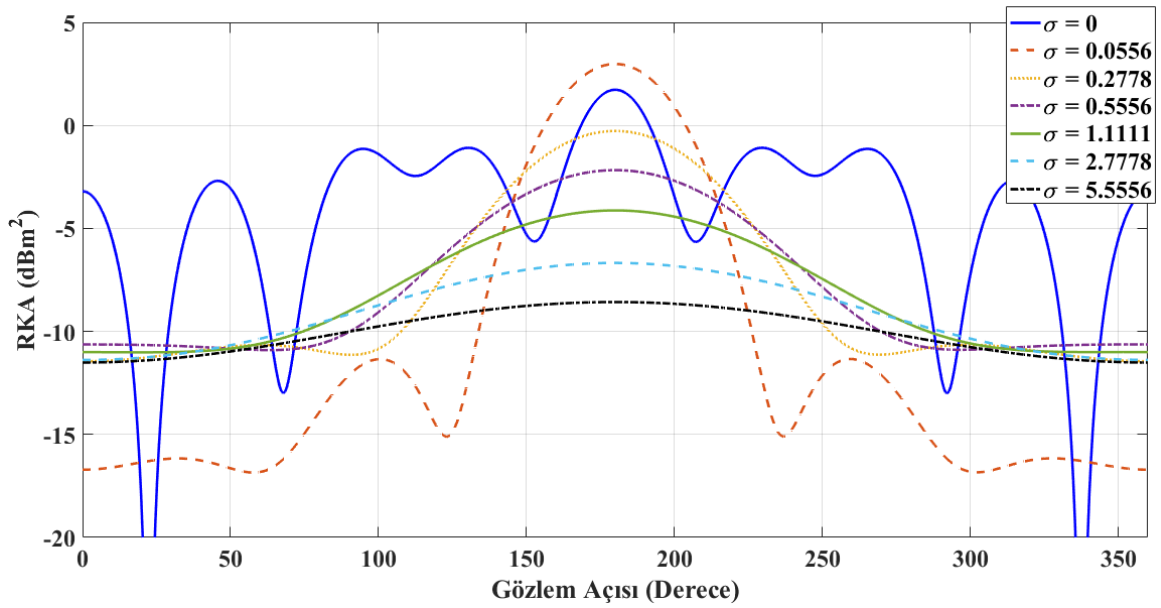


Şekil 3.3: σ artışının cisim üzerindeki alanlara etkisi ve deri etkisinin gözlemlenmesi

(a) $\sigma=0.5556-1.6667$, (b) $\sigma=0.5556-2.2222$, (c) $\sigma=0.5556-2.7778$, (d) $\sigma=0.5556-2.7778$

Buna ek olarak deri etkisi ile birlikte alanların dış çeperde toplanıp nokta saçıcı gibi davranması ile birlikte bir frekanstaki RKA grafiği σ 'nın artışıyla düzleşmeye başlar. σ arttıkça elektrik geçirgenlik katsayısının gerçel kısmı sanal kısmının yanında çok küçük kalır ve gerçel kısımdan kaynaklı alan dağılımları önemsiz hale gelerek saçılım her açıda aynı değeri alır [11].

1 GHz frekansında 1λ yarıçapa sahip 1988 üçgen ile ayrıklaştırılmış cismin çeşitli σ değerleri için RKA grafiği Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Kayıplı cisimlerde cisim üzerindeki alan dağılımlarının değişmesi ile birlikte ortaya çıkan RKA düzleşmesi net olarak görülmektedir.

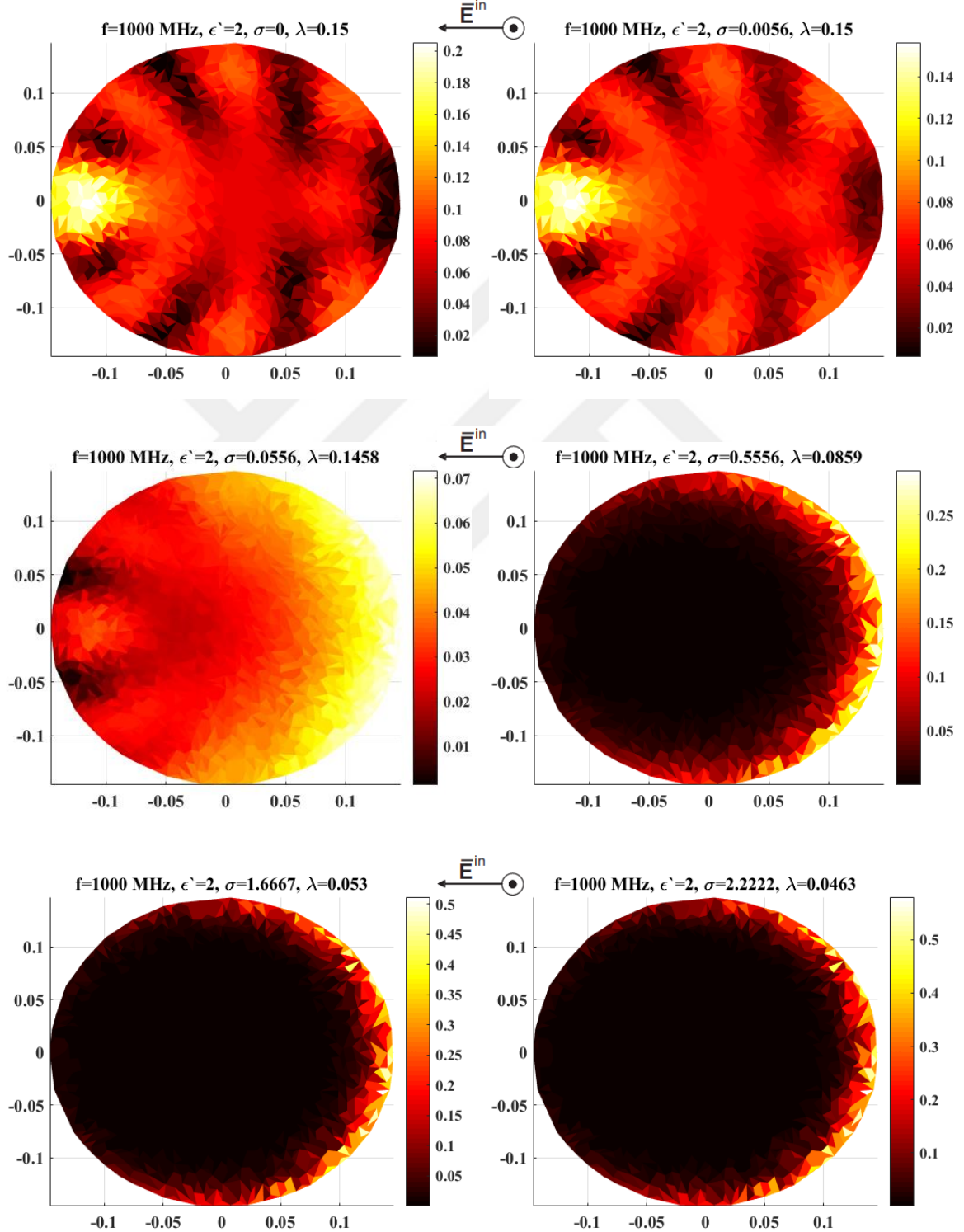


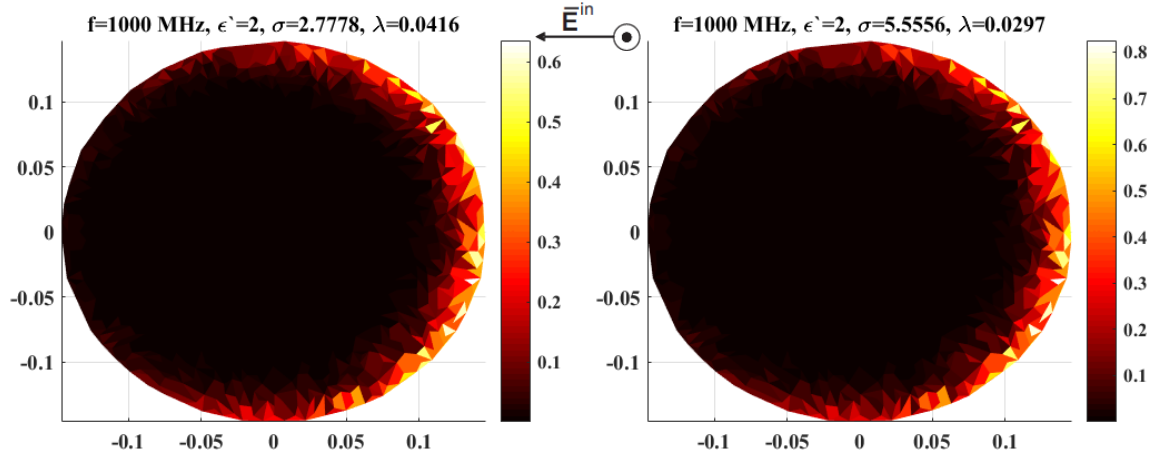
Şekil 3.4: σ değişiminin RKA üzerine etkisi

Şekil 3.4'te görüldüğü gibi kayıpsız cisimlerde ($\sigma = 0$) RKA grafiklerinde ortaya çıkan dalgalanmalar alanların tamamen çeperde toplandığı $\sigma = 2.7778$, $\sigma = 5.5556$ gibi durumlarda yok olmuş ve cisim dielektrik saçıcı özelliklerini kaybetmiştir.

3.3. Gerçek Boyutları Sabit Saçıcının Öz İletkenlik Katsayısına Göre İncelenmesi

İkinci olarak gerçek boyutları sabit tutulan bir cismin farklı σ değerine sahip ortamdan oluştuğundaki durum incelenecektir. Bu inceleme için 1 GHz frekansında, ϵ_r ve μ_r değerleri 2, yarıçapı kayıpsız durum için 0.25λ 'ya denk düşen 15 cm olan homojen bir dairenin 1052 üçgenle oluşturulmuş alan dağılımları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.





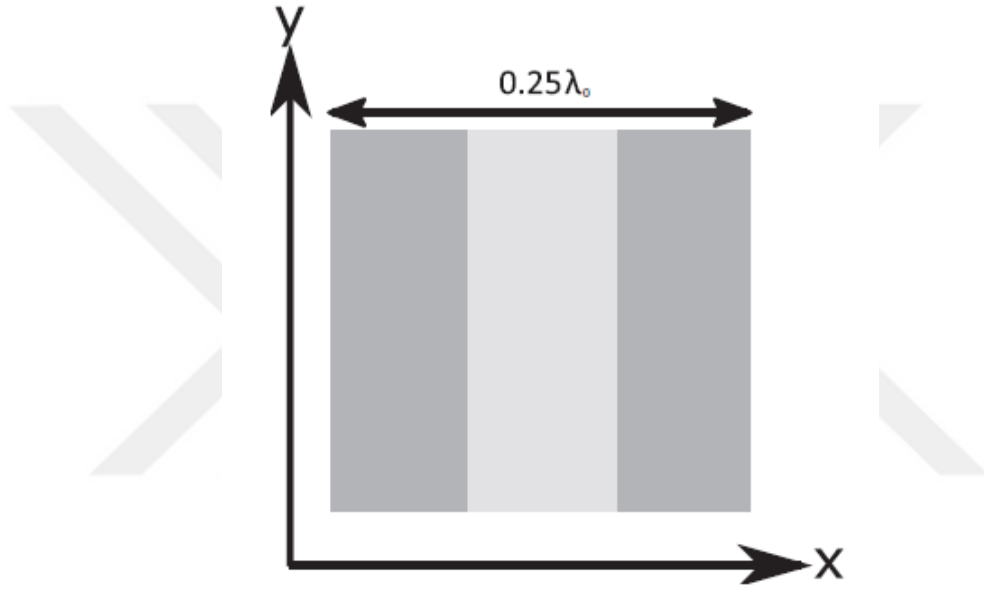
Şekil 3.5: Gerçek boyutları sabit saçıcının σ değişirken davranışı
 (a) $\sigma = 0$, (b) $\sigma = 0.0056$, (c) $\sigma = 0.0556$, (d) $\sigma = 0.5556$, (e) $\sigma = 1.6667$,
 (f) $\sigma = 2.2222$, (g) $\sigma = 2.7778$, (h) $\sigma = 5.5556$ için alan dağılımları.

Şekil 3.5 (a-h) grafiklerinde deri etkisi gözlenmektedir. Ancak dikkat edilmesi gereken nokta Şekil 3.5 (h)'de yani σ 'nın en yüksek olduğu değerdeki elektriksel boyutun Şekil 3.5 (a)'da yani σ 'nın 0 olduğu değere göre yaklaşık 5 kat büyük olduğudur. Aradaki değerlerde Şekil (3.5 b-g)'de görüleceği gibi dalga boyu kademeli olarak düşmektedir. Şekil 3.5'teki tüm grafiklerde şiddet ölçeğinin alt ve üst limitleri sabit tutulduğunda artan σ için çeperlerde toplanan akımlar Şekil 3.3'e benzer biçimde daha net gözlemlenebilir.

3.4. Gerçek Boyutları Sabit, Homojen Olmayan Kare Saçıcının Öz İletkenlik Katsayısına Göre İncelenmesi

Hacim integral denklemlerinin kullanıldığı KFİE metodu homojen olmayan cisimlerin incelenmesine olanak sağlar. Şekil 3.6’da gösterilen 3 parçalı homojen olmayan problem böyle bir probleme örnek olup köşegene göre açısal simetriye sahip değildir. Bu nedenle sonuçta bulunan akım dağılımı ve RKA’da simetriye sahip olmayacaktır.

Bir kenarı en yüksek frekansta $0.25 \lambda_0$ olan ve elektrik geçirgenlik özellikleri farklı olan bir geometri Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Homojen olmayan kare problemi

Bu saçıcı kendi içinde homojen 3 adet dikey parçadan oluşmaktadır. μ_r değeri tüm parçalarda 2, ϵ_r değeri ise dış parçalarda 10, ortadaki parçada ise 2 olarak seçilmiştir. Elektrik geçirgenlik katsayısı cisim dışından gelen bir alanın cisim içinde ne kadar enerji tutacağını bir ölçütü olduğundan kayıpsız veya düşük iletkenliğe sahip saçıcılarda ortadaki parçadaki alan dağılımının dış parçalara göre daha düşük olması beklenmektedir. Ancak öz iletkenlik katsayısı arttıkça elektrik geçirgenlik katsayısının sanal kısmının gerçel kısmına oranı da artacağından parçalar arası alan şiddeti değişimi daha düzgün hale gelir. Önceki bölümlerde incelenen saçıcılarda elektriksel özellikler homojen olduğu için saçıcı içindeki dalga boyu sabittir ancak kare problemindeki parça geçişlerinde dalga boyu değişmektedir. Yüksek ϵ_r değeri ile düşen dalga boyuna ek olarak artan öz iletkenlik katsayısı dalga boyunu daha da küçük hale getirir. Bu sebeple cisim ayrık hale getirilirken kullanılan üçgen sayısı yüksek tutulmuştur.

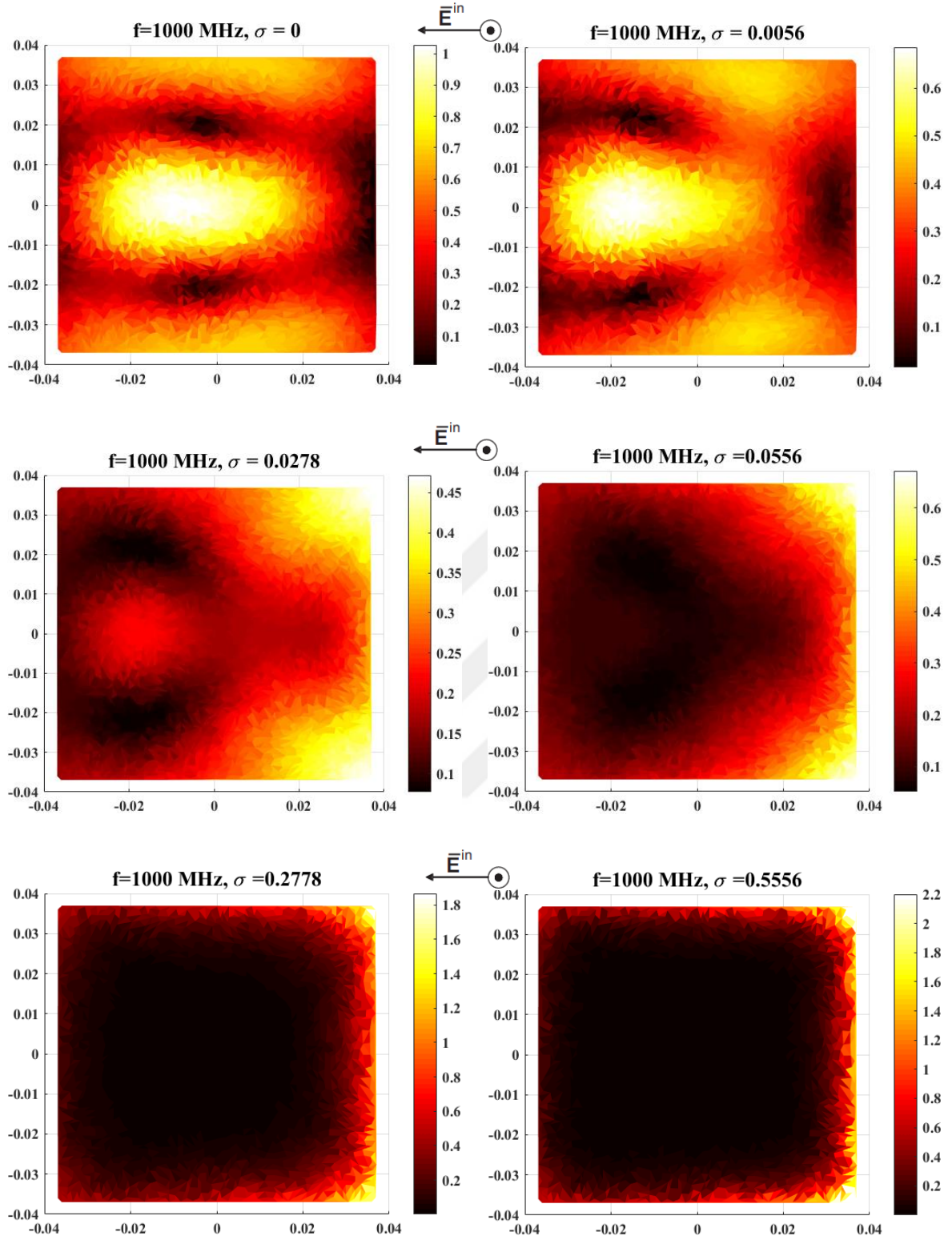
Saçılım problemleri tanımlanırken cismin elektrik özelliklerini belirleyen ϵ_r ve μ_r değerlerinin türevlenebilir olması gerektiği belirtilmiştir ancak homojen olmayan kare problemi bu koşulu sağlamamaktadır. Buna rağmen KFİE metodunun uyumlu ve beklenen sonuçlar verdiği görülmüştür.

Kare probleminde alan dağılımları 2 farklı gelen alan açısı için incelenmiştir. $-\mathbf{x}$ yönünde gelen alana ek olarak $-\mathbf{x}$ yönünden $+45$ derece açı ile gelen alan sonuçları da verilmiştir.

