

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

114384

İKİ BOYUTLU MİKROSTRİP HATLARIN
ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR (FDTD)
METODU İLE ANALİZİ

Yavuz EROL

FİYAHİ
DOKUMANTASYON MERKEZİ

114384

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. ANABİLİM DALI

ELAZIĞ
2001

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İKİ BOYUTLU MİKROSTRİP HATLARIN
ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR (FDTD)
METODU İLE ANALİZİ**

Yavuz EROL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH. ANABİLİM DALI**

Bu tez, 01.08.2001..... Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Üyeleri
Taraflından Oybirliği/Oyçokluğu ile Başarılı/Başarisız Olarak Değerlendirilmiştir.

(İmza)

Danışman
Hasan N. ALPK
Enformatik Bölüm Başkanı

O. Güneş
(İmza)

Üye
Doç. Dr. Osman ÖZCAN

S. Aksoy
(İmza)
Üye
Yrd. Doç. Dr. Filizet ATA

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../.....
tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İKİ BOYUTLU MİKROSTRİP HATLARIN ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR (FDTD) METODU İLE ANALİZİ

Yavuz EROL

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
2001, Sayfa : 67

Bu tezde elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan sayısal yöntemlerden biri olan Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) metodu ile iki boyutlu mikrostrip hatların analizi için gerekli ön bilgiler verilerek iki boyutta elektromanyetik dalga yayılımının zamana bağlı değişimi incelenmiştir.

FDTD metodu ile elektromanyetik problemlerin çözümü yapılırken önce Maxwell denklemlerine ait rotasyonel bağıntıları Taylor serisinden faydalananarak merkezi sonlu farklar açılımı ile ayırtlaştırılmıştır. \vec{E} ve \vec{H} alanlarına ait denklemler uygun parametreler kullanılarak bilgisayarda iteratif olarak çözürtülmüş ve Yee hücresindeki her bir alan bileşenin zamana ve konuma göre değişimleri tek ve iki boyutlu yapırlarda incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yee Hücresi, FDTD, Mikrostrip Hat, Gauss Darbesi.

ABSTRACT**Master Thesis**

**The Analysis of Two Dimensional Microstrip Line
with the Finite Difference Time Domain (FDTD) Method**

Yavuz EROL

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering
2001, Page : 67

In this thesis, two dimensional time dependent electromagnetic wave propagation has been studied in order to analyse microstrip lines by using Finite Difference Time Domain Method, which is one of the methods used in electromagnetics.

When an electromagnetic problem is analysed by FDTD, first Maxwell equations are discretized by Taylor series, then discrete equations belong to \vec{E} and \vec{H} fields are iteratively solved by computers and finally fields components of the Yee cell are observed in one and two dimensional structures.

Key Words: Yee Cell, FDTD, Microstrip Line, Gaussian Pulse.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca bana yol gösteren, her zaman destek olan ve yardımcılarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan Hüseyin BALIK'a, e-mail yoluyla bilgi ve görüşlerinden yararlandığım Sayın Doç. Dr. Levent SEVGİ'ye, çalışmalarım sırasında yardımcılarını gördüğüm ve bilgi alışverişinde bulunduğum arkadaşım Arş. Gör. Ayhan AKBAL'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
SİMGELER	IX
KISALTMALAR	X
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL ELEKTROMANYETİK	2
2.1. Maxwell Denklemlerinin Elde Edilmesi	2
2.2. Elektromanyetik Dalgalar	4
2.3. Elektromanyetikte Kullanılan Sayısal Yöntemler	6
2.3.1. Sonlu Elemanlar (FE) Metodu	7
2.3.2. Parabolik Denklem (PE) Metodu	8
2.3.3. İntegral Denklem (IE) Metodu	8
2.3.4. Spektral Domen (SDM) Metodu	9
2.3.5. İletim Hattı Matrisi (TLM) Metodu	9
2.3.6. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu	10
3. ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR (FDTD) METODU	12
3.1. Giriş	12
3.2. FDTD İçin Temel Bağıntılar	13
3.3. FDTD Algoritması	14
3.4. FDTD Formülasyonu	15
3.5. Kararlılık	18
3.6. Sınır Şartları	18
3.7. Alt Izgaralama (Subgridding)	19
3.8. Gauss Fonksiyonu	19
3.9. FDTD Metodunun Uygulama Alanları	22
4. MİKROSTRİP HATLAR	23

5. FDTD METODU İLE TEK BOYUTLU SİMÜLASYON	26
5.1. Giriş	26
5.2. Serbest Uzayda Dalga Yayılımı	26
5.2.1. Simülasyon Sonuçları	32
5.3. Tek Boyutta Sınır Şartları	33
5.3.1. Simülasyon Sonuçları	33
5.4. Dielektrik Ortamda Dalga Yayılımı	33
5.4.1. Simülasyon Sonuçları	34
6. FDTD METODU İLE 2 BOYUTLU SİMÜLASYON	36
6.1. Giriş	36
6.2. İki Boyutta Modlar	37
6.2.1. TM Modu	37
6.2.2. TE Modu	37
6.3. TM Modu İçin Formülasyon	38
6.4. TE Modu İçin Formülasyon	38
6.5. TM Modu İçin Hücre Yerleşim Planı	39
6.6. İki Boyutlu Simülasyon Sonuçları	42
6.6.1. Gauss Darbesinin Yapının Merkezine Uygulanması	42
6.6.2. Gauss Darbesinin Bir Doğru Boyunca Uygulanması	51
6.6.3. İki Boyutlu Analizde Gauss Darbesinin Genliğinin Değişimi	59
6.7. FDTD Metodu İle Zaman ve Frekans Cevabının Elde Edilmesi	60
6.7.1. Zaman Cevabı	60
6.7.2. Frekans Cevabı	63
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	65
KAYNAKLAR.....	66

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Elektromanyetik dalganın \vec{E} ve \vec{H} bileşenleri	5
Şekil 2.2 : Frekans spektrumu	5
Şekil 2.3 : FE hücre yapısı	7
Şekil 2.4 : TLM hücresi	10
Şekil 2.5 : FDTD hücresi	11
Şekil 3.1 : Yıllara göre yayın sayısı	12
Şekil 3.2 : Birim Yee hücresi	13
Şekil 3.3 : FDTD algoritması için akış diyagramı	14
Şekil 3.4 : Gauss darbesi	20
Şekil 3.5 : Parametrelerin Gauss darbesine etkisi	20
Şekil 3.6 : Gauss darbesi ve fourier dönüşümü	21
Şekil 4.1 : Mikrostrip hat ve boyutları	23
Şekil 4.2 : Mikrostrip hattın yandan görünüsü	24
Şekil 5.1 : Tek boyutta alan bileşenlerinin yerleşimi	27
Şekil 5.2 : E_x ve H_y bileşenlerinin hesabında kullanılan alan bileşenleri	29
Şekil 5.3 : E_x ve H_y alanlarının zaman ve konuma göre yerleşimi	29
Şekil 5.4 : Tek boyutta alan bileşenlerinin konuma göre yerleşimi	30
Şekil 5.5 : 100 zaman adımı sonunda E_x ve H_y alanlarının durumu	31
Şekil 5.6 : Sınır şartları yokken $T = 80, 100, 200, 300, 400, 500$ ve 15000 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	32
Şekil 5.7 : Sınır şartları varken $T = 80, 100, 200, 225$ ve 250 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	34
Şekil 5.8 : Tek boyutlu yapıda dielektrik malzemenin yeri	34
Şekil 5.9 : 1 - 50 nolu hücreler arasında dielektrik sabiti 4 olan bir malzeme varken $T= 80, 100, 140, 180, 250, 400$ ve 500 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu.....	35
Şekil 6.1 : TM modu için 2 boyutta alan bileşenlerinin yerleşimi	39
Şekil 6.2 : İki boyutlu analiz için problem uzayının izgaralara ayrılması	42
Şekil 6.3 : 10 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	43
Şekil 6.4 : 20 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	43
Şekil 6.5 : 30 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	44
Şekil 6.6 : 40 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	44
Şekil 6.7 : 50 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	45
Şekil 6.8 : 60 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	45

Şekil 6.9 : 70 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	46
Şekil 6.10 : 80 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	46
Şekil 6.11 : 90 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	47
Şekil 6.12 : 100 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	47
Şekil 6.13 : 110 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	48
Şekil 6.14 : 120 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	48
Şekil 6.15 : 130 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	49
Şekil 6.16 : 140 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	49
Şekil 6.17 : 150 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	50
Şekil 6.18 : 160 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	50
Şekil 6.19 : 10 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	51
Şekil 6.20 : 20 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	52
Şekil 6.21 : 30 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	52
Şekil 6.22 : 40 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	53
Şekil 6.23 : 50 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	53
Şekil 6.24 : 60 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	54
Şekil 6.25 : 70 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	54
Şekil 6.26 : 80 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	55
Şekil 6.27 : 90 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	55
Şekil 6.28 : 100 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	56
Şekil 6.29 : 110 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	56
Şekil 6.30 : 120 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	57
Şekil 6.31 : 130 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	57
Şekil 6.32 : 140 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	58
Şekil 6.33 : 150 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu	58
Şekil 6.34 : Silindirik dağılım nedeniyle pulsın genliğinin zamanla azalması	59
Şekil 6.35 : Doğru boyunca kaynak uygulandığında pulsın genliğinin değişimi	60
Şekil 6.36 : 2 boyutlu yapıda gözlem noktaları	61
Şekil 6.37 : A, B, C ve D gözlem noktalarındaki E_z alan bileşenlerinin zamana bağlı değişimi	62
Şekil 6.38 : A, B, C ve D gözlem noktalarındaki E_z alan bileşenlerinin zamana bağlı değişimi	63
Şekil 6.39 : İki boyutlu yapıda zaman ve frekans cevabı	64

SİMGELER

- \vec{E} : Elektrik alan
 \vec{H} : Manyetik alan
 \vec{B} : Manyetik akı yoğunluğu
 ϕ : Manyetik akı
 q : Yük miktarı
 ρ : Yük yoğunluğu
 I : Elektriksel akım
 J : Akım yoğunluğu
 σ : İletkenlik
 μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği
 ϵ_0 : Boşluğun dielektrik sabiti
 μ_r : Malzemenin bağıl geçirgenliği
 ϵ_r : Malzemenin bağıl dielektrik sabiti
 c : Işık hızı
 λ : Dalga boyu
 f : Frekans
 t : Zaman
 Δt : Zaman adımı
 Z_0 : Karakteristik empedans
 $d\ell$: Birim uzunluk
 dS : Birim yüzey
 dV : Birim hacim
 ∇ : Nabla operatörü
 $\vec{A} \cdot \vec{B}$: A ve B vektörleri için skaler çarpım
 $\vec{A} \times \vec{B}$: A ve B vektörleri için vektörel çarpım

KISALTMALAR

ABC	: Emici Sınır Şartı (Absorbing Boundary Condition)
FDTD	: Zaman Domeninde Sonlu Farklar (Finite Difference Time Domain)
FE	: Sonlu Elemanlar (Finite Element)
PE	: Parabolik Denklem (Parabolic Equation)
İE	: İntegral Denklem (Integral Equation)
PML	: Tam Benzeşimli Tabaka (Perfectly Matched Layer)
SDM	: Frekans Domen Metodu (Spectral Domain Method)
TLM	: İletim Hattı Matrisi (Transmission Line Matrix)
TE	: Enine Elektrik (Transverse Electric)
TM	: Enine Manyetik (Transverse Magnetic)

1.GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknoloji ve bilgi birikimi sayesinde her geçen gün yeni elektronik cihazlar üretilmekte ve mevcut frekans bandının yetersiz kalması nedeniyle üreticiler yüksek frekanslara yönelmektedirler. Yüksek frekans kullanıldığında ise cihazların boyutları küçülmekte ve cihaz boyutu ile dalga boyu artık karşılaştırılabilcek seviyelere gelmektedir. Frekansın GHz'ler mertebesine ulaşığı mikro ölçekli bu cihazlarda meydana gelen elektromanyetik dalga propagasyonu, yansımıma, kırılma, girişim gibi karmaşık olayların anlaşılabilmesi, ancak olayların fiziğinin doğru anlaşılmasıyla mümkündür. Analitik olarak çözülmesi çok zor olan bu tip problemlerin çözümü, yüksek teknoloji kullanılarak hazırlanmış ölçüme düzenekleriyle veya güçlü algoritmalar kullanan sayısal modelleme teknikleriyle yapılmaktadır. Deneysel ölçüm yöntemlerinin pahalılığı nedeniyle bu karmaşık problemlerin analizinde çok hızlı ve yüksek kapasiteli bilgisayarlar kullanan sayısal modelleme teknikleri tercih edilmektedir. Böylece hem zamanдан hem de paradan tasarruf sağlanmakta ve aynı zamanda deneysel yöntemlerle elde edilmesi mümkün olmayan bilgiler elde edilmektedir. Bu durumda sayısal modelleme teknikleriyle uğraşan mikrodalga mühendislerinin programlama, işaret işleme ve elektromanyetik teori hakkında çok iyi bilgi sahibi olması gerekmektedir.

Bu tezde mikrostrip yapılarda elektromanyetik dalga propagasyonun analizini yapmak için gerekli ön bilgiler verilecek ve 2 boyutlu FDTD denklemleri çözdürülerek zaman ve frekans analizi yapılacaktır. Bu amaçla tezin 2. bölümünde Maxwell denklemleri ve elektromanyetik dalgalar hakkında temel bilgiler ile mevcut sayısal yöntemler verilmiş, 3. bölümde FDTD metodunun ayrıntıları üzerinde durulmuş, 4. bölümde mikrostrip hatların yapıları ve özellikleri anlatılmış, 5. ve 6. bölümlerde ise sırasıyla tek ve iki boyutlu simülasyon teknikleri ve sonuçları verilmiştir. Son bölümde de bu tezin ışığında ilerlenebilecek yollar ve çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. TEMEL ELEKTROMANYETİK

2.1. Maxwell Denklemlerinin Elde Edilmesi

Elektromanyetizma biliminin kurucularından James Clerk Maxwell'in o zamana kadar birbirinden ayrı olarak düşünülen elektrik ve manyetizma yasalarını sistemli bir bütünlük içinde matematiksel bir yapıya kavuşturmasıyla elektromanyetizma kuramının temelleri atılmıştır (Griffiths,1991). Maxwell, değişken elektrik ve manyetik alanların birbirlerinden ayrı olarak var olamayacağını göstermiş, elektromanyetik alan ve dalga kavramlarını geliştirmiştir. Ortaya koyulan bu denklemlerle, uzayın herhangi bir noktasında ve zamanın herhangi bir anında elektrik ve manyetik alan değerler birbirine bağlanmıştır. Bunun sonucu olarak elektromanyetik dalgalar Maxwell denklemleriyle tanımlanabilirler.

Temel elektrik ve manyetizma yasaları yeniden düzenlenliğinde 4 adet Maxwell denklemi elde edilir. Gauss Yasasına göre bir yüzey parçası üzerindeki \vec{E} alanının akısı ($\int \vec{E} \cdot d\vec{S}$), o yüzeyi kesen çizgilerin sayısıyla orantılıdır. Burada, bir yükü çevreleyen kapalı bir yüzeyden geçen akı q/ϵ_0 ile verilir. Böylece,

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.1)$$

olur. (2.1)'de q yükü kapalı yüzey içinde kalan yüklerin toplamıdır. Bu yüzeyin dışında kalan bir yükün akiya katkısı sıfır olur çünkü, bu yüklerin alan çizgileri yüzeyin bir yerinden girip başka bir yerinden çıkarlar. (2.1) ifadesine diverjans teoremi uygulanırsa,

$$\oint_{yüzey} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \int_{hacim} (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (2.2)$$

olur. Burada $q = \int \rho dV$ olduğundan (2.2) denklemi,

$$\int (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{\int \rho dV}{\epsilon_0} \quad (2.3)$$

haline gelir. Gerekli düzenlemeler yapılarsa Maxwell'in 1. denklemi;

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.4)$$

şeklinde bulunur.

Manyetizma için Gauss kanunu doğada izole edilmiş manyetik tek kutupların var olamayacağını gösterir. Yani herhangi bir kapalı yüzey boyunca manyetik akı sıfırdır. Buna göre,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (2.5)$$

dir. Bu ifade için de benzer şekilde diverjans teoremi alınırsa 2.Maxwell denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.6)$$

Faraday kanununa göre, sabit bir manyetik alan içinde hareket ettirilen iletken çerçevede bir gerilim induklenir ve bu induklenen gerilim;

$$emk = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

ile verilir. Bu kanununun integral ifadesi

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.8)$$

dir. Bu denkleme (2.9)'da verilen Stokes teoremi uygulanır ve gerekli düzenlemeler yapılınrsa (2.10) denklemi elde edilir.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} \quad (2.9)$$

$$-\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (2.10)$$

Böylelikle 3. Maxwell denklemi aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.11)$$

(2.11)'e göre manyetik alanın zamana bağlı değişimi elektrik alan meydana getirir.

Amper kanununa göre,

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I \quad (2.12)$$

dir. Burada $I = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$ olduğundan, Stokes teoremine göre,

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \mu_0 \cdot \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (2.13)$$

olur. Buradan da 4. Maxwell denklemi (2.14)'deki gibi elde edilir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J} + \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.14)$$

(2.14)'e göre manyetik alanın oluşması için ya elektrik alanının zamana bağlı olarak değişmesi ya da bir akımın varlığı gereklidir.

Boşlukta ρ yük yoğunluğu ve J akım yoğunluğu sıfır olduğundan elde edilen 4 adet Maxwell denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.15) \qquad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.17) \qquad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.18)$$

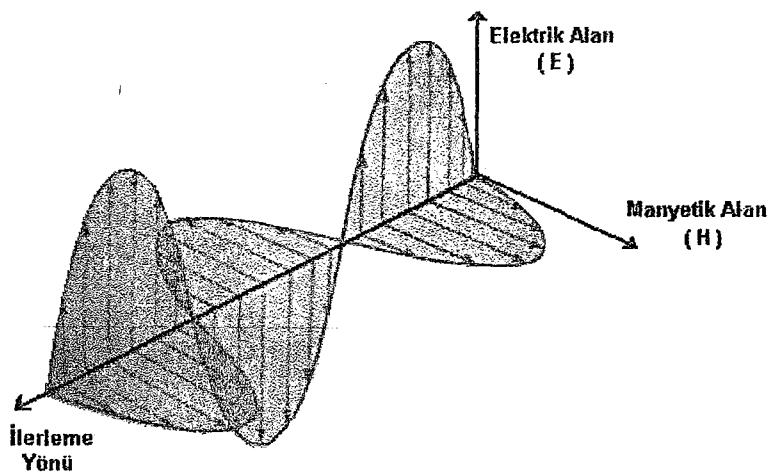
2.2. Elektromanyetik Dalgalar

Durgun bir yük sadece \vec{E} elektrik alanı oluştururken, hareketli bir yük elektrik alana ek olarak bir de manyetik alan oluşturur. Eğer zamanla değişim yoksa, elektrik alan ve manyetik alan birbirlerinden bağımsız olarak bulunabilirler. Yani durgun bir yük veya düzgün doğrusal hareket yapan bir yük elektromanyetik dalga yayınlamaz.

Elektromanyetik dalga oluşması için yükün ivmelenmesi gereklidir. Zamanla değişim gösteren durumlarda, elektrik alan ve manyetik alan birbirine tamamen bağlıdır. Yani elektrik alan değişimini manyetik alan oluşturur, benzer şekilde manyetik alan değişimini de elektrik alan oluşturur.

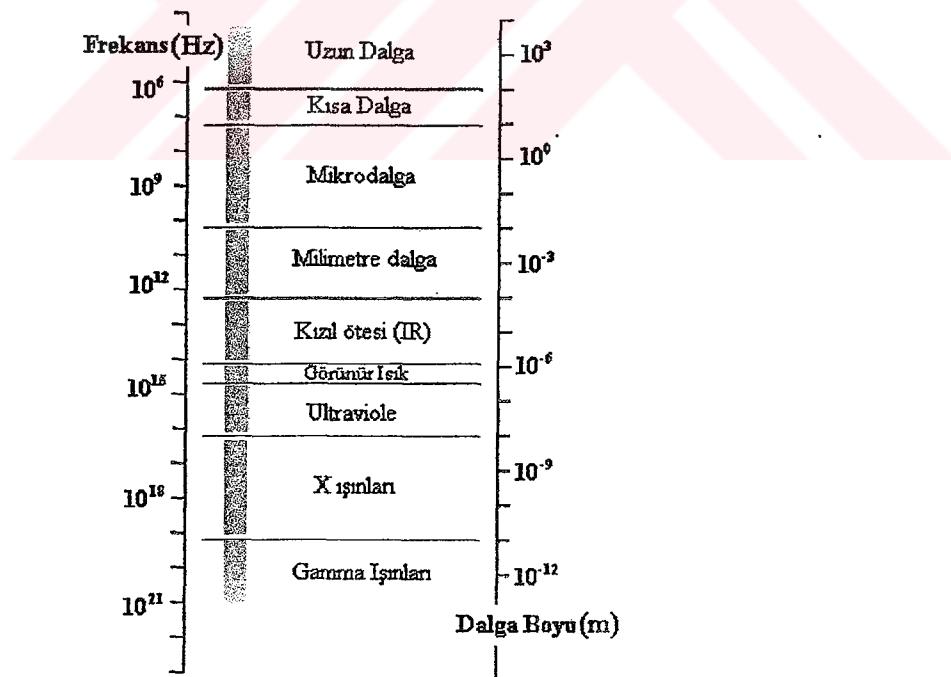
Değişken bir elektrik alanına her zaman bir manyetik alan, değişken bir manyetik alana da her zaman bir elektrik alan eşlik eder. Boşlukta bu iki alan birbirine diktir ve elektromanyetik dalga, doğrultusu her iki alana da dik olacak şekilde yayılır (Şekil 2.1).

Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızıyla yayılır ve Maxwell denklemleriyle tanımlanır. Elektromanyetik dalgaların farklılığı dalga boylarının farklı olmasından kaynaklanır. $\lambda = c/f$ bağıntısına göre frekans arttıkça dalga boyu küçülür ve frekans azaldıkça dalga boyu büyür.



Şekil 2.1 : Elektromanyetik dalganın \vec{E} ve \vec{H} bileşenleri.

Elektromanyetik dalgalar çok düşük frekanslardan çok yüksek frekanslara kadar uzanır. Bu nedenle elektromanyetik spektrum geniş bir frekans aralığını kapsar (Şekil 2.2). Bütün elektromanyetik dalgalar spektrumun hangi bölgesinde olursa olsun boşlukta daima ışık hızında hareket eder. Gama ışınları, X ışınları, ultraviole, kızılötesi, mikrodalga, radyo dalgaları gibi çeşitleri olan elektromanyetik dalgalar, 100 Hz ile 10^{22} Hz arasında çok geniş bir frekans aralığına sahiptir.



Şekil 2.2 : Frekans spektrumu

2.3. Elektromanyetikte Kullanılan Sayısal Yöntemler

Elektromanyetik problemlerin çözümünde analitik yöntemler, sayısal yöntemler ve deney sonuçları kullanılmaktadır. Bilgisayar hızlarının ve hafızalarının yeterli olmadığı yıllarda analitik yöntemlere ağırlık verilmiş ve bir çok problem incelenmiştir. Analitik çözüm elde etmenin mümkün olmadığı yapılar için ise deneysel yöntemler ve ölçümler tercih edilmiştir.

1980'lerde bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak karmaşık yapıların analizinde sayısal yöntemler kullanılmaya başlanmıştır. 1990'lardan itibaren doğru, verimli ve hızlı çözümler üretebilecek algoritmalar geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan pek çok sayısal yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları problemi zaman domeninde, bazıları da frekans domeninde çözer. Doğruluk ve hız daima sayısal yöntemlerde bir denge içindedir. Bazı teknikler hızlı olmasına rağmen özellikle kompleks yüksek frekans devrelerinde doğru sonuçlar vermez. Yüksek frekansta tam dalga çözümlerinin yapılması gereklidir. Tam dalga çözüm içeren sayısal yöntemler doğru sonuç vermelerine rağmen hem yavaş hem de fazla bilgisayar kaynaklarına ihtiyaç duyar. Günümüz elektromanyetik araştırmacılarından istenen basit tekniklerin hızına ve tam dalga tekniklerinin doğruluğuna sahip bir teknik geliştirmektir. Bilgisayardaki hızlı gelişmeler bu sorunu çözmez çünkü mikrodalga devrelerindeki hızlı kompleksleşme bilgisayardaki gelişmelerin önüne geçmektedir. Sonuçta araştırmacılara her zaman büyük iş düşer.

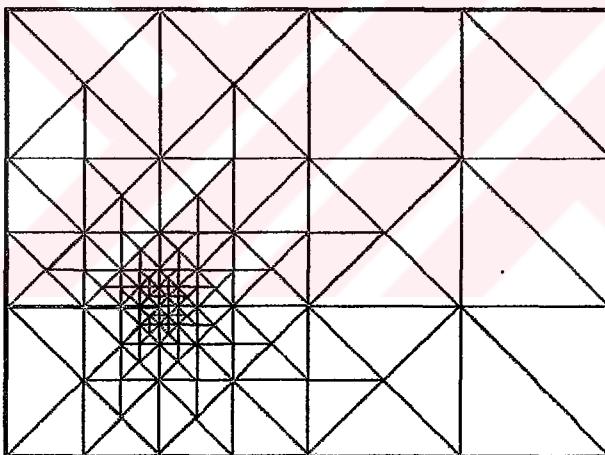
Elektromanyetikte kullanılan sayısal yöntemlerden bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir. Bunlar kullanılan tüm teknikleri içermeyip sadece genel bir görüş vermesi için verilmiştir.

- ◆ Sonlu Elemanlar (FE) Metodu
- ◆ Parabolik Denklem (PE) Metodu
- ◆ İntegral Denklem (IE) Metodu
- ◆ Spektral Domen (SDM) Metodu
- ◆ İletim Hattı Matrisi (TLM) Metodu
- ◆ Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

2.3.1. Sonlu Elemanlar (FE) Metodu

Sonlu elemanlar yöntemi pek çok mühendislik dalında, malzemelerin ve yapısal problemlerin analizinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, karmaşık sınır koşulları nedeniyle tüm çözüm bölgesi için bir potansiyel fonksiyonu bulmanın mümkün olmadığı durumlarda, çözümün sonlu küçük elemanlar içinde aranmasına dayanır. Çözüm için, elemanların geometrik yapısı aynı kalmak koşulu ile tüm çözüm bölgesi aynı geometrik elemanlara bölünür. Bu geometrik elemanlar üçgen, dörtgen ve benzeri şekiller olabilir. Düzensiz şekillerde ve gelişmiş güzel böülümlendirmelerde üçgen elemanlar kolaylık sağlar (Şekil 2.3). Böyle elemanlar sınır yüzeylere kolayca uygulanabilir (Kürüm, 1990).

Bu yöntemde elemanlar içinde tanımlanan yaklaşık potansiyel fonksiyonu sonsuz sayıda terim içermeyeceği için bir kesme hatası vardır.



Şekil 2.3 : FE hücre yapısı

Sonlu elemanlar yöntemi manyetik ve elektrostatikteki kompleks nonlineer problemlerin çözümünde, homojen olmayan kompleks yapıların analizinde ve 3 boyutlu elektromanyetik radyasyon problemlerinin analizinde kullanılmaktadır (Hubing, 1991).

2.3.2. Parabolik Denklem (PE) Metodu

Dalga iletimi problemlerinde yaygın olarak kullanılan bu yöntemde parabolik formdaki dalga denklemi Fourier dönüşümü kullanılarak sayısal olarak çözdürülür. Yöntem ilk olarak Leontovich ve Fock tarafından ortaya atılmıştır. Başlangıçta, özellikle 2 boyutlu dalga iletimi problemlerine uygulanan PE yöntemi günümüzde hem 2 hem de 3 boyutlu elektromanyetik ve akustik birçok karmaşık probleme uygulanmaktadır.

Parabolik dalga denklemi, tek yönde ilerleyen dalga hareketlerini incelediğinden, PE yöntemi ile geriye yansımaların olmadığı ya da önemsiz sayılabilen problemler ele alınabilir. Yine PE yöntemi bir ilk değer problemini modellediğinden, dalga iletimi problemlerinde sınır koşullarının ayrıca ele alınması gereklidir. İki yönlü dalga hareketlerini modelleyen Helmholtz dalga denklemi için de PE yöntemi kullanılmaktadır.

PE yöntemi hızlı Fourier dönüşümleri ile adım adım uzay-dalga sayısı domenlerine geçişlere dayanır. Bu nedenle özellikle sayısal Fourier dönüşümlerinde söz konusu olan spektral sızıntı ve örtüşme gibi etkilerin göz önünde tutulması ve bunların giderilmesi için gerekli önlemlerin alınması gereklidir (Sevgi, 1999).

Parabolik denklem metodu ile günümüzde 2 ve 3 boyutlu elektromanyetik problemlerin ve yeryüzünde elektromanyetik dalga iletiminin analizi yapılmaktadır.

2.3.3. İntegral Denklem (IE) Metodu

İntegral denklem metodu 3 boyutlu yapıların yüzey akım yoğunluğu ile ilgilenen ve Green fonksiyonlarını kullanan tam dalga tekniklerden biridir. Esas olarak bu yöntem integral denklemlerin çözümü aracılığıyla konum domeninde elde edilen iletkende akan yüzey akımlarının hesabını içerir (Shorthouse, 1992). Bu metod genellikle ön işlemler gerektirir ve bazen kapalı form çözümleri kullanılır. İntegral denklem formülasyonu iki farklı şekilde yazılabılır. Bunlar elektrik alan integral denklem ve manyetik alan integral denklemidir. Ancak manyetik alan integral denklemi entegre mikrostrip devreler için uygun değildir (Balık, 1997).

Integral denklem yöntemi ışıma ve kuplajın hesaba katıldığı 3 boyutlu alan çözümlerinde, mikrodalga ve milimetre dalga entegre devrelerin analizinde kullanılmaktadır.

2.3.4. Spektral Domen (SDM) Metodu

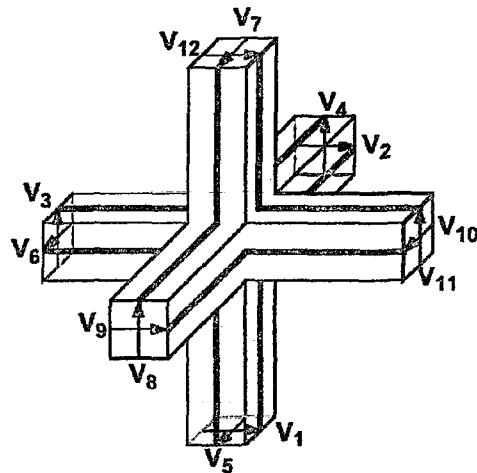
Spektral domen metodu Green fonksiyonlarını kullanarak frekans domeninde çözüm üreten bir yöntemdir. Bu yöntemde integral formdaki Green fonksiyonu cebirsel hale dönüştürülerek bilinmeyen akım yoğunluğu hesaplanır. Ancak düzlemsel mikrodalga devreler için integral denklem metodunun kullandığı konum domenindeki Green fonksiyonunun formu uygun değildir. Daha verimli bir yol bulmak için Green fonksiyonu spektral domenden konum domenine bir ters dönüşüm kullanmak zorundadır (Balık, 1997).