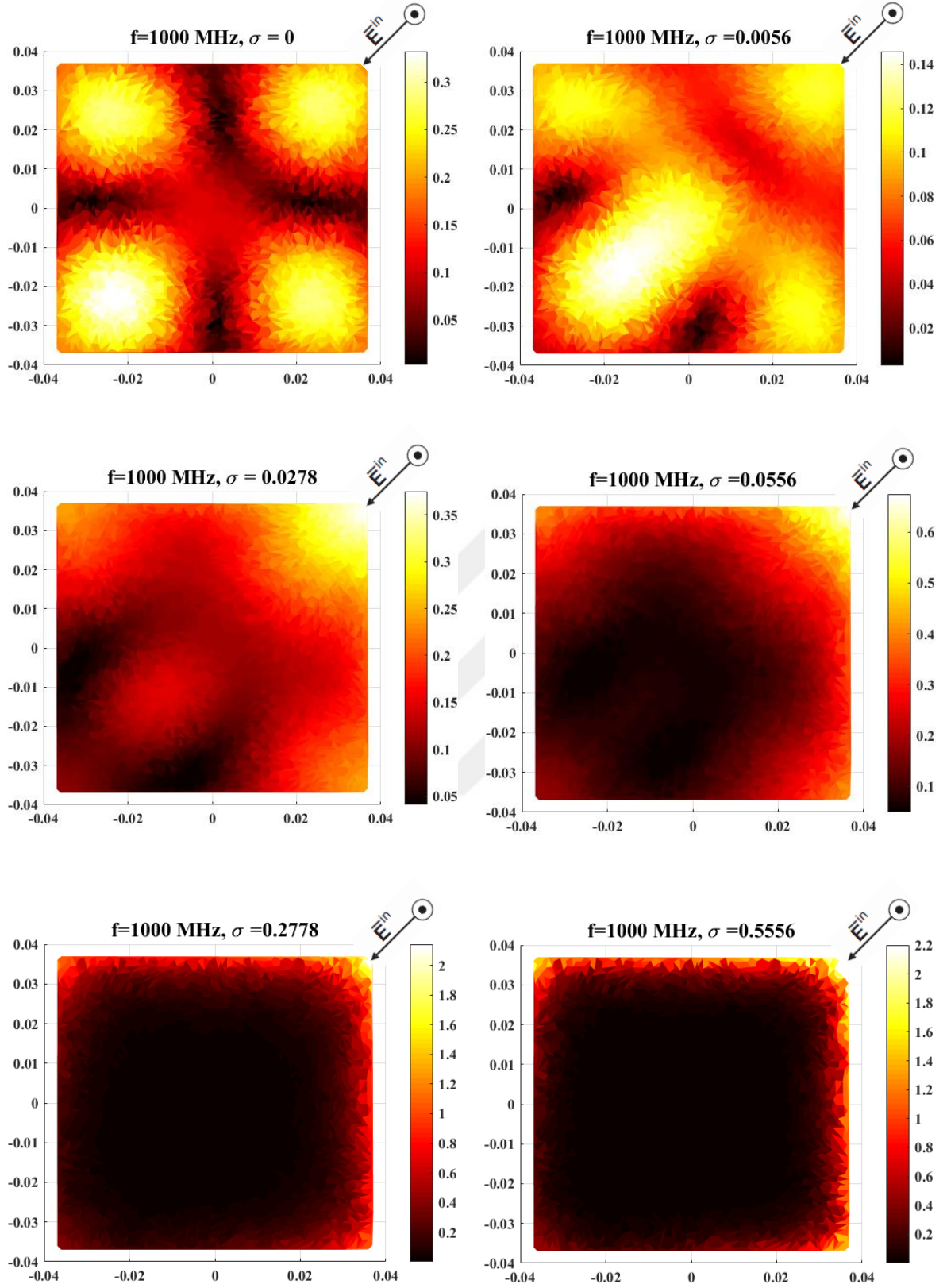
Referans olması açısından 3 parçası için de ϵ_r değeri 10, μ_r değeri 2 olan yani homojen bir kare problemin 1 GHz frekansında, 2060 üçgen ile çözümü sonucu elde edilen alan dağılımları sırası ile 0 ve 45 derece geliş açısı için Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de verilmiştir. Alan dağılımlarının anlaşılabilir olması için ölçek şiddeti otomatik ayarlanmıştır. Bu çalışmada cismin gerçek boyutları sabit tutulmuştur. Daha önceki daire testleri ile karşılaştırıldığında kare probleminde saçılıma ek olarak kırınım etkisinin de görülmesi beklenmektedir. Bu çalışmada kullanılan açılım fonksiyonlarının darbe fonksiyonları yerine daha karmaşık ancak doğruluk oranı daha yüksek olduğu fonksiyonlar olması durumunda kırınım etkisinin daha net ortaya çıkacağı öngörülmektedir. Ancak bu haliyle de kenarlarda devam eden akımlar kırınım etkisini göstermektedir. Tüm grafiklerdeki öz iletkenlik değerleri sırası ile (a-f) $\sigma = 0, 0.0056, 0.0278, 0.0556, 0.2778$ ve 0.5556 biçimindedir.

Şekil 3.9 ve Şekil 3.10 ise homojen olmayan çalışmanın 0 ve 45 derece geliş açısı için E_z alan sonuçlarını göstermektedir. Cismin kayıp oranının artması ile homojen olmayan yapılardaki alan şiddeti geçişlerinin daha düzgün hale gelmesi bu şekillerde gösterilmiştir.

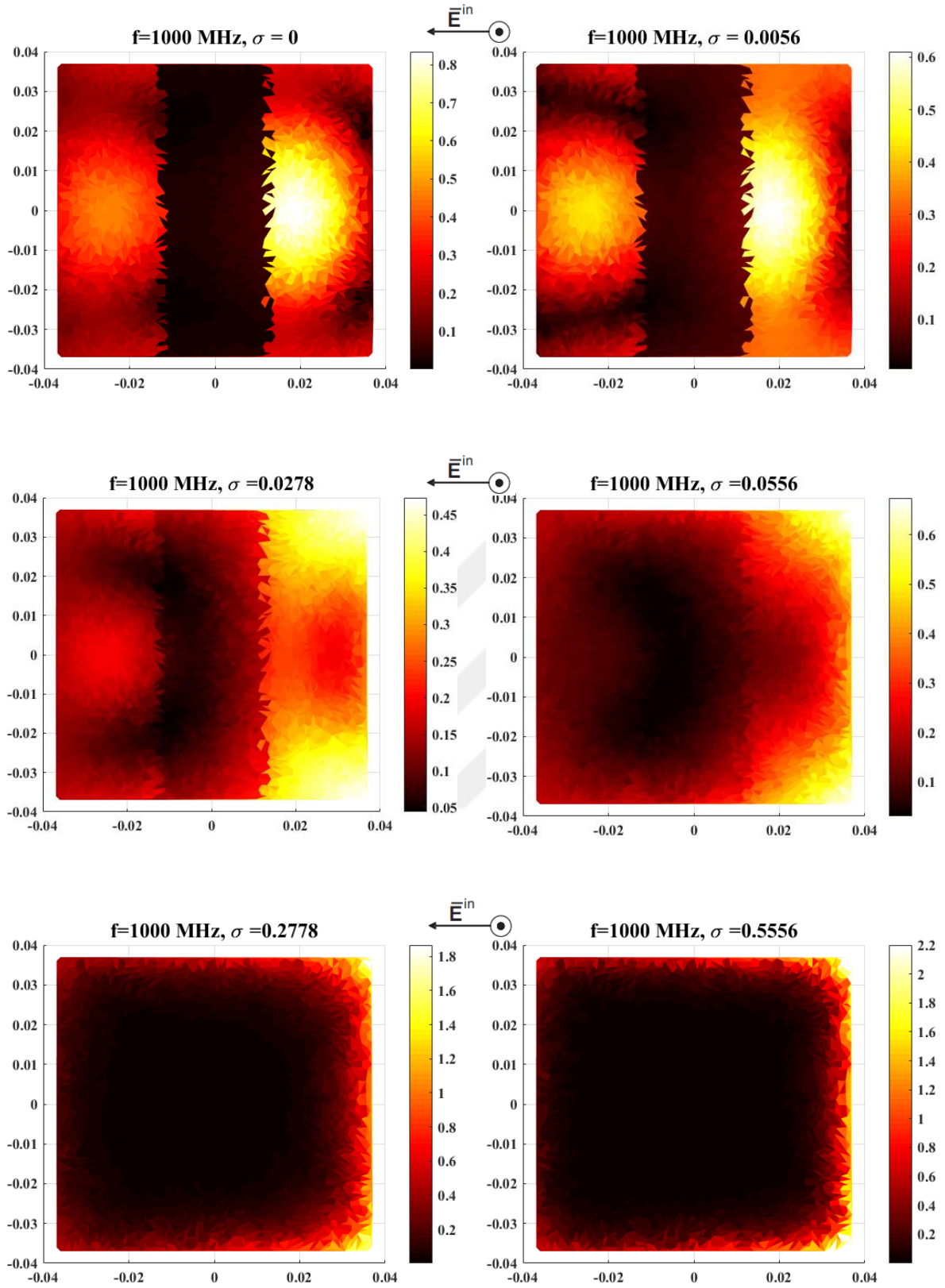
Homojen ve homojen olmayan yapılarda 45 derece ile gelen alan grafikleri incelendiğinde homojen yapının köşegenin her iki tarafında öngörüldüğü şekilde bir simetriye sahip olduğu, homojen olmayan yapıda ise 45 dereceden gelen alan için köşegenin iki tarafında simetrisinin olmadığı görülür. Bunun sebebi gelen alanın cisme ulaştığı noktadan elektrik geçirgenlik katsayısının değiştiği yere kadar olan uzaklığın köşegenin iki tarafında farklı olmasıdır.



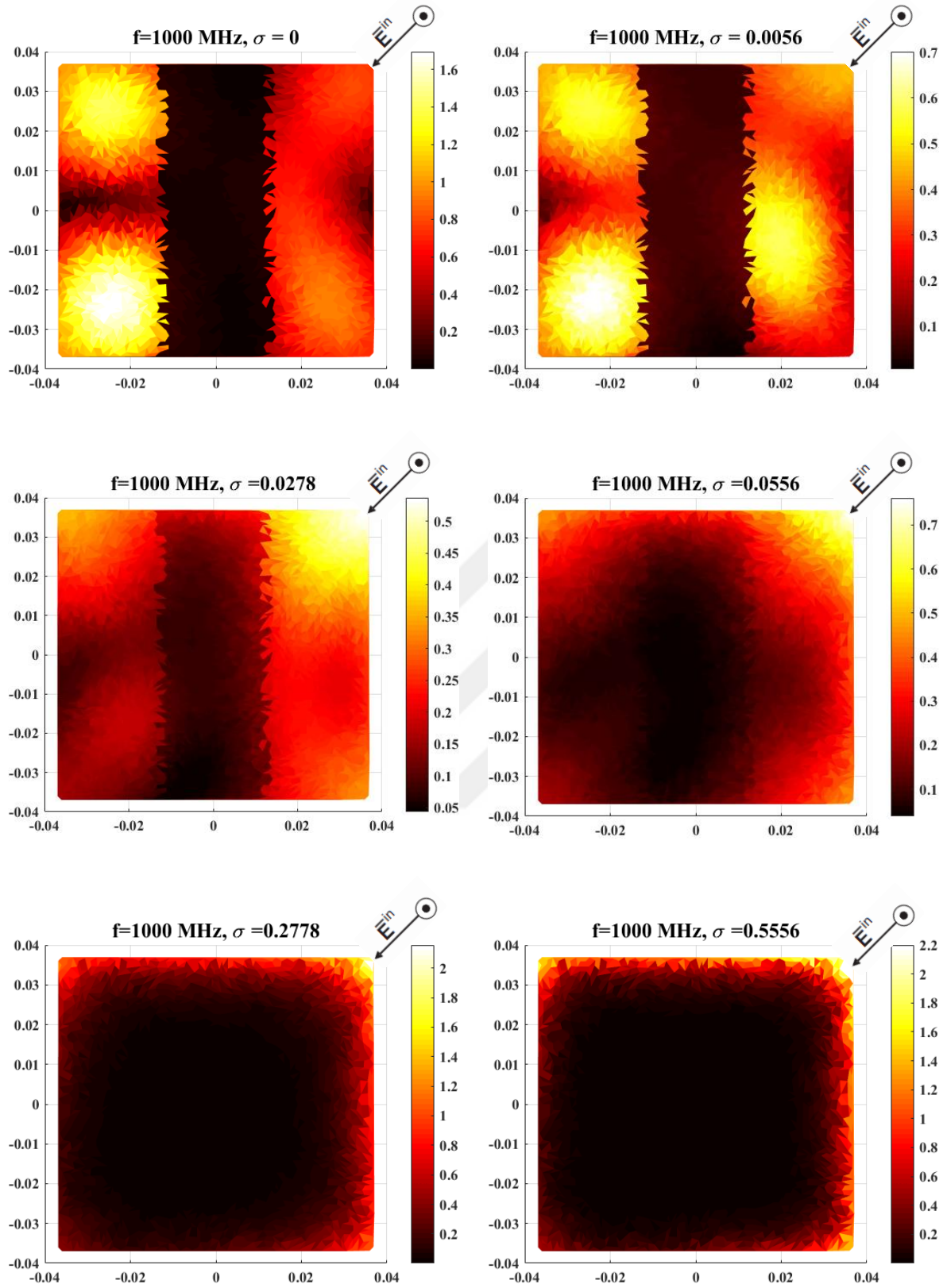
Şekil 3.7: Gerçek boyutları sabit, homojen, kare saçıcının 0 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma = 0$, (b) $\sigma = 0.0056$, (c) $\sigma = 0.0278$ (d) $\sigma = 0.0556$, (e) $\sigma = 0.2778$, (f) $\sigma = 0.5556$ için alan dağılımları



Şekil 3.8: Gerçek boyutları sabit, homojen, kare saçıcının 45 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma = 0$, (b) $\sigma = 0.0056$, (c) $\sigma = 0.0278$ (d) $\sigma = 0.0556$, (e) $\sigma = 0.2778$, (f) $\sigma = 0.5556$ için alan dağılımları



Şekil 3.9: Gerçek boyutları sabit, homojen olmayan, kare saçıcının 0 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma = 0$, (b) $\sigma = 0.0056$, (c) $\sigma = 0.0278$ (d) $\sigma = 0.0556$, (e) $\sigma = 0.2778$, (f) $\sigma = 0.5556$ için alan dağılımları



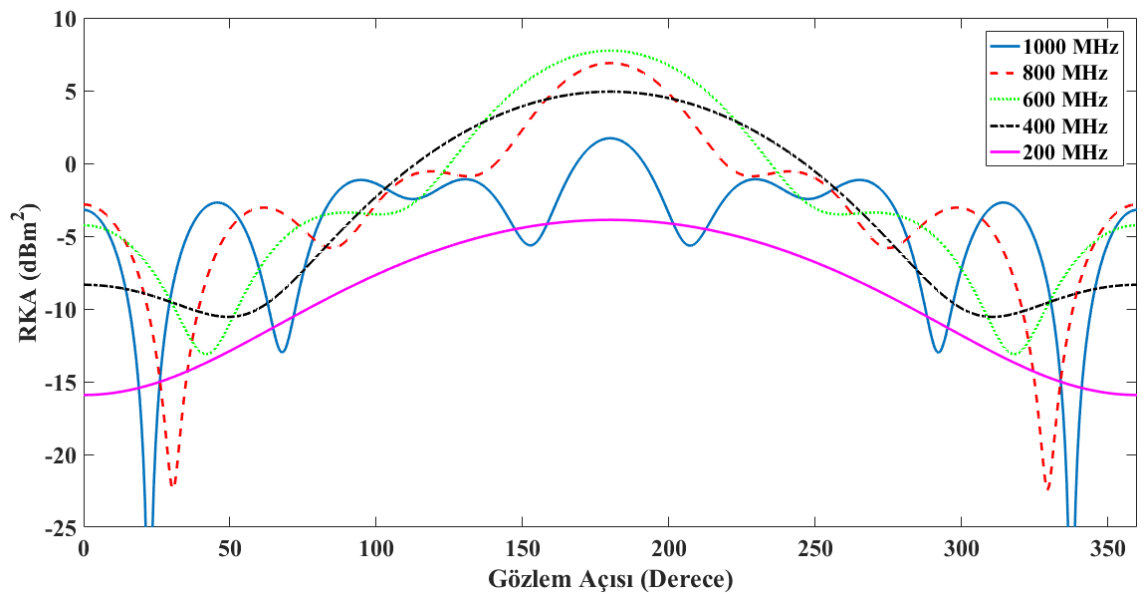
Şekil 3.10: Gerçek boyutları sabit, homojen olmayan, kare saçıcının 45 derece geliş açısıyla σ değişirken davranışı, (a) $\sigma = 0$, (b) $\sigma = 0.0056$, (c) $\sigma = 0.0278$ (d) $\sigma = 0.0556$, (e) $\sigma = 0.2778$, (f) $\sigma = 0.5556$ için alan dağılımları

3.5. Dalga Boyu Cinsinden Boyutları ve Öz İletkenlik Katsayısı Sabit Bir Saıcımmın Değişen Frekansa Göre İncelenmesi

Bu bölümde KFİE algoritmasının güçlü olduğu geniş bant uygulamaları homojen cisimler için incelenecektir. Daha önce de belirtildiği gibi bir cisim yüzeyde ve hacim içinde kalan üçgenlerle ayrıklaştırılır. Farklı frekanslarda hacim integralleri birbirleriyle basit cebirsel işlemlerle ilintilidir. Belirli bir geometri için üçgen sayısı arttıkça hacim bilinmeyenlerinin yüzey bilinmeyenlerine göre çok daha fazla sayıda olması beklenmektedir. Bu sayede KFİE yönteminin büyük cisimlerde daha verimli çalışması beklenmektedir. Burada verimli çalışmaktan kasıt sınırlı bir hata oranı içinde daha hızlı bir çözüm sunulmasıdır. Daha önceki çalışmalarla uyumlu olması açısından frekans bandı 100 MHz ile 1 GHz arasında seçilmiştir.

Daha önceki çalışmalarda fiziksel boyutları sabit bir daire incelendiğinde radar kesit alanının en yüksek değerinin frekans düştükçe azaldığı gözlemlenmiştir. Frekans ve dalga boyu ters orantılı olduğundan frekans düştükçe cisim dalga boyu cinsinden daha küçük hale gelmekte böylece nokta saçıcıya yaklaşarak açıya bağlı Radar Kesit Alanı değişimleri düşmektedir. Bu da RKA grafiklerinin düzleşmeye başlamasına neden olur. Daha önceki kısımlarda σ değerindeki artışın RKA grafiklerinde düzleşmeye neden olduğu gösterilmişti, bu noktada ise dalga boyundan ve dolayısıyla cismin elektriksel boyutundan kaynaklanan etki gözlemlenmektedir.

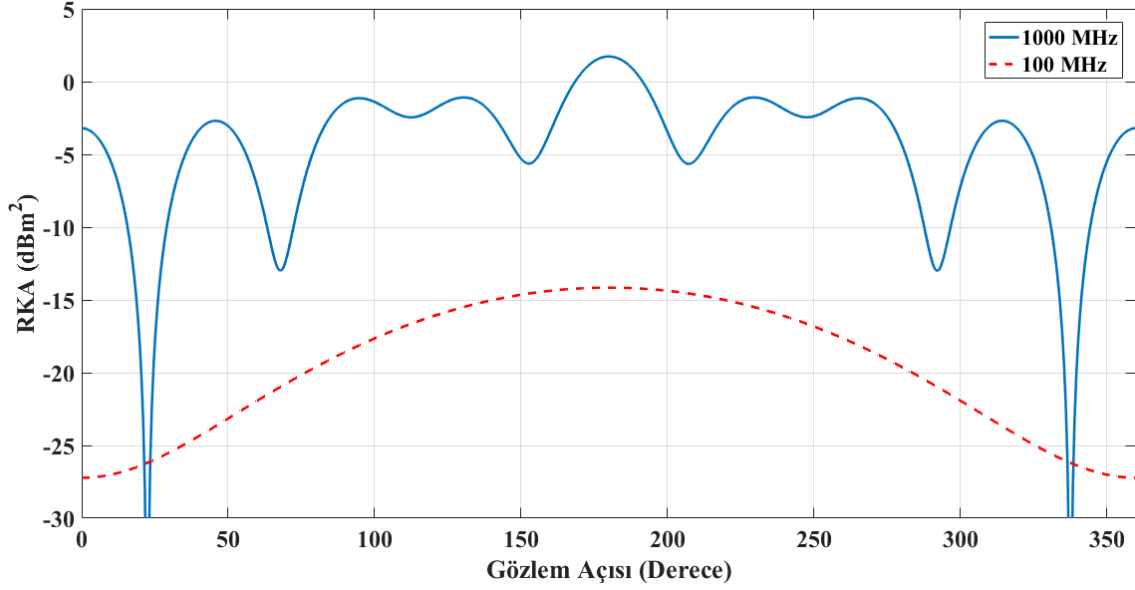
İlk olarak referans olması açısından kayıpsız bir cismin RKA grafiği 200 MHz ile 1 GHz arasında 5 örnekle Şekil 3.11’de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: Kayıpsız cismin geniş bant RKA sonuçları

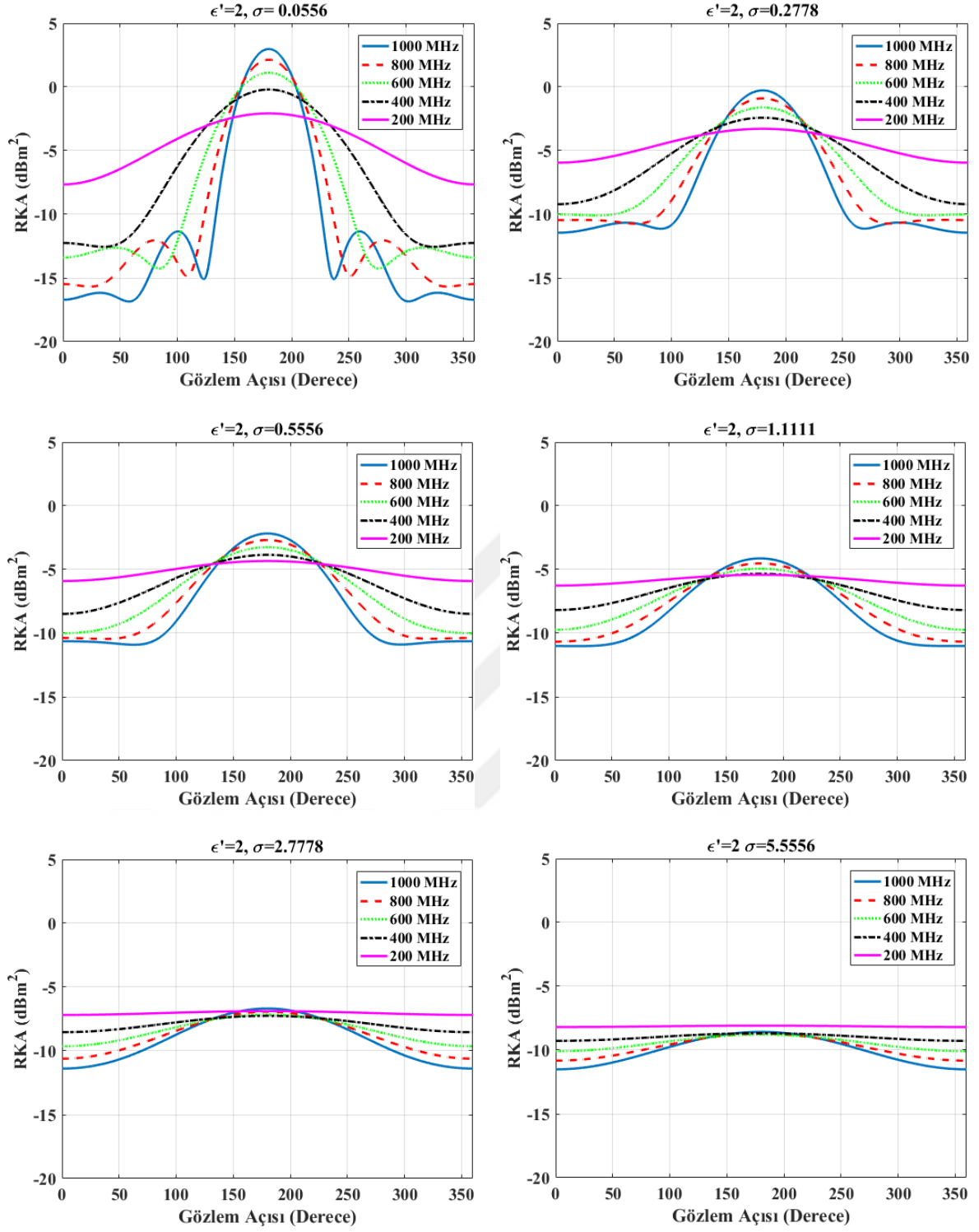
Şekil 3.11’de frekans kademeli olarak düşürülmüş ve cismin elektriksel olarak küçüldüğü ve nokta saçıcıya yaklaştığı gözlemlenmiştir. Daha önce Şekil 3.4’te kayıp oranları ile gözlenen RKA grafiklerindeki düzleşme bu kez çalışma frekansının azalması ile ortaya çıkmaktadır.

Bu durumun daha net görülmesi açısından 1 GHz ve 100 MHz olmak üzere 2 uç frekans beraber çizilmiş ve Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



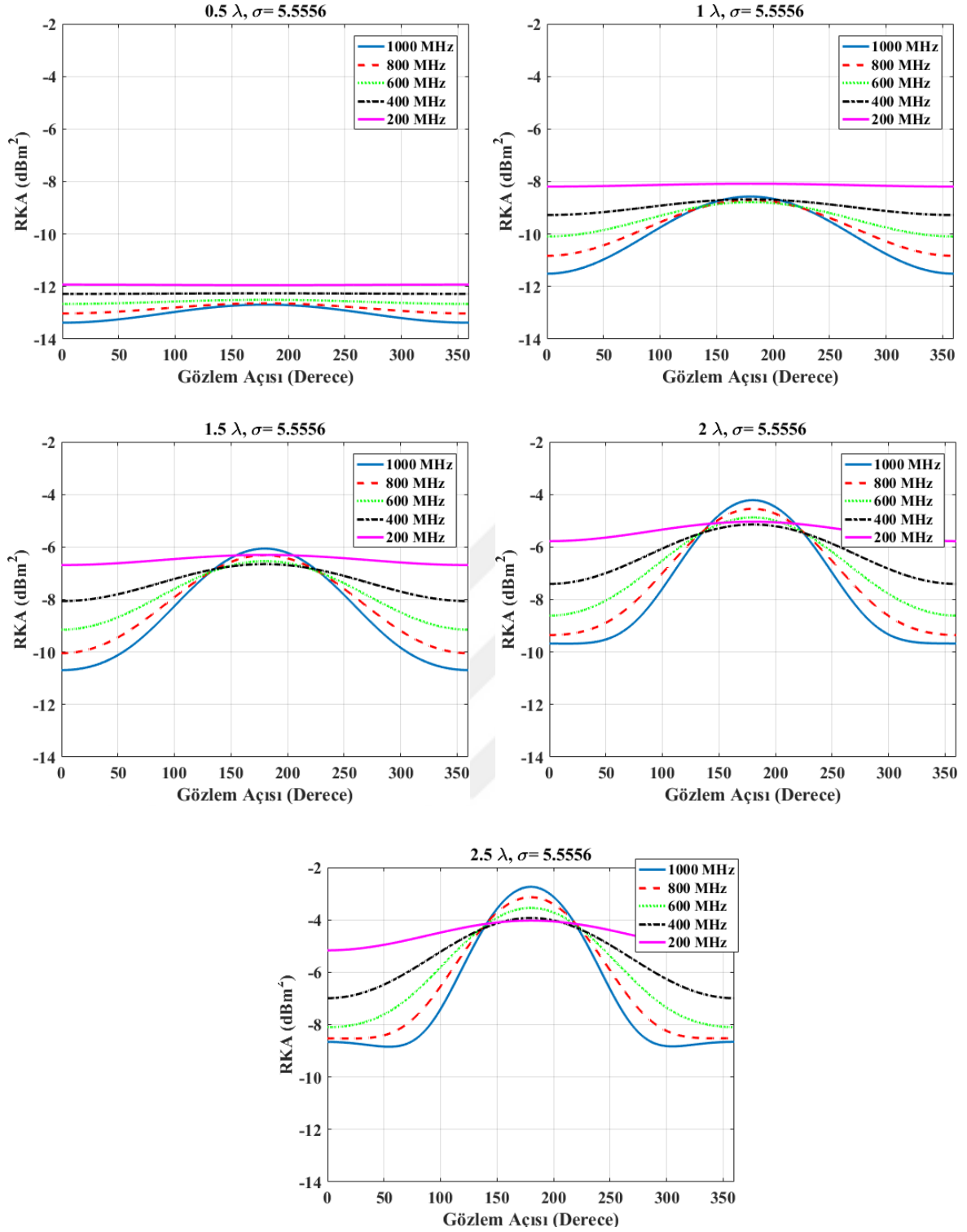
Şekil 3.12: 1 GHz ve 100 MHz frekanslarında kayıpsız cismin RKA sonuçları

Kayıp oranları ve çözüm frekanslarındaki değişimin etkileri ayrı ayrı gözlemlendikten sonra bu iki analiz birleştirilmiş ve kademeli olarak artırılan σ değerine göre geniş bant sonuçları Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13: 1λ yarıçaplı saçıcının σ değişirken (a) $\sigma=0.0556$, (b) $\sigma=0.2778$, (c) $\sigma=0.5556$, (d) $\sigma=1.1111$, (e) $\sigma=2.7778$, (f) $\sigma=5.5556$ geniş bant sonuçları

Görülen düzleşmenin saçıcının elektriksel boyutu ile ilişkili olduğunu göstermek için KFİE metodu ile bulunan, σ değerinin 5.5556 olduğu grafikler yarıçapı 0.5λ , 1λ , 1.5λ , 2λ ve 2.5λ olan cisimler için Şekil 3.14 (a-e)'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Yüksek öz iletkenlik değerine sahip saçıcının elektriksel boyutunun artışının
(a)0.5 λ (b)1 λ (c)1.5 λ (d)2 λ , (e)2.5 λ yarıçap için RKA üzerindeki etkisi

Şekil 3.14 (a)'da hem elektriksel boyut küçük hem de öz iletkenlik katsayısı yüksektir. Daha önce Şekil 3.4 ve Şekil 3.6'da gösterildiği gibi elektriksel boyutun küçülmesi ve saçıcının daha iletken duruma gelmesi cismi nokta saçıcı durumuna yaklaştırır ve RKA grafiklerini düzleştirir. Şekil 3.14 (e)'de görüldüğü gibi cismin elektriksel boyutunun büyütülmesi ile cisim nokta saçıcı davranışından uzaklaşır ve RKA grafiklerinde dalgalanmalar tekrar oluşmaya başlar. Elektriksel boyuta bağlı geniş bant RKA grafiklerindeki bu geçiş Şekil 3.14 (a-e) boyunca gözlemlenir.

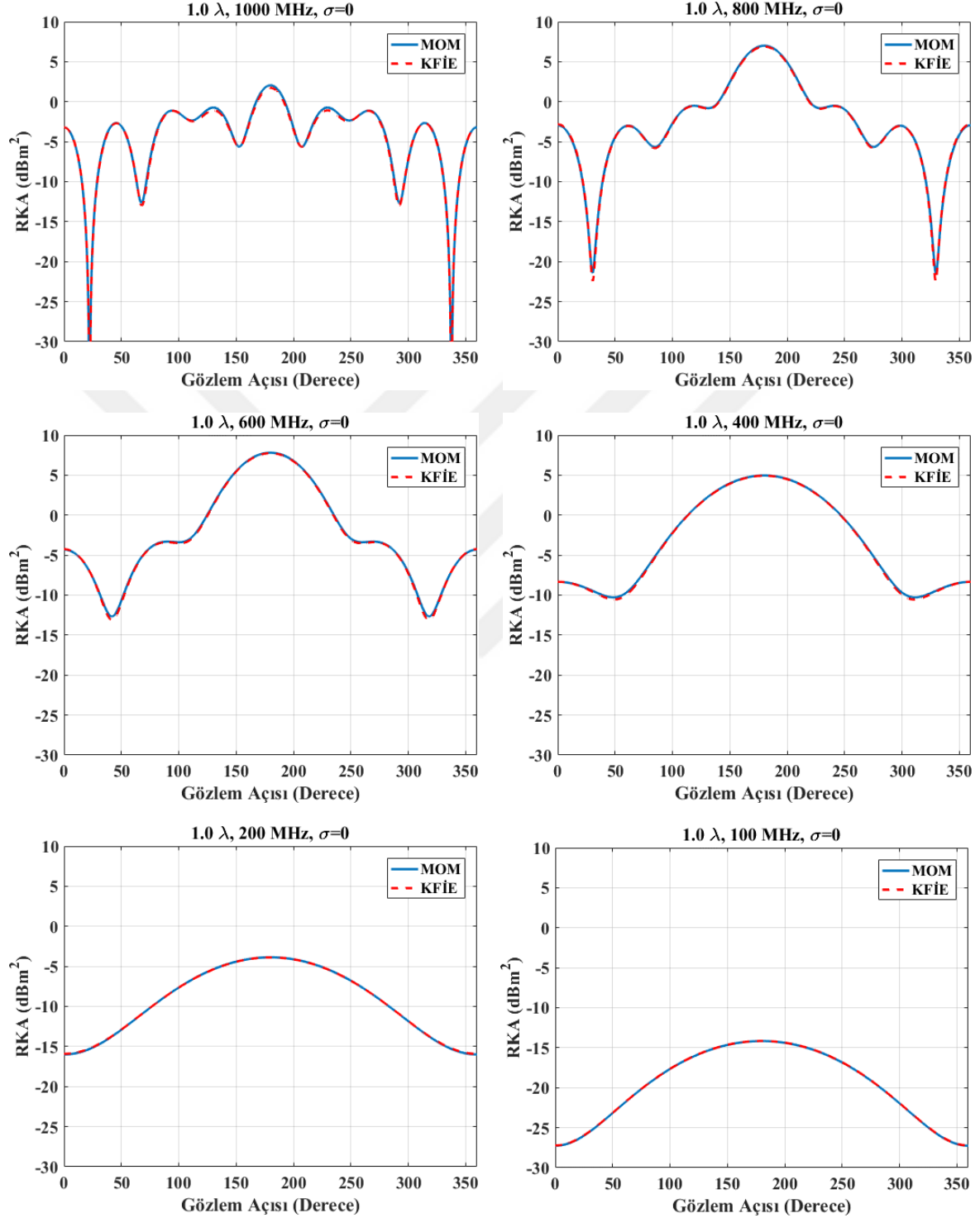
Çeşitli parametreler üzerindeki bu teorik yorumların ardından KFİE ve MM sonuçları karşılaştırılmış ve fark oranları farklı üçgen sayıları için bulunmuştur. Bu fark oranları

- 1- RKA gözlem açısına,
- 2- Frekansa,
- 3- Cisim üzerindeki alan dağılımına

bağlı olarak incelenmiştir.

1-RKA gözlem açısına bağlı olarak 3 farklı çalışma çeşitli frekanslarda karşılaştırılmıştır.

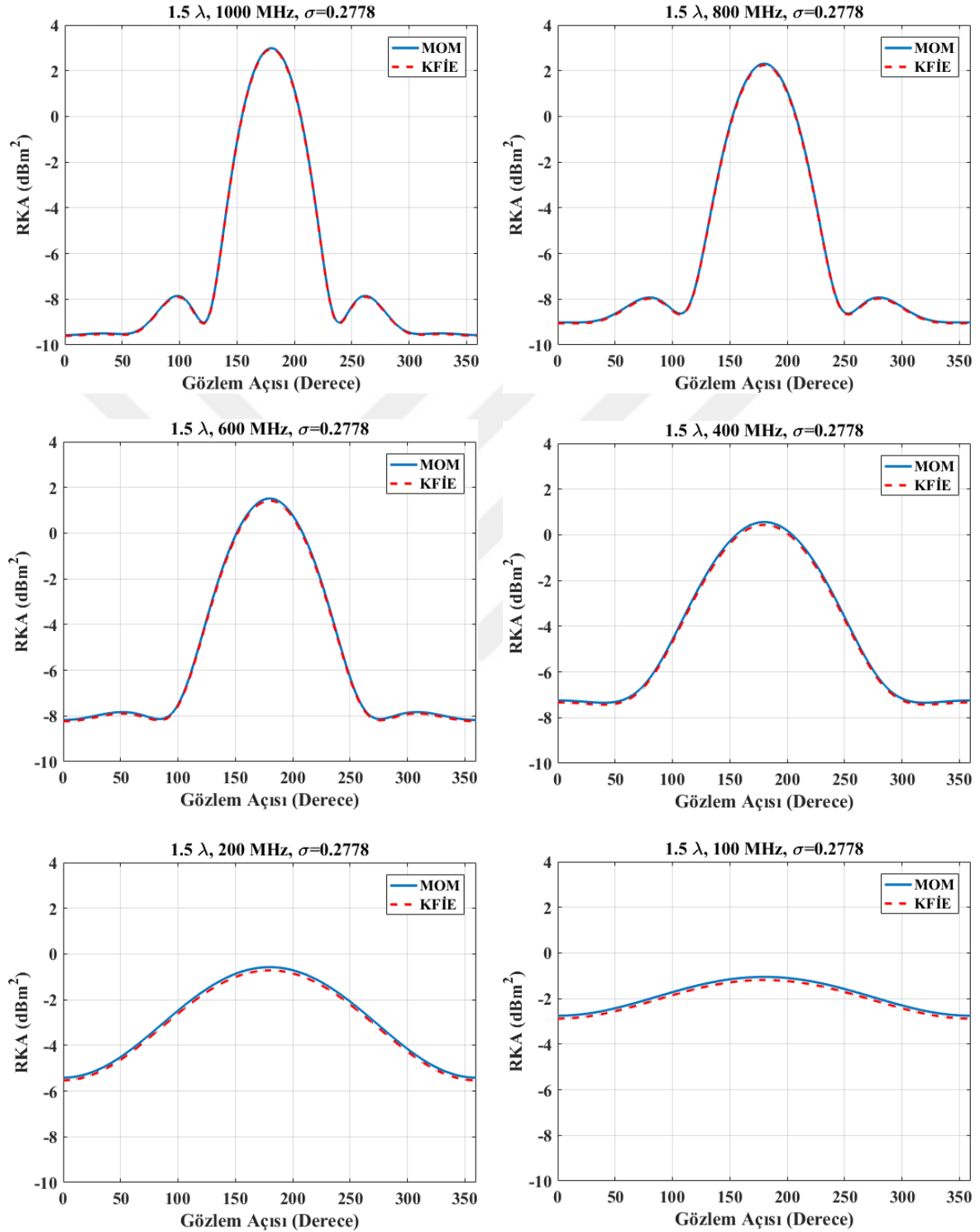
- a) 1λ yarıçapında 1988 üçgen ile modellenmiş kayıpsız saçıcının MM ve KFİE yöntemleri ile çıkarılmış RKA sonuçları Şekil 3.15’de (a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz için birlikte çizilmiştir.