SDM kullanılmasının temel avantajı, konum domenindeki integral denklemin Fourier dönüşümünden sonra cebirsel formülasyona dönüşmesidir. SDM yöntemi, integral denklem yönteminin Fourier dönüşümü alınmış hali olduğundan gerekli analitik ön işlemlerin miktarı artmaktadır ancak daha verimli sonuçlar elde edilmektedir.

Bu yöntem mikrostrip hatların uç etkilerinin ve akım dağılımlarının analizinde, dalga klavuzu ve düzlemsel rezonatör anten analizinde ve pek çok elektromanyetik alan probleminin analizinde kullanılmaktadır.

2.3.5. İletim Hattı Matrisi (TLM) Metodu

İletim hattı matrisi metodu, alan teorisi-devre teorisi eşdeğerliğine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde FDTD metoduna benzer olarak analizi yapılacak olan yapı Şekil 2.4'deki gibi küçük hücrelere bölünerek her bir hücreye ait akım ve gerilim değerleri iteratif olarak hesaplanır. FDTD tekniğinde elektrik ve manyetik alan bileşenleri bağımsız değişken iken TLM tekniğinde gerilim ve akımlar bağımsız değişkendir (Sevgi, 1999).



Şekil 2.4 : TLM hücresi

TLM metodu ile Huygen's dalga modeli kullanılarak birbirine bağlı iletim hatları boyunca ilerleyen akım ve gerilim palslarının simülasyonu yapılır. Her hücrede zaman domeninde dalga iletimi giden ve yansıyan gerilimler ile temsil edilir. Bu yöntemde hatlar birbirine 3 boyutlu saçılma matrisi ile bağlıdır.

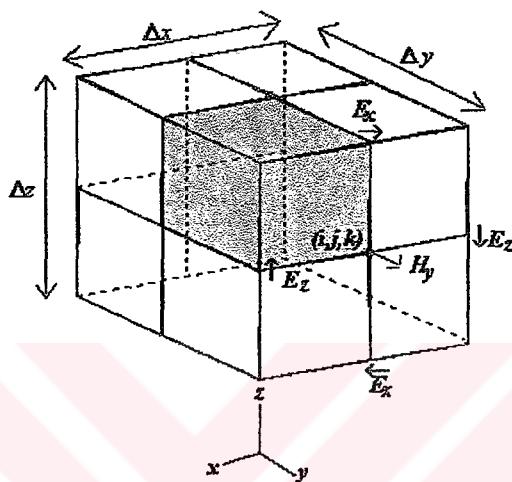
Bu yöntem FDTD metodu ile benzer avantaj ve sınırlamalara sahiptir. Dezavantaj ise kompleks yapıların ve düzgün olmayan alanların analizinde çok fazla hafızaya gereksinim duymasıdır.

TLM yöntemi mikrostrip hatların ve dalga klavuzlarının analizinde, elektromanyetik dalgaların biyolojik etkilerinin analizinde, EMC/EMI modellemede ve pek çok elektromanyetik problemin modellenmesinde kullanılmaktadır.

2.3.6. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) Metodu

Bu çalışmada seçilen yöntem FDTD metodudur. 1966 yılında Kane Yee tarafından ortaya atılan FDTD metodu, merkezi sonlu farklar açılımı kullanılarak ayrıklığılmış Maxwell denklemlerine ait zamana bağlı rotasyonel denklemlerini doğrudan zaman domeninde çözen bir yöntemdir (Yee, 1966).

Bu metod TLM yöntemine benzer olarak elektromanyetik dalga propagasyonunun zaman ve konum domeninde simülasyonunu yapar. Bu yöntemde, modellenen yapı Şekil 2.5'deki gibi çok küçük hücrelere bölünerek bütün hücrelerde elektrik ve manyetik alanın 3'er bileşeni iteratif olarak hesaplanır. Yapının modellenmesi ise simülasyon başlangıcında her bir hücreye ait ϵ , μ ve σ parametrelerinin belirlenmesiyle sağlanır.



Şekil 2.5: FDTD hücresi

FDTD metodu direk olarak zaman domeninde Maxwell denklemlerinin çözümünü verdiğinde ve modellenen yapıya göre formülasyonu değişmediğinden dolayı pek çok elektromanyetik problemin analizinde tercih edilmektedir. Analiz sonunda elde edilen zaman cevabının Fourier dönüşümü alınarak modellenen yapıının geniş bir aralıkta frekans cevabını elde etmek de mümkündür.

FDTD metodu iletken, dielektrik ve lineer olmayan kayıplı malzemelerde elektromanyetik dalga yayılımının analizinde, pek çok elektromanyetik problemin modellenmesinde, dielektrik dalga klavuzu, düzlemsel devreler, mikrostrip filtre ve kuplör analizinde, aktif ve pasif anten modellemesinde ve medikal elektronik alanında kullanılmaktadır.

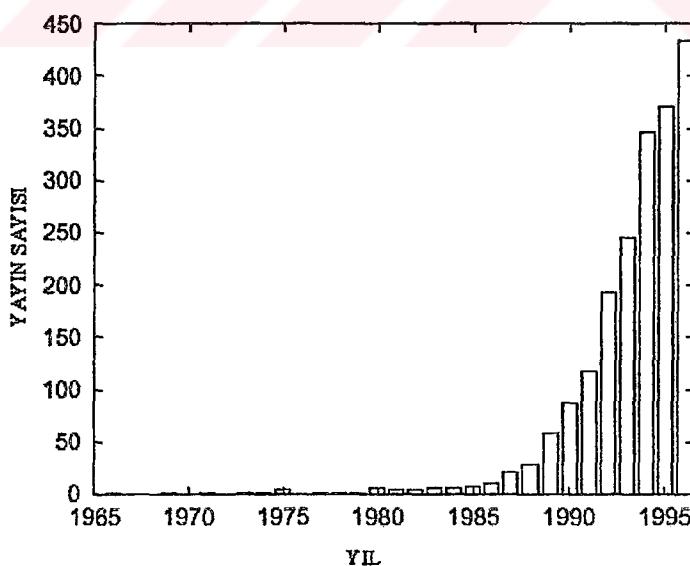
Bu bölümde sayısal yöntemler kısaca anlatılmıştır. Tez çalışması için seçilen FDTD metodunun ayrıntıları 3. bölümde verilecektir.

3. ZAMAN DOMENİNDE SONLU FARKLAR (FDTD) METODU

3.1. Giriş

Bu çalışmada mikrostrip hatların analizini yapmak için Zaman Domeninde Sonlu Farklar yöntemi seçilmiştir. Zaman Domeninde Sonlu Farklar (FDTD) yöntemi, elektromanyetik problemlerin çözümünde kullanılan en popüler sayısal yöntemlerden biridir. Bu metod 30 yılı aşkın bir süredir varolmasına rağmen, bilgisayar fiyatları düşmeye devam ettikçe, metodun popülaritesi artmaya devam edecektir. Ayrıca metodun geliştirilmesine yönelik yayınların artması da metodun çekiciliğini artırmaktadır. FDTD ile ilgili araştırma faaliyetlerinin çok fazla olmasından dolayı, FDTD literatürüne izlenmesi zor bir iştir.

İlk defa 1966'da Yee (Yee,1966) tarafından ortaya atılan FDTD metodu, Maxwell denklemlerinin diferansiyel formunu ayıklaştırmaya yarayan sade ve kullanışlı bir yöntemdir. Bununla birlikte orijinal FDTD metodundaki sorunlar, işlemci fiyatlarının azalmasıyla beraber azaltılmakta böylece metoda olan ilgi de buna paralel olarak artmaktadır. Gerçekten FDTD metodu ile ilgili yayınların sayısı Şekil 3.1'de görüldüğü gibi 1995 yılı baz alınırsa son 10 yılda yaklaşık exponansiyel olarak artmıştır (Shlager ve Schneider,1999).



Şekil 3.1 : Yıllara göre yayın sayısı

3.2. FDTD için Temel Bağıntılar

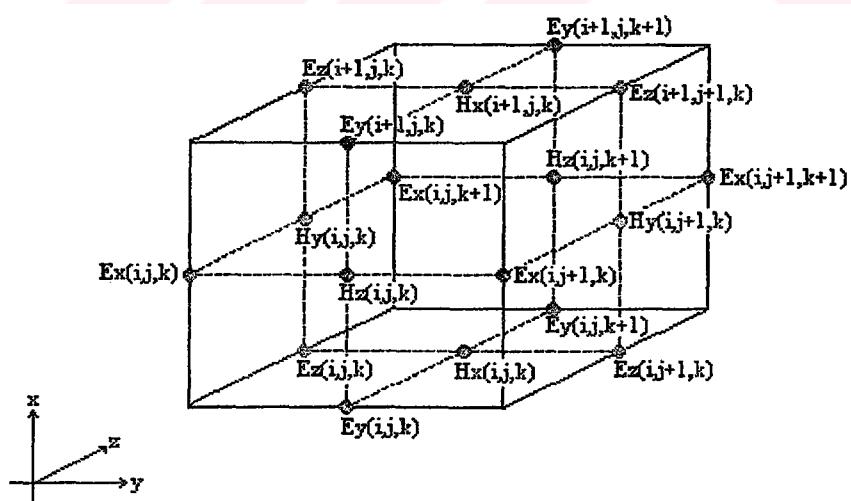
Bir önceki bölümde de söylendiği gibi FDTD, “zaman domeninde sonlu farklar” yöntemi olarak bilinir ve diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zaman domeninde ayrılaştırılıp çözülmesi esasına dayanır (Yee, 1966). İlk defa 1966 yılında Kane Yee tarafından ortaya atılan bu yöntem, uzayın seçilen ayrık noktalarında elektrik alan ve manyetik alanın 3'er bileşeninin hesaplanabilmesini sağlar.

Karmaşık olmasına rağmen, Maxwell denklemlerinin anlaşılmasını sağlamak ve bilgisayarda işlemleri yürütmek için denklemlerin uygun bir forma dönüştürülmesi gereklidir. İzole edilmiş yüklerin ve akımların olmadığı bir uzay bölgesi ele alınırsa Maxwell denklemleri şöyle yazılabilir.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (3.2)$$

FDTD yönteminde (3.1) ve (3.2)'de verilen \vec{E} ve \vec{H} alanlarına ait denklemler ayrılaştırılarak iteratif olarak çözüdürüllür. Bu amaçla, Yee tarafından önerilen Şekil 3.2'deki birim hücre kullanılarak 3 boyutta alan bileşenleri yerleştirilir (Yee, 1966).

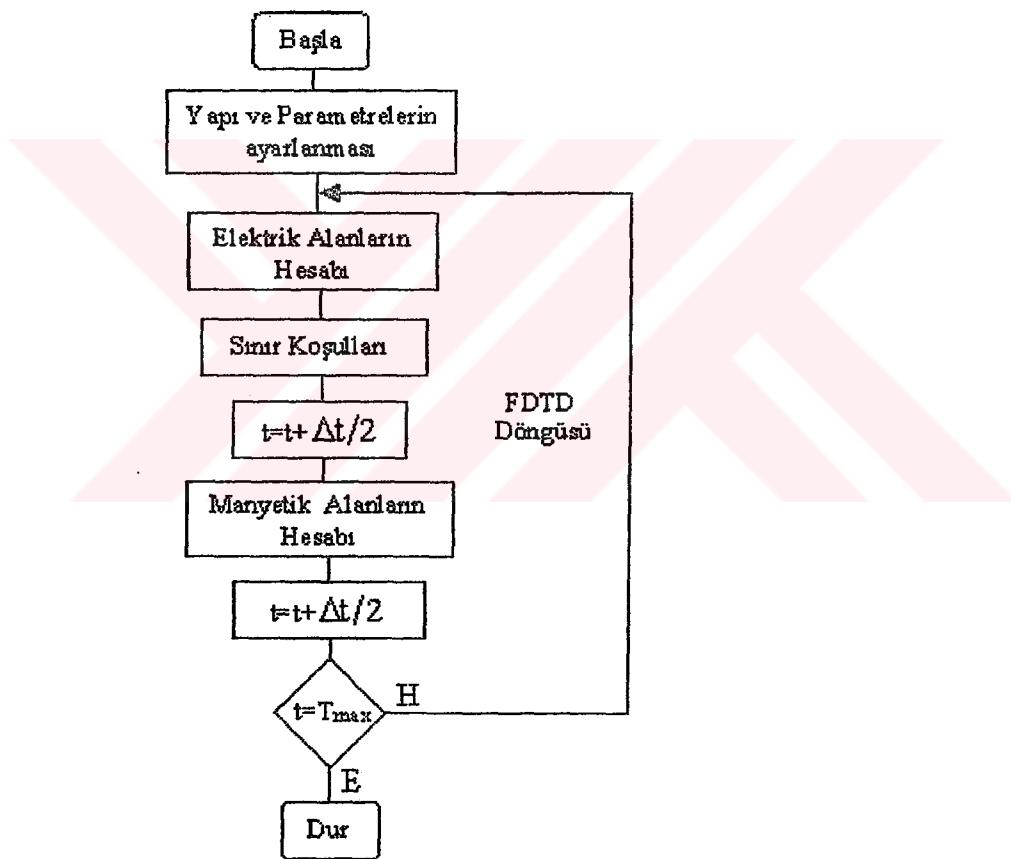


Şekil 3.2 : Birim Yee hüresi

3.3. FDTD Algoritması

Gerçek bir problemde malzeme, her biri belirli μ ve ϵ değerine sahip olan ve uygun bir şekilde boyutlandırılmış Yee hücrelerine bölünerek kolayca analiz edilebilir. Alan bileşenlerinin hepsi için başlangıç değeri verilir. Daha sonra uygun bir cevap elde edilene kadar alan denklemleri iteratif olarak çözüdürürlür.

\tilde{E} değerleri $t = n \cdot \Delta t$ 'de ve \tilde{H} değerleri $t = (n + 1/2)\Delta t$ 'de güncelleştirilir. Ana döngü, zaman döngüsüdür ve seçilen maksimum zaman adımı tamamlanıncaya kadar ana zaman döngüsü çalıştırılır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : FDTD algoritması için akış diyagramı

3.4. FDTD Formülasyonu

Maxwell denklemlerindeki \vec{E} ve \vec{B} alanlarına ait rotasyonel bağıntıları aşağıdaki gibidir.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{ve} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Gerekli düzenlemeler yapılırsa,

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{E}$$

ve

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \vec{\nabla} \times \vec{H}$$

bulunur. Vektörel çarpım için (3.3) eşitliği kullanılır.

$$\vec{\nabla} \times \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix} = \vec{i} \cdot \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

Buna göre ;

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{1}{\mu} \cdot \left[\vec{i} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right) \right] \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{H}) = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left[\vec{i} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) + \vec{j} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \right] \quad (3.5)$$

elde edilir. Görüldüğü gibi elektrik ve manyetik alana ait 3'er bileşen bulunmaktadır.

Bunlar ;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir.

Böylece 3 boyutlu FDTD denklemleri elde edilmiş olur. Bu denklemler kullanılarak tek boyutlu ve iki boyutlu FDTD denklemleri de benzer şekilde bulunabilir. Bu denklemlere göre uzayın herhangi bir noktasındaki elektrik ve manyetik alan bileşenleri birbirlerine tamamen bağlıdır ve bu bağlılık ortamın manyetik geçirgenliği ve dielektrik sabitiyle de ilgilidir.

Elde edilen bu 6 adet denklem (3.6-3.11 denklemleri) zamana bağlıdır. Bu denklemlerin bilgisayar ortamında çözülebilmesi için ayrıkllaştırılması gereklidir. Bu amaçla Taylor serisinden faydalananarak merkezi sonlu farklar açılımı yapılır.

$u(i.\Delta x, j.\Delta y, k.\Delta z) = u_{i,j,k}^n$ olmak üzere, konuma göre ayrıklama

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - u^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \quad (3.12)$$

'e göre yapılır. Zamana göre ayrıklama için

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - u^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} \quad (3.13)$$

eşitsizliği kullanılır. 3 adet manyetik alan ve 3 adet elektrik alan denklemi üzerinde konum ve zamanda ayrıklama yapılrsa, Manyetik alan için,

$$\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[\frac{E_y^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_y^n(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_z^n(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} \right] \quad (3.14)$$

$$\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[\frac{E_z^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_z^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_x^n(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) - H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left[\frac{E_x^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_x^n(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_y^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \right] \quad (3.16)$$

elde edilir. Benzer şekilde elektrik alan için ise;

$$\frac{E_x^{n+1}(i, j, k) - E_x^n(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \quad (3.17)$$

$$\frac{E_y^{n+1}(i, j, k) - E_y^n(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \right] \quad (3.18)$$

$$\frac{E_z^{n+1}(i, j, k) - E_z^n(i, j, k)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} \right] \quad (3.19)$$

elde edilir. Bu 6 adet denklemde gerekli düzenlemeler yapılrsa, Manyetik alan için:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_y^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_y^n(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_z^n(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} \right] \quad (3.20)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_z^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_z^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i, j, k + \frac{1}{2}) - E_x^n(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \quad (3.21)$$

$$H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_x^n(i, j + \frac{1}{2}, k) - E_x^n(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i + \frac{1}{2}, j, k) - E_y^n(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \right] \quad (3.22)$$

bulunur. Elektrik alan için:

$$E_x^{n+1}(i, j, k) = E_x^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \quad (3.23)$$

$$E_y^{n+1}(i, j, k) = E_y^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k - \frac{1}{2})}{\Delta z} - \frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} \right] \quad (3.24)$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k) = E_z^n(i, j, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j, k) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j, k)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}, k) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}, k)}{\Delta y} \right] \quad (3.25)$$

denklemleri bulunmuş olur.

3.5. Kararlılık Kriteri

FDTD yönteminde hesaplama zaman adımı olan Δt , rastgele seçilemez (Yee, 1966). Δt değeri Δx , Δy ve Δz 'ye bağlı olarak seçilmelidir. Bunlar arasındaki bağıntı;

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (3.26)$$

ile verilir ve buna Courant şartı denir (Taflove, 1995).

FDTD çözümünün kararlı olabilmesi için, seçilen zaman adımdında dalganın maksimum ilerlemesi hücrenin boyutunu aşmamalıdır. Diğer bir değişle, dalga hareketinin bir zaman adımda hücre içerisinde kalabilmesi için zaman adımı yeterince küçük seçilmelidir.

3.6. Sınır Şartları

Açık bölge problemlerini modellemede Emici Sınır Şartları (ABC), hesaplama alanını sınırlamak için sıkça kullanılır (Mur, 1981). Bu durumda hesaplama alanının dış sınırı boyunca elektrik alanın teğetsel bileşeni Yee algoritması kullanılarak güncellenmez. ABC sınır şartlarının önemsiz sayılabilcek düzeyde yansımaları oluşturması için yapılan araştırmalar (Mur, 1981; Higdon, 1986; Berenger, 1994) FDTD araştırmalarının en aktif alanlarından biridir ve olmaya devam edecektir. Popüler ABC sınır şartlarının çoğu, soğurucu malzeme kullananlar veya diferansiyel denklemlerden türetilenler olmak üzere guruplara ayrılmaktadır. 1994'te Berenger (Berenger, 1994) tarafından ileri sürülen PML (tam benzeşimli tabaka) tekniği, soğurucu malzeme olarak hesaba katılabilmektedir. Bununla birlikte formülasyonu, önceki sunulmuş ızgara sonlandırma tekniklerinden tamamen farklıdır. Uygulamada PML yaklaşımı, diğer ABC sınır şartlarının çoğundan daha doğru ve anlamlı sonuçlar vermektedir. Sonuçta PML tekniği, diğer tekniklerin karşılaştırma yapmak zorunda olduğu bir standart olmuştur.

3.7. Alt Izgaralama (Subgridding)

FDTD yönteminde analiz edilecek olan yapı x, y ve z eksenleri boyunca binlerce küçük hücreye bölünür. Gerekli işlemlerden sonra, yapı içerisindeki elektromanyetik dalgaların ilerleyişi hakkında bilgiler elde edilir. Ancak elektrik ve manyetik alan değerlerinin fazla değişmediği yerlerde, yapının çok fazla hücreye bölünmesi işlem yükünü artırdığından dolayı gereksizdir. Bunun yerine alan değerlerinin hızlı değişim gösterdiği bölgelerde, köşelerde ve uç bölgelerde yapının daha fazla hücreye bölünmesiyle daha doğru ve verimli sonuçlar elde edilmektedir.

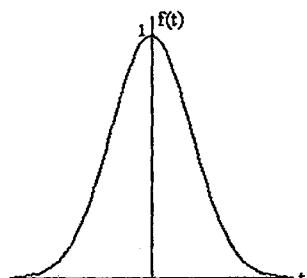
Alt izgaralama tekniğinde, belirli bölgeler problem uzayının geri kalan kısımlarından daha fazla hücreye bölünür. Bu teknik Yee, Kasher, Kim, Hoefer ve Zivanovic tarafından yapılan araştırmalarda ileri sürülmüştür (Yee, 1987; Kasher ve Yee, 1987; Kim ve Hoefer, 1990; Zivanovic, 1991). Bu tekniklerde temel sorun, büyük ve küçük boyutlu hücrelerin birleştirilmesinde ortaya çıkmaktadır.

Standart FDTD denklemleri bu iki ızgara arasındaki sınırdan uzak noktalarda güncellenir. Yee, Kasher, Kim ve Hoefer büyük ve küçük hücreler arasındaki sınırda alanın ilerleyişini sağlamak için, uzayda ve zamanda lineer bir interpolasyon kullanmıştır. Monk, (Monk, 1996) alt izgaralamanın hata analizini vermiştir. Zivanovic tarafından sunulan teknikte ızgaralar arasındaki sınırda alanların elde edilmesi için dalga denklemlerinin ayrık formu kullanılmıştır. Prescott ve Shuley ise Zivanovic'in tekniğini geliştirerek verimliliğini artırmıştır (Prescott ve Shuley, 1992).

1997 yılında da White ve Iskander (White ve Iskander, 1997) tarafından bu tekniğin 3 boyutlu problemlere uygulanması hakkında ayrıntılı açıklamalar verilmiştir.

3.8. Gauss Fonksiyonu

FDTD metodu ile bir yapının geniş frekans bandında davranışını incelemek için kaynak olarak Gauss darbesi kullanılır. Şekil 3.4'de Gauss darbesinin zamana bağlı değişimi görülmektedir.

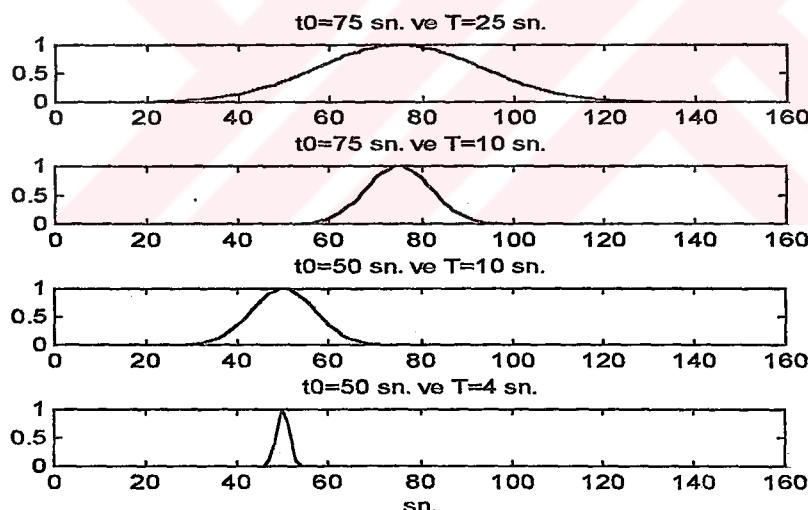


Şekil 3.4: Gauss darbesi

Şekil 3.4'de verilen Gauss darbesinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$f(t) = e^{-\frac{(t-t_0)^2}{T^2}} \quad (3.27)$$

Burada t_0 , darbenin gecikme süresini belirtir. t_0 değeri ne kadar küçükse darbe o kadar erken oluşur. T ise darbenin genişliğini belirler. T ne kadar küçük ise darbe o kadar keskin, T ne kadar büyükse darbe o kadar geniş olur. Bu durum Şekil 3.5'de görülmektedir.



Şekil 3.5 : Parametrelerin Gauss darbesine etkisi

Gauss fonksiyonunun Fourier dönüşümü de Gauss fonksiyonudur. Zaman - bant genişliği çarpımı sabit olduğundan, zamanda daralan Gauss darbesinin frekans bandı genişler.

Gauss darbesi alçak frekansları da (DC bileşen) içeren frekans bandına sahiptir. Bu nedenle, çok alçak frekanslardan istenen en yüksek frekanslara kadar analizlerde Gauss darbesi kullanmak elverişlidir (Sevgi, 1999)

$f(t) = e^{-\frac{t^2}{T^2}}$ ile verilen Gauss darbesinin Fourier Dönüşümü aşağıdaki gibidir.

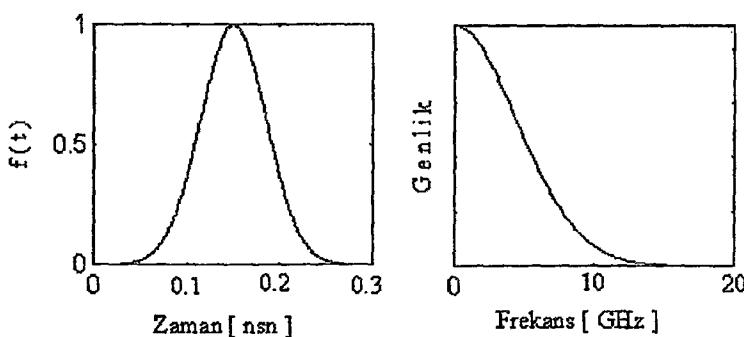
$$F(w) = T \cdot \sqrt{\pi} \cdot e^{-\frac{T^2 \cdot w^2}{4}} \quad (3.28)$$

Bant genişliği, frekans domeninde darbe genliğinin maksimum değerinin %5'ine düşüğü frekans aralığı olarak tanımlanır (Sevgi, 1999). (3.28) bağıntısına göre Gauss darbesinin bant genişliği, darbe süresine bağlıdır. Bundan yararlanarak, analiz edilecek en yüksek frekans için uygun darbe süresi seçilir.

Darbe süresi ile en yüksek frekans bileşeni arasındaki bağlantı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi yazılabilir (Krishnaiah, 1995).

$$f_{\max} = \frac{0.66}{T} \quad (3.29)$$

Şekil 3.6'da parametreleri $T = 50$ psn. ve $t_0 = 3T$ olan Gauss darbesinin zaman ve frekans davranışları görülmektedir. (3.29)'a göre en yüksek frekans bileşeni $f=13.2$ GHz. olarak hesaplanır. Bu durum Şekil 3.6'dan görülmektedir.



Şekil 3.6 : Gauss darbesi ve Fourier dönüşümü

3.9. FDTD Metodunun Uygulama Alanları

Günümüzde FDTD yöntemi, çok farklı elektromanyetik problemlerin çözümü için kullanılmaktadır. Bu alanlardaki çalışmalar şöyle sıralanabilir.

- ◆ Mikrostrip hatların analizi
- ◆ Dalga kılavuzlarındaki yayılımın modellenmesi
- ◆ Anten sistemlerinin modellenmesi
- ◆ Radar saçılma yüzeyi (RSY) modelleme
- ◆ Biyolojik dokularda elektromanyetik yutulma hesapları
- ◆ Mikrodalga yapılarının analizi
- ◆ Elektromanyetik uyumluluk ve girişim (EMC/EMI) modelleme

FDTD metodu ile düzlemsel mikrostrip devrelerin analizinde D .Paul, M. Daniel , C. J. Railton (Paul ve dig.,1991), J.P.Mcgeehan (Railton ve McGeehan,1990) adlı araştırmacıların, analiz zamanını kısaltan ve optimize edilmiş sınır şartlarını veren yayınları bulunmaktadır. D.M. Sheen ve S.M.Ali düzlemsel mikrostrip devrelerin 3 boyutlu analizini yaparak frekansa bağımlı saçılma parametrelerini elde etmiştir (Sheen ve Ali,1990).

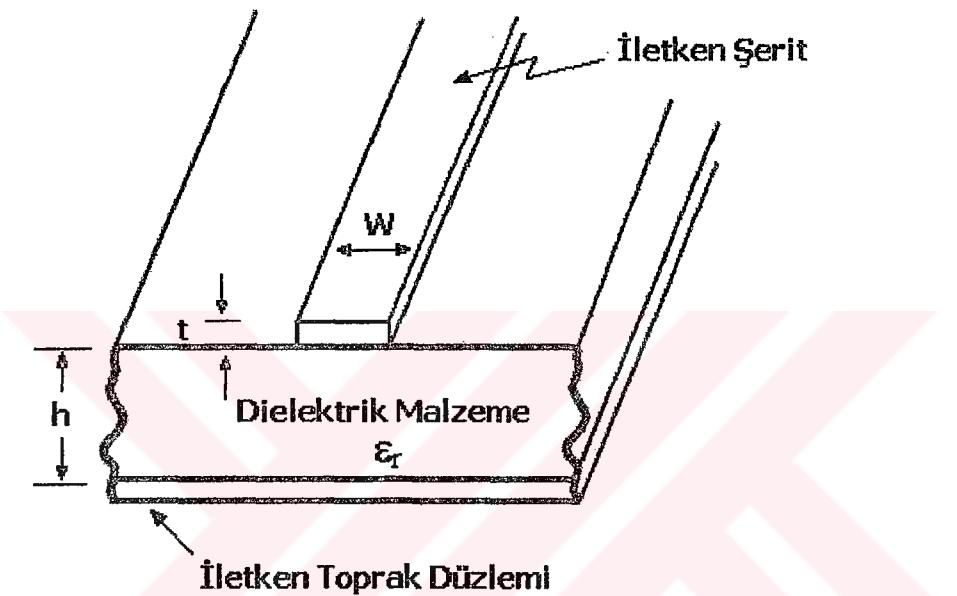
P.Y. Zhao, J. Litva, Li Wu (Zhao ve dig.,1994) tarafından yeni ve kararlı bir sınır koşulu geliştirilmiş, böylece ABC sınır şartına göre daha iyi soğurma performansı elde edilmiştir. L.Roselli, R.Sorrenino, P.Mezzanotte (Mezzanotte ve dig.,1994) tarafından yüksek performanslı monolitik mikrodalga devre paketlerinin simülasyonu yapılmıştır.