Şekil 3.15: 1λ yarıçapındaki kayıpsız cismin

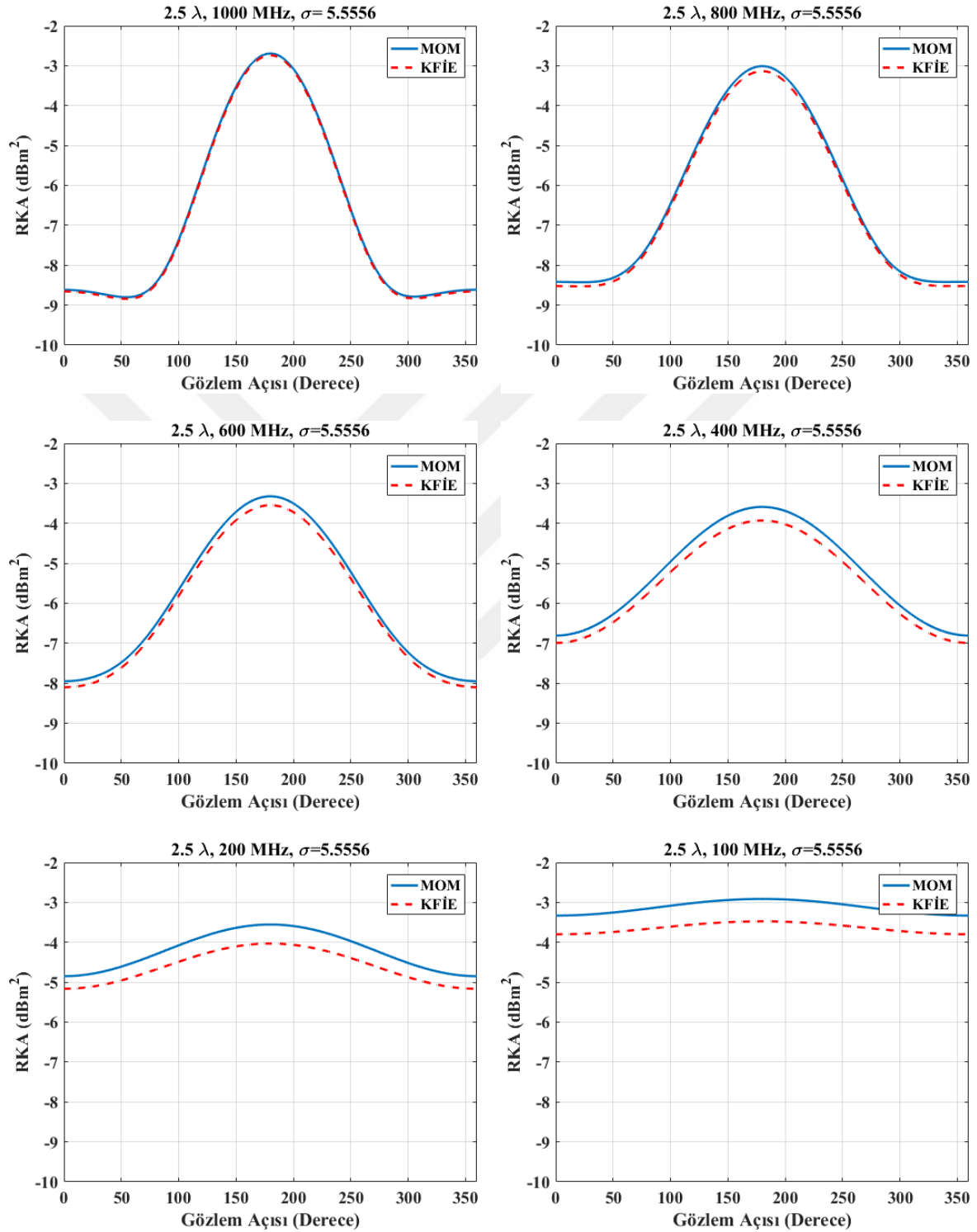
(a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz için KFİE ve MM ile bulunan RKA sonuçlarının karşılaştırması

- b) 1.5λ yarıçapında 1988 üçgen ile modellenmiş σ değeri 0.2778 olan kayıplı saçıcının MM ve KFİE ile bulunan RKA sonuçları Şekil 3.16'da (a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz için birlikte çizilmiştir.



Şekil 3.16: 1.5λ yarıçapında $\sigma=0.2778$ değerinde kayıplı cismin
(a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz
için KFİE ve MM ile bulunan RKA sonuçlarının karşılaştırması

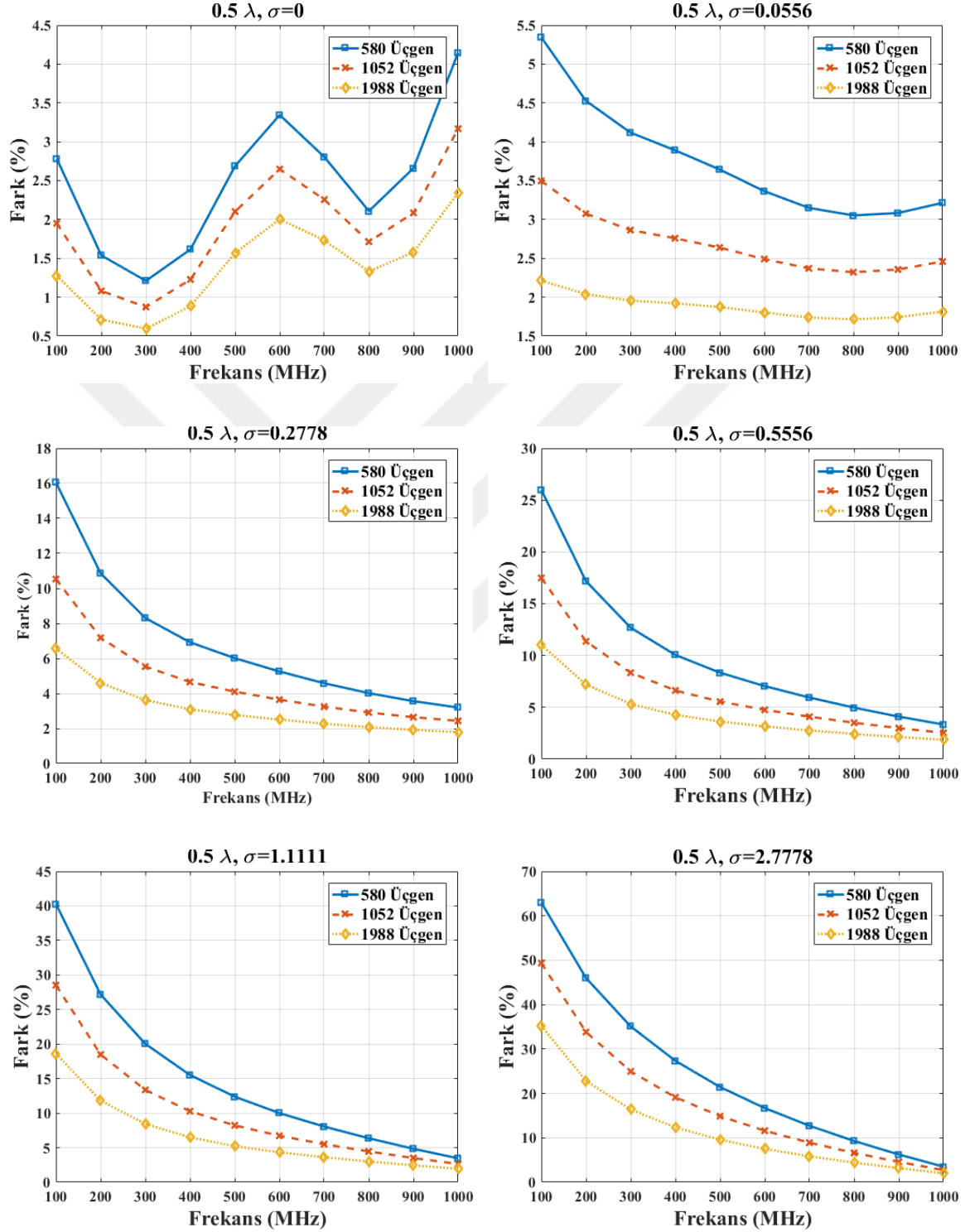
- c) 2.5λ yarıçapında 1988 üçgen ile modellenmiş σ değeri 5.5556 olan kayıplı saçıcının MM ve KFİE ile çıkarılmış RKA sonuçları Şekil 3.17’de (a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz için birlikte çizilmiştir.



Şekil 3.17: 2.5λ yarıçapında $\sigma=5.5556$ değerinde kayıplı cismin
(a) 1 GHz, (b) 800 MHz, (c) 600 MHz, (d) 400 MHz, (e) 200 MHz, (f) 100 MHz
için KFİE ve MM ile bulunan RKA sonuçlarının karşılaştırması

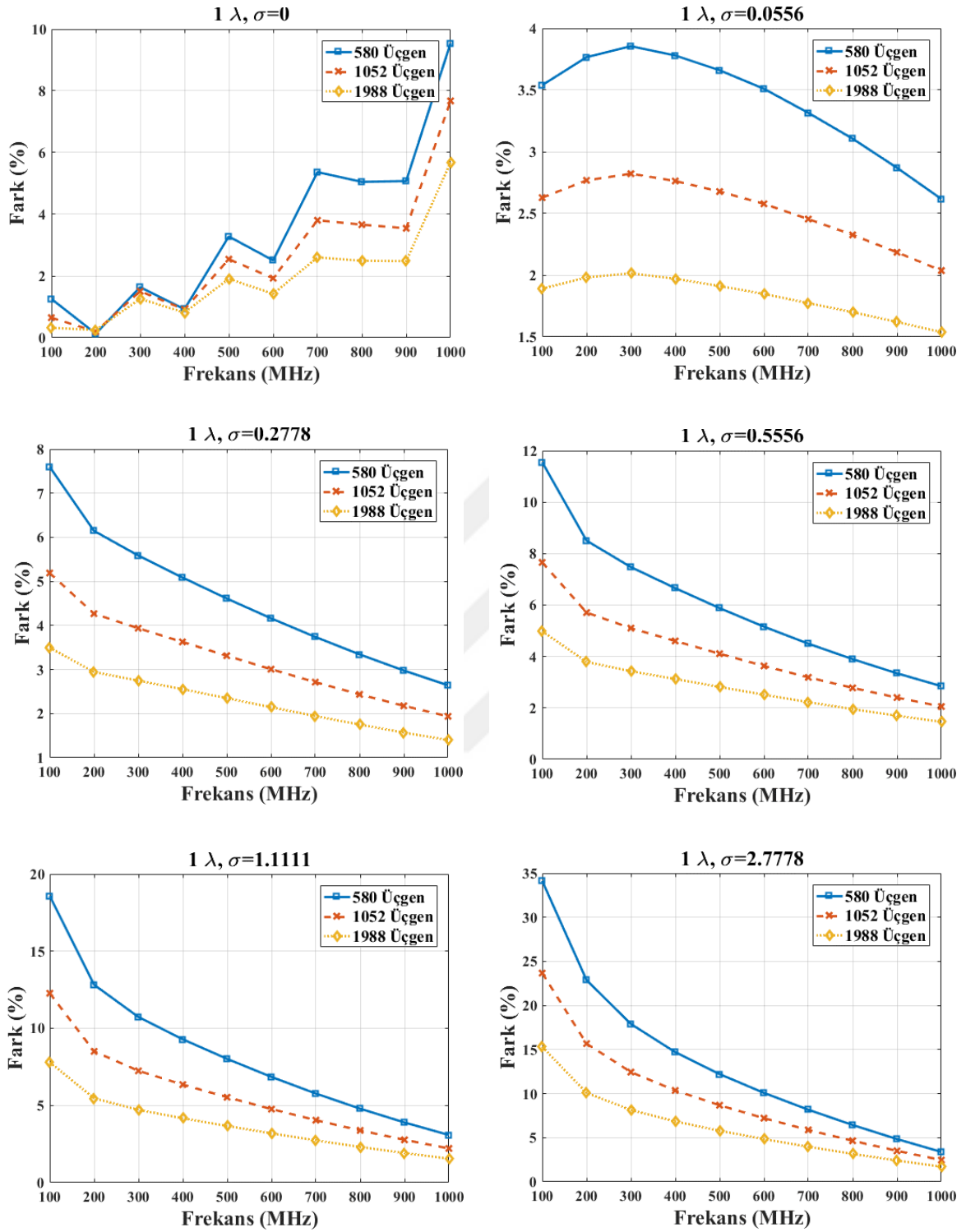
2-1.Sabit elektriksel boyuttaki cisimlerin frekansa bağı RKA fark oranları farklı σ değerleri için Şekil 3.18-3.22’de modellemede kullanılan farklı üçgen sayıları ile gösterilmiştir.

a) 0.5λ yarıçapa sahip saçıcı



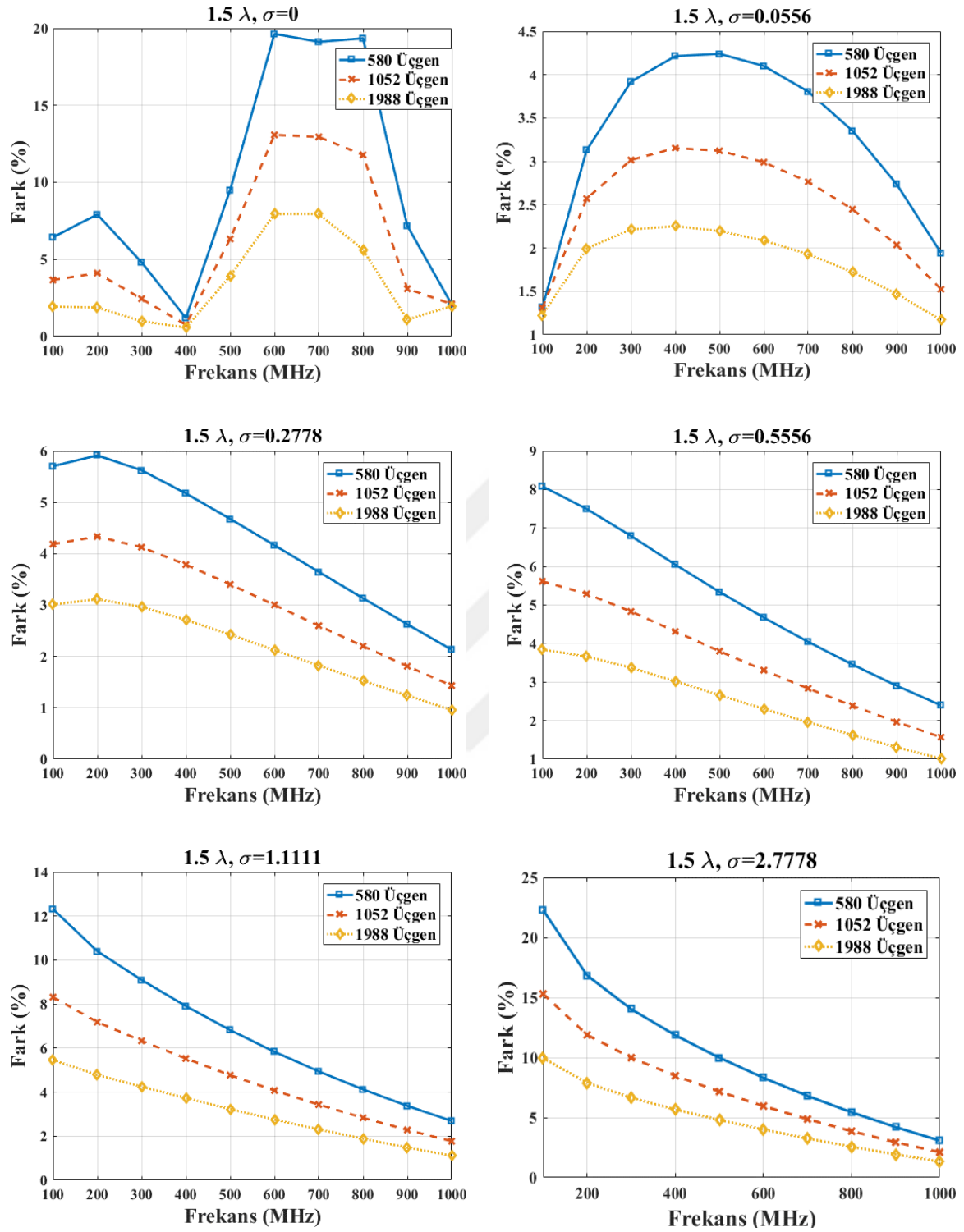
Şekil 3.18: 0.5λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları

b) 1λ yarıçapa sahip saçıcı



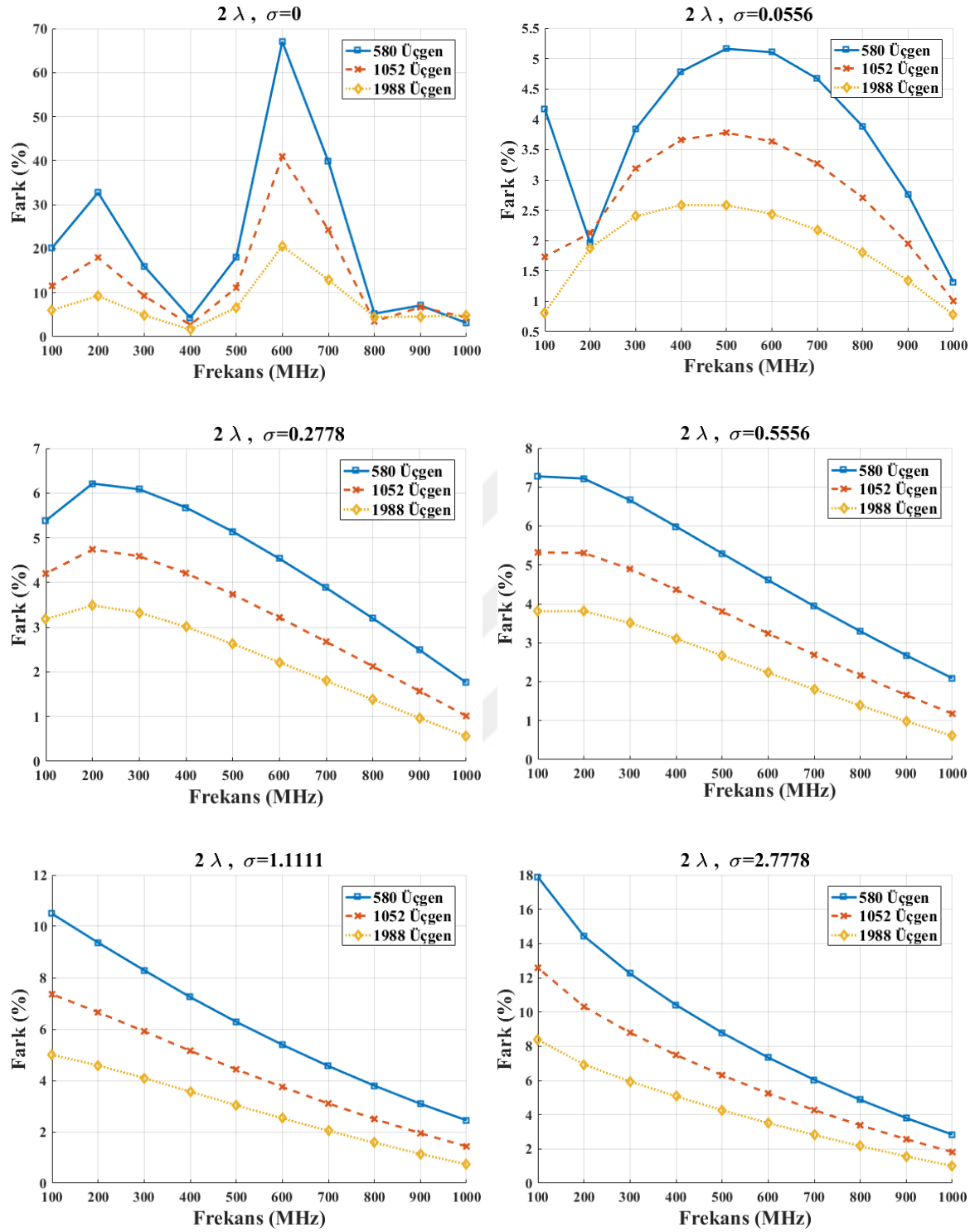
Şekil 3.19: 1λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları

c) 1.5λ yarıçapa sahip saçıcı



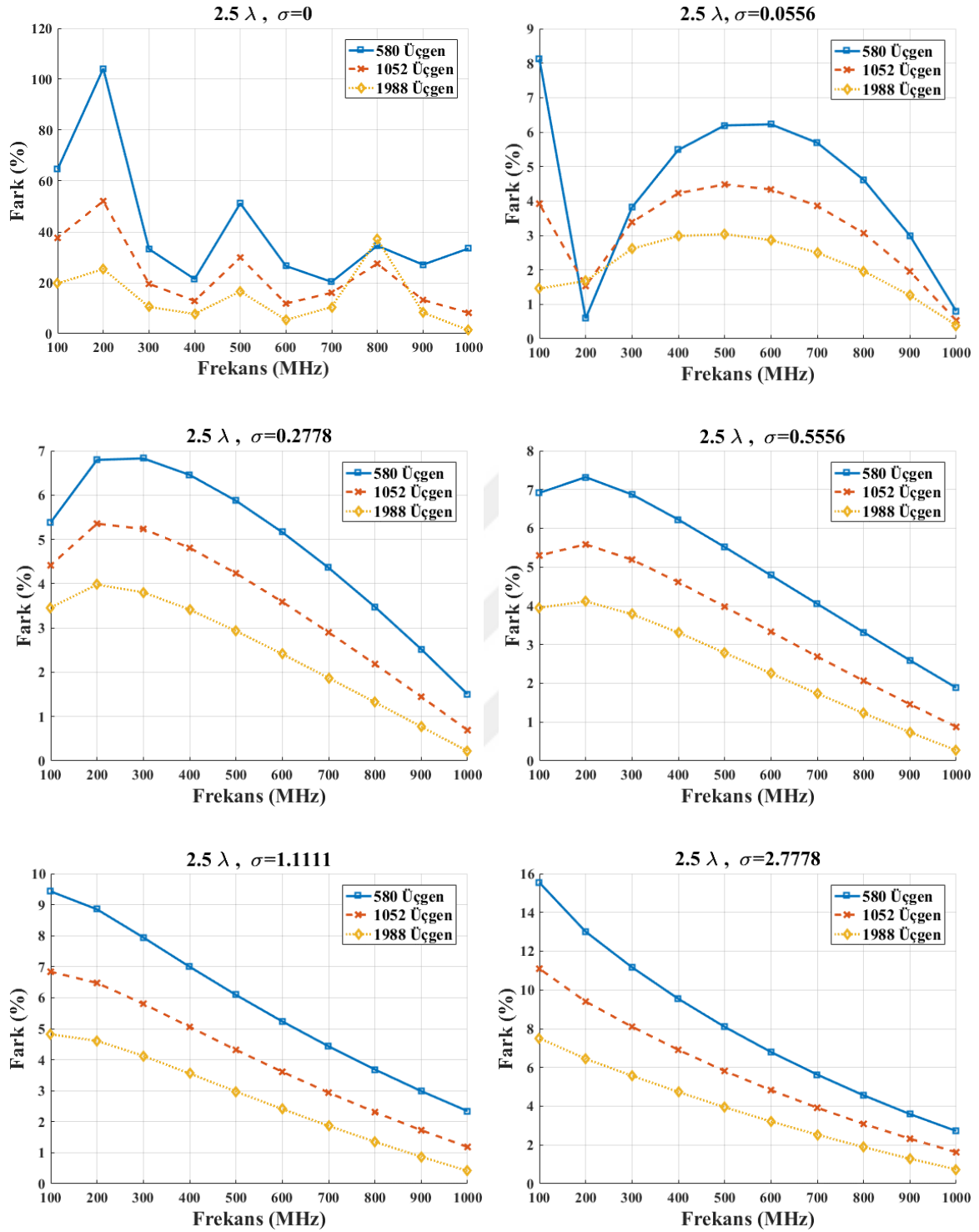
Şekil 3.20: 1.5λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları

d) 2λ yarıçapa sahip saçıcı



Şekil 3.21: 2λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları

e) 2.5λ yarıçapa sahip saçıcı



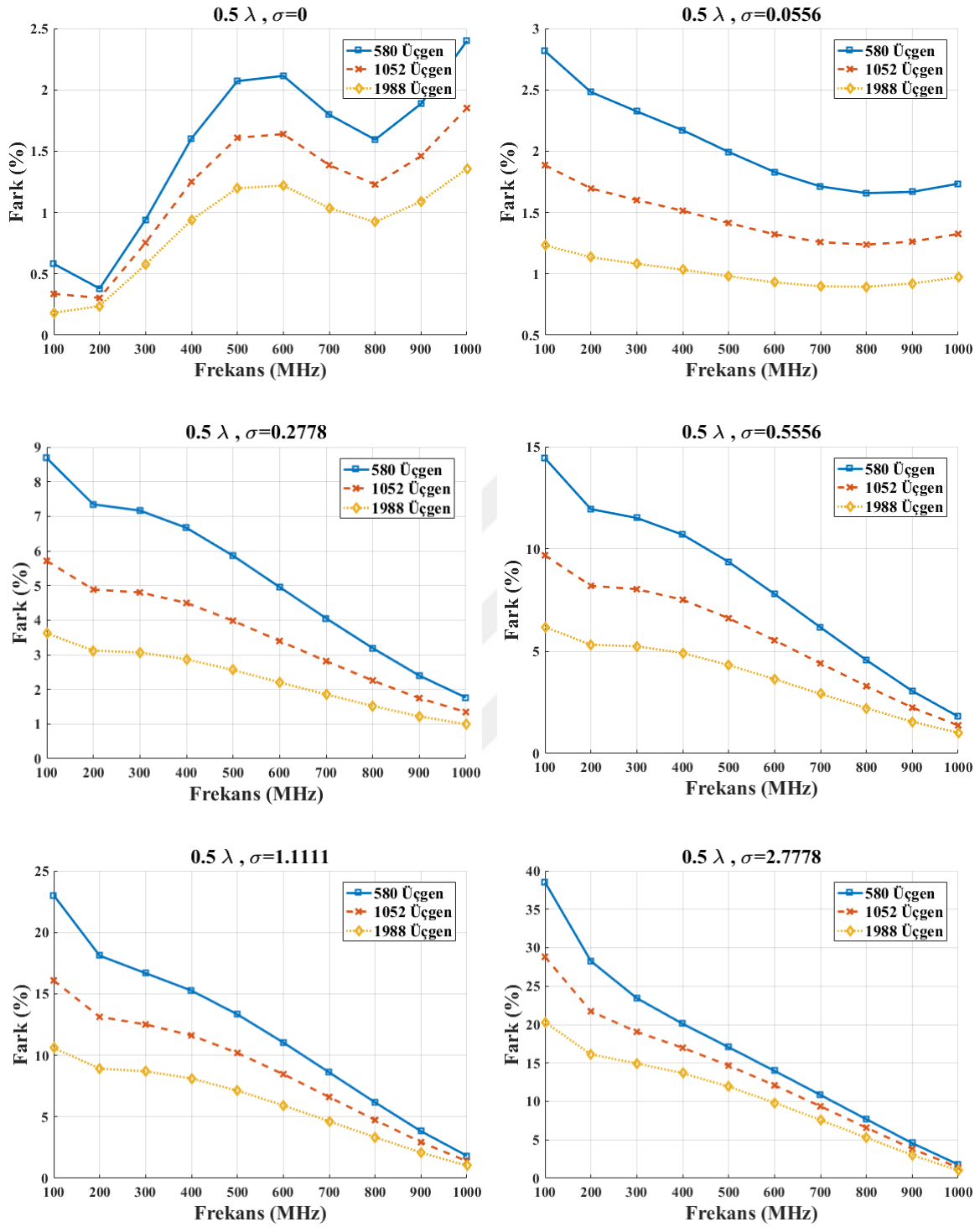
Şekil 3.22: 2.5λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta RKA fark oranları

Öngörüldüğü üzere kayıplı cisimlerde en yüksek fark oranı düşük frekans ve yüksek σ durumu için geçerlidir. Düşük frekans cismin elektriksel olarak küçük olmasına, yüksek σ ise cismin dielektrik yapısını kaybetmesiyle akım dağılımının çeperlerde toplanmasına ve RKA grafiklerinin düzleşmesine neden olur.

2-2.KFİE ve MM sonuç karşılaştırmaları RKA değerlerine ek olarak cisim üzerinde bulunan alanlar ile de yapılabilir. Bu tezde iki farklı metot ile bulunan E_z değerleri RKA sonuçlarında olduğu gibi farklı frekans, σ ve boyutlar için incelenmiş ve fark oranları Şekil 3.23-3.27’de gösterilmiştir.

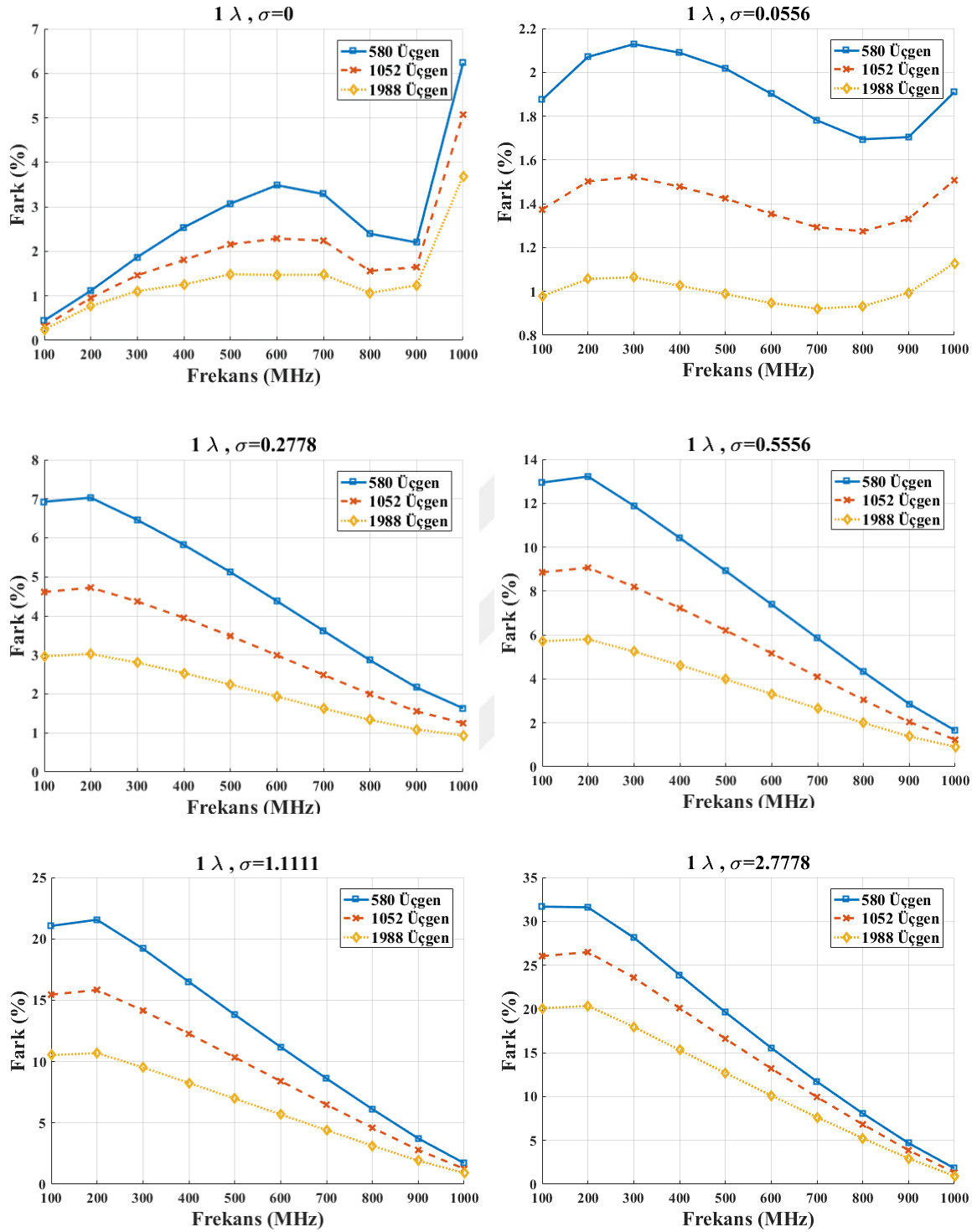


a) 0.5λ yarıçapa sahip saçıcı



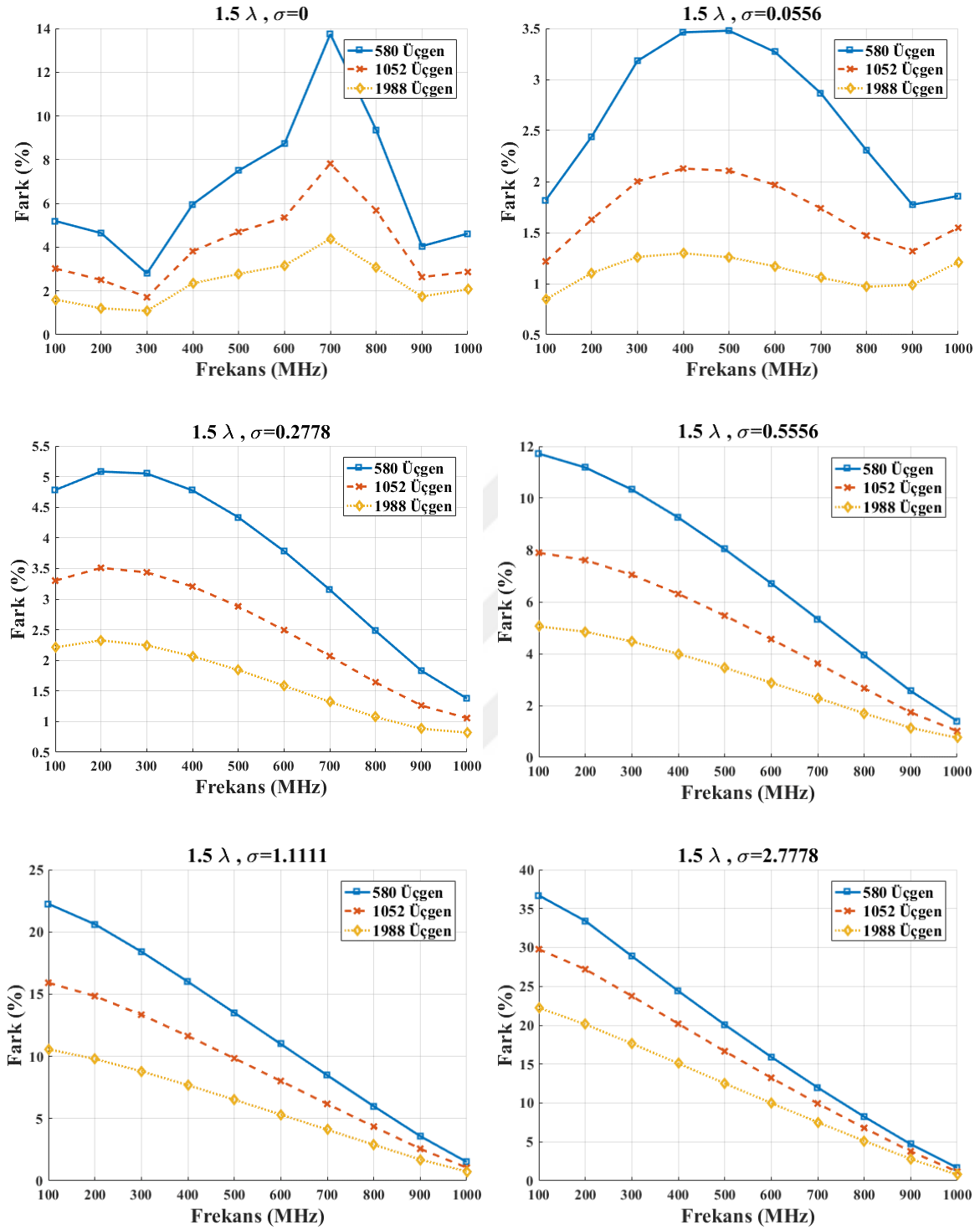
Şekil 3.23: 0.5λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları

b) 1λ yarıçapa sahip saçıcı



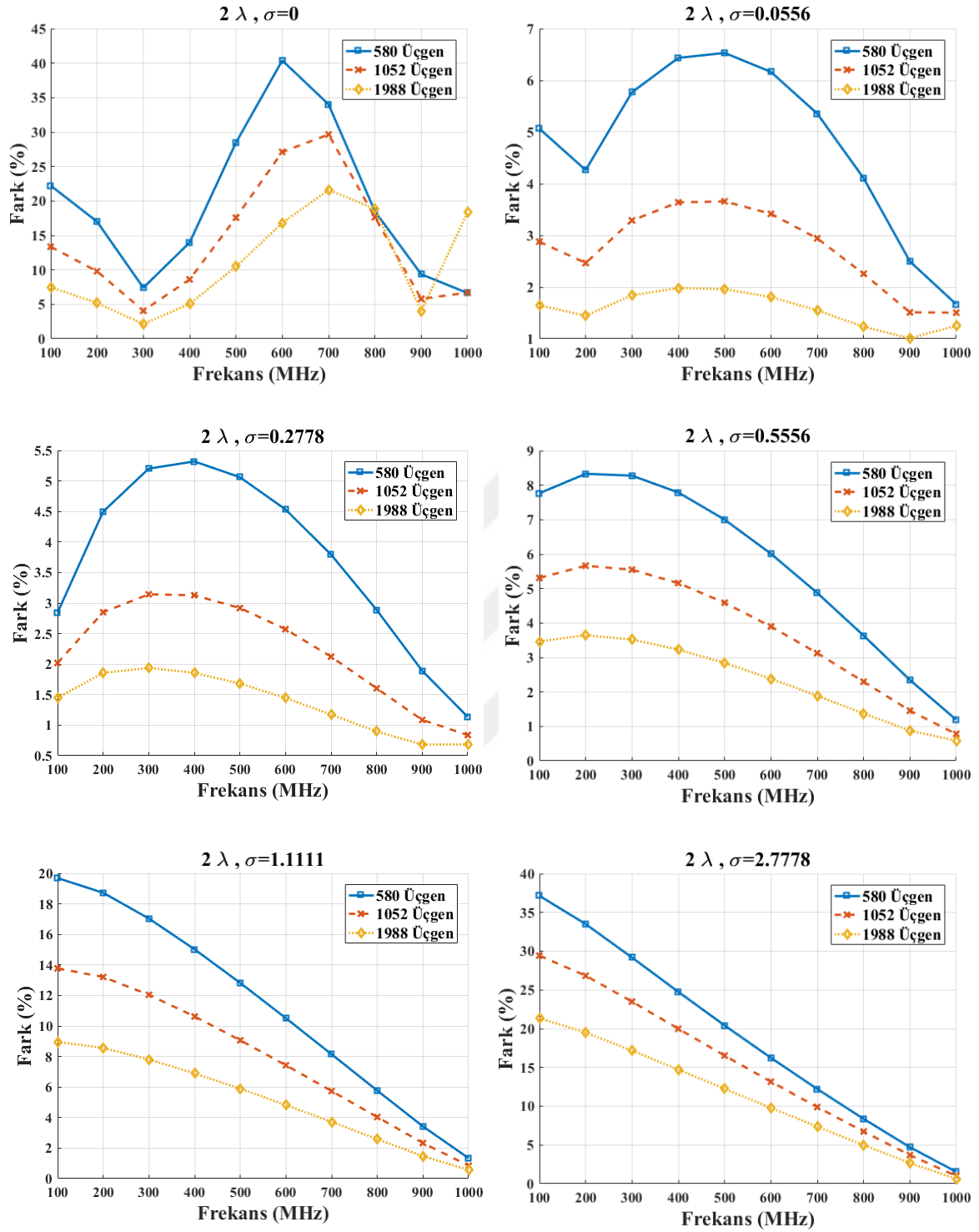
Şekil 3.24: 1λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları

c) 1.5λ yarıçapa sahip cisim



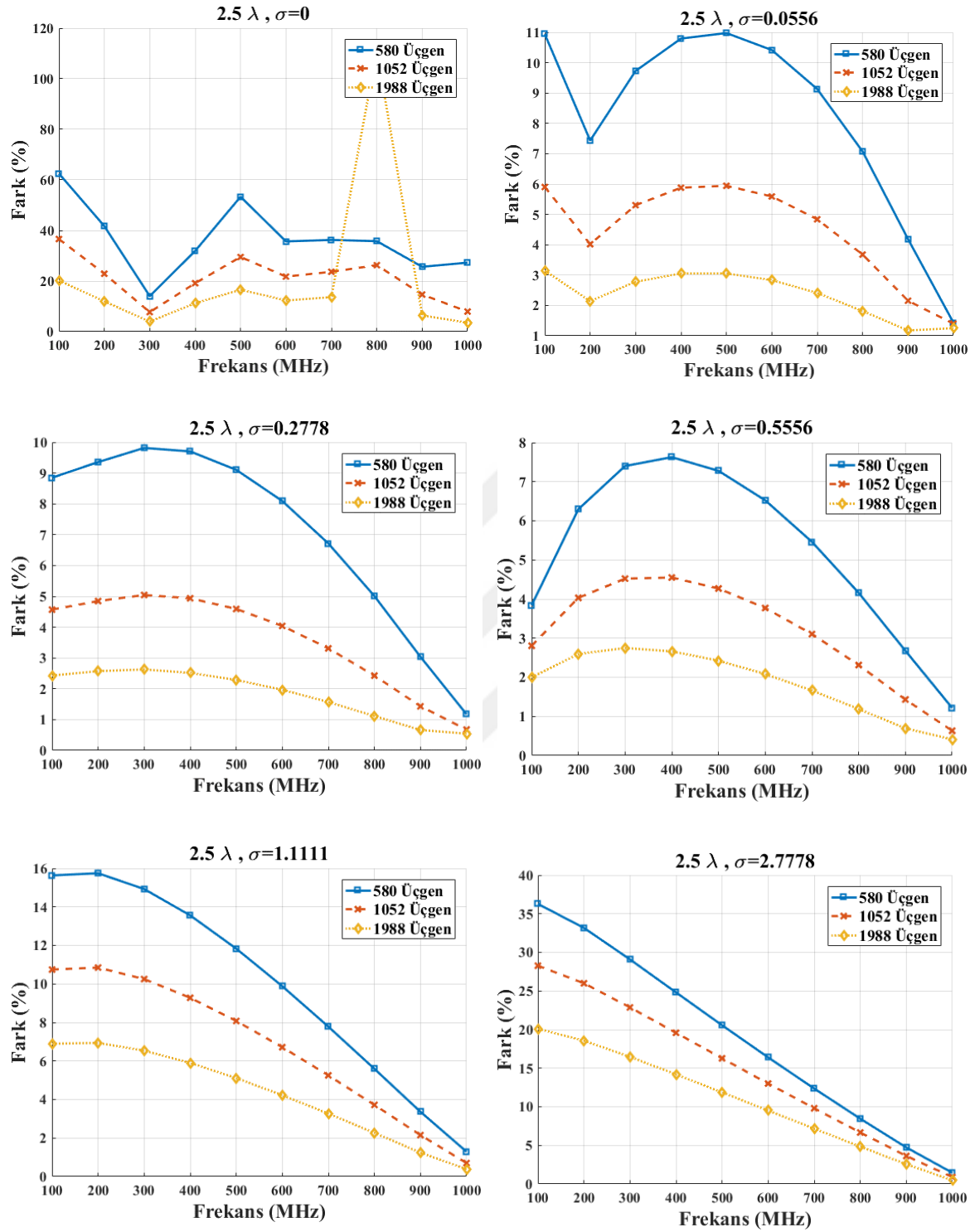
Şekil 3.25: 1.5λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları

d) 2λ yarıçapa sahip saçıcı



Şekil 3.26: 2λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları

e) 2.5λ yarıçapa sahip saçıcı



Şekil 3.27: 2.5λ yarıçapa sahip saçıcının (a) $\sigma=0$, (b) $\sigma=0.0556$, (c) $\sigma=0.2778$, (d) $\sigma=0.5556$, (e) $\sigma=1.1111$, (f) $\sigma=2.7778$ için geniş bantta alan fark oranları

Genel itibariyle kayıplı cisimlerde frekans yükseldikçe hata oranı azalmaktadır. RKA ve alan fark grafiklerinde aynı yapı gözlemlenmektedir. Alan grafikleri yalnızca E_z bileşeni için çizildiği ve RKA hesabında elektrik (J_z) ve manyetik (M_x, M_y) kaynakların farklı çarpanlarla elde edilen değerleri kullanıldığından aynı fark oranının elde edilmesi beklenmemektedir.



3-RKA ve alan farkları Öklid normu kullanılarak bulunmuştur. Ancak bu yöntem farkın cisim üzerinde hangi bölgelerle ve hangi üçgenlerle ilişkili olduğu ile ilgili bilgi vermez. Frekans, öz iletkenlik katsayısı ve cismin elektriksel boyutunun alan dağılımını etkilediği bilindiğinden çıkarılan farkların cisim üzerinde nasıl konumlandığının gösterilmesi de önemlidir. Cisim üzerindeki alan hesapları oransal olarak tanımlanmış ve her üçgen için

$$Fark_i = \frac{|MOM sonuc_u_i - KFIE sonuc_u_i|}{|MOM sonuc_u_i|}$$

denklemleri ile hesaplanmıştır.

İlk olarak yapılan çalışmaların 100-1000 MHz bandını taradığı, ω_0 değerinin $2\pi \times 1\text{GHz}$ alındığı belirtilmelidir. 1 GHz için yapılan karşılaştırmalarda algoritmanın çalışma mantığı çerçevesinde $\omega_0 = \omega$ olmasına rağmen farkın sıfır olması beklenmez, çünkü $\omega_0 = \omega$ olsa dahi KFİE algoritması MM algoritmasına indirgenmemektedir. Bu sonuç 2 yöntem için de bulunan matrislerdeki bilinmeyen sayılarının farklı olmasından da görülebilir.

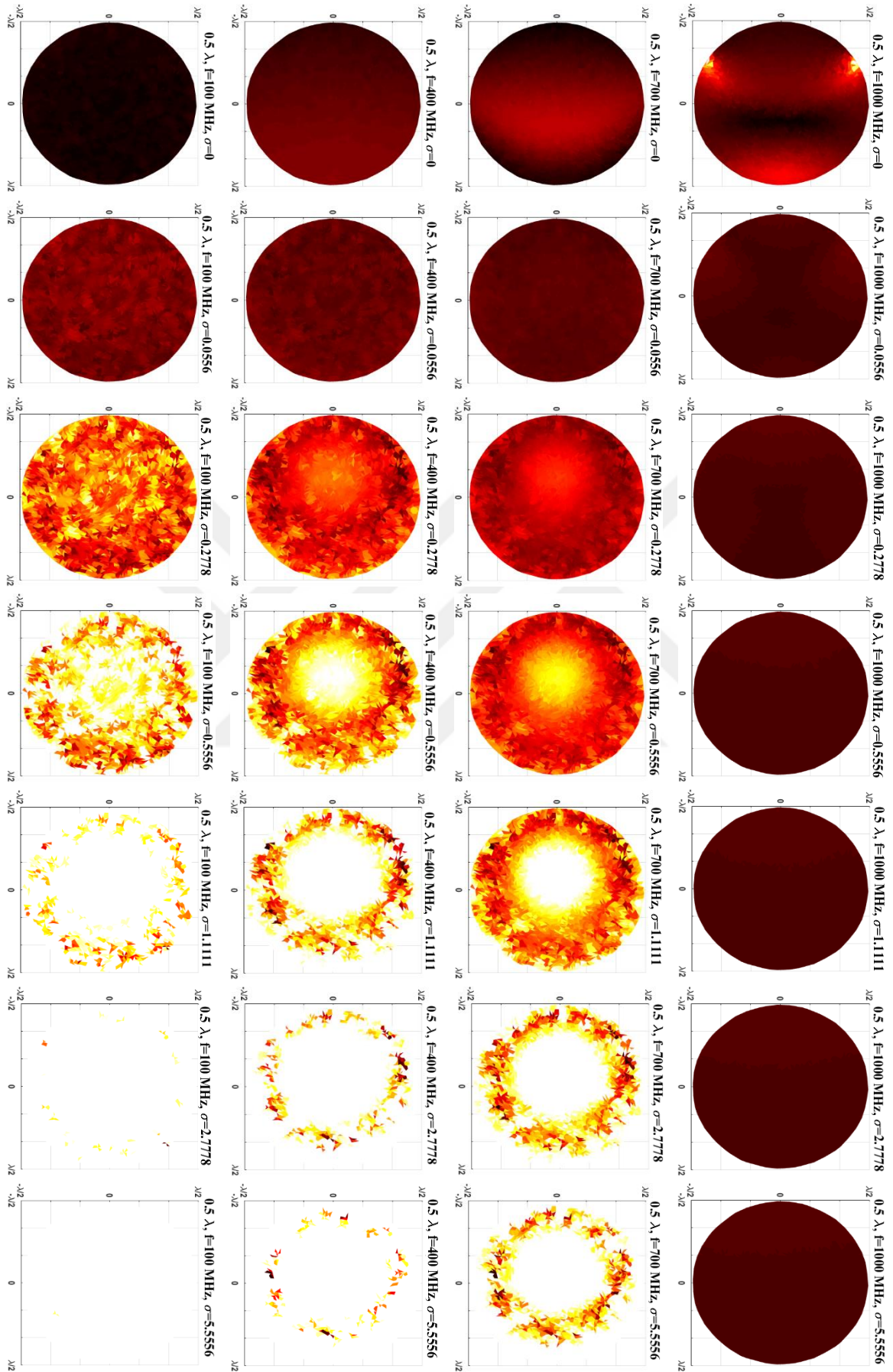
Frekans, öz iletkenlik katsayısı ve cismin elektriksel boyutu parametreleri için

- 1- Frekans azaldıkça kayıplı cisimlerde deri etkisi azalır, alanlar çeperlerden merkeze doğru açılmaya başlar.
- 2- Öz iletkenlik katsayısı arttıkça deri etkisi artar, cismin ortasındaki boşluk artar.
- 3- Cismin elektriksel boyutu küçüldükçe alanlar çeperlerde yeterince yer bulamaz ve merkeze kayarlar. Ters durumda ise merkezdeki boşluk artar.

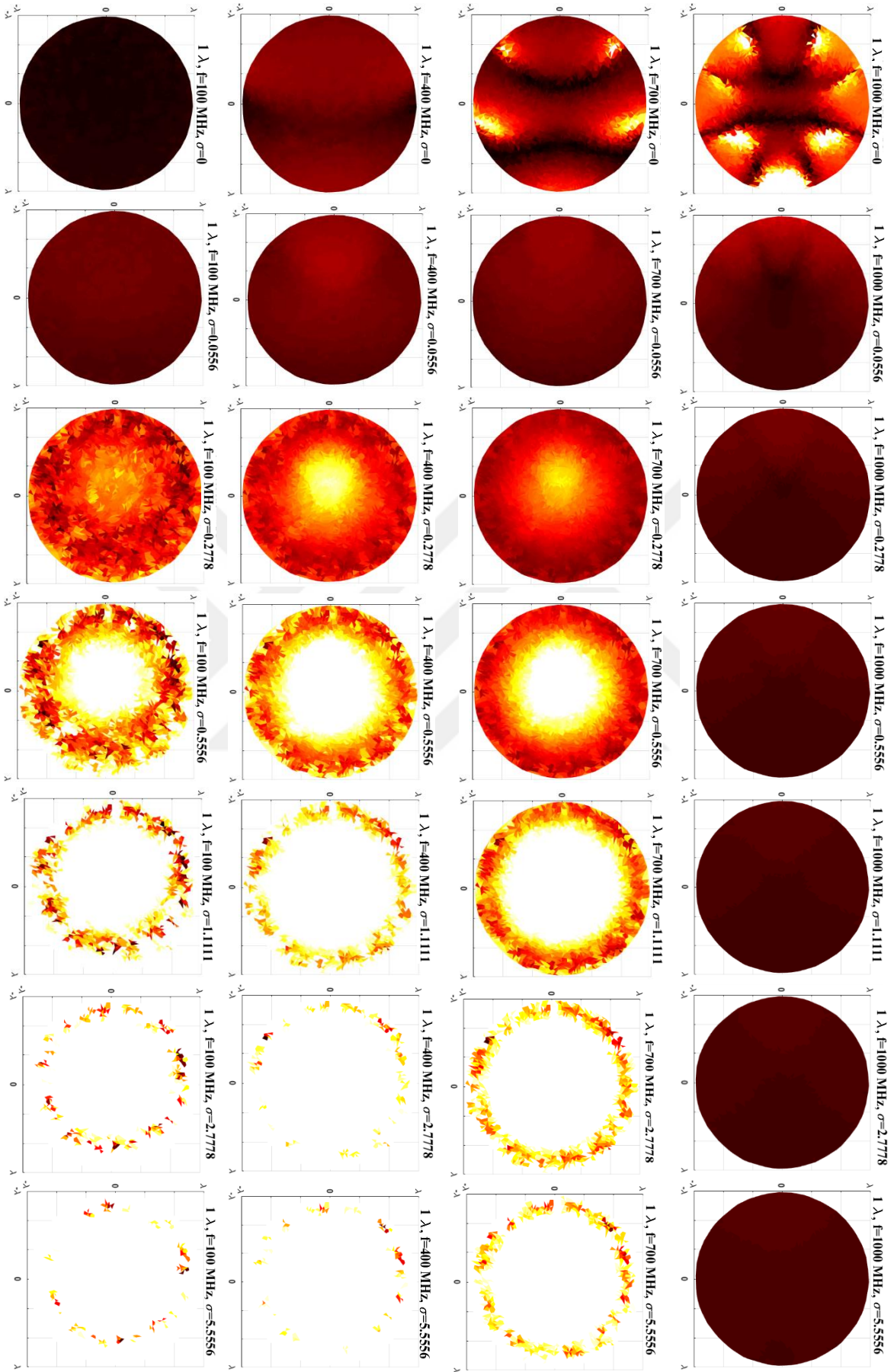
Bu teorik öngörüler test edilmiş ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Bu tezdeki çalışmalar,

- 1- 100 MHz ile 1 GHz arasında 900 MHz geniş bir frekans bandı,
- 2- σ değerleri 0, 0.0556, 0.2778, 0.0556, 1.1111, 2.7778 ve 5.5556 olacak şekilde geniş bir öz iletkenlik katsayısı aralığı
- 3- 0.5λ , 1.0λ , 1.5λ , 2.0λ ve 2.5λ yarıçapa sahip geniş bir elektriksel boyut