B.Toland, J.Lin, B. Houshmand, T. Itoh (Toland ve dig.,1993) tarafından iki elemanlı bir aktif antenin analizi yapılarak aktif ve nonlinear devrelerin kararlı ve geniş sinyal simülasyonları verilmiştir. Z. Chen, M. Ney, J. Hoefer (Chen ve dig.,1991) tarafından da Yee'nin FDTD metodundan farklı bir formülasyon geliştirilerek TLM eşdegeri verilmiştir.

Göründüğü gibi, farklı elektromanyetik problemlerin çözümünde FDTD yöntemi sıkça kullanılmakta olup, literatürde yöntemin geliştirilmesine ve iyileştirilmesine yönelik pek çok yayın bulunmaktadır.

4. MİKROSTRİP HATLAR

Mikrostrip hatlar, yüksek radyo frekansında ve mikrodalga bandındaki frekanslarda (400MHz-3GHz) çalışan elektronik devrelerde kullanılır. Basit bir mikrostrip iletim hattı alüminyum veya bakırdan yapılmış iletken bir tabakanın üzerine yerleştirilen ince bir dielektrik tabakadan oluşur. Bu dielektrik tabakanın üzerinde de iletken bir şerit bulunur (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 : Mikrostrip hat ve boyutları

Mikrostrip hatlarda enerji, alttaki iletken tabaka ile üstteki iletken şerit arasında ilettilir. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi mikrostrip hattın yan taraflarında fiziksel sınırlar olmadığından az da olsa enerji sızıntısı meydana gelir. Bu nedenle mikrostrip hatlı devrelerin modellenmesi oldukça zordur (Sevgi, 1999).

Mikrostrip devrelerin iki farklı kullanım alanı vardır.

- Mikrostrip hatlar, yüksek frekanslarda çalışan elektronik devrelerde ayrık elemanlar arasındaki bağlantılarında kullanılır.
- Dielektrik tabaka üzerindeki iletken şeridin uygun şekilde yerleştirilmesiyle monolitik mikrostrip devreler olarak bilinen filtre, empedans uydurucu gibi devrelerin yapımında kullanılır.

Mikrostrip hatların iki önemli parametresi efektif dielektrik katsayısı ve karakteristik empedanştır. Bu parametrelerin frekansa bağlı değişimi FDTD metodu ile analiz yapılarak elde edilebilmektedir.

Bir iletim hattının karakteristik empedansı Z_0 , ilerleyen elektromanyetik dalganın hattın sonundan gördüğü empedanştır. İlerleyen tek bir elektromanyetik dalga için Z_0 , gerilimin akıma oranıdır.

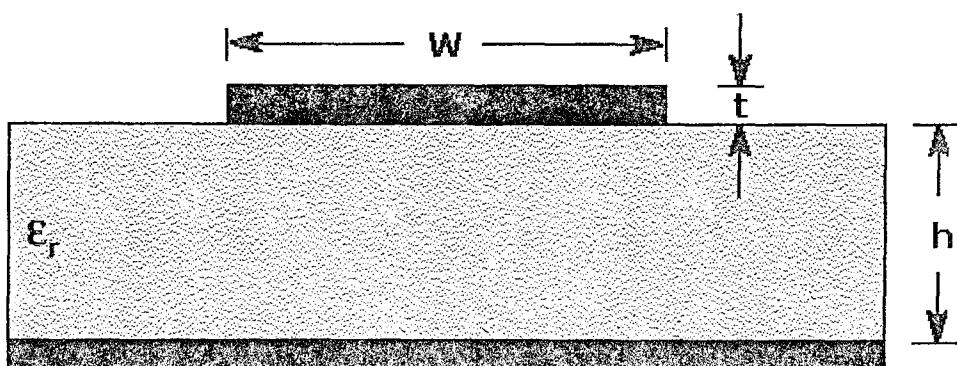
Devre tasarımindan karakteristik empedansın önemi, ilerleyen elektromanyetik dalga farklı karakteristik empedansa sahip bir hattın sınırına geldiğinde ortaya çıkar. Eğer iki hattın empedansı farklı ise ilerleyen dalganın bir kısmı geldiği hatta geri yansıyacak, kalan kısmı ise ikinci hattan ilerleyecektir.

Z_1 ve Z_2 her bir hattın karakteristik empedansını göstermek üzere yansıma faktörü aşağıdaki gibi yazılır.

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (4.1)$$

Burada ρ , gelen dalgaya ait yansıma katsayısidır. (4.1)'e göre $Z_2=Z_1$ olursa $\rho=0$ olur ve geri yansıma meydana gelmez. Bu, mikrostrip devre tasarımindan çok karşılaşılan bir durumdur. Çünkü mikrostrip hattın empedansının bağlantı yapılacak mikrostrip devrenin empedansıyla uyumlu olması gereklidir. Bu durumda mikrostrip hattın empedansının doğru bir şekilde hesaplanması gerekecektir.

Şekil 4.2'de bir mikrostrip iletim hattına ait kesit gösterilmektedir.



Toprak Düzlemi

Şekil 4.2 : Mikrostrip hattın yandan görünüşü

Şekil 4.2'de gösterilen mikrostrip hattın karakteristik empedansının yaklaşık değeri aşağıdaki formülle bulunur (Tisani, 2000).

$$Z_0 = \left(87 / \sqrt{\epsilon_r + 1.41} \right) \times \ln(5.98 \times h / (0.8 \times W + t)) \quad (4.2)$$

(4.2)'de verilen formül Şekil 4.2'deki mikrostrip hattın karakteristik empedansının alçak frekanslar için belli doğrulukla hesaplanması sağlar. Ancak mikrostrip hattın şekli değiştirildiğinde veya yüksek frekanslar kullanıldığında hattın karakteristik empedansını doğru olarak belirleyecek yeni bir formül bulunması gerekecektir. Bu işlemin zor olması nedeniyle yaklaşık formüller kullanmak yerine FDTD metodu ile analiz yapılarak mikrostrip hatta ait parametreler belirlenir.

FDTD ile mikrostrip hatlarda efektif dielektrik katsayısının frekans analizi en zor simülasyonlardan birisidir. Çünkü farklı frekanslarda dielektrik malzemenin işaret iletimine etkisi farklı olmaktadır. Efektif dielektrik katsayı, hat üzerinde işaret fazının frekansla değişimi gözlenerek yapılır. Eğer uygulanan sınır şartları çok az da olsa geri yansımı meydana getiriyorsa FDTD metodu ile yapılan analiz sonuçları çok hatalı olabilmektedir. Bu nedenle FDTD simülasyonu ile efektif dielektrik katsayı hesabında parametre optimizasyonu ve etkili sınır şartları kullanılması zorunludur (Sevgi, 1999).

FDTD metodu ile mikrostrip hatların analizinde S parametreleri kullanılır. S parametreleri giden ve yansıyan akım ve gerilim dalgalarını birbirine bağlayan parametre takımıdır. FDTD metodu ile mikrostrip hatlı devrelerin S parametreleri ile simülasyonu yapılrken şu adımlar izlenir (Sevgi, 1999).

- ♦ Önce sınır şartları belirlenir.
- ♦ Gauss darbesi kullanılarak şerit altında düşey elektrik alan bileşeni uyarılır.
- ♦ FDTD simülasyonu boyunca devrenin giriş ve çıkışındaki gözlem noktalarından zamana bağlı işaretler gözlenir.
- ♦ S parametrelerinin hesabı için \tilde{E} ve \tilde{H} bileşenleri yardımıyla giden ve yansıyan akım ve gerilim dalgaları hesaplanır.
- ♦ Girişte ve çıkışta elde edilen giden ve toplam yansıyan dalgaların Fourier dönüşümleri alınarak devrenin S parametreleri elde edilir.

5. FDTD METODU İLE TEK BOYUTLU SİMÜLASYON

5.1. Giriş

FDTD yöntemi ile tek boyutlu yapıların simülasyonu yapılarak, hücre yapısının daha kolay anlaşılması ve zaman domeninde darbe iletiminin kolayca görülmesi sağlanır. Ayrıca iteratif denklemler, kararlılık kriteri, sayısal dispersiyon gibi kavramların daha iyi anlaşılması için tek boyutlu yapıların incelenmesi gereklidir.

5.2. Serbest Uzayda Dalga Yayılımı

Boş uzayda, Maxwell'in rotasyonel denklemleri şöyledir.

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (5.2)$$

\vec{E} ve \vec{H} üç boyutlu vektörler olduğundan, (5.1) ve (5.2) denklemlerinin her biri 3 denklemi temsil eder. Tek boyutta elektrik ve manyetik alana ait birer bileşen bulunur. Buna göre E_x ve H_y dışındaki alan bileşenleri sıfır alınırsa,

$$E_y = E_z = 0 \quad (5.3)$$

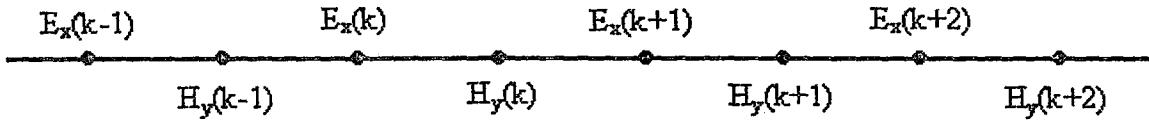
$$H_x = H_z = 0 \quad (5.4)$$

olur ve tek boyutlu FDTD denklemleri,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (5.6)$$

haline gelir. (5.5) ve (5.6) denklemleri elektrik alanı x yönünde, manyetik alanı y yönünde olan ve z yönünde ilerleyen bir düzlemsel dalgayı ifade eder. Yee hücresine göre, tek boyutlu durumda alan bileşenleri bir doğru parçası üzerinde bulunurlar (Şekil 5.1).



Şekil 5.1: Tek boyutta alan bileşenlerinin yerlesimi

Şekil 5.1'den görüldüğü gibi elektrik ve manyetik alan bileşenleri aynı indisle belirtilse de aralarında yarım hücre boyu mesafe vardır.

Zamana ve konuma göre türevler için merkezi farklar yaklaşımı kullanılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} \Rightarrow \frac{E_x^{\frac{n+1}{2}}(k) - E_x^{\frac{n-1}{2}}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial z} \Rightarrow \frac{H_y^{n+1}(k) - H_y^n(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_x^{\frac{n+1}{2}}(k + \frac{1}{2}) - E_x^{\frac{n+1}{2}}(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (5.8)$$

Bu denklemlerde, n terimi zamanı belirtmektedir ve gerçekte kastedilen $t = n \cdot \Delta t$ zamanıdır. $n+1$ terimi de bir adım sonraki zamanı gösterir. Parantez içindeki terimler ise mesafeyi göstermektedir.

Burada önemli bir konu ayrıklaştırma sırasında kullanılan zaman ve konuma ait indislerdir. Ayrıklaştırma işlemine hangi alan bileşeninden başlanırsa, o bileşene ait zaman ve konum indisleri referans olarak alınır ve elektrik alan ile manyetik alan arasında yarım zaman adımı fark vardır.

Buna göre tek boyutlu denklemler 2 şekilde yazılabilir.

1- Önce \vec{E} alanı yazılırsa;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} \Rightarrow \frac{E_x^{\frac{n+1}{2}}(k) - E_x^{\frac{n-1}{2}}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial z} \Rightarrow \frac{H_y^{n+1}(k) - H_y^n(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_x^{\frac{n+1}{2}}(k + \frac{1}{2}) - E_x^{\frac{n+1}{2}}(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (5.10)$$

olur. Benzer şekilde,

2- Önce \vec{H} alanı yazılırsa ;

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_x}{\partial z} \Rightarrow \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(k) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_x^n(k + \frac{1}{2}) - E_x^n(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_y}{\partial z} \Rightarrow \frac{E_x^{n+1}(k) - E_x^n(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(k + \frac{1}{2}) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \quad (5.12)$$

olur. Görüldüğü gibi ayrıklaştırma işlemine hangi alan bileşeninden başlandığı önemlidir. \vec{E} alanının önce ayrıklaştırılması sonucu elde edilen (5.9) denklemindeki önemli noktalar şöyle sıralanabilir.

$$\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) - E_x^{n-\frac{1}{2}}(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2})}{\Delta z}$$

\vec{E} alanında $n + \frac{1}{2}$ ve $n - \frac{1}{2}$ indisleri ile işleme başlanır. Bu iki zamanın orta noktası n 'dir. Dolayısıyla \vec{H} alanı için n anındaki değerler kullanılır. \vec{E} alanı k konumunda iken \vec{H} alanı $k + \frac{1}{2}$ konumunda bulunur. Buradan \vec{H} alanına ait (5.10) denklemine geçilirken yarızaman adımı artırılır.

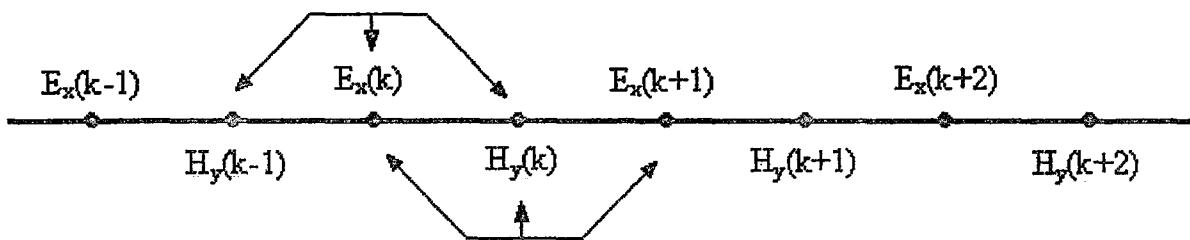
$$\frac{H_y^{n+1}(k) - H_y^n(k)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(k + \frac{1}{2}) - E_x^{n-\frac{1}{2}}(k - \frac{1}{2})}{\Delta z}$$

Böylece $n + \frac{1}{2}$ ve $n - \frac{1}{2}$ değerleri $n+1$ ve n şekline dönüşür. $n+1$ ve n değerlerinin orta noktası $n + \frac{1}{2}$ olduğu için ikinci denklemde \vec{E} alanı için $n + \frac{1}{2}$ değeri kullanılır. Tek boyutlu durumda E_x bileşeni için elde edilen (5.9) denklemi düzenlenirse

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) = E_x^{n-\frac{1}{2}}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot \left[H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2}) \right] \quad (5.13)$$

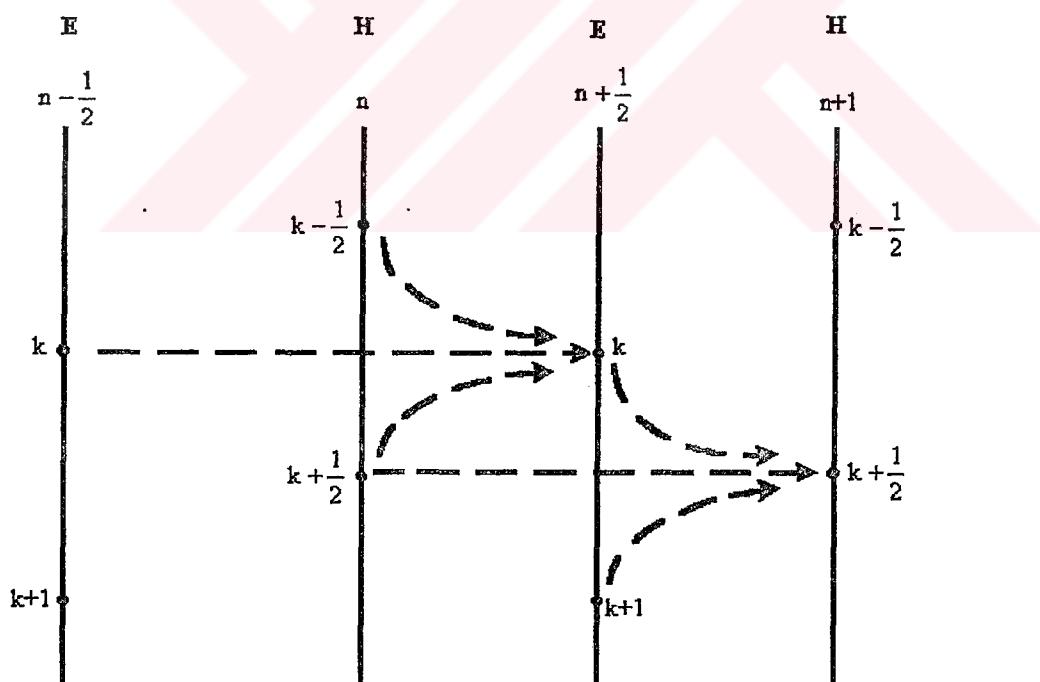
elde edilir. (5.13)'e göre, E_x alanının $n + \frac{1}{2}$ anındaki yeni değeri, 1 zaman adımı önce aynı noktadaki E_x değerine ve önceki değerden yarızaman adımı sonra hesaplanan komşu H_y alanlarının değerlerine bağlıdır.

E_x ve H_y alanlarının hesabı için gerekli alan bileşenleri Şekil 5.2'den görülmektedir. Şekil 5.2'ye göre alan bileşenlerinin yeni değeri, aynı konumdaki 1 zaman adımı önceki değerine de bağlı olduğu için hesap sırasında alan bileşenlerinin önceki değerleri hafızada tutulmalıdır.



Şekil 5.2 : E_x ve H_y bileşenlerinin hesabında kullanılan alan bileşenleri

Tek boyutlu durumda alan bileşenlerinin hesabı sırasında hem konum hem de zaman değerleri değiştiği için Şekil 5.3'ün kullanılması daha anlaşıllır olmaktadır.



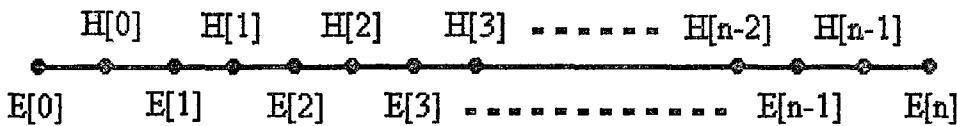
Şekil 5.3 : E_x ve H_y alanlarının zaman ve konuma göre yerleşimi

(5.9) ve (5.10) denklemleri düzenlenirse aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$E_x^{\frac{n+1}{2}}(k) = E_x^{\frac{n-1}{2}}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot \left[H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2}) \right] \quad (5.14)$$

$$H_y^{n+1}(k) = H_y^n(k) - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot \left[E_x^{\frac{n+1}{2}}(k + \frac{1}{2}) - E_x^{\frac{n+1}{2}}(k - \frac{1}{2}) \right] \quad (5.15)$$

Elde edilen denklemlerin bilgisayar programında yazılacak formata getirilmesi için gerekli işlemler aşağıdaki gibi yapılır. Alan bileşenlerinin yerleşimi için Şekil 5.4 kullanılır.



Şekil 5.4 : Tek boyutta alan bileşenlerinin konuma göre yerleşimi

\vec{E} ve \vec{H} alanları için elde edilen (5.14) ve (5.15) denklemlerinden yararlanarak her alan bileşeni için gerekli eşitlikler yazılırsa, \vec{E} alan bileşenleri için:

$$E[0] = E[0] - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot (H[0] - H[?])$$

$$E[1] = E[1] - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot (H[1] - H[0])$$

$$E[n-1] = E[n-1] - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot (H[n-1] - H[n-2])$$

$$E[n] = E[n] - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot (H[?] - H[n-1])$$

elde edilir. \vec{H} alan bileşenleri için ise;

$$H[0] = H[0] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot (E[1] - E[0])$$

$$H[1] = H[1] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot (E[2] - E[1])$$

$$H[n-1] = H[n-1] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot (E[n] - E[n-1])$$

$$H[n] = H[n] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot (E[?] - E[n])$$

bulunur. Yukarıda yazılan eşitliklerden görüldüğü gibi uç noktalarda \vec{E} ve \vec{H} alanlarına ait değerler bulunmadığından $E[0]$, $E[n]$ ve $H[n]$ değerleri hesaplanamaz.

Bilgisayarda sayısal olarak hesaplanması gereken denklemler aşağıdaki gibi elde edilir.

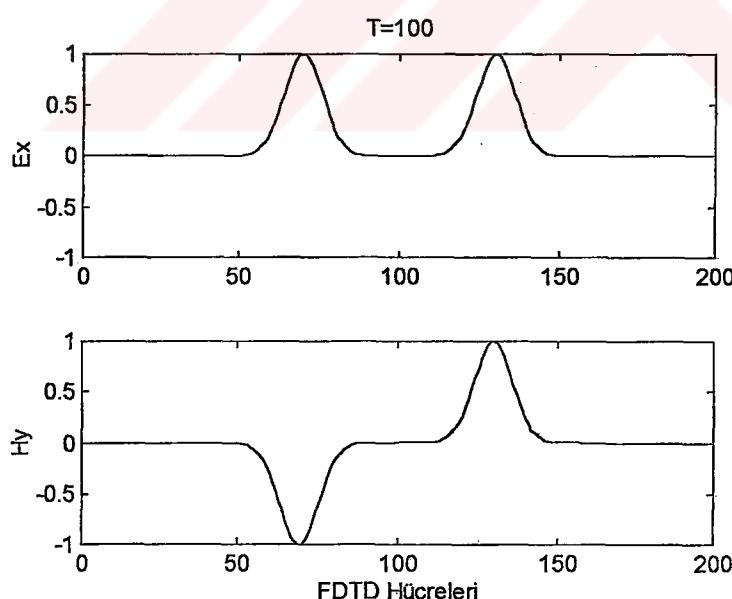
$$E[k] = E[k] - \frac{\Delta t}{\epsilon \cdot \Delta z} \cdot (H[k] - H[k-1]) \quad (5.16)$$

(5.16) denklemindeki işlem $k=1$ ile $k < n$ arasındaki tamsayılar için yapılır.

$$H[k] = H[k] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot (E[k+1] - E[k]) \quad (5.17)$$

(5.17) denklemindeki işlem $k=0$ ile $k < n$ arasındaki tamsayılar için yapılır.

(5.16) ve (5.17) denklemlerindeki işlemler bilgisayarda iteratif olarak çözüdürülecek tek boyutta alan bileşenlerinin zamana ve konuma bağlı değişimi görülmüş olur. Şekil 5.5'e göre Gauss darbesi problem uzayının merkezinde oluşturulmuştur. Darbenin pozitif ve negatif yönlere doğru ilerlediği görülmektedir.



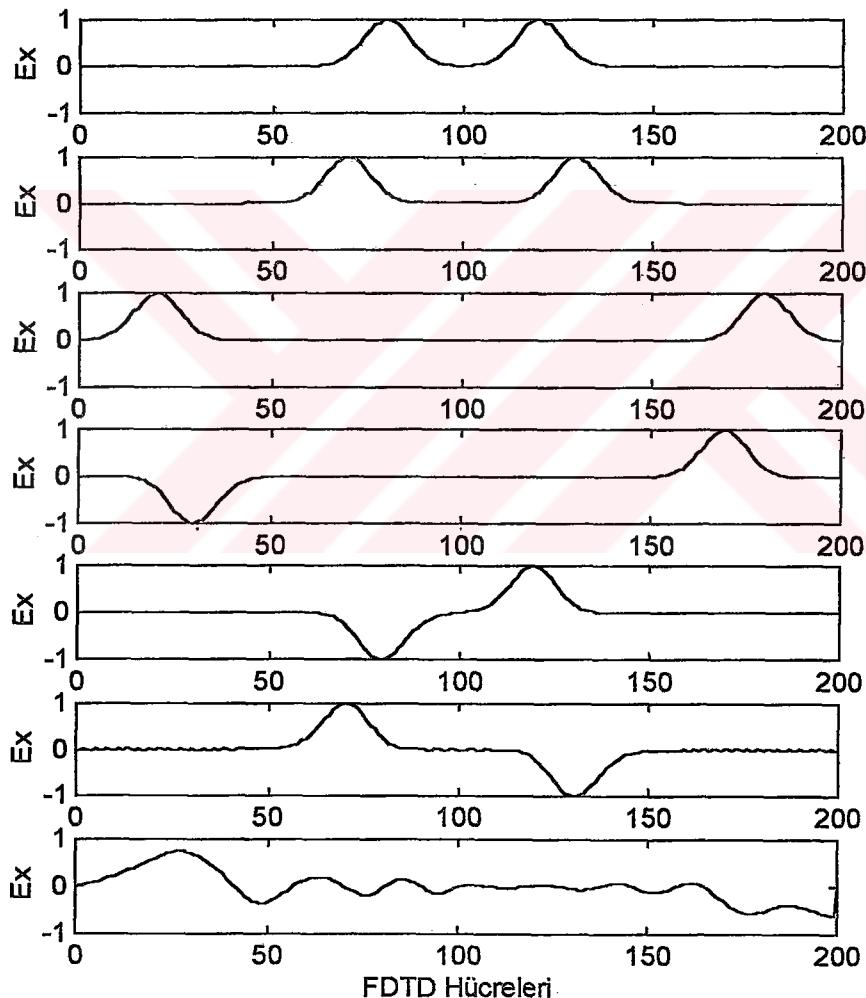
Şekil 5.5 : 100 zaman adımı sonunda E_x ve H_y alanlarının durumu

5.2.1. Simülasyon Sonuçları

Tek boyutlu FDTD simülasyonu için gerekli bağıntılar elde edildikten sonra, bilgisayarda çözülmesi gereken denklemler için bir C++ programı yazılmış ve çeşitli zaman adımlarında Gauss darbesinin nasıl ilerlediği hakkında bilgi edinilmiştir.

Problem uzayının uç noktalarında herhangi bir sınır şartı kullanılmadığı için, problem uzayının içine geri yansımalar olduğundan programın bu haliyle kullanılması yanlış sonuçlara neden olur.

Şekil 5.6'dan görüldüğü gibi 15.000 zaman adımı sonunda bile problem uzayı içinde darbe yayılımı devam etmektedir.



Şekil 5.6 : Sınır şartları yokken $T= 80 , 100 , 200 , 300 , 400 , 500$ ve 15000 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu

5.3. Tek Boyutta Sınır Şartları

ABC sınır şartları, ilerleyen \vec{E} ve \vec{H} alanlarının problem uzayı içine geri yansımalarını önlemek için kullanılır. Normalde \vec{E} alanının hesaplanması, \vec{E} alanı çevresindeki \vec{H} alanlarına ihtiyaç duyulur. Problem uzayının uç noktalarında, bir taraftaki alan değerleri bilinmemektedir. Ancak problem uzayı dışında kaynak olmadığı bilindiğinden, dalgalar uç noktalardan dışarıya doğru yayılmalıdır. Bu durumda uç noktalardaki değerlerin tahmin edilmesi gerekecektir.

5.3.1. Simülasyon Sonuçları

Sınır şartları kullanıldığı durumda, Gauss darbesinin problem uzayının sonundan geri yansımadan ilerlediği görülmektedir (Şekil 5.7).

5.4. Dielektrik Ortamda Dalga Yayılımı

Dielektrik sabite sahip olan bir ortamın simüle edilebilmesi için Maxwell denklemlerine ϵ_r katsayısını eklemek yeterlidir. Bu durumda Maxwell denklemleri aşağıdaki hali alır.

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \vec{\nabla} \times \vec{H} \quad (5.18)$$

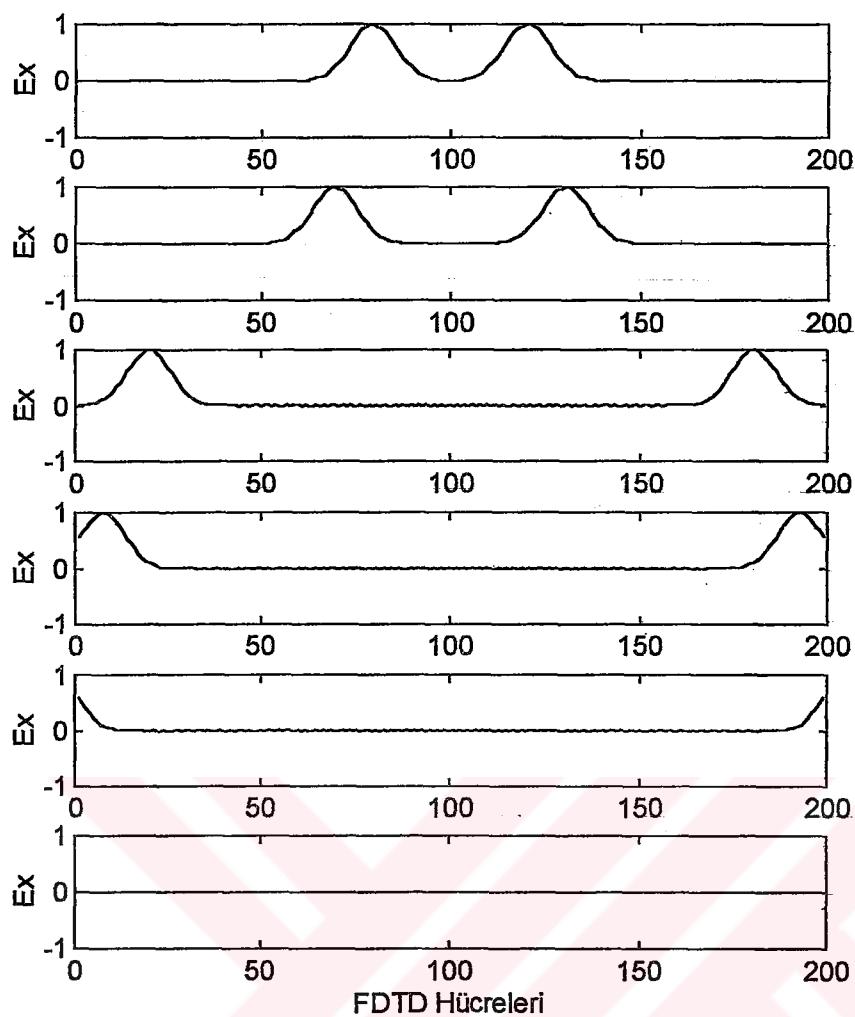
$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu_0} \vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (5.19)$$

Sonlu farklar açılımı kullanılarak (5.18) ve (5.19) denklemleri düzenlenirse,

$$E_x^{n+\frac{1}{2}}(k) = E_x^{n-\frac{1}{2}}(k) - \frac{\Delta t}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \Delta z} \cdot \left[H_y^n(k + \frac{1}{2}) - H_y^n(k - \frac{1}{2}) \right] \quad (5.20)$$

$$H_y^{n+1}(k) = H_y^n(k) - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta z} \cdot \left[E_x^{n+\frac{1}{2}}(k + \frac{1}{2}) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(k - \frac{1}{2}) \right] \quad (5.21)$$

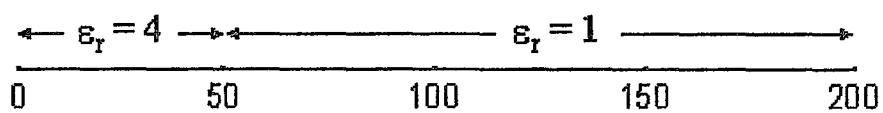
elde edilir.



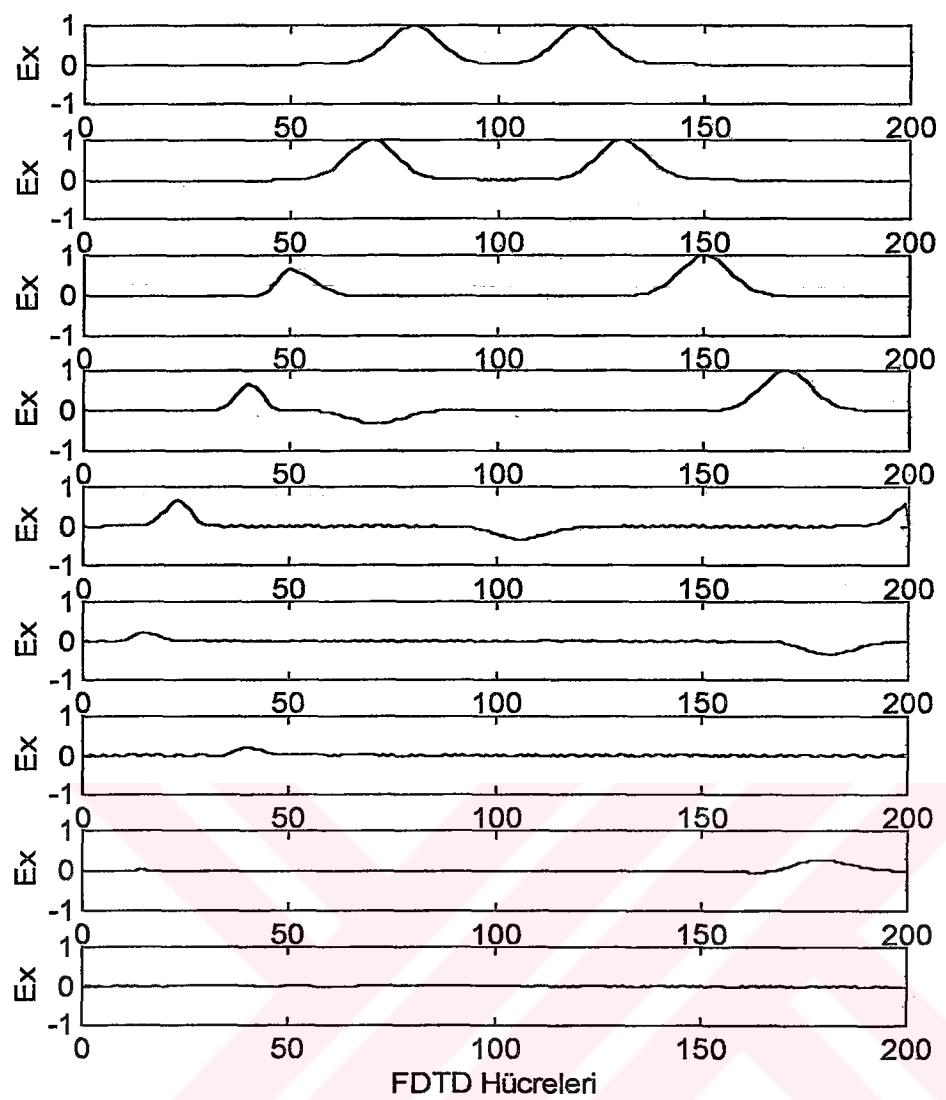
Şekil 5.7 : Sınır şartları varken $T= 80 , 100 , 200 , 225$ ve 250 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu

5.4.1. Simülasyon Sonuçları

Yapının bir kısmı Şekil 5.8'deki gibi dielektrik sabiti boşluğunkinden farklı olan bir malzeme ile kaplı iken Gauss darbesinin ilerleyışı tamamen değişir.



Şekil 5.8 : Tek boyutlu yapıda dielektrik malzemenin yeri



Şekil 5.9 : 1 - 50 nolu hücreler arasında dielektrik sabiti 4 olan bir malzeme varken $T = 80, 100, 140, 180, 250, 400$ ve 500 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu

6. FDTD METODU İLE 2 BOYUTLU SİMÜLASYON

6.1. Giriş

Maxwell denklemlerindeki Elektrik ve Manyetik alana ait rotasyonel denklemlerinin üç boyuttaki toplam 6 adet bileşeni bölüm 3'de elde edildiği gibi yazılırsa, Manyetik alan için:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$

elde edilir. Elektrik alan için ise;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \right)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)$$

bulunur. 2 boyutlu denklemlerde alan bileşenleri bir düzlem üzerinde bulunur. Yani x, y, z yönündeki alan bileşenlerinden bir tanesinin değişimi sıfırdır. Örneğin z yönünde hiçbir değişim olmadığı kabul edilirse, başka bir değişle $\frac{\partial}{\partial z} = 0$ ise 6 adet denklem şu şekilde gelir. Manyetik alan bileşenleri ;

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right) \quad (6.3)$$

ve Elektrik alan bileşenleri;

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) \quad (6.6)$$

şeklinde bulunur. 2 boyutlu analiz için bu denklemlerden sadece 3'ü kullanılır. 6 adet denklem üçer bileşen içeren 2 guruba ayrılır. Bir guruptaki alan bileşenleri TM modunu, diğer guruptaki alan bileşenleri TE modunu oluşturur.

6.2. İki Boyutta Modlar

6.2.1 TM Modu

TM modunda, elektromanyetik dalganın ilerleme yönünde manyetik alanın bileşeni yoktur. Ancak elektrik alanın hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik bileşenleri vardır. Bu guruptaki denklemler sadece H_x , H_y ve E_z alan bileşenlerini içerir. Bu durumda TM modu için denklemler (6.1), (6.2) ve (6.6) denklemlerinden oluşur.

6.2.2 TE Modu

TE modunda, elektromanyetik dalganın ilerleme yönünde elektrik alanın bileşeni yoktur. Ancak manyetik alanın hem eksen doğrultusunda hem de eksene dik bileşenleri vardır. Bu guruptaki denklemler sadece E_x , E_y ve H_z alan bileşenlerini içerir. Bu durumda TE modu için denklemler (6.3), (6.4) ve (6.5) denklemlerinden oluşur.

Gördüğü gibi TM ve TE modları birbirinden ayrıdır. Yani ortak alan bileşenleri yoktur. TM ve TE modları, 2 boyutlu elektromanyetik alan etkileşimi problemlerinin oluşturulması için 2 farklı yoldur. 2 modla birleştirilen fiziksel olaylar çok farklı olabilir. Bu aslında modellenen sonsuz uzun yapının yüzeyiyle ilişkili elektrik ve manyetik alan çizgilerinin yönelimi nedeniyedir. TE modunda elektrik alan çizgileri iletim yönüne dik iken TM modunda manyetik alan çizgileri iletim yönüne diktir.

6.3. TM Modu İçin Formülasyon

2 boyutlu TM modu için (6.1), (6.2) ve (6.6) denklemleri tekrar yazılırsa,

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial y} \quad \frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial E_z}{\partial x} \quad \frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right)$$

elde edilir. Burada elektrik ve manyetik kayıpların olmadığı varsayılmıştır. Problemi daha basitleştirmek için FDTD hesap uzayının homojen bir malzeme ile dolu olduğu kabul edilecektir. Yani konuma bağlı olarak μ ve ϵ değerleri değişmemektedir.

2 boyutlu TM modu için yazılan denklemler, merkezi sonlu farklar açılımı yardımıyla ayrılaştırılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j)}{\Delta t} = -\frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_z^n(i,j + \frac{1}{2}) - E_z^n(i,j - \frac{1}{2})}{\Delta y} \quad (6.7)$$

$$\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{E_z^n(i + \frac{1}{2},j) - E_z^n(i - \frac{1}{2},j)}{\Delta x} \quad (6.8)$$

$$\frac{E_z^{n+1}(i,j) - E_z^n(i,j)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon} \left(\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2},j) - H_y^{n-\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2},j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j + \frac{1}{2}) - H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j - \frac{1}{2})}{\Delta y} \right) \quad (6.9)$$

6.4. TE Modu İçin Formülasyon

2 boyutlu TE modu için (6.3), (6.4) ve (6.5) denklemleri tekrar yazılırsa,

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad \frac{\partial E_y}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad \frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right)$$

elde edilir. Bu denklemler, merkezi sonlu farklar açılımı yardımıyla ayrılaştırılırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

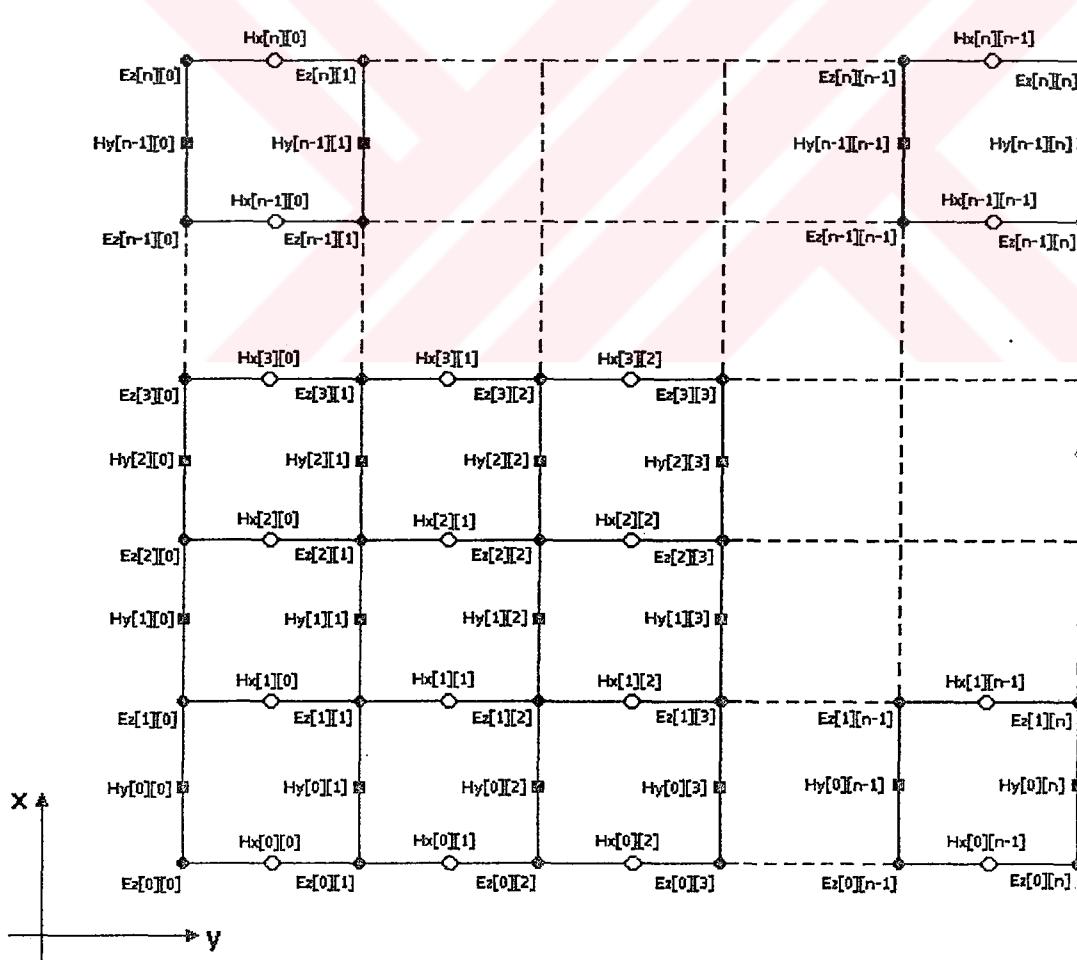
$$\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - E_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j)}{\Delta t} = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{H_z^n(i,j + \frac{1}{2}) - H_z^n(i,j - \frac{1}{2})}{\Delta y} \quad (6.10)$$

$$\frac{E_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) - E_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j)}{\Delta t} = -\frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{H_z^n(i + \frac{1}{2}, j) - H_z^n(i - \frac{1}{2}, j)}{\Delta x} \quad (6.11)$$

$$\frac{H_z^{n+1}(i,j) - H_z^n(i,j)}{\Delta t} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - E_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2})}{\Delta y} - \frac{E_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - E_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j)}{\Delta x} \right) \quad (6.12)$$

6.5. TM Modu İçin Hücre Yerleşim Planı

TM modundaki H_x , H_y ve E_z alan bileşenleri x-y düzleminde yerleştirilecek olursa Şekil 6.1'deki yerleşim planı elde edilir.



Şekil 6.1 : TM modu için 2 boyutta alan bileşenlerinin yerleşimi

TM modu için elde edilen (6.7), (6.8) ve (6.9) denklemelerinde gerekli düzenlemeler yapılrsa aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i,j) - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta y} \cdot \left[E_z^n(i,j + \frac{1}{2}) - E_z^n(i,j - \frac{1}{2}) \right] \quad (6.13)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i,j) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i,j) + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta x} \cdot \left[E_z^n(i + \frac{1}{2},j) - E_z^n(i - \frac{1}{2},j) \right] \quad (6.14)$$

$$E_z^{n+1}(i,j) = E_z^n(i,j) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2},j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2},j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j + \frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j - \frac{1}{2})}{\Delta y} \right] \quad (6.15)$$

\vec{E} ve \vec{H} alanları için elde edilen denklemelerden yararlanarak her alan bileşeni için gerekli eşitlikler yazılırsa, H_x alan bileşenleri için:

$$H_x[0][0] = H_x[0][0] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta y} \cdot [E_z[0][1] - E_z[0][0]]$$

$$H_x[1][0] = H_x[1][0] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta y} \cdot [E_z[1][1] - E_z[1][0]]$$

$$H_x[n][n-1] = H_x[n][n-1] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta y} \cdot [E_z[n][n] - E_z[n][n-1]]$$

elde edilir. H_y alan bileşenleri için ise;

$$H_y[0][0] = H_y[0][0] + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta x} \cdot [E_z[1][0] - E_z[0][0]]$$

$$H_y[1][0] = H_y[1][0] + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta x} \cdot [E_z[2][0] - E_z[1][0]]$$

$$H_y[n-1][n] = H_y[n-1][n] + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta x} \cdot [E_z[n][n] - E_z[n-1][n]]$$

bulunabilir. Son olarak E_z alan bileşenleri için;

$$E_z[0][0] = E_z[0][0] + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[\frac{H_y[0][0] - H_y[?][?]}{\Delta x} - \frac{H_x[0][0] - H_x[?][?]}{\Delta y} \right]$$

$$E_z[1][1] = E_z[1][1] + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[\frac{H_y[1][1] - H_y[0][1]}{\Delta x} - \frac{H_x[1][1] - H_x[1][0]}{\Delta y} \right]$$

$$E_z[n][n] = E_z[n][n] + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[\frac{H_y[?][?]-H_y[n-1][n]}{\Delta x} - \frac{H_x[?][?]-H_x[n][n-1]}{\Delta y} \right]$$

elde edilir. Yukarıda yazılan eşitliklerden görüldüğü gibi kenarlarda bulunan E_z bileşenleri hesaplanamaz. Ayrıca $E_z[n][n]$ değeri bulunduğu halde $H_x[n][n]$ ve $H_y[n][n]$ değerleri bulunmaz.

Buna göre bilgisayarda sayısal olarak hesaplanması gereken denklemeler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$H_x[i][j] = H_x[i][j] - \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta y} \cdot [E_z[i][j+1] - E_z[i][j]] \quad (6.16)$$

(6.16) denklemindeki işlemde H_x bileşeni hesaplanırken i değişkeni 0 ile n arasında, j değişkeni ise 0 ile $n-1$ arasında tamsayı değerler alabilir.

$$H_y[i][j] = H_y[i][j] + \frac{\Delta t}{\mu \cdot \Delta x} \cdot [E_z[i+1][j] - E_z[i][j]] \quad (6.17)$$

(6.17) denkleminde H_y bileşeni hesaplanırken i değişkeni 0 ile $n-1$ arasında, j değişkeni ise 0 ile n arasında tamsayı değerler alabilir.

$$E_z[i][j] = E_z[i][j] + \frac{\Delta t}{\epsilon} \cdot \left[\frac{H_y[i][j] - H_y[i-1][j]}{\Delta x} - \frac{H_x[i][j] - H_x[i][j-1]}{\Delta y} \right] \quad (6.18)$$

(6.18) denkleminde E_z bileşeni hesaplanırken i değişkeni 1 ile $n-1$ arasında, j değişkeni ise 1 ile $n-1$ arasında tamsayı değerler alabilir.

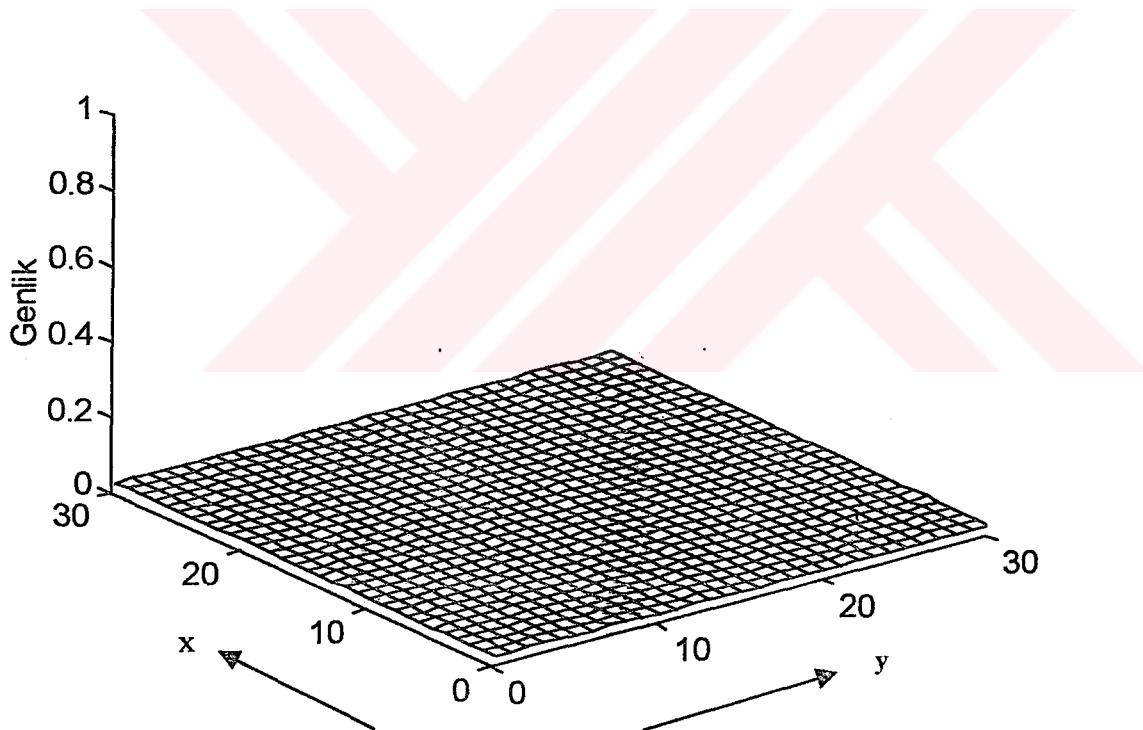
Böylece 2 boyutlu FDTD metoduna ait ayrıklığırlımiş denklemeler elde edilmiş olur. Bilgisayar ortamında bu denklemler iteratif olarak çözülmenden önce H_x , H_y ve E_z alan bileşenlerinin başlangıç değerleri sıfırlanmalıdır. Bölüm 3'de verilen FDTD algoritmasında da görüldüğü gibi elektrik ve manyetik alan bileşenleri yarız zaman adımı aralıklla hesaplanır. Bu durumda alan bileşenlerinin 1 zaman adımı önceki değerlerinin hafızada tutulması gerekecektir. Örneğin iki boyutlu simülasyon sırasında analiz edilecek olan yapı x ve y ekseni boyunca 100'er hücreye bölündürse H_x ve H_y alan bileşeninin her biri için $100 \times 99 = 9900$ adet, E_z alan bileşeni için ise $98 \times 98 = 9604$ adet değer hesaplanır. Bu durumda H_x ve H_y alan bileşenlerinin 100'er adet, E_z alan bileşeninin ise 396 adet değeri simülasyon sırasında güncellenmez.

6.6. İki Boyutlu Simülasyon Sonuçları

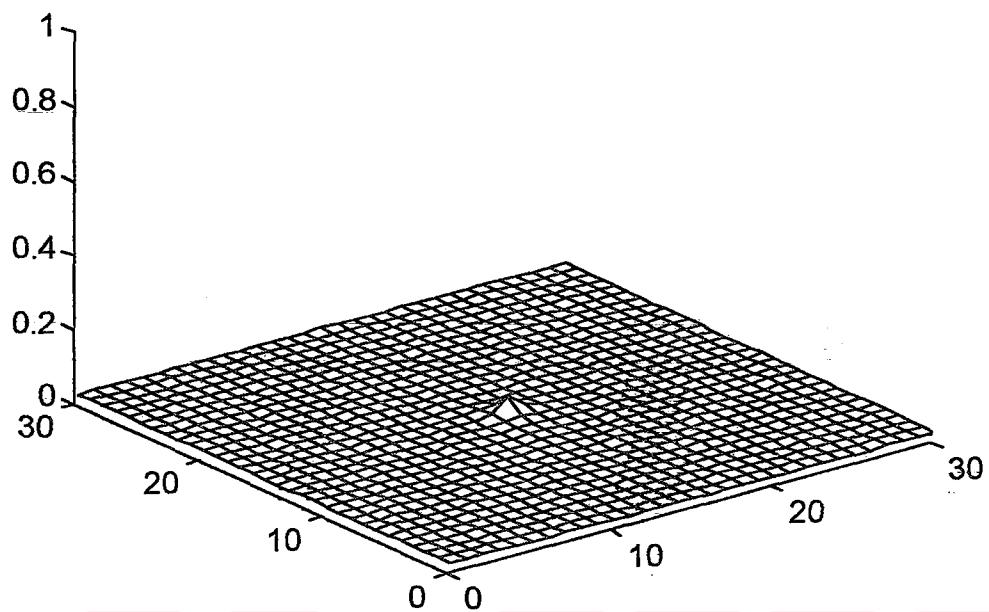
6.6.1. Gauss Darbesinin Yapının Merkezine Uygulanması

TM modu için gerekli eşitlikler elde edildikten sonra Gauss darbesinin iki boyutta ilerleyişini görmek amacıyla problem uzayı x ve y yönünde Şekil 6.2'deki gibi 30×30 adet hücreye bölünmüştür. Hesaplanması gereken denklemler için bir C++ programı yazılarak H_x , H_y ve E_z alan bileşenleri iteratif olarak çözdürülmüş ve kaynak olarak Gauss darbesi seçilerek yapının merkezine uygulanmıştır. 10'ar zaman adımı aralıkla E_z alan bileşeni çizdirilerek Gauss darbesinin 2 boyutta ilerleyisi gözlenmiştir.

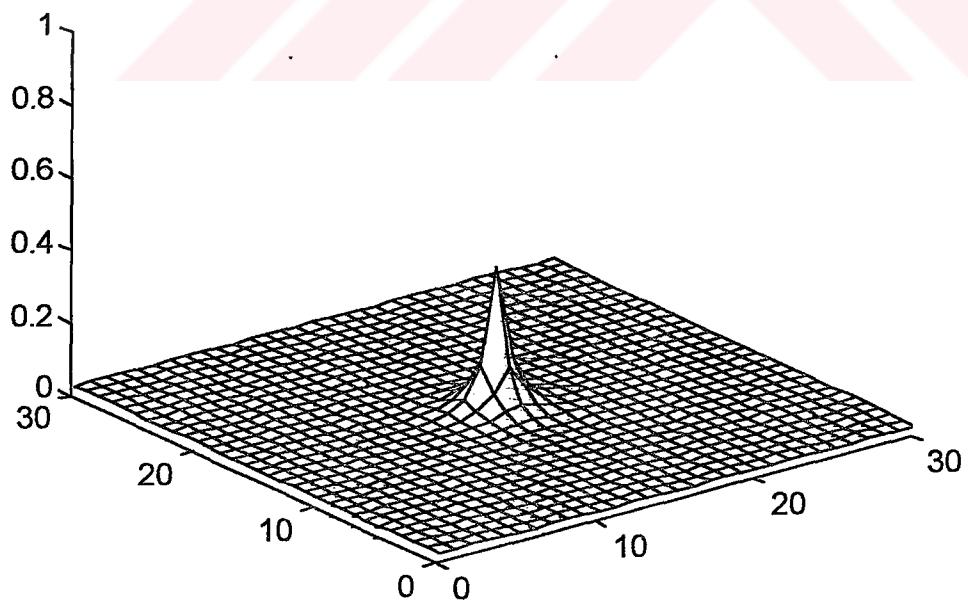
Burada sınır şartları kullanılmadığı için 100. zaman adımdan sonra Gauss darbesinin problem uzayının içine geri yansıldığı görülmektedir.



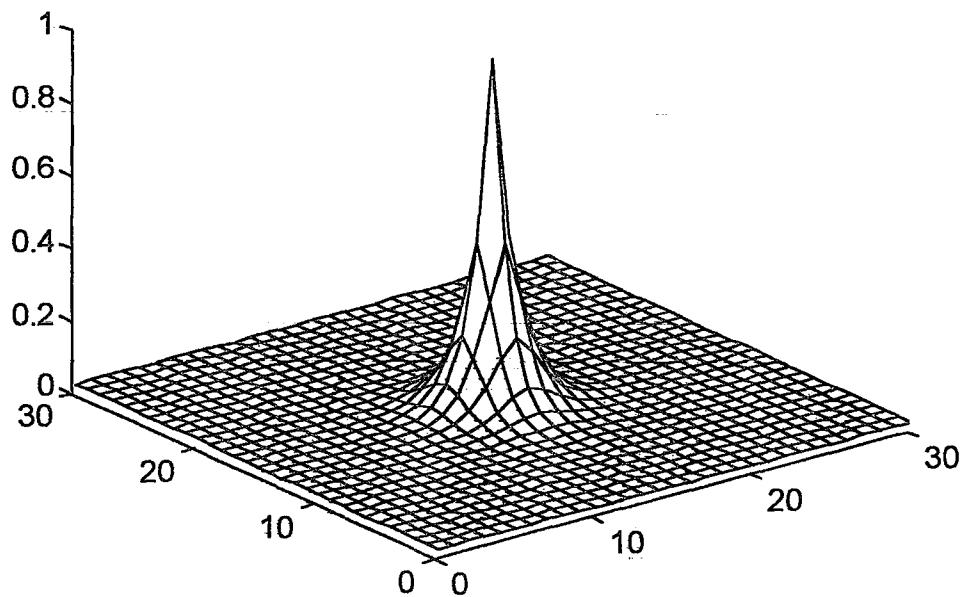
Şekil 6.2: İki boyutlu analiz için problem uzayının izgaralara ayrılması



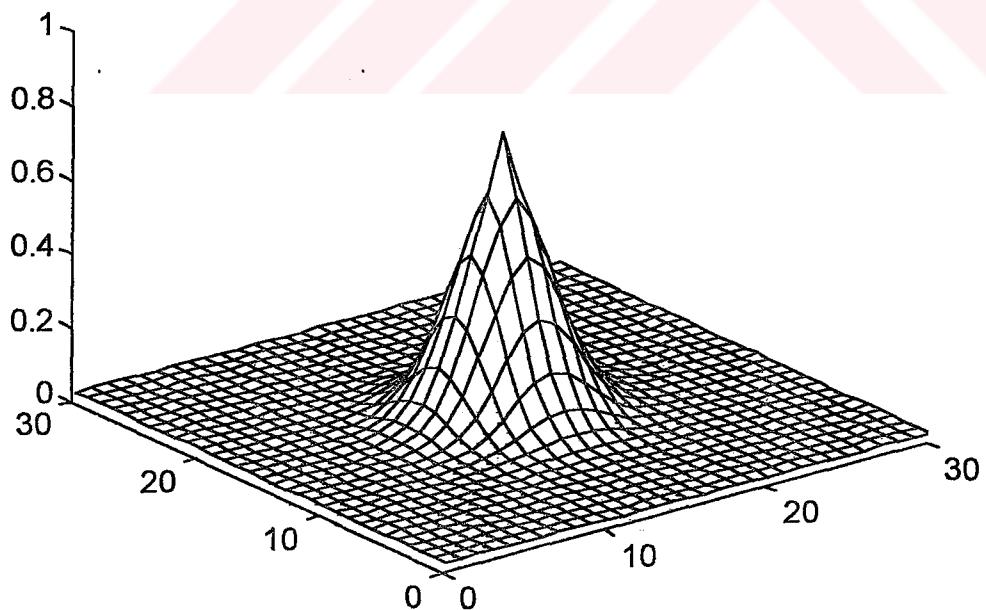
Şekil 6.3 : 10 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



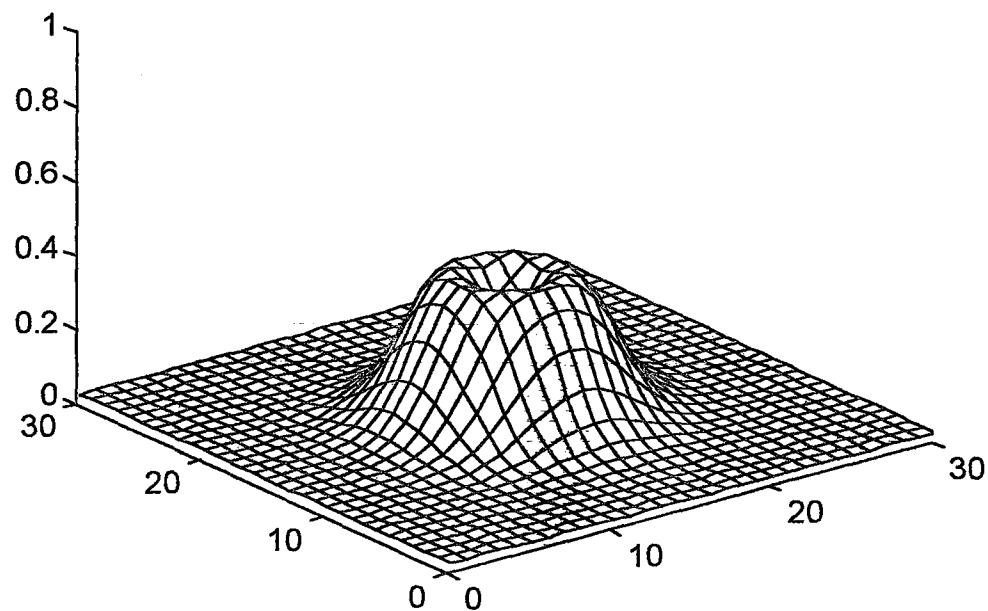
Şekil 6.4 : 20 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