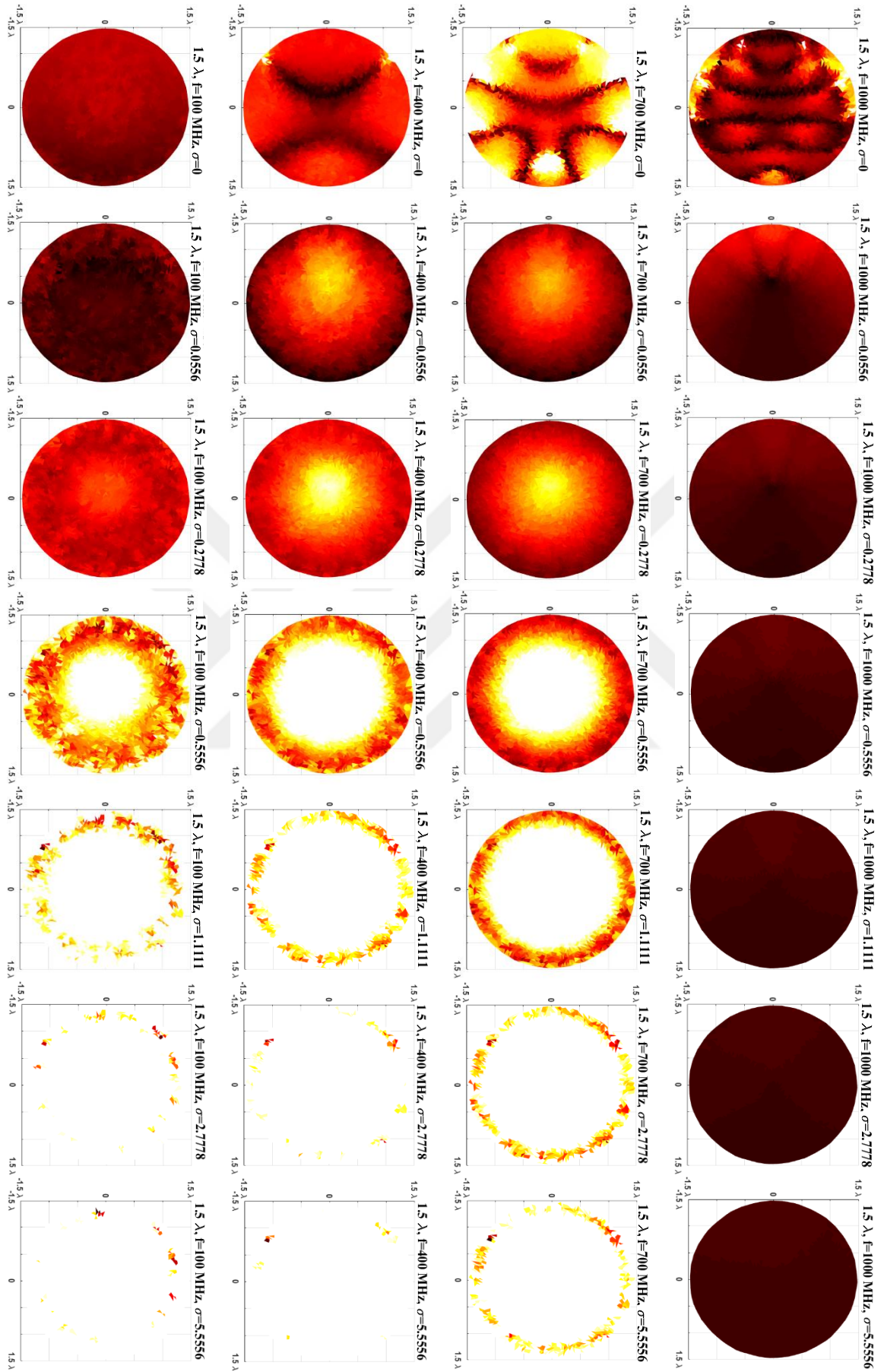
çerçevesinde ele alınmıştır. Farklı parametrelerin cisim üzerindeki alanlara etkisinin incelenmesinde şiddet aralığının aynı olması önemlidir. Ancak yukarıda belirtildiği gibi geniş aralıklarla yapılan testlerde uç değerlerin aynı aralıkta incelenmesi görsel olarak zorluk çıkarabilmektedir. Bu nedenle aşağıda gösterilen grafikler ilk olarak tüm parametreleri kapsayacak şekilde çizilse de, sonrasında görsellerin daha iyi anlaşılması için yüksek kayıp oranlarında ($\sigma=1.1111$, 2.7778 , 5.5556) daha uygun şiddet limitleri ile tekrar çizilmiştir.



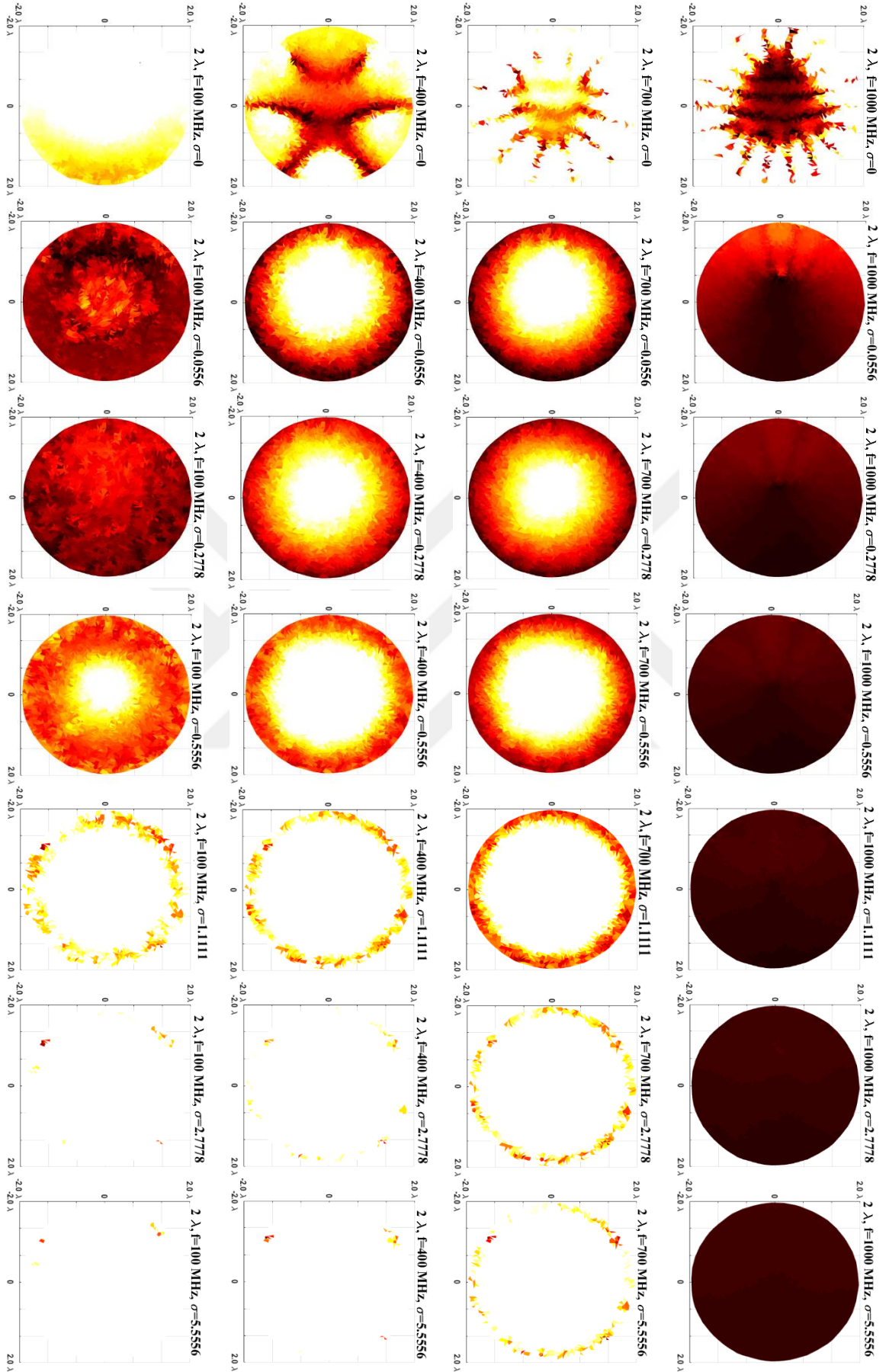
Şekil 3.28: 0.5λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi



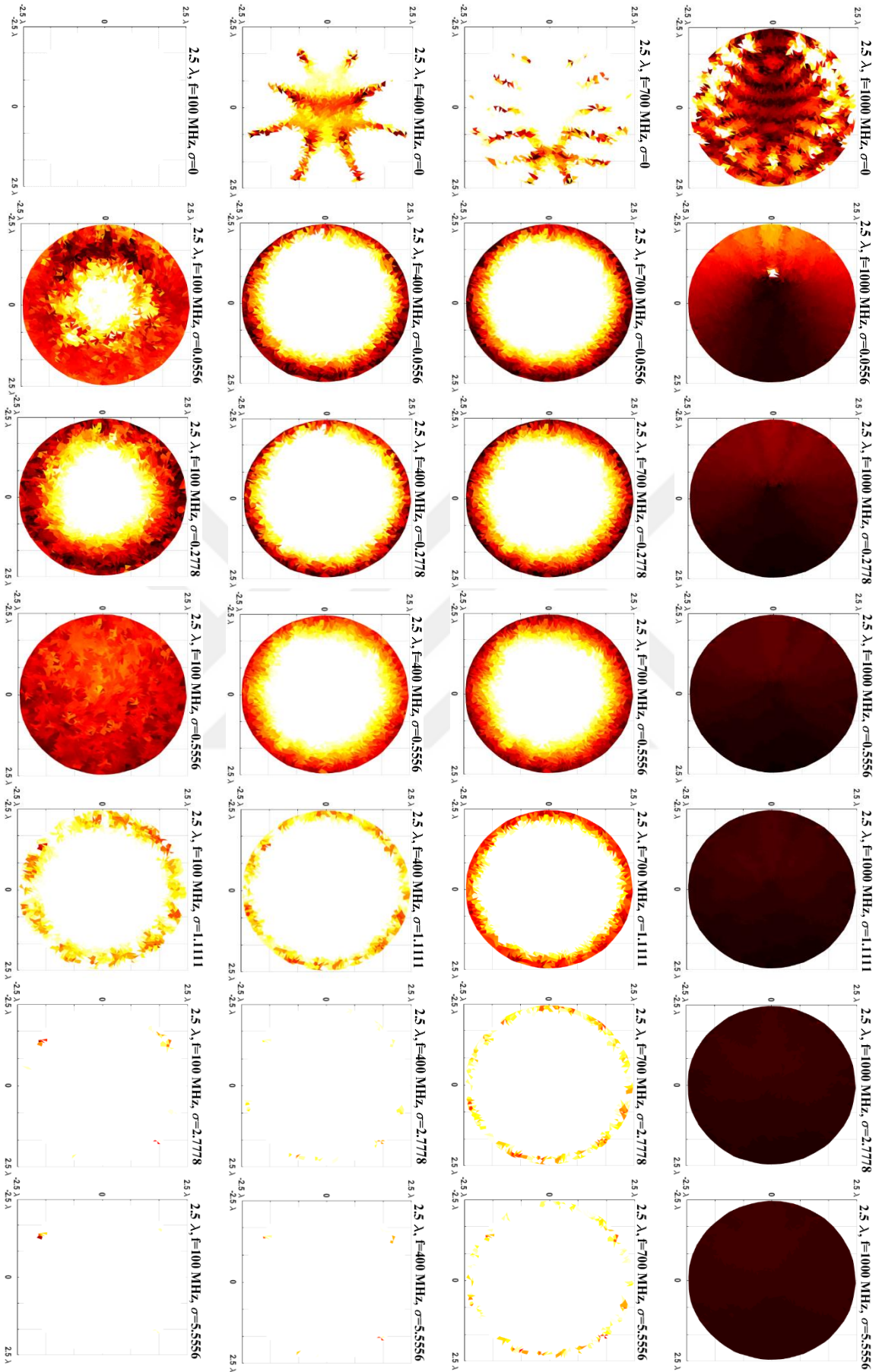
Şekil 3.29: 1λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi



Şekil 3.30: 1.5λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi

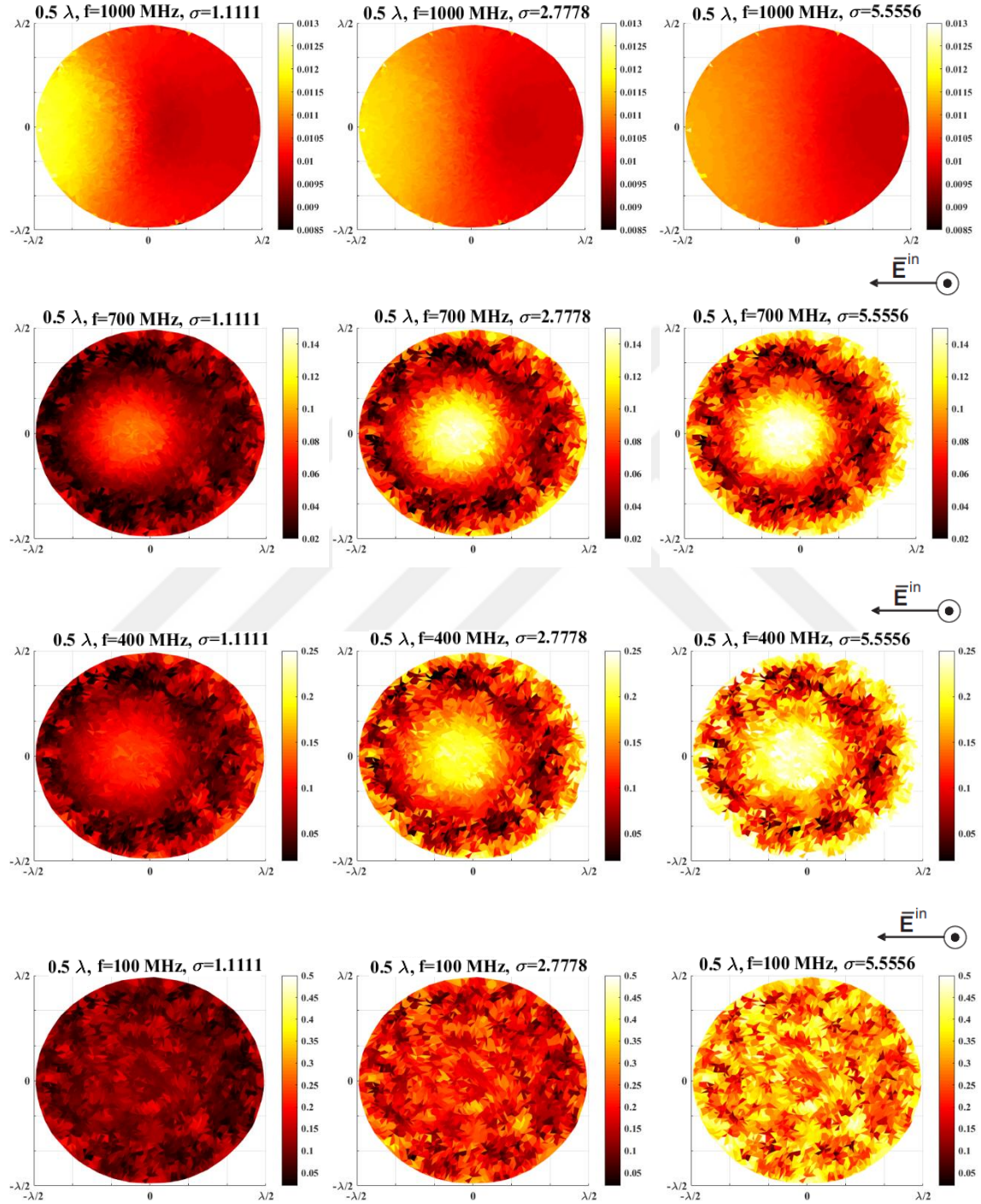


Şekil 3.31: 2λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi

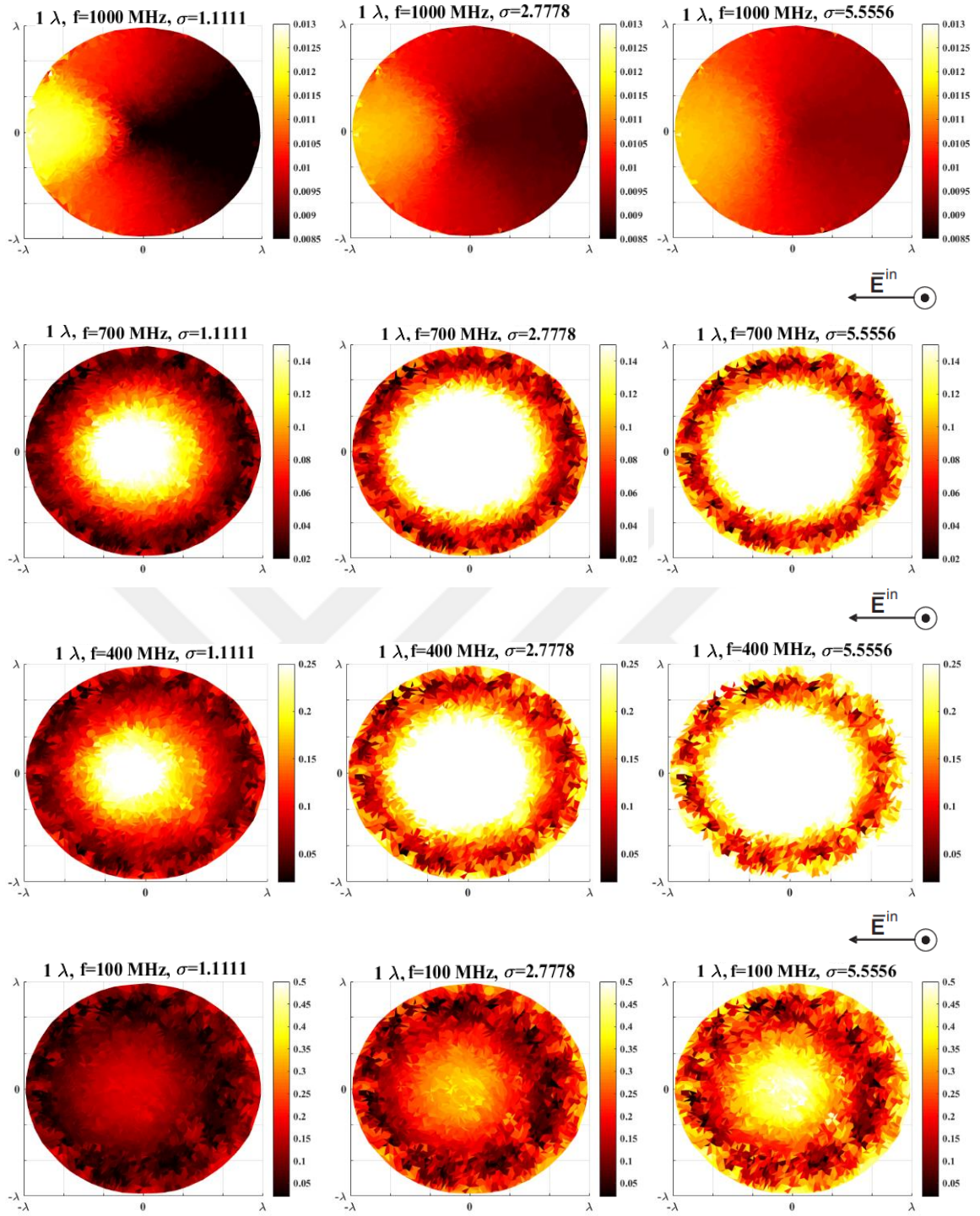


Şekil 3.32: 2.5 λ yarıçapa sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların gösterimi