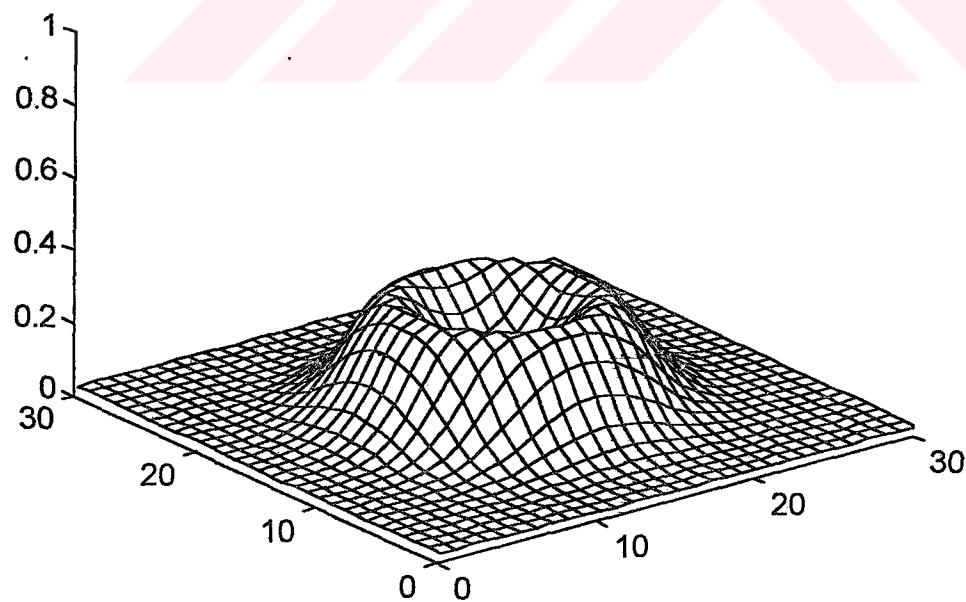
Şekil 6.5 : 30 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



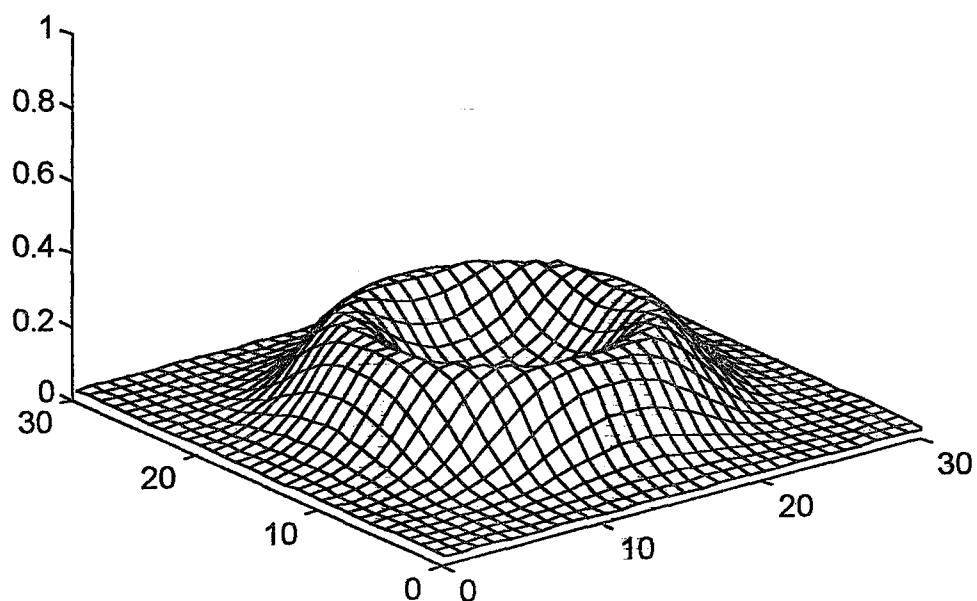
Şekil 6.6 : 40 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



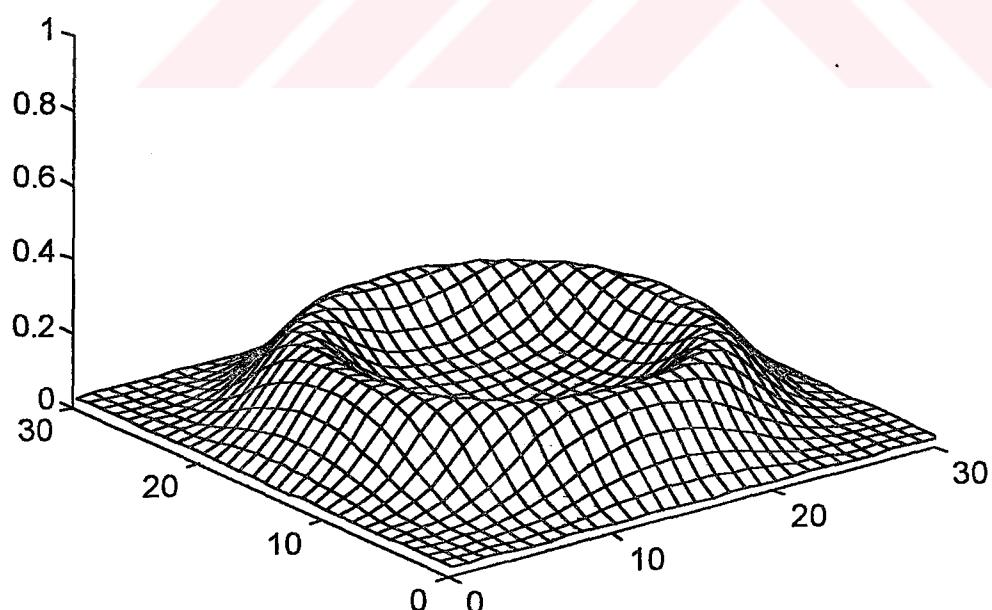
Şekil 6.7 : 50 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



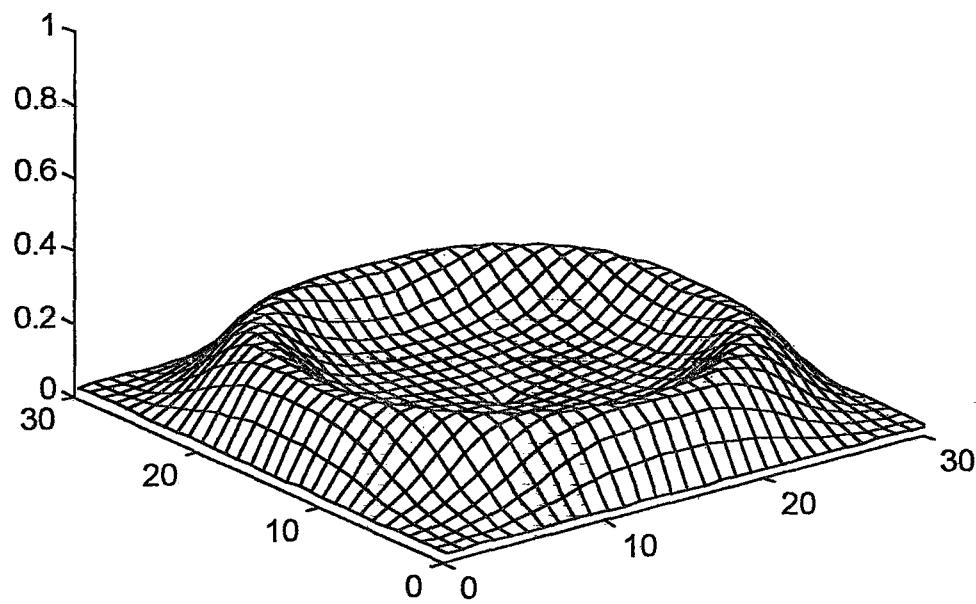
Şekil 6.8 : 60 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



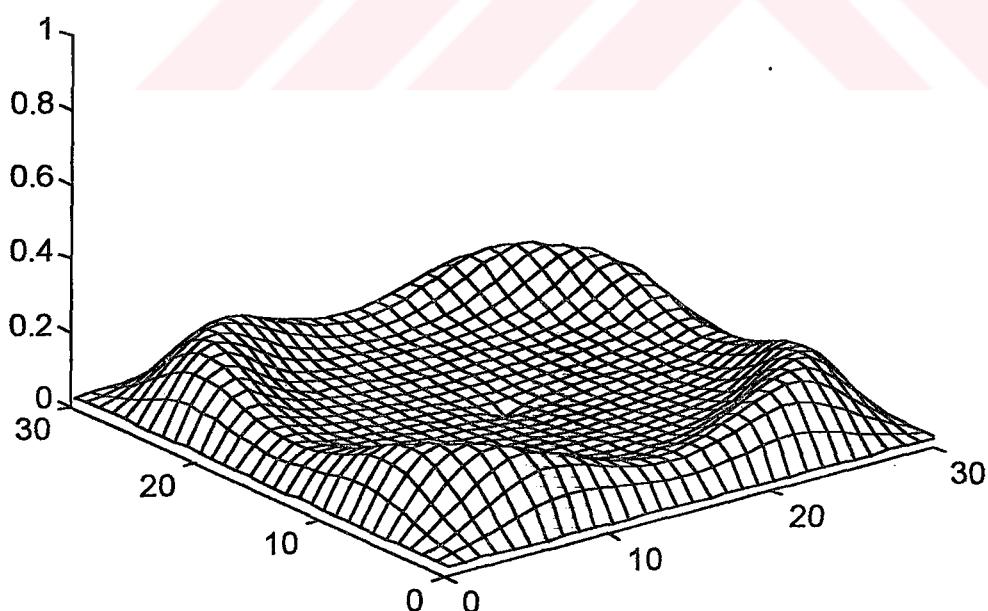
Şekil 6.9 : 70 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



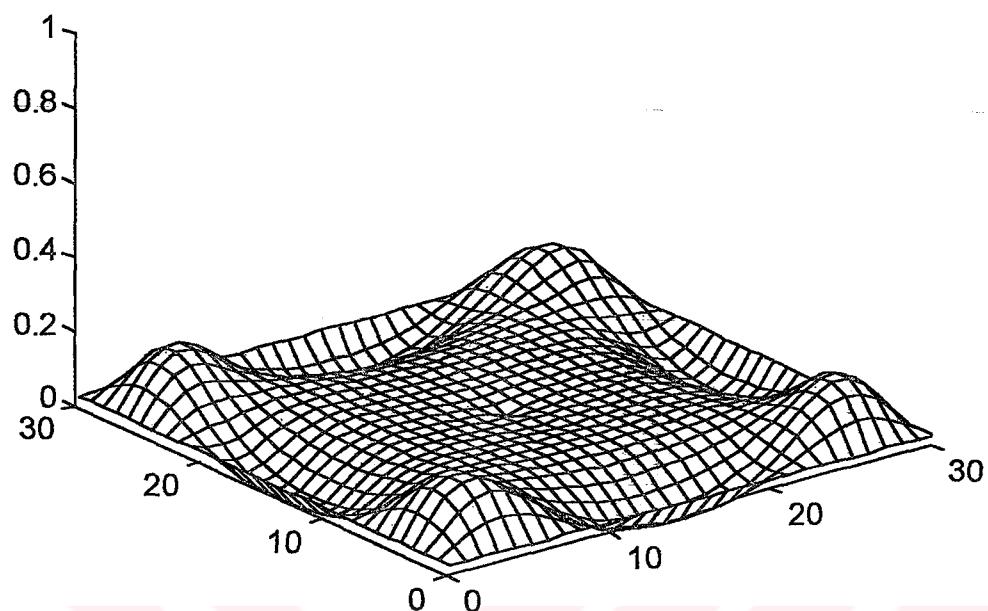
Şekil 6.10 : 80 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



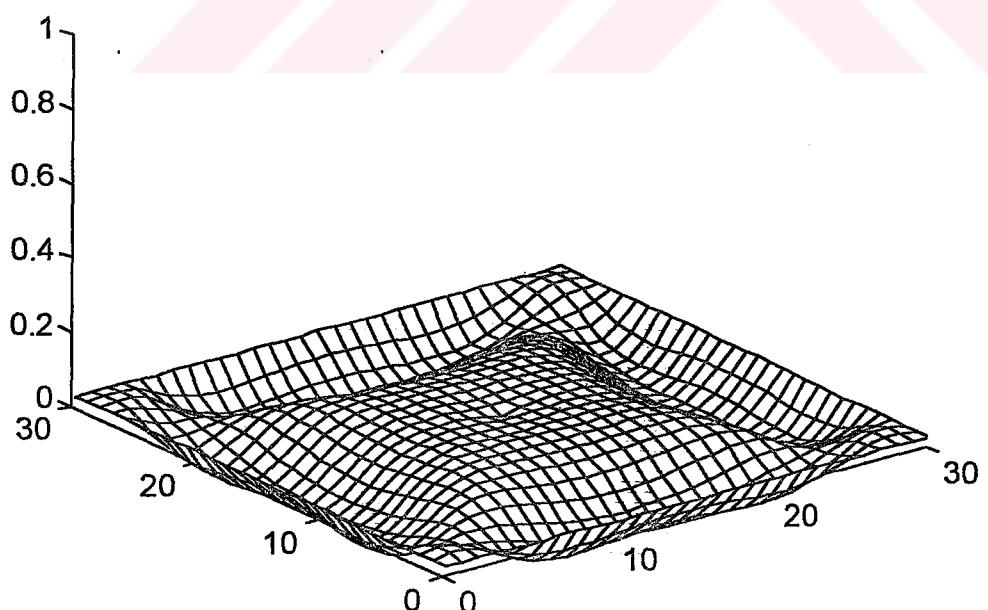
Şekil 6.11 : 90 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



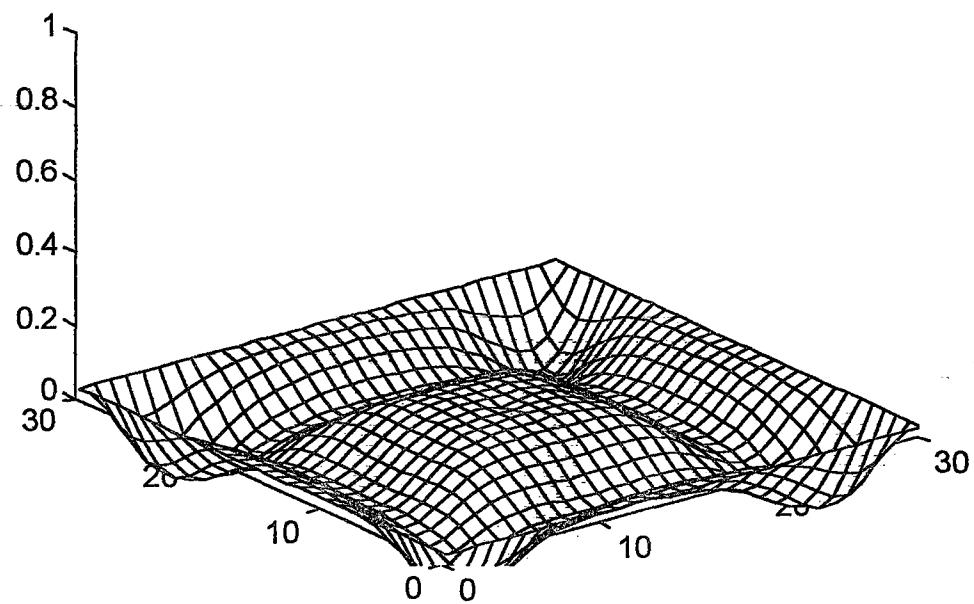
Şekil 6.12 : 100 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



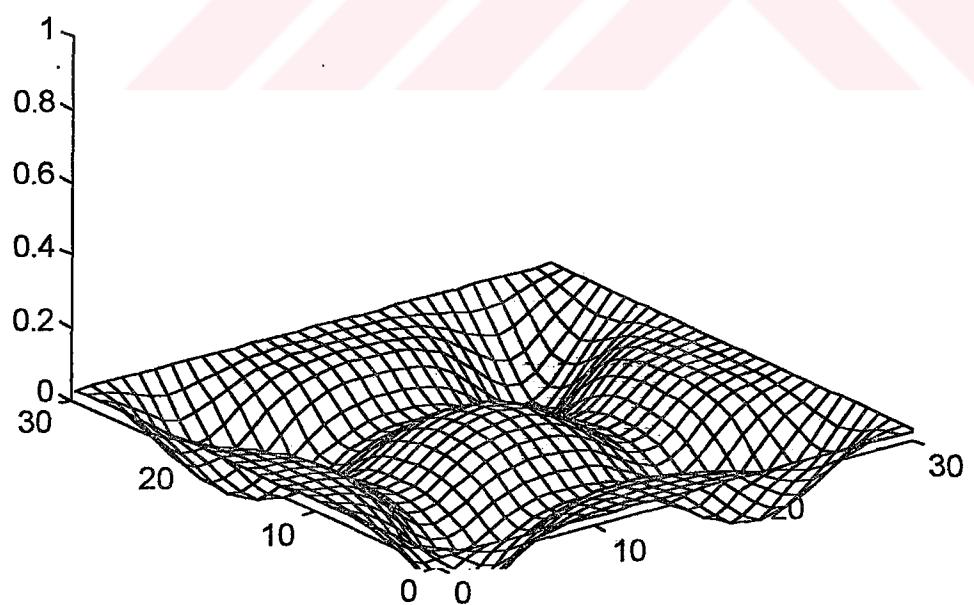
Şekil 6.13 : 110 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



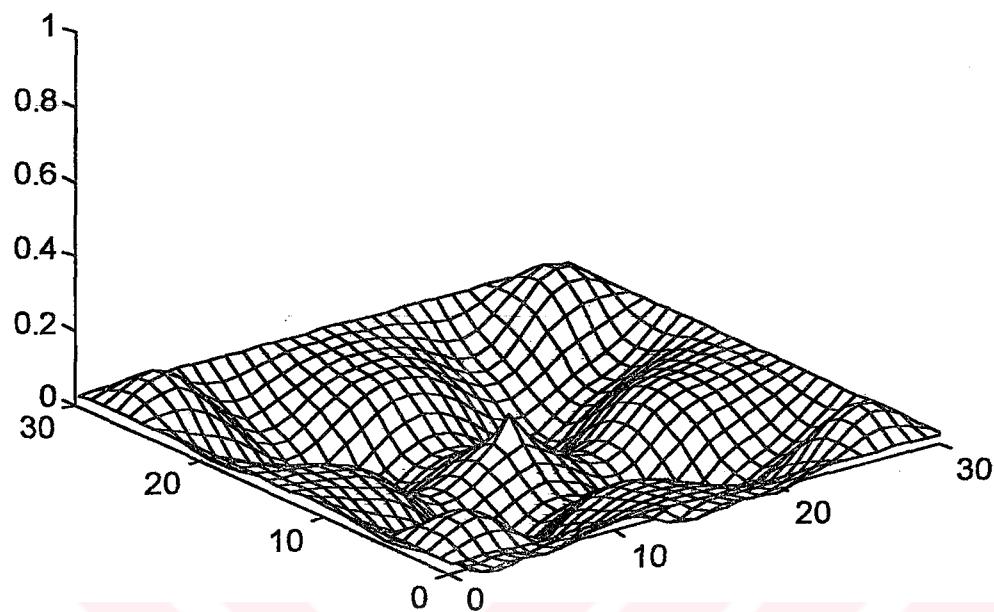
Şekil 6.14 : 120 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



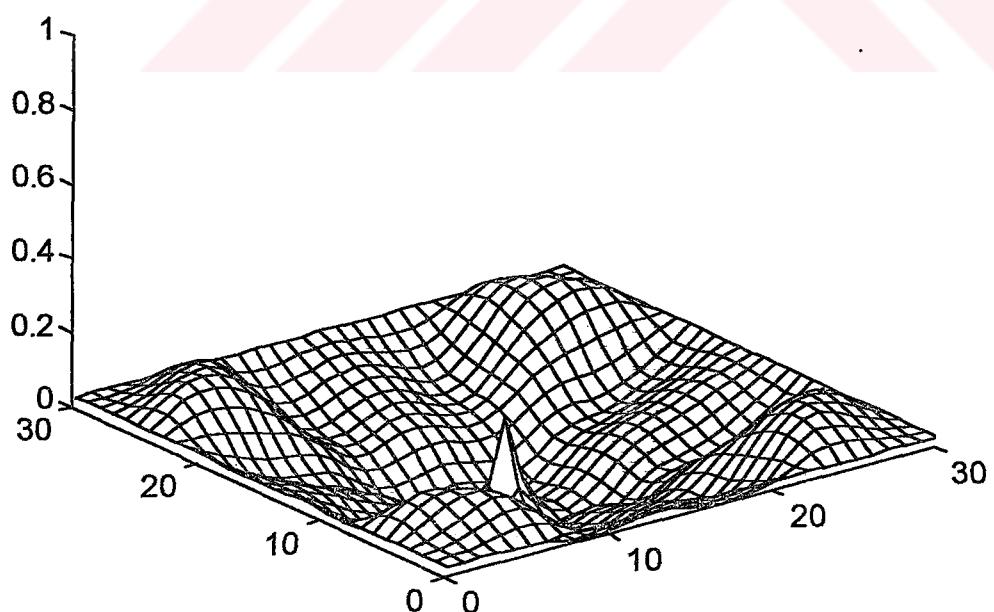
Şekil 6.15 : 130 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



Şekil 6.16 : 140 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



Şekil 6.17 : 150 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu

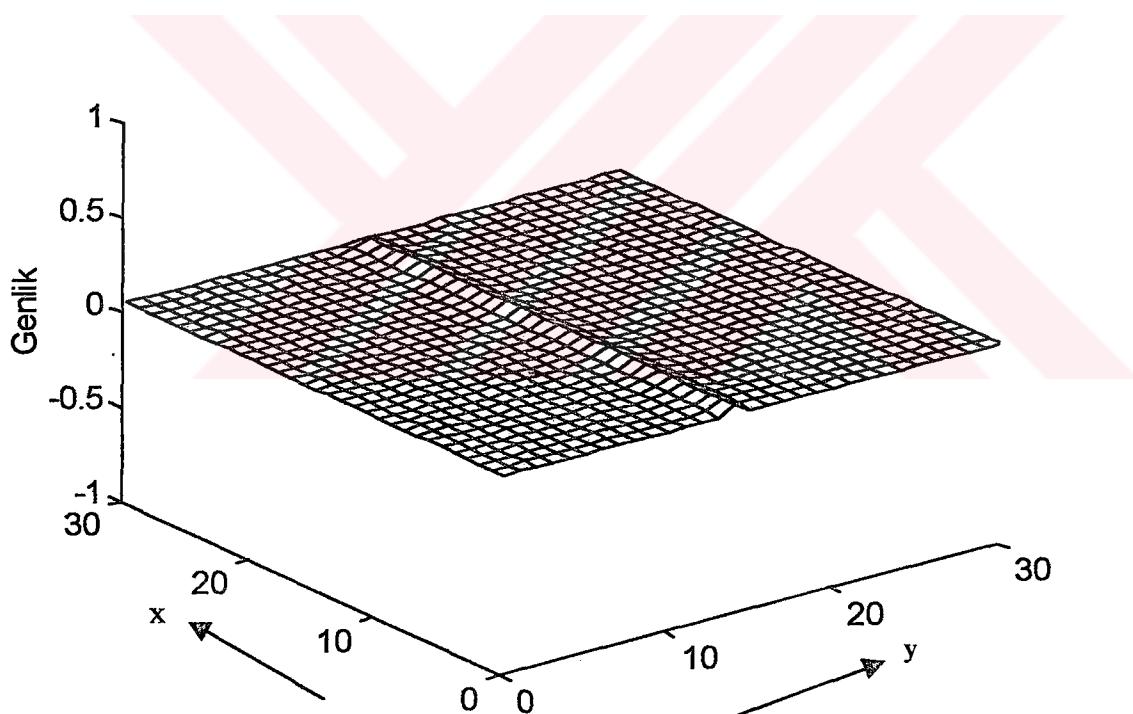


Şekil 6.18 : 160 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu

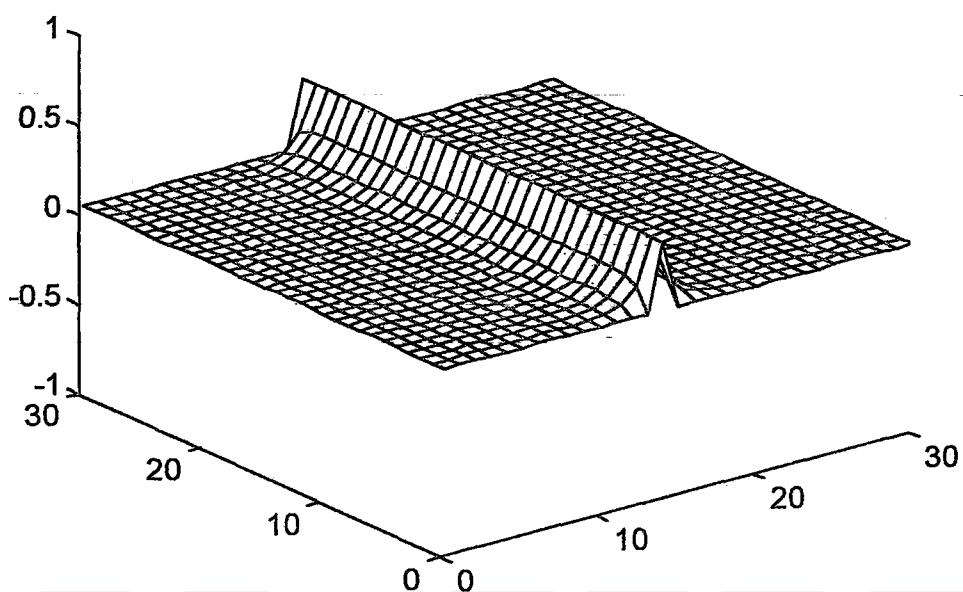
6.6.2. Gauss Darbesinin Bir Doğru Boyunca Uygulanması

İki boyutlu analiz için izgaralara bölünen yapıda kaynak olarak yine Gauss darbesi kullanılmış ve pals, Şekil 6.19'deki gibi yapının merkezinden geçen y ekseni boyunca uygulanmıştır. Bu durumda palsın dairesel olarak her yöne doğru değil, x ekseni boyunca her iki yöne doğru ilerlediği gözlenmiştir. Kaynağın bu şekilde uygulaması için program içerisinde E_z alan bileşenin merkezden geçen y ekseni üzerindeki bütün bileşenlerini pals'ın değerine eşitlemek yeterlidir.

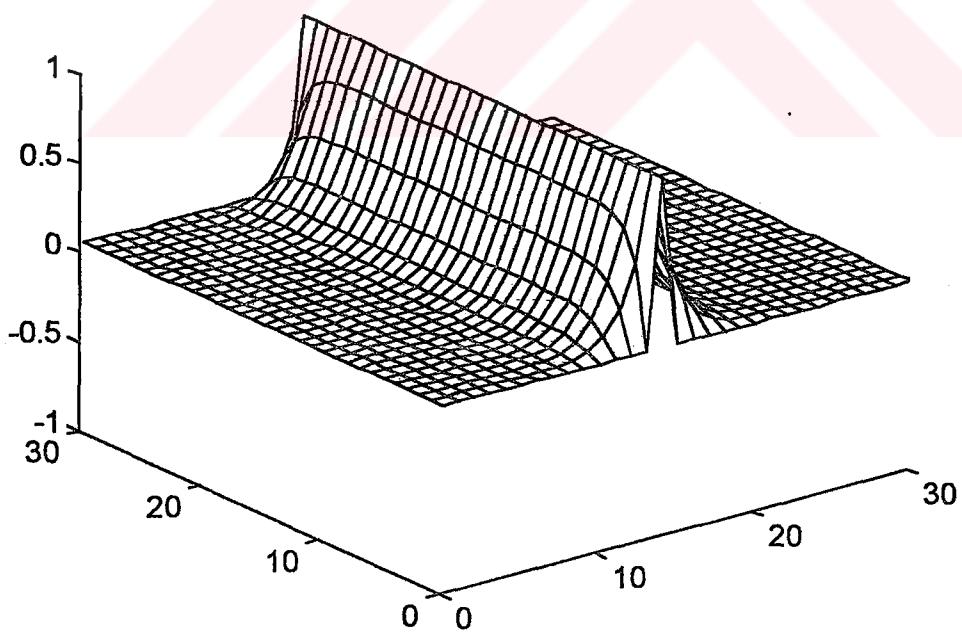
Sınır şartları kullanılmadığı için 100. Zaman adımından sonra Gauss darbesinin problem uzayının içine yansıdığı görülmektedir.



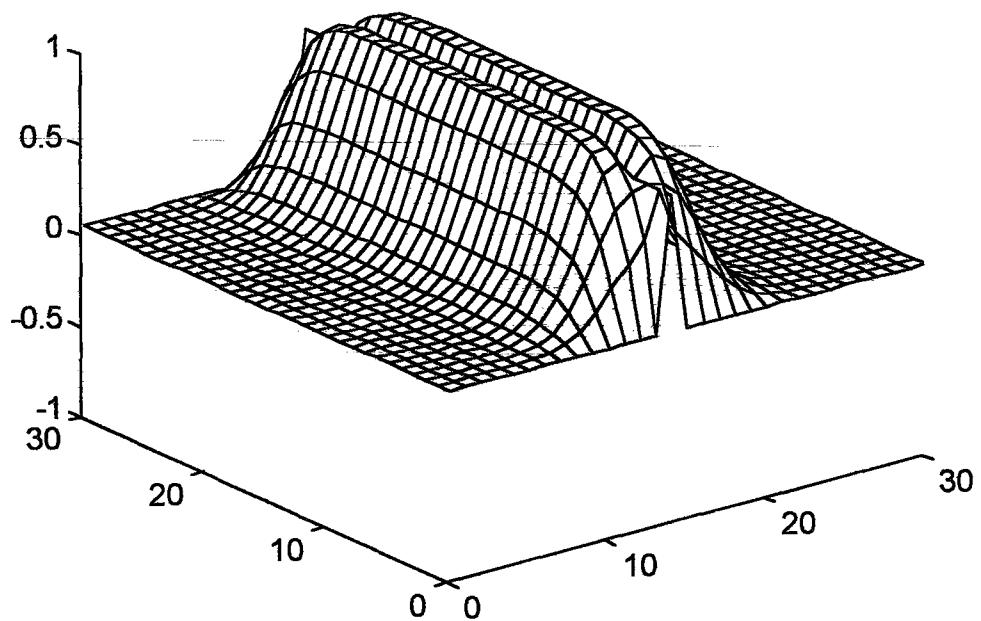
Şekil 6.19 : 10 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



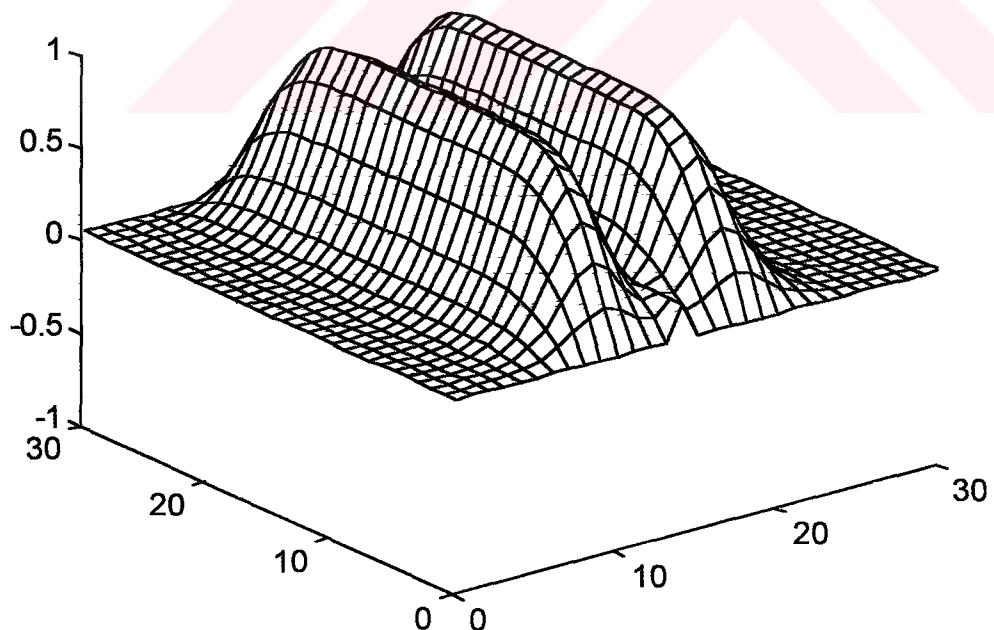
Şekil 6.20 : 20 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



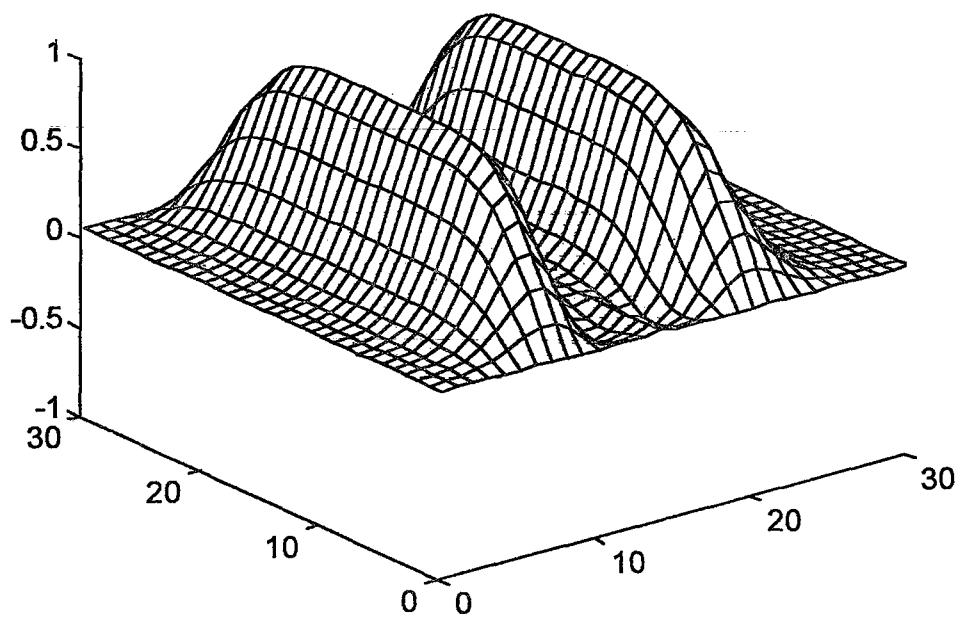
Şekil 6.21 : 30 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



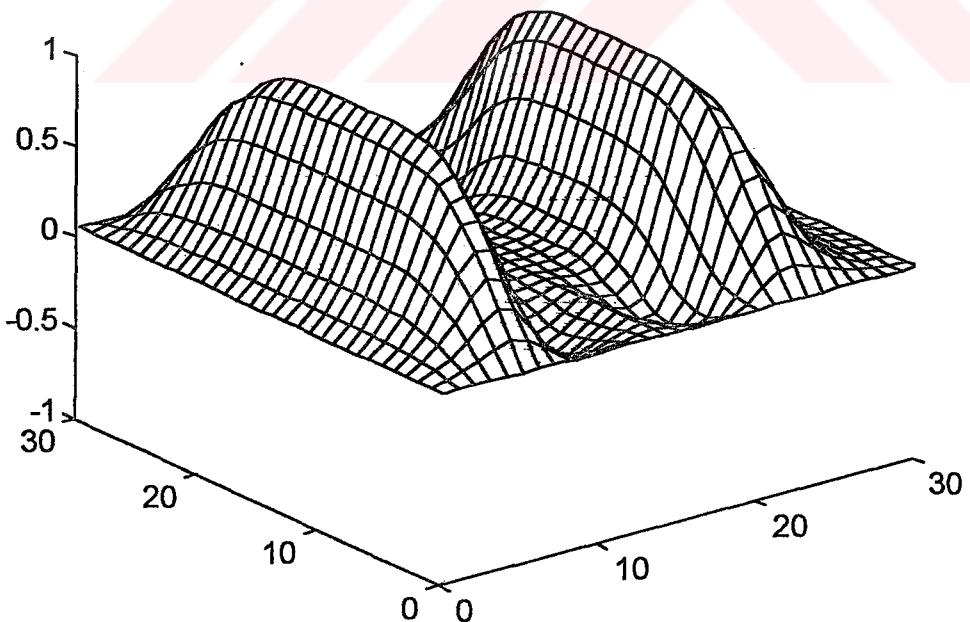
Şekil 6.22 : 40 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



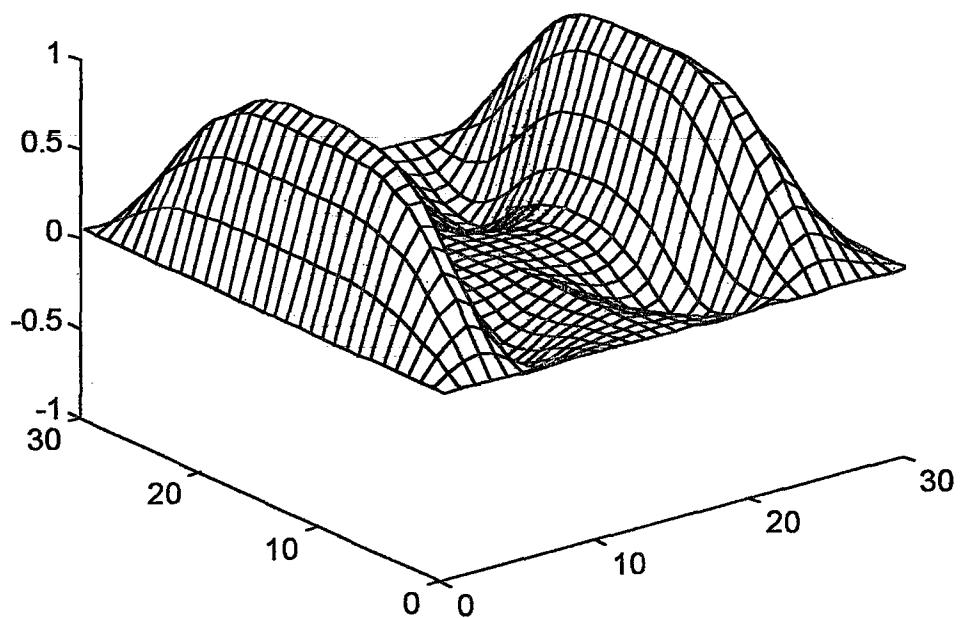
Şekil 6.23 : 50 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



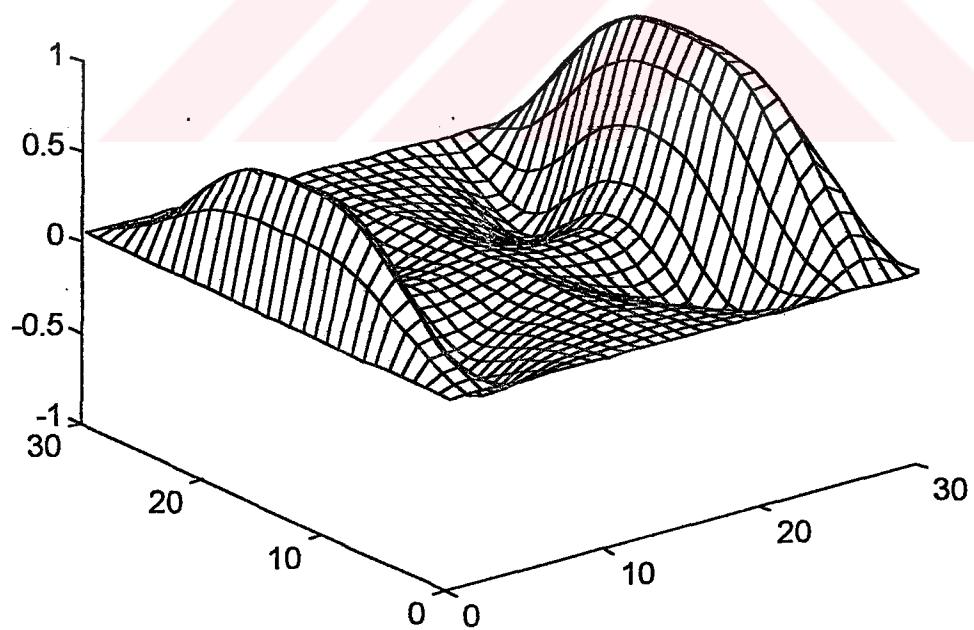
Şekil 6.24 : 60 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



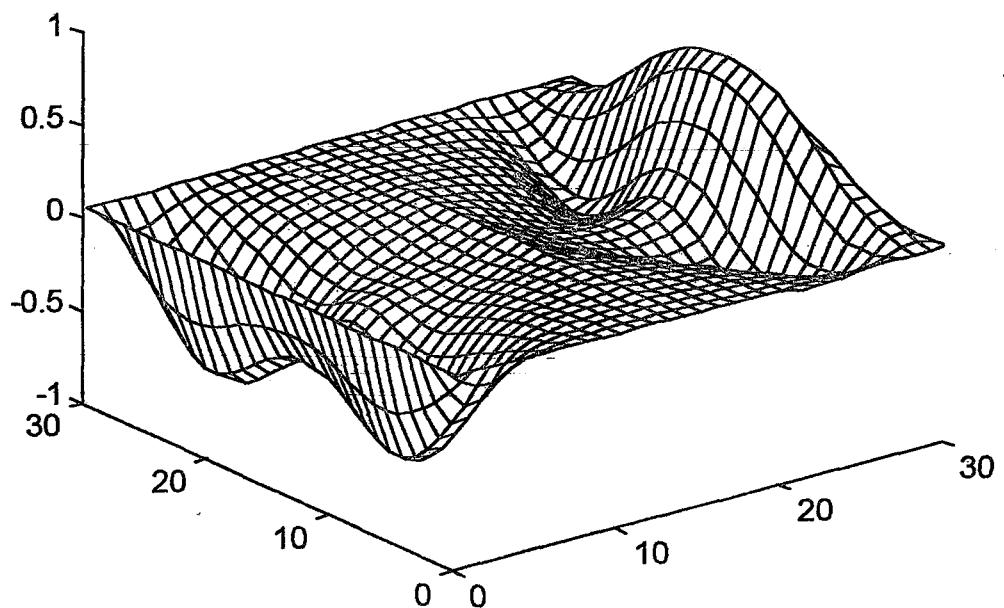
Şekil 6.25 : 70 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



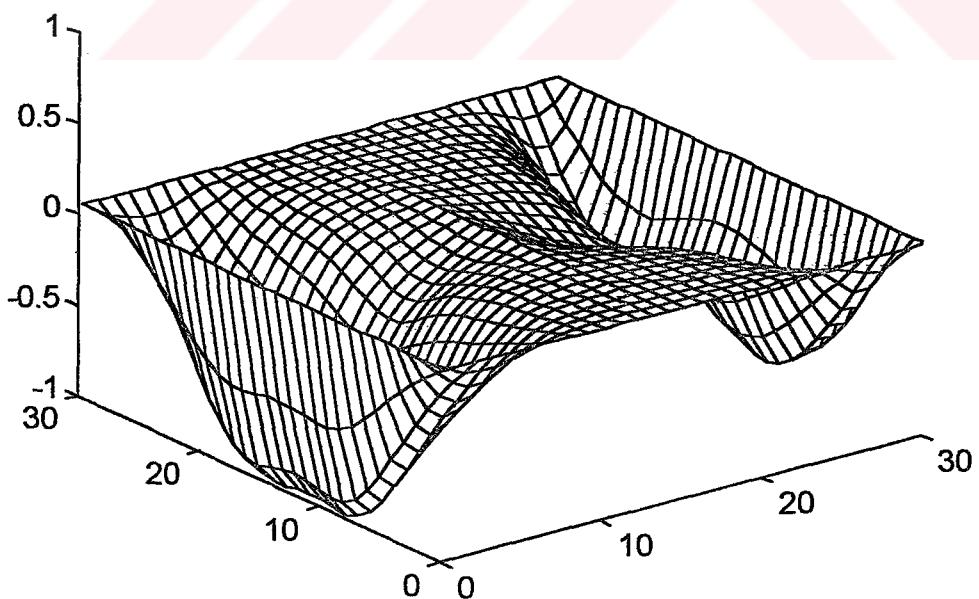
Şekil 6.26 : 80 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



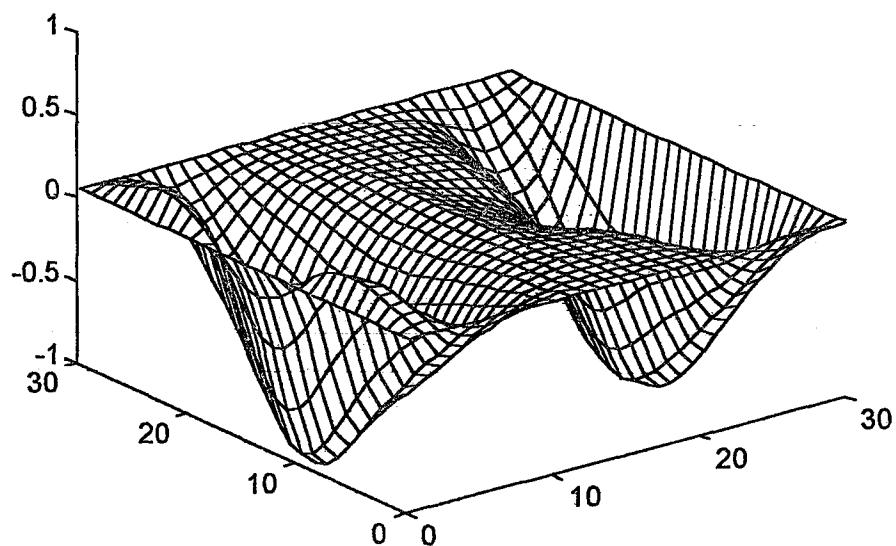
Şekil 6.27 : 90 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



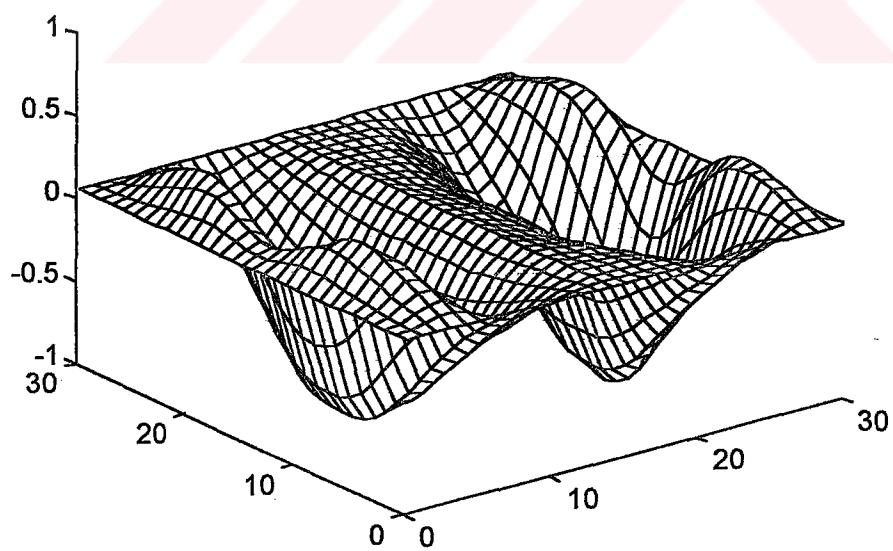
Şekil 6.28 : 100 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



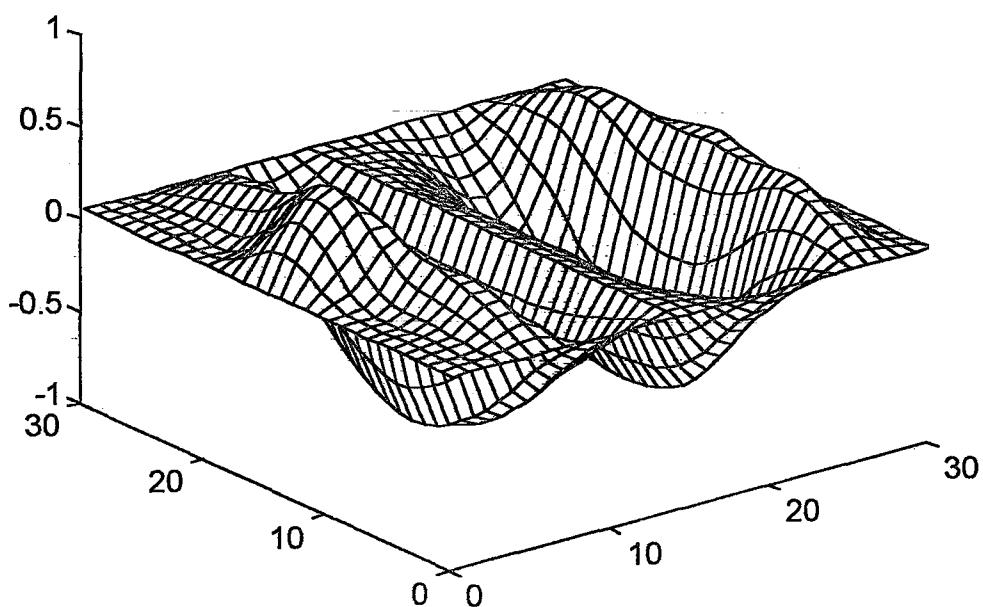
Şekil 6.29 : 110 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



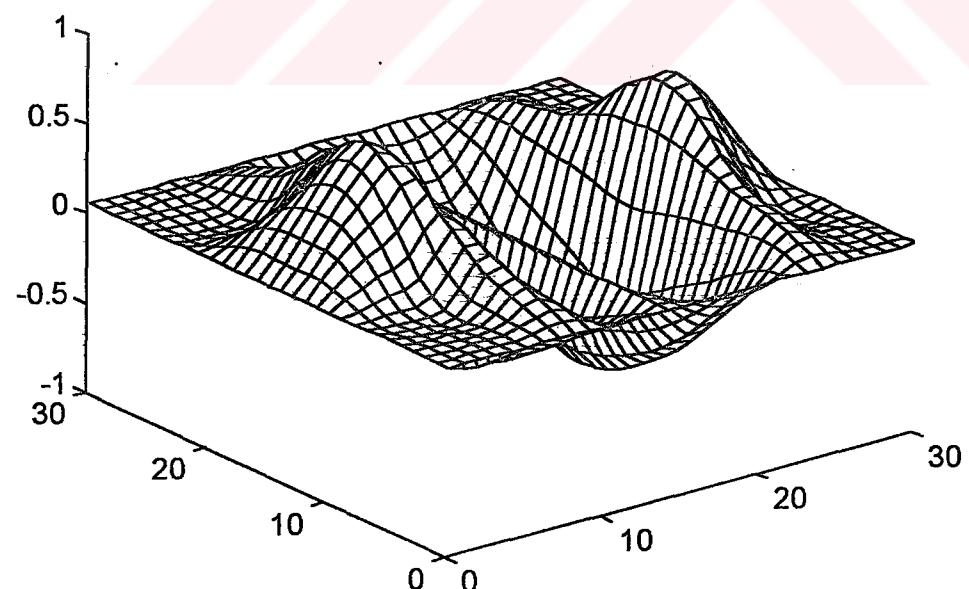
Şekil 6.30 : 120 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



Şekil 6.31 : 130 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



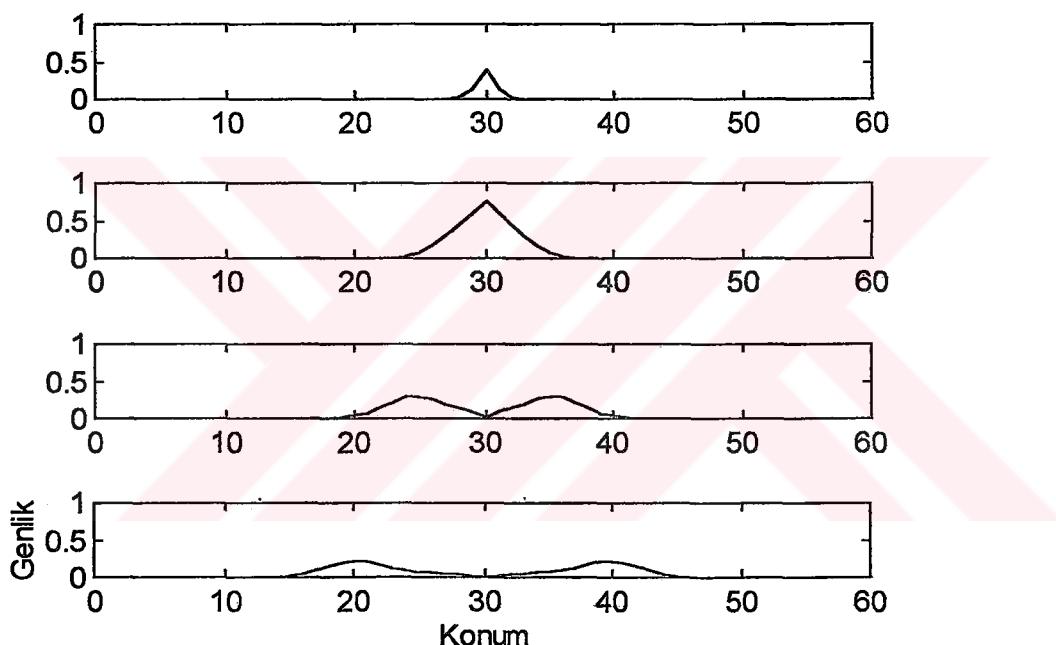
Şekil 6.32 : 140 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu



Şekil 6.33 : 150 zaman adımı sonunda Gauss darbesinin durumu

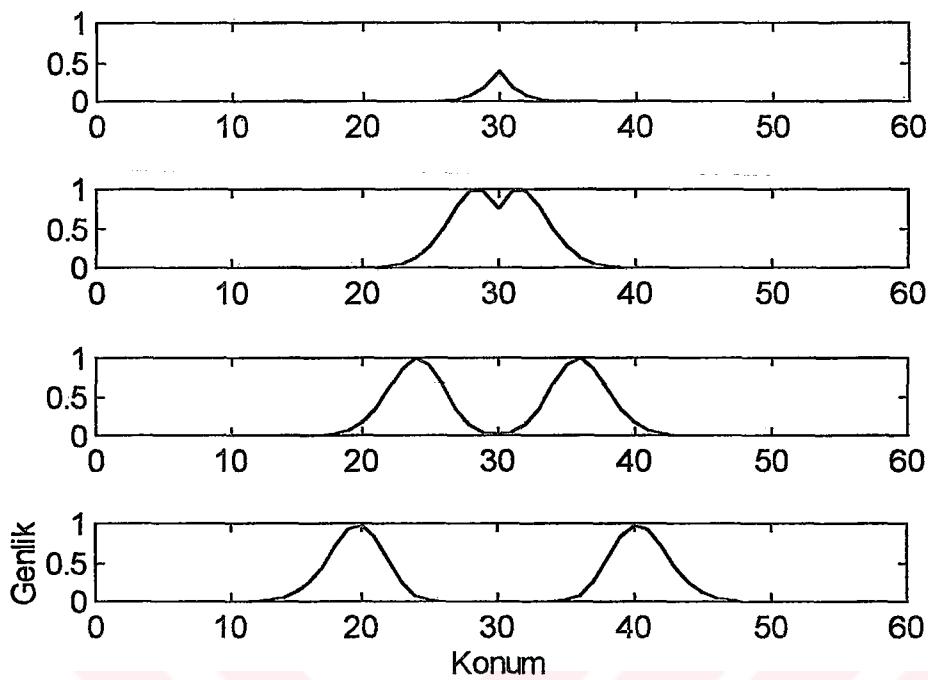
6.6.3. İki Boyutlu Analizde Gauss Darbesinin Genliğinin Değişimi

Bölüm 6.6.1'deki sonuçlardan görüldüğü gibi Gauss Darbesi yapının merkezine uygulandığında, puls hem x hem de y yönünde ilerlemektedir. Bu durumda puls ilerledikçe genliği azalmaktadır. Gauss darbesi merkeze uygulandığında yapıda herhangi bir kayıp parametresi olmasa bile ($\sigma = 0$ ve $\epsilon_r = 1$) silindirik dağılım nedeniyle genlik değeri merkezden uzaklaşıkça azalır (Sevgi, 1999). Şekil 6.34'de iki boyutlu yapının merkezine Gauss darbesi uygulandıktan sonra sırasıyla 20, 40, 60 ve 80 zaman adımı sonundaki pulsın genliği konuma bağlı olarak çizdirilmiştir.



Şekil 6.34 : Silindirik dağılım nedeniyle pulsın genliğinin zamanla azalması

Eğer Gauss darbesi bölüm 6.6.2'deki gibi bir doğru boyunca uygulanırsa pulsın genliği zamana bağlı olarak değişmez. Şekil 6.35'de sırasıyla 20, 40, 60 ve 80 zaman adımı sonundaki pulsın genliği konuma bağlı olarak çizdirilmiştir.



Şekil 6.35 : Doğru boyunca kaynak uygulandığında pulsın genliğinin değişimi

6.7. FDTD Metodu İle Zaman ve Frekans Cevabının Elde Edilmesi

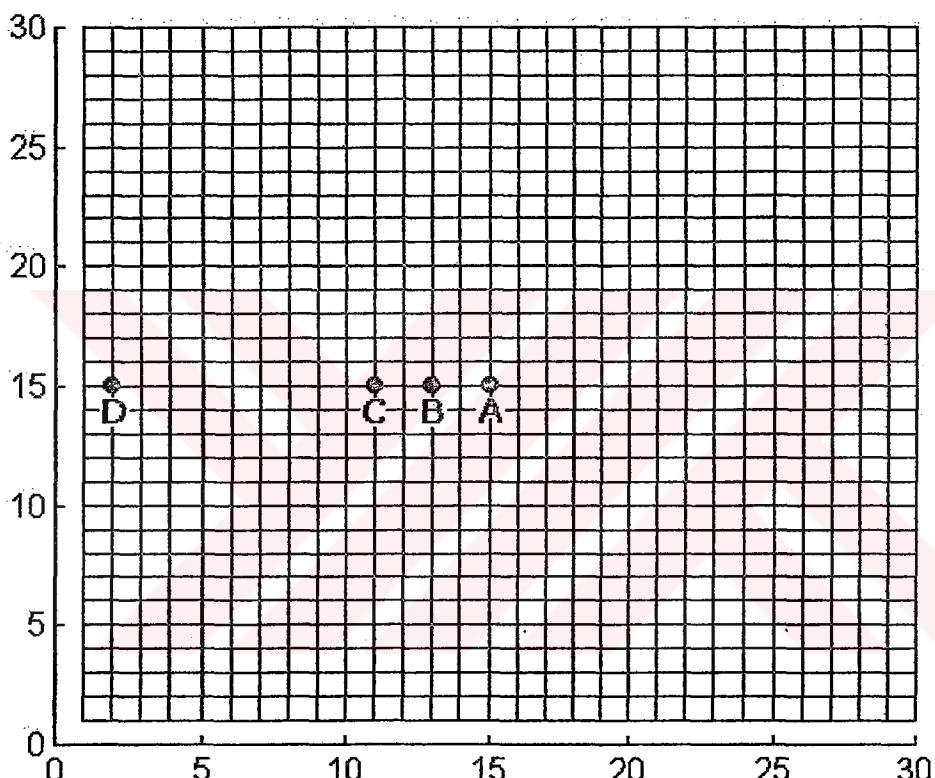
6.7.1. Zaman Cevabı

FDTD metodu ile 2 boyutlu yapıların analizi yapılırken Maxwell denklemleri doğrudan zaman domeninde ayrıklaştırılarak iteratif olarak çözüldüğü için sonuçta elde edilen bilgi zaman domeni cevabıdır. Bu cevabının elde edilmesi için yapılması gereken FDTD simülasyonu süresince problem uzayı içerisindeki belirli noktalardan gözlem yapmaktadır. Simülasyon sonunda yapıya ait zaman cevabı doğrudan elde edilir. Eğer frekans cevabı elde edilmek isteniyorsa zaman cevabının Fourier dönüşümü alınmalıdır.