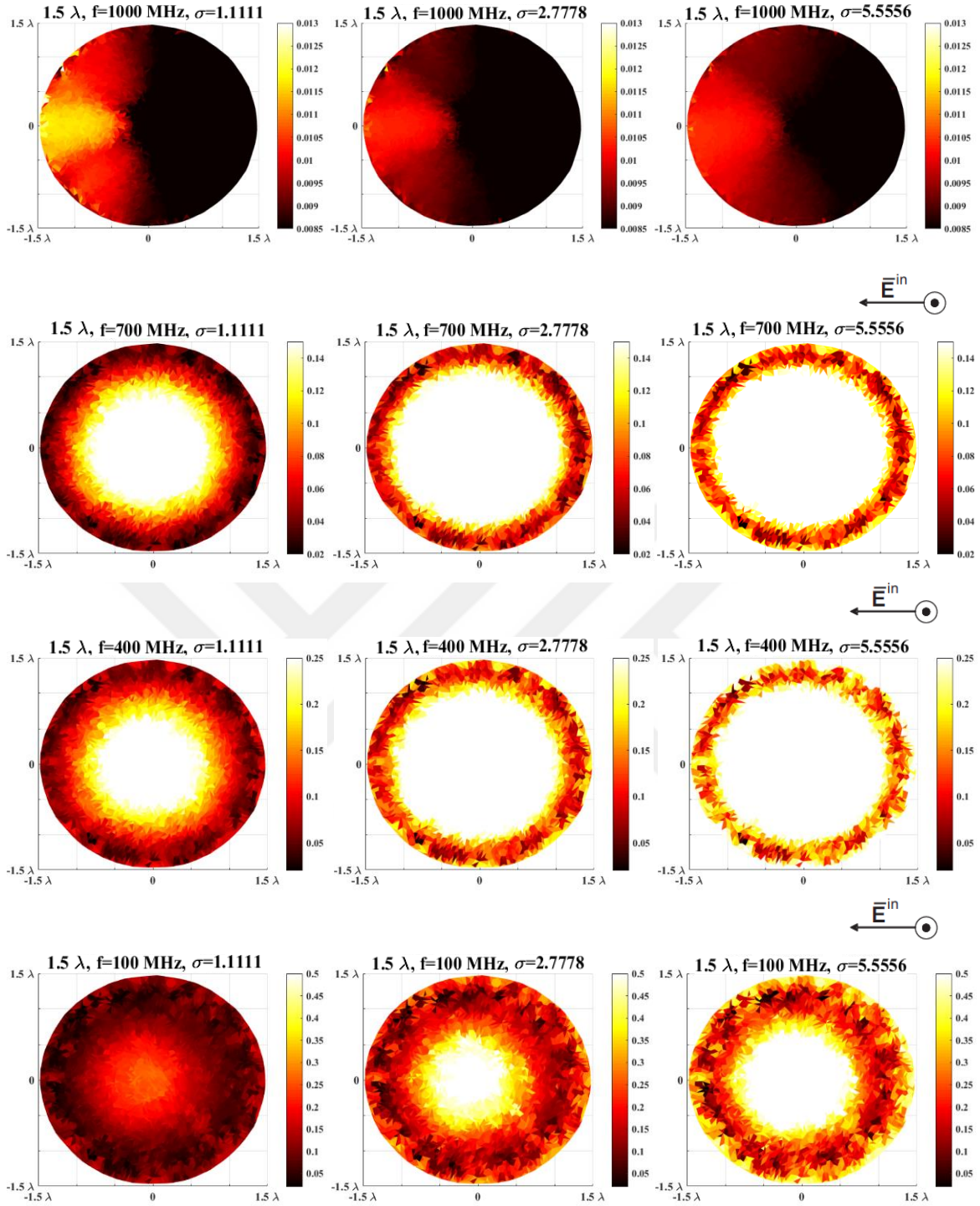
Yüksek öz iletkenlik katsayısı değerleri dar bir şiddet aralığında incelendiğinde fark dağılımları artan yarıçap değerleri için Şekil 3.30 ile Şekil 3.33 arasında görülür.



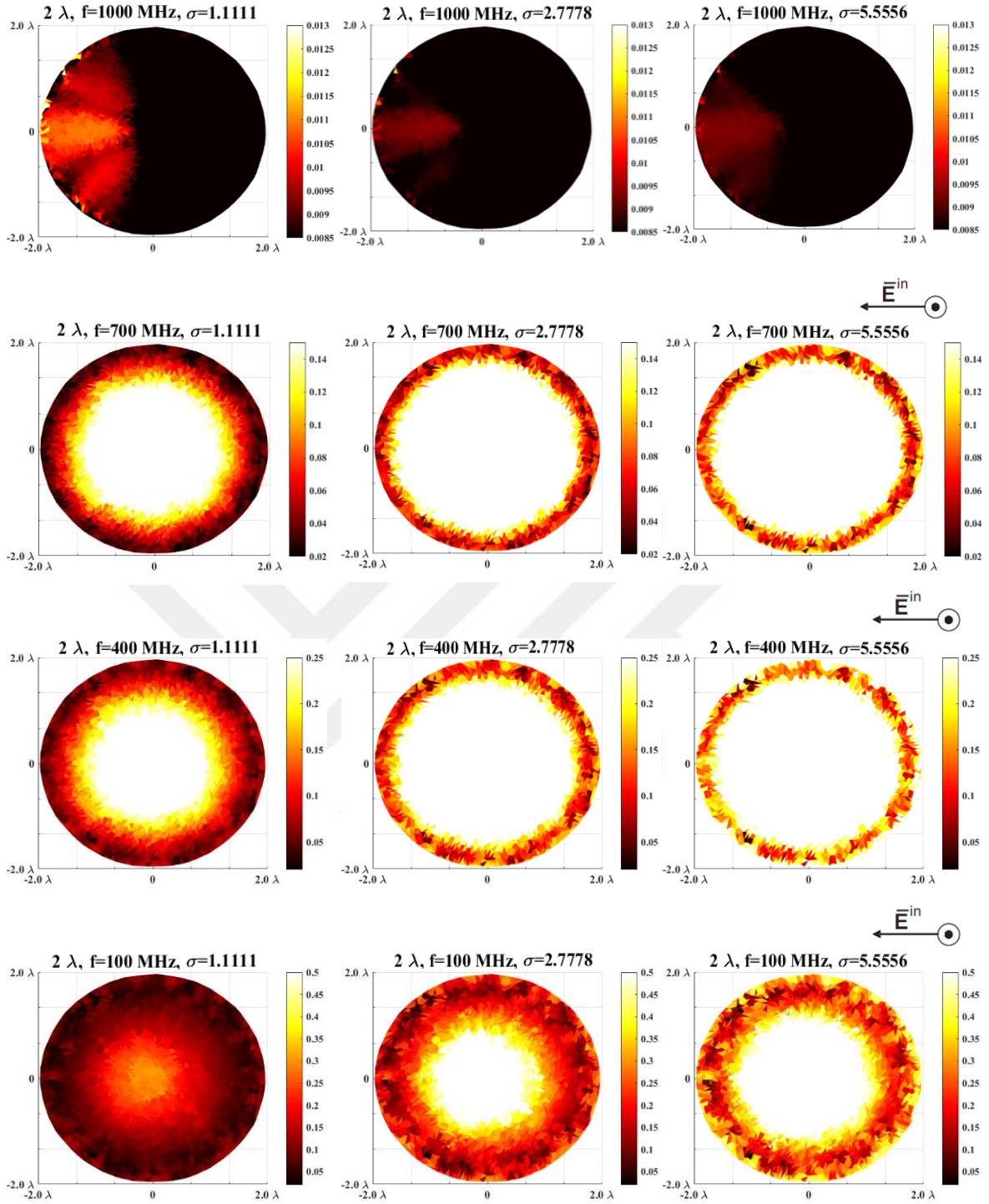
Şekil 3.33: 0.5λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi



Şekil 3.34: 1λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi



Şekil 3.35: 1.5 λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi



Şekil 3.36: 2λ yarıçapa ve yüksek öz iletkenlik katsayısına sahip saçıcı için frekans ve σ değerine bağlı farkların cisim üzerindeki dağılımlarının gösterimi

İlk olarak 5 farklı yarıçap değeri için çizilen grafiklerde de öz iletkenlik katsayısı arttıkça cismin merkezindeki fark yüzdelerinin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Daha önce belirtildiği gibi farklar nispi olarak belirtilmiş ve MM ile KFİE sonuçları orantısal olarak karşılaştırılmıştır. Teorik olarak ispatlandığı, bu çalışmada da nümerik olarak gösterildiği gibi öz iletkenlik katsayısının artışı deri etkisi sebebiyle alanların dış çeperlerde toplanmasına yol açar. Sonuç olarak merkeze yakın bölgelerdeki alanların sayısal değerleri çeperlerdeki alanların sayısal değerlerine göre çok düşük olmaktadır. Oransal fark alındığı için merkezdeki küçük sayısal değerlere sahip farklar yüksek görünmekte ancak mutlak fark değerleri düşük kalmaktadır. Bu sebeple oransal farkın yüksek olduğu merkez bölgelerin büyüklüklerine bakılarak deri etkisi yatay eksenlerde görülebilir.

İkinci olarak grafiklerin yukarıdan aşağıya olan dikey eksenlerinde frekansın düştüğü gözlemlenmektedir. Şiddet ölçeğine bakıldığında frekansın düşmesinin fark oranlarını artırdığı RKA ve alan fark grafikleri ile uyumlu olarak saçıcı üzerinde de gözlemlenmektedir.

Üçüncü ve son olarak da cismin elektriksel boyutlarının alan dağılımları ile ilişkisi incelenebilir. Sabit şiddetteki bir elektriksel alan oransal olarak büyük ve küçük iki farklı kayıplı cisme gönderildiğinde büyük cismin çevresi ve çeperi daha büyük olduğundan alanların dağılacağı yer mevcuttur ve merkezdeki boşluk artar. Küçük cisimler ise aynı şiddette gelen bir alan için merkezlerinde daha küçük bir boşluk oluştururlar.

Ancak 1 GHz frekansında fark oranları çok düşük olduğundan cismin elektriksel davranışları ile ilgili yorum yapmak zorlaşır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada iki boyutlu kayıplı cisimlerin Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik (KFİE) Metodu ile analizi gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik benzetim problemlerinin çözümü için yeni ve etkili bir yaklaşım olan KFİE yöntemi bugüne kadar ideal yani kayıpsız cisimler üzerinde test edilmiştir. Öz iletkenlik katsayısının (σ) cismin dielektrik geçirgenlik sabitine (ϵ) eklenmesi ile cisim mükemmel dielektrikten kayıplı dielektrik kategorisine geçer ve böylece Radar Kesit Alanı (RKA) sonuçları ile cisim üzerindeki elektrik ve manyetik alanların dağılımı değişir. Artırılan kayıp oranları ile cisim iyi iletken sınıfına girer ve bu deri etkisi ile birlikte elektromanyetik alanların cismin çeperinde toplanmasına neden olur.

Saçılım problemlerinde saçılan alanlar elektrik ve manyetik potansiyellerle, bu potansiyeller ise elektrik ve manyetik alanlarla ilişkilidir. İntegral hesaplamalarında bu alanlar Hankel fonksiyonu, uzaklık vektörleri ve ortam parametreleri ile kullanılır. Elektromanyetik problemlerin nümerik yöntemler ile çözümünde cisim ilk olarak belirli sayıda üçgen ile ayrıştırılır. Ardından bilinen açılım fonksiyonları ile elektrik ve manyetik akım değerleri açılır. Hankel fonksiyonu, kaynak ve gözlem noktaları (yani üçgenleri) arası uzaklık ve ortam katsayıları çarpanları doğrusal denkleme eklenerek elektrik ve manyetik alan vektörleri bulunur. Son adımda da bilinen test fonksiyonları ile bilinmeyen sayısı kadar test edilen problem Z_{mn} kare empedans matrisini verir.

Elektromanyetik problemlerin geniş bant çözümlerinde yukarıda bahsedilen yöntemin her bir test frekansında tekrarlanması gerekmektedir. Bu durum zaman ve kaynak kullanımının artmasına yol açmaktadır. Bu tezde kullanılan KFİE yöntemi kayıpsız dielektrik cisimlerin geniş bant problemlerinde bir frekansta bulunan matrislerin diğer frekanslar için basit cebirsel işlemlerle tekrar kullanılabildiğini ve bu sayede problem çözümlerinde zaman ve bellek gereksinimlerinin azaldığını göstermiştir.

Bu noktada KFİE algoritmasında ortam parametrelerinden ϵ elektrik geçirgenlik katsayısı $\epsilon' - j\epsilon''$ karmaşık sayısı halinde yazılarak cismin kayıplı olduğu durum incelenebilir. Herhangi bir cisim üzerindeki elektromanyetik alanların dağılımında ortam parametreleri, çalışma frekansı ve cismin elektriksel boyutu rol oynar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta σ değerinin değiştirilmesi durumunda cisim içindeki dalga boyunun değişecek olması ve cismin elektriksel boyutunun farklı bir değer alacak olmasıdır. Doğru bir karşılaştırma için yalnızca tek bir parametrenin değiştirilip diğerlerinin aynı kalması önemlidir. Bu durumda kayıp oranının artmasının alanlar ve RKA sonuçlarında gerçekleştirdiği etkinin görülmesi için cismi oluşturan üçgenlerin yerleri cismin elektriksel boyutu aynı kalacak biçimde güncellenmiştir. Böylece σ artışı ile elektriksel boyutları sabit bir cisim üzerindeki alanların çeperlere kaydığı KFİE ile gösterilmiştir. RKA sonuçlarında ise kayıp oranlarının artması ile düzleşme görülmüştür. Buna ek olarak σ değerindeki artışın gerçek boyutları sabit olan cisimlerin elektriksel boyutları küçülse dahi nasıl davranacağı incelenmiştir.

Bu tez çalışmasında homojen olmayan cisimlerin de analizi yapılmış ve kayıpsız ortamlarda farklı elektrik geçirgenlik katsayısına sahip bölgelerdeki alan şiddetinin değişimi gösterilmiştir. Bu cisimlerde de artan öz iletkenlik katsayısı ile karmaşık elektrik geçirgenlik katsayısının sanal kısmını baskın hale geldiği ve böylece homojen olmayan alanlar arasındaki şiddet farkının azaldığı görülmüştür. Homojen olmayan cisimlerin incelendiği duruma örnek olarak parçalı kare problemi verildiğinden aynı zamanda köşelerin etkisi ile kırınım özelliği de alanlar üzerinde görülmüştür. Kayıpların artması ile beraber homojen olmayan cisimde de deri etkisi gözlenmiştir.

KFİE yönteminin avantajlı olduğu geniş bant çözümleri kayıplı cisimlere uygulanmış ve zaman ve bellek gereksinimlerindeki azalma daha önceki çalışmalarla uyumlu çıkmıştır. Geniş bant çalışmaları kapsamında farklı elektriksel boyutlardaki cisimler çeşitli σ değerlerinde test edilmiş ardından da 3 farklı üçgen sayısı ile modellenen cisimlerin fark oranları bulunmuştur. Üçgen sayısındaki artışın beklendiği gibi fark oranlarını düşürdüğü gözlenmiştir. Cisim iyi iletken durumuna geldiğinde ise çeperlerde sıkışan alanlar neticesinde RKA fark oranlarında artış gözlenmiş ve σ değeri arttığında farkın yükselmemesi için üçgen sayısının da arttırılması gerektiği anlaşılmıştır. RKA fark oranları ile paralel biçimde $\mathbf{E}_z$ alan vektör farkları da hesaplanmış ve benzer grafikler elde edilmiştir. Son olarak $\mathbf{E}_z$ alan vektörlerinin farklı frekans, σ ve büyüklük parametreleri için fark grafikleri cisim üzerindeki her bir üçgen için hesaplanmış ve gösterilmiştir. Burada bulunan sonuçlar teorik öngörüler ile örtüşmektedir.

Sonuç olarak KFİE algoritmasının iki boyutlu kayıplı cisimlere uygulanmasının mümkün olduğu ortaya çıkmış, Moment Metodu ile yapılan karşılaştırmalarda fark oranları hesaplanarak doğruluk payının yüksek olması için gerekli koşullar gösterilmiştir.

İletkenlik değerinin sanal kısmı arttıkça saçıcıda deri etkisi giderek artmakta ve akım yüzeye yaklaşmaktadır. Bu da problemi temel olarak bir yüzey problemi haline getirmektedir. Ancak KFİE’de hacim bilinmeyenleri de bulunup sayıları yüzey bilinmeyenlerinden formülasyonun gereği olarak çok daha fazla olduğu için nümerik fark oluşmaktadır. Bu koşullar altında dahi fark grafikleri değerlendirildiğinde KFİE’nin makul bir bant genişliğinde kabul edilebilir fark limitleri içinde kaldığı ve dolayısıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda mükemmel elektrik iletken formülasyonu ile oluşturulacak KFİE algoritması ile yüzey akımları kullanılarak çok yüksek σ değerlerinin mükemmel iletken sonuçlarına yaklaştığı gösterilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Pozar, David M. *Microwave Engineering*. Hoboken, NJ :Wiley, **2012**, 3. Baskı
- [2] Cheng D.K., *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*, Pearson, **1992**, ISBN-10: 0201566117
- [3] Matthew N., O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, Oxford, **2007**, 4. Baskı
- [4] Harrington, Roger F, Harrington, Jan L, *Field computation by moment methods*, Oxford University Press, **1996**.
- [5] R. F. Harrington, Matrix Methods for Field Problems, *Proceedings of the IEEE*, vol.55, no. 2, Şubat **1967**
- [6] M.M.Ney, Method of Moments as Applied to Electromagnetic Problems, *Microwave Theory and Techniques IEEE Transactions*, vol. 33, pp. 972-980, **1985**, ISSN 0018-9480.
- [7] Balanis C. A., *Antenna Theory Analysis and Design*, Wiley, **2005**, 3. Baskı
- [8] Koksall, A., Shifted-Frequency Internal Equivalence, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 46, 1, 76-81, Jan, **1988**
- [9] Unal, A., Koksall, A, (**2016**) “Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik Algoritmasının İki Boyutlu Elektromanyetik Saçılma Problemlerinde Başarımının İncelenmesi”, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi
- [10] Unal,A., Ozdemir S., Koksall A., " Application of Shifted Frequency Internal Equivalence to Multifrequency Scattering Problems”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol 65, Issue 9,**2017**
- [11] R., Curiac, I.R., Ciric, “Analysis of Wave Scattering by a Lossy Dielectric Using Single Source Surface Integral Equations”, *IEEE CCECE 2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings*

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Buğra AYDEMİR
Doğum Yeri : Ankara
Medeni Hali : Evli
E-posta : aydemirbugra@gmail.com
Adresi : Etlik mah. Çerçi sk. No:11/21, Keçiören/Ankara

Eğitim

Lise : Ankara Fen Lisesi
Lisans : Bilkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : Çok İyi
Fransızca : Çok İyi

İş Deneyimi

2011-2013 :ENSIL, Limoges, Fransa
2013 :Ethertronics SAS, Antibes, Fransa-Anten Mühendisi
2014 :Engitek Mühendislik, Ankara-Anten Mühendisi
2015-.... :STM A.Ş., Ankara-Danışman

Deneyim Alanları

Anten ve Mikrodalga Uygulamaları
Nümerik Elektromanyetik
Sinyal Analiz

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınları

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

Aydemir, B., Köksal, A.,

Kaydırılmış Frekansta İç Eşdeğerlik Metodunun İki Boyutlu Kayıplı Cisimlere Uygulanması

URSI 2018, Konya, Türkiye, 2018



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTÖRA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih:07/07/2018

Tez Başlığı : KAYDIRILMIŞ FREKANSTA İÇ EŞDEĞERLİK METODUNUN İKİ BOYUTLU KAYIPLI CİSİMLERE UYGULANMASI

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 60 sayfalık kısmına ilişkin, 07/07/2018 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %6'dır.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç ✓
- 2- Alıntılar ~~hariç~~/dâhil ✓
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Buğra AYDEMİR
Öğrenci No: N14229634
Anabilim Dalı: ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
Programı: TEZLİ YÜKSEK LİSANS
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

07/07/2018

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

(Prof. Dr. Adnan KÖKSAL)