Bölüm 6.6.1 ve 6.6.2'deki sonuçlarda analiz edilen yapıda Gauss darbesinin ilerleyışı verilmiş ve 2 boyutta Gauss darbesinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği gözlenmiştir. Bu bölümde ise belirli gözlem noktalarından simülasyon süresi boyunca

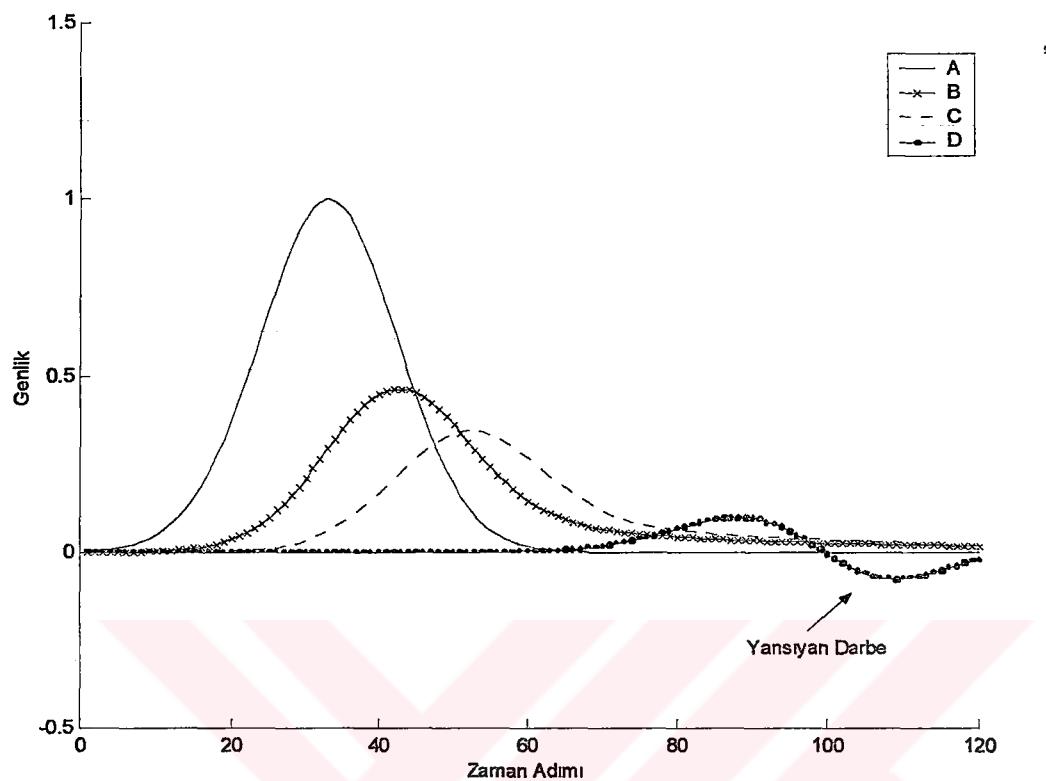
her zaman adımda değerler alınarak o noktadaki alan bileşenlerinin genliğinin zamana bağlı olarak nasıl değiştiği gösterilmektedir.

Şekil 6.36'daki gibi ızgaralara bölünmüş yapıda Gauss darbesi merkeze uygulanmış ve A,B,C,D gözlem noktalarındaki E_z alan bileşeninin genliğinin nasıl değiştiği simülasyon süresi boyunca gözlenmiştir. Bu durum Şekil 6.37'den görülmektedir.



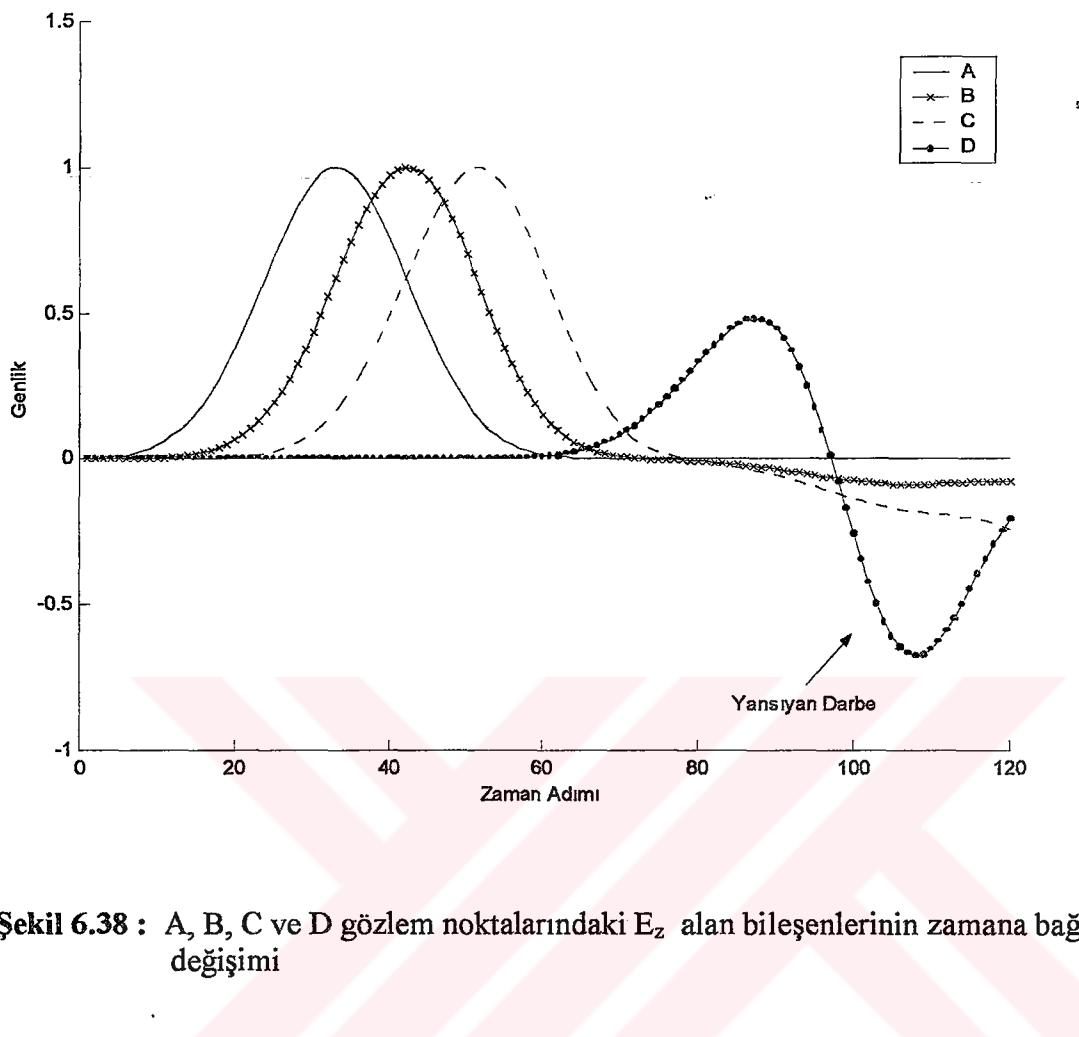
Şekil 6.36 : 2 boyutlu yapıda gözlem noktaları

Şekil 6.37'den görüldüğü gibi Gauss darbesi merkezdeki A noktasına uygulandıktan sonra ilerlemekte ve C'ye ulaştığında genliği %50'den fazla azalmaktadır. Bu durum önceki bölümde bahsedildiği gibi silindirik dağılım nedeniyledir. Sınır şartı kullanılmadığı için 100. zaman adımdan sonra palsın problem uzayının içine geri döndüğü görülmektedir.



Şekil 6.37 : A, B, C ve D gözlem noktalarındaki E_z alan bileşenlerinin zamana bağlı değişimi

Bölüm 6.6.2'deki gibi Gauss darbesi bir doğru boyunca uygulanırsa A,B,C,D gözlem noktalarındaki E_z alan bileşeninin zamana bağlı değişimi Şekil 6.38'deki gibi olur. Şekil 6.38'den de görüldüğü gibi pals uygulandıktan sonra ilerlemekte ve C'ye ulaştığında genliğinde herhangi bir değişim olmamaktadır. Şekil 6.37'deki sonuca benzer olarak sınır şartı kullanılmadığı için 100. zaman adımlından sonra palsın problem uzayının içine geri döndüğü görülmektedir.

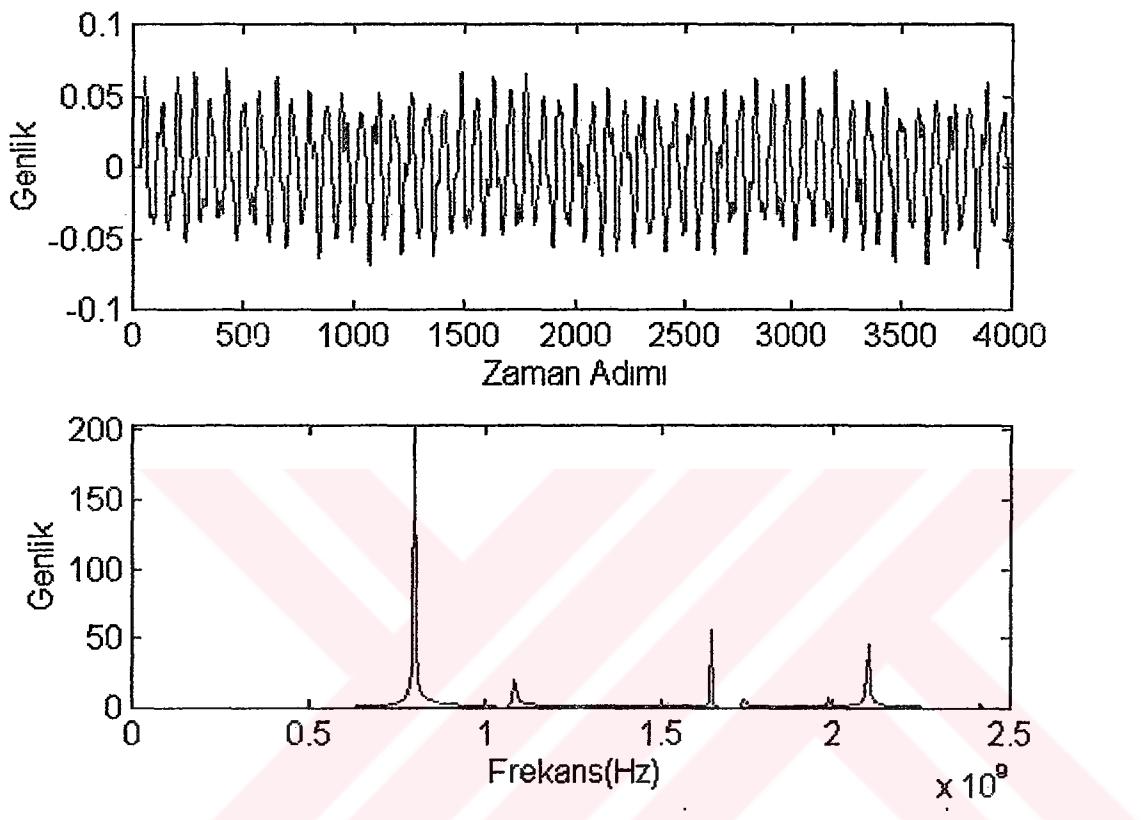


Şekil 6.38 : A, B, C ve D gözlem noktalarındaki E_z alan bileşenlerinin zamana bağlı değişimi

6.7.2. Frekans Cevabı

FDTD metodu ile simülasyonun önemli bir uygulaması da frekans analizidir. Bu bölümde kenarları mükemmel iletken kaplı 2 boyutlu bir yapının frekans davranışını elde edilecektir. Frekans davranışını elde etmek için öncelikle yapının içindeki bir noktaya kaynak olarak Gauss darbesi uygulanır. Gauss darbesinin süresi analiz yapılacak en yüksek frekansa göre belirlenir. FDTD simülasyonu boyunca yapı içerisindeki bir gözlem noktasından E_z alan bileşeninin değerleri her zaman adımı için kaydedilir. Gözlenen alan bileşeninin, yapının her kenarından birkaç yansımaya gelinceye kadar kaydedilmesi yeterlidir. Çünkü bu şekilde zaman cevabı, yapıya ait bilgileri kaydetmiş

olacaktır (Sevgi,1999). Simülasyon sonunda kaydedilen alan bileşenine ait değerlerin Fourier dönüşümü alınarak incelenen yapının rezonans frekansları elde edilir. Şekil 6.39'da $\Delta x = \Delta y = 1\text{cm}$ olan ve 30×30 hücreye bölünen bir yapıya ait zaman ve frekans cevabı görülmektedir.



Şekil 6.39 : İki boyutlu yapıda zaman ve frekans Cevabı

Şekil 6.39'dan görüldüğü gibi E_z alan bileşeninin değeri 4000 zaman adımı boyunca kaydedilmiştir. Eğer daha hassas frekans ayrimı isteniyorsa gözlem süresi uzatılmalıdır. Çünkü frekans çözünürlüğü ile simülasyon süresi birbirile ters orantılıdır. FDTD metodu ile frekans analizi yapılırken önemli bir diğer konu da örnekleme frekansıdır. Eğer zamana bağlı işaret düşük frekansla örneklenirse frekans bandındaki örtüşmeden (aliasing) dolayı bilgi kaybı meydana gelir. Bu durumu önlemek için Nyquist örnekleme teoremi gereğince örnekleme frekansı, zamana bağlı işaretin içerdiği en yüksek frekansın en az 2 katı olmalıdır.

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu tezde elektromanyetikte kullanılan güçlü sayısal tekniklerden biri olan zaman domeninde sonlu farklar metodu ayrıntılarıyla sunulmuştur. Ayrıca, elde edilen 2 boyutlu FDTD denklemeleri ile mikrostrip yapılarının nasıl analiz edileceği hakkında genel bilgiler verilmiş ve iki boyutlu yapılarda zaman domeninde darbe iletiminin simülasyonu yapılmıştır. Bu şekilde, yöntemin 3 boyutlu yapılara uygulanabilmesi için gerekli teorik altyapı hazırlanarak FDTD hücre yapısı, iteratif denklem çözümü, kararlılık kriteri, sayısal dispersiyon, zaman ve frekans domeni cevabı, mikrostrip hattın özellikleri gibi pek çok konu ayrıntılarıyla öğrenilmiştir.

Günümüzde FDTD metodu pek çok elektromanyetik problemin çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem her ne kadar ele alınan fiziksel problem için doğru sonuçlar üretse de çok fazla bellek ve hafızaya gerek duymaktadır. Hassas sonuç gerektiren durumlarda ise simülasyon süresi çok fazla olabilmektedir. Bu durumda yöntemin temel algoritmasına ek olarak mutlaka iyileştirmeler yapılması gereklidir. Örneğin mikrostrip yapılarının simülasyonunu doğru bir şekilde yapabilmek için yapının kenarlarından geri yansımaları önemli ölçüde azaltan sınır şartları kullanılması gereklidir. Ancak bu şekilde açık bölge simülasyonu yapılabilir. Diğer bir konu ise alt izgaralama(subgridding)'dır. Alan bileşenlerinin yavaş değiştiği yerlerde büyük hücreler, hızlı değiştiği yerlerde ise daha küçük hücreler kullanarak hem sistem kaynaklarından hem de zamandan tasarruf sağlanır. Bu konular üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

Bu tezde yapılan çalışmalar FDTD metodıyla tek ve iki boyutlu yapıların zaman ve frekans cevabının elde edilmesinde yeterli bilgiler vermektedir. İleriye yönelik olarak bu metod sınır şartları, alt izgaralama ve dinamik bellek kullanımını da içeren bir duruma getirilecek ve 3 boyutlu FDTD metodıyla pek çok elektromanyetik problemin çözümü yapılacaktır.

KAYNAKLAR

- Balık, H., 1997, Passive open planar microwave circuit analysis by enhanced spectral domain method. Phd. Thesis, University of Bristol.
- Berenger, J., 1994, A perfectly matched layer for the absorption electromagnetic waves. *J Comput. Phys.*, vol.114, no.1, 185-200.
- Chen, Z., Hoefer W., Ney, M., 1991, New Finite-Difference Time-Domain formulation and its equivalence with the TLM symmetrical condensed node. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.39, no.12, 2158-2169.
- Griffiths, D., 1991, Elektromagnetik Teori. Arte Güven Yayın, İstanbul, 404 s.
- Higdon, R.L., 1986, Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multi-dimensional wave equation. *Math. Comput.*, vol.47, 437-459.
- Hubing, T., 1991, Survey of numerical electromagnetic modelling techniques. Intel Corporation.
- Kasher, J., Yee, K.S., 1987, A numerical example of a 2-D scattering problem using a subgrid. *Applied Comp. Electromag. Soc. J. And newsletter*, vol.2, no.2, 75-102.
- Kim, L., Hoefer, J., 1990, A local mesh refinement algorithm for the time domain-finite difference method using Maxwell's curl equations. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, 812-815.
- Krishnaiah, K.M., 1995, Finite Difference Time Domain Method (with Subgridding). Transfer Report, Centre for communication research university of Bristol.
- Kürüm, H., 1990, Çift yanlı lineer asenkron motorların sonlu elemanlar yöntemi ile analizi. Doktora tezi, Fırat Üniversitesi.
- Mezzanotte, P., Mongiardo, M., Roselli, L., Sorrentino, R., Heinrich, W., 1994, Analysis of packages microwave integrated circuits by FDTD. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol.42, no.9, 1796-1801.
- Mezzanotte, P., Mongiardo, L., Roselli, L., Sorrentino, R., 1994, FDTD analysis of high performance MMIC package. *IEEE MTT-S*, 337-340.
- Monk, P., 1996, Sub-gridding FDTD schemes. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.*, vol.11, no.1, 37-46.
- Mur, G., 1981, Absorbing boundary conditions for the finite-difference time-domain electromagnetic-field equations. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-23, 377-382.
- Paul, D., Daniel, E., Railton, C., 1991, Fast finite difference time domain method for the analysis of planar microstrip circuits. *European microwave Conf.*, 303-308.

- Prescott, D., Shuley, N., 1992, A method for incorporating different sized cells into the finite-difference time-domain analysis technique. IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol.2, 434-436.
- Railton, C., Mcgeehan, P., 1990, An analysis of microstrip with rectangular and trapezoidal conductor cross sections. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol.38, no. 8, 1017-1022.
- Sevgi, L., 1999, Elektromanyetik Problemler ve Sayısal Yöntemler. Birsen Yayınevi, İstanbul, 213 s.
- Sheen, D., Ali, M., 1990, Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol.38, no.7, 849-857.
- Shlager, L., Schneider, J., 1999, A survey of the finite-difference time-domain literature. 1-26.
- Shorthouse, D., 1992, The CAD and analysis of passive Monolithic microwave integrated circuits by Finite difference time domain technique. Phd. Thesis, University of Bristol.
- Taflove, A., 1995, Computational Electrodynamics the Finite-Difference Time-Domain Method. Artech House, Boston, 598 p.
- Tisani, M., 2000, Solutions to current high-speed board design. Application note 22, Pericom Semiconductor Corporation.
- Toland, B., Houshmand, B., Itoh, T., 1993, FDTD analysis of an active antenna. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol.3, no.14, 423-425.
- Yee, K.S., 1966, Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations. IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol. AP-14, no.3, pp. 302-307.
- Yee, K.S., 1987, A subgridding method for the finite difference time domain algorithm to solve Maxwell's equations. Tech. Rep. UCRL-96772.
- White, M., Iskander M., 1997, Development of a multigrid FDTD code for three-dimensional applications. IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.45, 1512-1517.
- Zhao, P., Litva, J., Wu, L., 1994, A new stable and very dispersive boundary condition for the FD-TD method. IEEE MTT-S, 35-38.
- Zivanovic, S., Yee, K.S., Mei, K., 1991, A subgridding method for the time domain finite difference method to solve Maxwell's equations. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, vol. 39, 471-479.







3.2. METOT

Midyeleri toplamak için araştırma bölgelerine gidildi. Göl suyunun çekilme dönemlerinde özellikle Sonbahar ile İlkbahar mevsimleri arasında arazi kontrolleri yapıldı ve midyelerin zemindeki hareketleri esnasında bırakıkları izler takip edilerek, zeminde 5 – 10 cm derinliğe gömülü yaşadıkları yerler tespit edildi. Böylece midyeler kıyıdan ve su içerisinde toplanmaya çalışıldı. Gölün bataklık derin kısımlarına ise tekneyle gidilerek balıkçılardan tespit ettikleri sahalardan uzun bir sopanın ucuna bağlanmış küçük teneke kutular yardımıyla midyeler zeminden çıkarılıp, su dolu bidonlarla laboratuvara getirildiler. Araziden çok sayıda toplanan midyenin mikrobiyolojik özelliklerini aynı zamanda tespit etmek güç olacağından veya getirilen midyelerin uzun zaman bekletildikten sonra bakteriyolojik analizlerinin yanlış sonuçlar verebileceği düşüncesiyle, her defasında getirilen midyelerin içerisinde 15 örnek seçilerek, *Salmonella* yönünden analizleri kültür yöntemi ve PCR teknigi ile gerçekleştirildi.

Ayrıca, midyelerin toplandığı bölgelerden, steril kapaklı 100 ml' lik cam şişelere su örnekleri alınarak, *Salmonella* yönünden muayene edildi.

3.2.1. *Salmonella*'nın Kültür Yöntemi İle İzolasyon ve İdentifikasiyonu

Mikrobiyolojik incelenmesi yapılacak midyelerin üzerindeki çamurlar klorsuz musluk suyu ile yıkandı ve kurutuldu. Aseptik koşullar altında midyelerin ön ve arka taraflarında bulunan iki adet kuvvetli kas sistemi steril bistüri ile kesilerek veya iğne ile uyarılarak kabukları açıldı. Çıkarılan yumuşak dokuların tamamı vücut sıvıları ile birlikte steril kapaklı tüplere bırakılarak, homojenizatörde homojenize edildi. Homojenizatların bir kısmı bakteriyolojik incelemede kullanılırken, kalan kısmı da -20 °C'de dipfreezde muhafaza edildi.

Steril pipetlerle midye homojenizatından 1 ml alınarak, muhtemel *Salmonella* aranması amacıyla 10 ml Rappaport Vassiliadis broth besiyerine ekimler yapıldı. Bu besiyeri etüvde 42 °C'de 24-48 saat süreyle inkübe edildikten sonra; MacConkey agar, *Salmonella - Shigella* agar ve Brilliant Green Phenol Red Laktoz agar selektif katı besi yerlerine sürme ekimler yapıldı ve aerob koşullarda 35-37 °C'de 18-24 saat süreyle

inkübasyona bırakıldı. Bu besi yerlerinde üreyen *Salmonella* şüpheli kolonilerden preparat hazırlanarak Gram boyama yapıldı. Gram negatif çomak şeklinde olan mikroorganizmaların Nutrient broth ve kanlı agarda kültürleri hazırlandı. İzole edilen *Salmonella* şüpheli suşların identifikasiyonları için, Oksidaz, Katalaz, Hareket, H₂S, İndol, Metil Red, Voges Proskauer, Gaz oluşturma, Üreaz, Sitrat, Lizin Dekarboksilaz, Arjinin dihidrolaz, Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase, Ornitin Dekarboksilaz, Triptofan Deaminaz, Fenilalanin Deaminaz, Jelatin Hidrolizi, Nitrat redüksiyonu ve Laktoz, Glikoz, Sakkaroz, Dulsitol, Mannitol, Arabinoz, Rhamnoz, Maltoz karbonhidrat fermantasyon testleri yapıldı (Arda, 2000; Bekar, 1997; Bilgehan, 1995; Carter, 1984; Quinn et al., 1994).

Çalışma bölgelerinden getirilen su örnekleri ise, 25 ml miktarında ilk önce Pepton Water besiyerine karıştırılıp 35-37 °C’ de 16-20 saat inkübasyonun ardından Rappaport Vassiliadis brotha 1 ml bırakıldı. Diğer izolasyon ve identifikasiyon işlemleri ise midyelerdeki gibi yürütüldü.

Kullanılan selektif besi yerlerinin *Salmonella* bakterisini izole edip edemeyeceğini kontrol etmek amacıyla, referans *Salmonella enteritidis* ve kontaminant olarak *Escherichia coli* kültürleri vasıtasiyla deneme izolasyonları yapıldı. *Salmonella* bakterisi ve kontaminant kültür aynı anda Rappaport Vassiliadis Broth'a ekildi ve tüm diğer selektif zenginleştirme ve izolasyon basamakları birlikte uygulandı.

Salmonella şüpheli, oksidaz negatif kolonilerden, Lassen (1975)' in Norveç üçlü tüp yöntemindeki katı, yarı katı ve sıvı besiyerlerine ekimler yapıldı. Tüp 37 C°' de 24 - 48 saat inkübasyona bırakıldı. Birinci tüpte (katı), Glikoz ve Laktoz Fermantasyonu , H₂S oluşumu, Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase, Lizin Dekarboksilaz teşekkürülü, ikinci tüpte (yarı katı) Mannitol Fermantasyonu, Nitrat Redüksiyonu, Hareket ve üçüncü tüpte (sıvı) ise, Üreaz ve İndol oluşumu ile Triptofan Deaminaz test sonuçları, tüplerde görülen biyoşimik değişikliklerden belirlendi. Ayrıca; metil red – voges proskauer, jelatin hidrolizi, sitrat kullanımı, ornitin dekarboksilaz, arjinin dihidrolaz ve karbonhidrat fermantasyon testleri de Arda (1997) ve Bilgehan (1995)'nın bildirdikleri yöntemlere göre yapıldı. *Salmonella* identifikasiyon ise, Lassen (1975) ve Bekar (1997)' in *Enterobactericeae* grubundaki bakterileri ayırmada kullandıkları ayırm şeması ile karşılaştırılarak belirlendi.

3.2.2. Serogruplandırma Çalışması

MacConkey agarda üretilen *Salmonella* suşları önce polivalan O antiserumuyla aglutine edildi. Aglütinasyonun görüldüğü grup antiserumlarıyla serogrup tayini yapıldı.

3.2.3. *Salmonella*'nın Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) ile İdentifikasiyonu

3.2.3.1. DNA İzolasyonu

PCR tekniğini optimize etmek amacıyla referans *Salmonella enteritidis* suşu ile PCR'da denemeler yapıldı. Bunun için; referans suşdan selektif Brilliant Green Phenol Red Laktoz agara yapılan ekimlerde üreyen kolonilerden öze ile örnek alınarak, eppendorf tüp içerisinde 300 mikrolitre (μl) distile suda iyice süspansedildi. Tüp içindeki mikroorganizmalar, 56 °C' ye ayarlı su banyosunda 30 dakika bekletilerek inaktive edildi. Eppendorf tüpündeki hacim kadar zirkonyum boncukları ilave edilerek bir mini çalkalayıcıda (Biospec Products, Oklahoma, USA) 4600 rpm'de 2 x 90 sn süreyle çalkalanarak etkenin hücre duvarının mekanik olarak yıkılması işlemi gerçekleştirildi. Daha sonra üstteki sıvı alınarak başka bir tüpe aktarıldı ve 300 μl Tris-HCl ile doygun hale getirilmiş fenol ilave edildi. Süspansiyon 5 dakika elle çalkalandıktan sonra 13.000 rpm' de 10 dakika santrifüj edildi. Fenollu kısma dokunmadan üstteki sıvı bir mikropipet yardımıyla dikkatli bir şekilde başka bir tüpe aktarıldı. Daha sonra DNA'nın presipitasyonu amacıyla süspansiyona 0,1 hacim 3 M sodyum asetat ve 2,5 hacim saf etanol ilave edilerek dipfreezde -20 °C' de 1-2 saat bekletildi. 13.000 rpm' de 10 dakika santrifüjden sonra tüpteki sıvı döküldü ve elde edilen tortu sırasıyla %90 ve %70' lik etanol ile iki defa yıkandı. Bu işlemler arasında 13.000 rpm' de 5 dakika süreyle santrifüj uygulandı. Son olarak elde edilen tortu kurutuldu ve 50 μl distile su ile süspansedildi. Bu süspansiyondan 5 μl alınarak PCR'da hedef DNA olarak kullanıldı.

3.2.3.2. PCR

PCR' de 10 x PCR buffer'ından (100 mM Tris-HCl, pH 9.0, 500 mM KCl, 15 mM MgCl₂, %1 Triton X -100) 5 µl, deoksinükleotid trifosfatların (adenin, guanin, sitozin ve timin) her birinden 250 µM, 2U Taq DNA polimeraz enzimi (Promega), *Salmonella* bakterisinin 16S rRNA geninden üretilen 16SF1 (5¹ – TGTTGTGGTTAATAACCGCA – 3¹) ve 16SIII (5¹ –CACAAATCCATCTCTGGA – 3¹) primer çiftinin (Promega) (Lin and Tsen, 1996) her birinden 10 pg ve 5 µl hedef DNA olmak üzere toplam 50 µl' lik hacimde hazırlanan PCR karışımının üzeri 40 µl mineral ya  ile kaplandı ve PCR reaksiyonu, Thermocycler' da (Hybaid, Ingiltere) gerçekleştirildi. DNA amplifikasyonu; denatürasyon için 95 °C' de 1 dakika, hibridizasyon için 58 °C' de 2 dakika ve polimerizasyon için 72 °C' de 2 dakika olmak üzere 35 siklus halinde gerçekleştirildi. Son siklusdan sonra 72 °C' de 5 dakika' lik bir sentez basama  uygulandı.

PCR' da amplifiye edilen DNA ürünlerinden, 7 µl alınıp, 3 µl blue-orange yükleme solusyonu ile karıştırılarak, daha önce hazırlanan %1.5' luk agaroz jel üzerindeki kuyucuklara yerleştirildi. Son kuyucu  da PCR markeri bırakıldı. Jel, Tris-borik asit- EDTA (TBE) buffer'ı kullanılarak 75 voltta 1 saat süreyle elektroforeze bırakıldı. Bu süre sonunda jel, ethidium bromide (0.5 µg / ml) ile oda  ısısında 30 dakika süreyle boyandı. Karanlık odada ultraviyole transilluminatörde *Salmonellaya* özgü DNA bant uzunluklarına (bp – base pair) bakılarak polaroid kamera sistemi ile fotoğrafı çekildi. Metodun herhangi bir aşamasında meydana gelebilecek muhtemel bir kontaminasyonu tespit etmek amacıyla gerek DNA ekstraksiyonu aşamasında gerekse PCR' da pozitif *Salmonella enteritidis* ve negatif kontrol olarak da *E. coli* bakterileri kullanıldı.

3.2.3.2. PCR

PCR' de 10 x PCR buffer'ından (100 mM Tris-HCl, pH 9.0, 500 mM KCl, 15 mM MgCl₂, %1 Triton X -100) 5 µl, deoksinükleotid trifosfatların (adenin, guanin, sitozin ve timin) her birinden 250 µM, 2U Taq DNA polimeraz enzimi (Promega), *Salmonella* bakterisinin 16S rRNA geninden üretilen 16SF1 (5¹ – TGTTGTGGTTAATAACCGCA – 3¹) ve 16SIII (5¹ –CACAAATCCATCTCTGGA – 3¹) primer çiftinin (Promega) (Lin and Tsen, 1996) her birinden 10 pg ve 5 µl hedef DNA olmak üzere toplam 50 µl' lik hacimde hazırlanan PCR karışımının üzeri 40 µl mineral ya  ile kaplandı ve PCR reaksiyonu, Thermocycler' da (Hybaid, Ingiltere) gerçekleştirildi. DNA amplifikasyon; denatürasyon için 95 °C' de 1 dakika, hibridizasyon için 58 °C' de 2 dakika ve polimerizasyon için 72 °C' de 2 dakika olmak üzere 35 siklus halinde gerçekleştirildi. Son siklusdan sonra 72 °C' de 5 dakika' lik bir sentez basama  uygulandı.

PCR' da amplifiye edilen DNA ürünlerinden, 7 µl alınıp, 3 µl blue-orange yükleme solusyonu ile karıştırılarak, daha önce hazırlanan %1.5' luk agaroz jel üzerindeki kuyucuklara yerleştirildi. Son kuyucu  da PCR markeri bırakıldı. Jel, Tris-borik asit- EDTA (TBE) buffer'ı kullanılarak 75 voltta 1 saat süreyle elektroforeze bırakıldı. Bu süre sonunda jel, ethidium bromide (0.5 µg / ml) ile oda  ısısında 30 dakika süreyle boyandı. Karanlık odada ultraviyole transilluminatörde *Salmonellaya* özgü DNA bant uzunluklarına (bp – base pair) bakılarak polaroid kamera sistemi ile fotoğrafı çekildi. Metodun herhangi bir aşamasında meydana gelebilecek muhtemel bir kontaminasyonu tespit etmek amacıyla gerek DNA ekstraksiyonu aşamasında gerekse PCR' da pozitif *Salmonella enteritidis* ve negatif kontrol olarak da *E. coli* bakterileri kullanıldı.

4.1. *Salmonella* İzolasyon ve İdentifikasiyonu

Keban Baraj Gölünden toplanan 627 adet midyeden, Koçkale bölgesine ait 397'sinin 19'unda (% 4.79) *Salmonella* izolasyonu yapılırken, Pertek bölgesinden çıkarılan 230 midyede *Salmonella*'ya rastlanılmadı. Homojenize edilen midye örneklerinden, Rappaport Vassiliadis Broth'da 48 saatlik ön zenginleştirme sonrası; MacConkey agar, *Salmonella* - *Shigella* agar ve Brilliant Green Phenol Red Laktoz agar besi yerlerine yapılan ekimlerde, *Salmonella* şüpheli koloniler tespit edildi. Bunların, MacConkey agarda gri - beyaz renkte (Şekil 4.1.1), *Salmonella* - *Shigella* agarda rensiz (Şekil 4.1.2), Brilliant Green Phenol Red Laktoz agarın normal yeşilimsi sarı rengini, açık kırmızıya dönüştüren ve opak üreme gösteren (Şekil 4.1.3) özellikte oldukları görüldü. Bu kolonilerden hazırlanan preparatların Gram boyanmasında, mikroorganizmaların Gram negatif çomak şeklinde olduğu saptandı. İzole edilen Gram negatif çomak şekilli 19 suşun nutrient broth ve kanlı agarda hazırlanan saf kültürlerinden biyokimyasal özellikleri belirlendi (Tablo 4.1.1). Bu suşlardan 19 (%100)'unda katalaz, glikoz, mannitol, metil red, lizin dekarboksilaz, rahamnoz, maltoz, nitrat; 15 (%78,95)'inde hareket; 16 (%84,21)'sında gaz teşekkürülü; 12 (%63,16)'sında arjinin dihidrolaz ve 10 (%52,63)'unda H₂S, sitrat, ornitin dekarboksilaz, dulsitol, arabinoz, testleri pozitif bulundu. Buna karşılık suşların 19 (%100)'unda Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase, laktaz, fenilalanin deaminaz, üre, indol, triptofan deaminaz, oksidaz, voges proskauer, jelatin hidrolizi, sakkaroz, inositol; 9 (%47,37)'unda H₂S; sitrat, ornitin dekarboksilaz, dulsitol, arabinoz; 4 (%21,05)'ünde hareket; 3 (% 15.79)'nde gaz teşekkürülü ve 7 (%36,84)'sında ise arjinin dihidrolaz negatif bulundu. Bu biyokimyasal özelliklere göre 19 suş (%3.03) *Salmonella* olarak identifiye edildi.

Her iki bölgeden alınan su örneklerinde ise, belirtilen izolasyon ve identifikasiyon testleri uygulandığında *Salmonella* tespit edilemedi.

4.1. *Salmonella* İzolasyon ve İdentifikasiyonu

Keban Baraj Gölünden toplanan 627 adet midyeden, Koçkale bölgesine ait 397'sinin 19'unda (% 4.79) *Salmonella* izolasyonu yapılırken, Pertek bölgesinden çıkarılan 230 midyede *Salmonella*'ya rastlanılmadı. Homojenize edilen midye örneklerinden, Rappaport Vassiliadis Broth'da 48 saatlik ön zenginleştirme sonrası; MacConkey agar, *Salmonella* - *Shigella* agar ve Brilliant Green Phenol Red Laktoz agar besi yerlerine yapılan ekimlerde, *Salmonella* şüpheli koloniler tespit edildi. Bunların, MacConkey agarda gri - beyaz renkte (Şekil 4.1.1), *Salmonella* - *Shigella* agarda rensiz (Şekil 4.1.2), Brilliant Green Phenol Red Laktoz agarın normal yeşilimsi sarı rengini, açık kırmızıya dönüştüren ve opak üreme gösteren (Şekil 4.1.3) özellikte oldukları görüldü. Bu kolonilerden hazırlanan preparatların Gram boyanmasında, mikroorganizmaların Gram negatif çomak şeklinde olduğu saptandı. İzole edilen Gram negatif çomak şekilli 19 suşun nutrient broth ve kanlı agarda hazırlanan saf kültürlerinden biyokimyasal özellikleri belirlendi (Tablo 4.1.1). Bu suşlardan 19 (%100)'unda katalaz, glikoz, mannitol, metil red, lizin dekarboksilaz, rahamnoz, maltoz, nitrat; 15 (%78,95)'inde hareket; 16 (%84,21)'sında gaz teşekkürülü; 12 (%63,16)'sında arjinin dihidrolaz ve 10 (%52,63)'unda H₂S, sitrat, ornitin dekarboksilaz, dulsitol, arabinoz, testleri pozitif bulundu. Buna karşılık suşların 19 (%100)'unda Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase, laktaz, fenilalanin deaminaz, üre, indol, triptofan deaminaz, oksidaz, voges proskauer, jelatin hidrolizi, sakkaroz, inositol; 9 (%47,37)'unda H₂S; sitrat, ornitin dekarboksilaz, dulsitol, arabinoz; 4 (%21,05)'ünde hareket; 3 (% 15.79)'nde gaz teşekkürülü ve 7 (%36,84)'sında ise arjinin dihidrolaz negatif bulundu. Bu biyokimyasal özelliklere göre 19 suş (%3.03) *Salmonella* olarak identifiye edildi.

Her iki bölgeden alınan su örneklerinde ise, belirtilen izolasyon ve identifikasiyon testleri uygulandığında *Salmonella* tespit edilemedi.

4.1. *Salmonella* İzolasyon ve İdentifikasiyonu

Keban Baraj Gölünden toplanan 627 adet midyeden, Koçkale bölgesine ait 397'sinin 19'unda (% 4.79) *Salmonella* izolasyonu yapılırken, Pertek bölgesinden çıkarılan 230 midyede *Salmonella*'ya rastlanılmadı. Homojenize edilen midye örneklerinden, Rappaport Vassiliadis Broth'da 48 saatlik ön zenginleştirme sonrası; MacConkey agar, *Salmonella* - *Shigella* agar ve Brilliant Green Phenol Red Laktoz agar besi yerlerine yapılan ekimlerde, *Salmonella* şüpheli koloniler tespit edildi. Bunların, MacConkey agarda gri - beyaz renkte (Şekil 4.1.1), *Salmonella* - *Shigella* agarda rensiz (Şekil 4.1.2), Brilliant Green Phenol Red Laktoz agarın normal yeşilimsi sarı rengini, açık kırmızıya dönüştüren ve opak üreme gösteren (Şekil 4.1.3) özellikte oldukları görüldü. Bu kolonilerden hazırlanan preparatların Gram boyanmasında, mikroorganizmaların Gram negatif çomak şeklinde olduğu saptandı. İzole edilen Gram negatif çomak şekilli 19 suşun nutrient broth ve kanlı agarda hazırlanan saf kültürlerinden biyokimyasal özellikleri belirlendi (Tablo 4.1.1). Bu suşlardan 19 (%100)'unda katalaz, glikoz, mannitol, metil red, lizin dekarboksilaz, rahamnoz, maltoz, nitrat; 15 (%78,95)'inde hareket; 16 (%84,21)'sında gaz teşekkürülü; 12 (%63,16)'sında arjinin dihidrolaz ve 10 (%52,63)'unda H₂S, sitrat, ornitin dekarboksilaz, dulsitol, arabinoz, testleri pozitif bulundu. Buna karşılık suşların 19 (%100)'unda Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase, laktaz, fenilalanin deaminaz, üre, indol, triptofan deaminaz, oksidaz, voges proskauer, jelatin hidrolizi, sakkaroz, inositol; 9 (%47,37)'unda H₂S; sitrat, ornitin dekarboksilaz, dulsitol, arabinoz; 4 (%21,05)'ünde hareket; 3 (% 15.79)'nde gaz teşekkürülü ve 7 (%36,84)'sında ise arjinin dihidrolaz negatif bulundu. Bu biyokimyasal özelliklere göre 19 suş (%3.03) *Salmonella* olarak identifiye edildi.

Her iki bölgeden alınan su örneklerinde ise, belirtilen izolasyon ve identifikasiyon testleri uygulandığında *Salmonella* tespit edilemedi.

Tablo 4.1.1. Tatlı Su Midyelerinden İzole Edilen 19 *Salmonella* Bakterisinin Morfolojik ve Biyokimyasal Özellikleri.

	IZOLE EDİLEN 19 SALMONELLA ŞÜPHELİ SUŞ																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Gram Boyama	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxidaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Katalaz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hareket	+	+	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
H₂S	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
İndol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metil Red	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Voges Proskauer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sitrat	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+
Üreaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ONPG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gaz Oluşumu	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Arjinin dihidrolaz	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+
Ornitindekarboksilaz	-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+
Fenilalanindeaminaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lizin dekarboksilaz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Triptofandeaminaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jelatin hidrolizi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrat redüksiyonu	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Laktoz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glikoz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Mannitol	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dulsitol	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Sakkaroz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arabinoz	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Inositol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rhamnoz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Maltoz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

- : Negatif Reaksiyon

+ : Pozitif Reaksiyon

ONPG : Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase testi

Tablo 4.1.1. Tatlı Su Midyelerinden İzole Edilen 19 *Salmonella* Bakterisinin Morfolojik ve Biyokimyasal Özellikleri.

	IZOLE EDİLEN 19 SALMONELLA ŞÜPHELİ SUŞ																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Gram Boyama	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxidaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Katalaz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Hareket	+	+	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+
H ₂ S	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
İndol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metil Red	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Voges Proskauer	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sitrat	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	+
Üreaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ONPG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gaz Oluşumu	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Arjinin dihidrolaz	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	+	+	+
Ornitindekarboksilaz	-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+
Fenilalanindeaminaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lizin dekarboksilaz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Triptofandeaminaz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Jelatin hidrolizi	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nitrat redüksiyonu	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Laktoz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glikoz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Mannitol	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Dulsitol	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Sakkaroz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arabinoz	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Inositol	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rhamnoz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Maltoz	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

- : Negatif Reaksiyon

+ : Pozitif Reaksiyon

ONPG : Ortho-Nitrophenyl-Beta-D-Galactosidase testi

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada; kültür yöntemi ve PCR tekniği ile Keban Baraj Gölünde bulunan tatlı su midyesinde (*Unio elongatulus eucirrus*) *Salmonella* İzolasyon ve identifikasiyonu başarılı bir şekilde yapılmıştır. Tatlı su midyesinde *Salmonella* ile ilgili yeterince araştırma kaynağı bulunamadığından, çalışma bulguları zaman zaman balıklarda yapılmış *Salmonella* ve PCR çalışmaları ile karşılaştırılmıştır.

Daha önce Keban Baraj Gölünün bu bölgesinde yapılan bir çalışmada (Şeker ve Sarieyyüpoğlu, 1998) midyelerin çıkarılmasında farklı araç ve gereçler denenmesine rağmen başarılı olunamamıştır. Midyelerin bulunabileceği kısımlarda zeminin uygun olmaması, taşlık, kayalık ve bazı yerlerinin ise bataklık olması nedeniyle bu araştırmada da midye toplama aletleri (direç, taraklı kepçe) kullanılamamıştır. Ancak, midyeler göl suyunun çekilme dönemlerinde özellikle de Sonbahar ile İlkbahar mevsimleri arasında kıyıya yakın yerlerden toplanabilmiştir.

Midyeler oksijen ve besin ihtiyaçlarını suları filtre ederek sağladıklarından bu sırada su içerisindeki mikroorganizmaları, ağır metalleri, pestisid ve hidrokarbon gibi zararlı maddeleri alarak dokularında biriktirirler (Göktan, 1983; Grabow et al., 1991; Ünlütürk, 1984; Viarengo et al., 1991; Yılmaz, 1989). Gerek bulundukları ortam ve gerekse beslenme fizyolojileri yönünden midyeler suyu süzerken mikroorganizmalardan özellikle bakterileri de vücutlarına alırlar. Bu tip midyelerle beslenen balıklara da bakteriler çok rahatlıkla geçmektedir. Bu bakteriler arasında yer alan *Salmonella* midyelerde ve balıklarda ciddi salgınlara neden olmamakla birlikte, uzun süre vücutlarında muhafaza etmeleri nedeniyle *Salmonella*'nın yayılmasında çok önemli role sahiptirler (Bocek, et al., 1992). Aynı şekilde; bu bakterinin midyelerde 6 ile 30 gün arasında canlı kaldığı, bazı araştırmalarca (Connel, 1980; Göğüş ve Kolsarıcı, 1992; Turick et al., 1988) da ifade edilmiştir. Yine *Salmonella*'nın canlılığını muhafaza etme kuramı balıklarda da geçerlidir. Şöyleki; deneysel olarak *Salmonella* ile enfekte edilen balıkların, sindirim kanalı ve çeşitli organlarında bu etkenin uzun süre bulunduğu, temiz suya alındıktan sonra bile canlılığını koruduğu ve çevreyi kontamine ettiği bildirilmiştir (Baker et al., 1983; Bocek et al., 1992; Lewis, 1975; Morse et al., 1978a; Morse et al., 1978b; Muz ve diğ., 1999). Salmonellozis tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de

gittikçe önem kazanmaktadır. *Salmonella* ile enfekte midyeleri ve balıkları tüketen kişilerde gastroenteritis ve tifo gibi ciddi problemler oluşabilmektedir (Ertaş ve dig., 1999; Meçgel, 1992; Muz ve dig., 1999). Her ne kadar tatlı su midyelerinin yenmesi yaygın değil ise de, bu çalışmada 19 midyede *Salmonella* bulunmuş olması, bu gıdaların çiğ veya az pişmiş olarak tüketilmesinin enfeksiyon riskini artıracağını göstermiştir. Nitekim; 1380 sayılı Su Ürünleri Kanununda (Anonim, 1995) da, *Salmonella*'nın kabuklu ve yumuşakçaların etlerinde hiç bulunmaması gerektiği kayda geçirilmiştir. Bu durumda Keban Baraj Gölü'nün Koçkale bölgesinden toplanan 397 adet tatlı su midyesinden *Salmonella* (% 4.79) izole edildiğinden, adı geçen bölgedeki tatlı su midyelerinin tüketilmelerinin sağlık açısından uygun olmadığı görülmüştür. Ayrıca enfekte midyelerin, bu bakteriyi sulara bulaştırması da söz konusu olduğundan, yöre balıkçıları da bu konuda önemle uyarılmalıdır.

Ünlütürk (1984); endüstriyel atıklar ve kanalizasyon sularının karıştığı bölgelerde yaşayan midyelere; *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Flavobacterium*, *Klebsiella*, *Micrococcus* ve fekal mikroorganizmaların da bulaşabileceğini belirtmiştir. Midyelerde bulunan fekal patojenlerin başında ise, *Salmonella*'nın geldiği bundan başka *Shigella* türleri, *Vibrio cholera*, *V. parahaemolyticus*, *Clostridium perfringens*, *Cl. botulinum* ve *Yersinia enterocolitica*'nın sıkılıkla izole edildiğini ifade etmiştir. Bu araştırmaya da; Elazığ şehir kanalizasyon atık sularının döküldüğü Koçkale bölgesindeki tatlı su midyelerinde *Salmonella* izole edilmesiyle yukarıdaki araştırıcının bulgusu teyit edilmiştir. Halbuki herhangi bir atık su karışmayan Pertek bölgesi midyelerinde bu etken bulunamamıştır.

Adriyatik denizinden toplanan midyelerde (*Mytilus galloprivincialis*), *Vibrio* türleri % 48.2 gibi yüksek oranda izole edilmesine karşın, diğer patojenlerden *Salmonella*, *Campylobacter* ve *E. coli*' tespit edilememiştir (Ripabelli et.al.,1999). Yine Meçgel (1992) de, deniz midyelerinde (*Mytilus galloprivincialis*) ve balıklarda yaptığı bakteriyolojik bir çalışmada; her iki canlıda da herhangi bir *Salmonella* serotipi ve *Vibrio* cinsi bakteri izole edememiştir. İspanya'da yapılan bir çalışmada (Martinez et al., 1991) ise; kabuklu deniz canlılarında *Salmonella* cinsi bakteriler izole edilmiştir. Keban Baraj gölünün Koçkale bölgesindeki tatlı su midyesinde de bu etken saptanmıştır.

Vanden Heever and Frey (1994), arıtılmış atık sulardan ve bunların döküldüğü baraj sularından yakalanan balıklarda koliform bakterileri ve *Salmonella*'yı her iki ortamda yaşayan balıklardan izole etmişlerdir. Gonzalez et al.,(1993) da; Gökkuşağı alabalıklarının yaşadığı göl suyundan *Salmonella* izole ettikleri halde burada yaşayan balıklarda bu etkene rastlayamamışlardır. Güney Asya ülkelerindeki balık çiftliklerinde yapılan bir çalışmada(Twiddy, 1995) ise; balık, su ve sediment örneklerinde *Salmonella* izolasyonu yapılmıştır. Yine vurgulanması gereken bir bulgu daha bu çalışmada elde edilmiştir. Şöyle ki; Keban Baraj Gölünün Koçkale bölgesinden çıkarılan tatlı su midyelerinden *Salmonella* izole edilmesine rağmen, Pertek ve Koçkale bölgelerinden alınan 45 su örneğinde bu bakteri bulunamamıştır. Hatta daha önce baraj gölünün bu yöresinde gerçekleştirilen bir projede(Şeker ve Sarıeyyüpoğlu, 1998), tatlı su midyelerinde ve sularda *E. coli*'nin standartların üzerinde (%53.7) tespit edilmiş olması, bu bölgedeki fekal kirlenmenin olduğunu göstermiştir. Elazığ DSİ IX. Bölge Müdürlüğü'nün Keban Baraj Gölünde yaptığı bakteriyolojik analizler sonucunda da, gölün özellikle Koçkale bölgesinin, *E. coli* ve fekal streptokok türlerinin yoğunluğu açısından dikkat çekici olarak görülmüş ve su kalite sınıflandırılmasında III. sınıf, yani kirlenmiş sular grubuna girdiği tespit edilmiştir(Anonim, 1994). Keban Baraj Gölünün Koçkale bölgesinde önceki yıllarda yapılan diğer araştırmalarda da (Ertaş ve diğ., 1999; Muz ve diğ., 1995) balıkların barsaklarından *Salmonella* izole edilmiştir. Farklı zaman dilimlerinde gerçekleştirilen bu çalışmaların tümünde *Salmonella*'nın izole edilmesi buralarda yaşayan su ürünlerinin bu etkenle kontaminasyonunun devam ettiğini kanıtlamıştır.

Salmonella'nın geleneksel metodlarla identifikasiyonunda, biyokimyasal ve serolojik testler yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak klasik testler özellikle kültürler saf olmadığından hatalı sonuçlar alınmasına neden olmaktadır. *Salmonella* her ne kadar çabuk çoğalan mikroorganizmalar ise de, izolasyon ve identifikasiyonları oldukça zor ve uzun zaman(5-7gün) gerektirmektedir. Serolojik testlerde ise; kros reaksiyonlar olabilmekte ve bazı antijenik benzerliği olan *E.coli* gibi mikroorganizmalarla hatalı sonuçlar oluşmaktadır (Mizuno et al., 1983). Oysa klasik yöntemler içerisinde Lassen (1975)'in geliştirdiği Norveç üçlü tüp sistemi ile Enterobactericeae familyasındaki bakteriler kısa sürede identifiye edilmektedir. Bir çok araştırıcının (Bekar, 1997; İstanbulluoğlu, 1978; Kalender ve Muz, 1999; Şeker ve Sarıeyyüpoğlu, 1998) da,

kullandığı bu yöntem, tatlı su midyelerinde gerçekleştirilen bu çalışmada da başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Norveç üçlü tüp sistemi ile *Salmonella*'nın biyokimyasal özellikleri diğer klasik yöntemlere göre daha çabuk (3 gün) belirlendiğinden ve işlemler sırasında gerekli kimyasallar ve cam malzemeler daha az kullanıldığından, özellikle Enterobakterilerin teşhisinde önerilmektedir.

PCR teknigi ile saf yada karışık kültürlerde bulunan az sayıdaki mikroorganizmalar, bir gün gibi kısa sürede doğru teşhis edildiğinden, klasik ve serolojik testlere göre daha avantajlıdır (Lin and Tsen, 1996). Her ne kadar PCR direkt teşhis yöntemi değilse de, amplifikasyonundan sonra spesifik primerlerin kullanılması tanıyı kolay hale getirmektedir. Tatlı su midyesinde yapılan bu araştırmada da *Salmonella*'nın 16S rRNA geninden üretilen cins spesifik 16SF1 ve 16SFII primerlerinin kullanılması ile farklı bakterilerin yanlış pozitif reaksiyon vermesi önlenmiştir. Ayrıca, tekniğin bütün basamaklarının negatif kontolle birlikte yürütülmesi ve sonuçta kontaminasyonun meydana gelmemesi, PCR tekniğinin başarılı bir şekilde yürüdüğünü göstermiştir.

PCR ile *Salmonella* teşhisinde genellikle bir ön zenginleştirme basamağı uygulanmaktadır. Bir çalışmada (Aabo et al., 1995), ön zenginleştirme sonrası PCR'ın rutin kültür metodundan % 42 gibi oldukça yüksek bir oranda daha fazla duyarlı olduğu saptanmış ve % 92 sensitivite ve % 99 spesifiteye sahip olduğu tespit edilmiştir. PCR'ın spesifitesi, sensitivitesi ve çabukluğu potansiyel teşhis için gereklidir. Ancak tekniğin biyolojik örneklerde uygulanmasında bazı zorluklarla karşılaşıldığı belirtilmiştir. Örneğin; kan, idrar ve gaita gibi materyallerde hedef mikroorganizmaları veya nükleik asitleri ekstrakte etmek gerektiğinde, örnekler arasında kros kontaminasyonun olduğu ve incelenen bu materyaller içindeki substanslarla reaksiyonun inhibe edildiği bildirilmiştir (Allard et al., 1990; Arda, 2000; Cohen et al., 1994; Quirke, 1992; Sarkar and Sommer, 1990; Woodward and Kirwan, 1996). Yapılan bu araştırmada da, midye homojenizatlarının ön zenginleştirilmesi sonrası *Salmonella* selektif besiyerlerinde üreyen şüpheli kolonilerin biyokimyasal özellikleri incelendiğinde, pozitif bulunan on dokuz susun hepsi PCR ile de *Salmonella* olarak tespit edilmiştir. Ancak, direkt midye homojenizatlarından DNA izolasyonu için yapılan denemelerden yeterli sensitiviteye sahip bir metot geliştirilememiştir.

Sonuç olarak; Keban Baraj gölünden toplanan tatlı su midyesinde, insan ve hayvanlar için patojen olan, kontamine gıdalarla alındığında ciddi enfeksiyonlara yol açan *Salmonella* bakterisinin bulunduğu bir kez daha kanıtlanmıştır. Ancak *Salmonella*'lı olan bu 19 tatlı su midyesinde, makroskobik bir bozukluğa rastlanmamış olması da bu araştırmayı ilginç kılmıştır. Şüphesiz bu da konuya, ileriye yönelik aynı bir çalışma boyutu getirerek, beraberinde “*Salmonella* midyeler için yalnızca portörmür veya enfeksiyona neden olmuyor mu” gibi soruları doğurmıştır.

Tatlı su midyelerinde (*Unio elongatus eucirrus*) *Salmonella*'nın hem kültür yöntemiyle ve hem de ilk kez PCR tekniğiyle tespit edilmesi, gerçekten su ürünlerini alanındaki çalışmalarla önemli bir ivme kazandırarak başlangıçtaki amaca ulaştırmıştır. Ayrıca bu çalışma, spesifik primerler temin edildiği takdirde, PCR teknigi ile midyelerde olduğu gibi, diğer su ürünlerinin bakteriyel hastalık etkenlerinin de kısa sürede teşhis edilebileceğine bir rehber olmuştur. Şüphesiz bununla da, Su ürünlerini laboratuvarlarında enfeksiyonların çabuk teşhisini yapılacak ve biran önce tedavi, aşısı ve korunma gibi önlemler alınarak doğabilecek ekonomik kayıplar önlenecektir.

Diğer taraftan bu çalışmada; *Salmonella*'lı küçük bir midye grubu tespit edilmiş olsa dahi, baraj gölündeki bu midyelerin değerlendirilmeden heba olduğunu görmek, su ürünlerinden yeterince yararlanamadığımız gerektiğini bir kez daha ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla Keban Baraj gölünde yoğun bir potansiyele sahip özellikle Pertek bölgesindeki midyelerin gerek insan gıdası ve gerekse hayvan rasyonları için iyi bir kaynak oluşturacağı görülmüştür. Ayrıca, deniz midyelerinde olduğu gibi, Pertek bölgesindeki tatlı su midyeleri yetiştirciliği ve kültürü çeşitli projelerle teşvik edildiğinde yöre halkına katkı sağlayacağı gözlemlenmiştir. Böylece baraj gölündeki tatlı su midyeleri koruma altına alınmış ve bölgeye büyük ekonomik girdiler sağlanmış olacaktır.

Keban Baraj Gölünün Pertek bölgesindeki tatlı su midyelerinde *Salmonella*'ya rastlanmazken, şehir kanalizasyon arıtma istasyonuna yakın Koçkale yoresinden toplanan midyelerden bu etkenin izole edilmesi, buranın bir kirlenmeyele karşı karşıya olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, kirliliğin bölgedeki tatlı su midyelerine ve balıklara etkisinin daha büyük boyutlara ulaşmaması için, biyolojik ve kimyasal bir arıtmanın arıtma tesislerinde gerçekleştirilmesi ve bu konuda ilgili kuruluşun ivedilikle dikkatinin çekilmesi öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- Aabo, S., Andersen, J.K. and Olsen, J.E., 1995, Research Note Detection of *Salmonella* in Minced Meat by the Polymerase Chain Reaction Method, *Lett. Appl. Microbiol.* 21, 180-182.
- Allard, A., Girones, R., Juto, P., Wadell, G., 1990, Polymerase Chain Reaction for Detection of Adenoviruses in Stool Samples. *J.Clin. Microbiol.*, 28, 2659-2667.
- Alpbaz, A.G., 1993, Kabuklu ve Eklem Bacaklılar Yetiştiriciliği. Ege Üniv. Su Ürünleri Fak. Yayınları No: 266, Ege Üniv. Basımevi, Bornova / İzmir.
- Anderson, D.P., 1974, Fish Immunology. T.F.H. Publications Inc. Ltd., USA, 239 p.
- Anonim, 1984a, Salmonellosis Control. The Role of Animal and Product Hygiene. WHO Expert Committee Technical Report Series 774 World Health Organization, Geneva.
- Anonim, , 1984b, Türk Standardları Enstitüsü, TS 4227, Hayvansal Su Ürünleri, Yumuşakçalar, 8-13.
- Anonim, 1988, Su Kirliliği ve Kontrolü Yönetmeliği. T.C. Resmi Gazete, Sayı: 19919.
- Anonim, 1991, Manuel of Recommended Diagnostic Techniques and Requirements for Biological Products. Vol. III. Office International Des Epizooties, Rue de Prony, Paris.
- Anonim, 1994a, Keban Baraj Gölü Limolojik Raporu. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. IX. Bölge Müdürlüğü. Su Ürünleri Başmühendisliği. Elazığ.
- Anonim, 1994b, Türk Standardı, TS 7438. Mikrobiyoloji – *Salmonella* Aranması Metotlarında Genel Kurallar. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 20 s.
- Anonim, 1995, Su Ürünleri Kanunu ve Su Ürünleri Yönetmeliği. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Koruma ve Kontrol Genel Müd., Ankara.
- Anonim, 1998, Gıda Mikrobiyolojisi, MERCK. 1. Baskı, Orkim Ltd.Şti., Ankara, 69 s.
- Arda, M., Minbay, A., Aydin, N., Akay, Ö., İzgür, M., Diker, S., 1994, İmmunoloji. Medisan Yayınları, Yayın No: 13, 386-388, Ankara.

- Arda, M., 1995, Biyoteknoloji, (Bazı Temel İlkeler), Kükem Derneği Bilimsel Yayınlar No:3, armoni Ltd. Şti., Ankara.
- Arda, M., Minbay, A., Aydin, N., 1999, Özel Mikrobiyoloji. Medisan Yayınları, Yayın No: 26, 5. Baskı, Ankara, 45-55.
- Arda, M., 2000, Temel Mikrobiyoloji. Medisan Yayınları, Yayın No: 45, 2. Baskı, Ankara, 361 s.
- Ari, S., 1999, DNA'ın Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) İle Çoğaltıması, Moleküler Biyolojide Kullanılan Yöntemler, ed.: Temizkan, G, Arda, M, Nobel Tıp Kitabevleri, İstanbul Üniversitesi Biyoteknoloji ve Genetik Mühendisliği Araştırma ve Uygulama Merkezi (BİYOGEM); Yayın No: 1, İstanbul, 57-68.
- Atay, D., 1984, Kabuklu Su Ürünleri ve Üretim Tekniği. Ankara Univ. Ziraat Fak. Yayınları; 914, 192 s.
- Bager, F. and Petersen, J., 1991, Sensitivity and Specificity of Different Methods for the Isolation of *Salmonella* from Pigs. Acta Vet. Scandinavia, 32 (4): 73-481.
- Bailey, J.S., 1998, Detection of *Salmonella* Cells within 24 to 26 Hours in Poultry Samples with the Polymerase Chain Reaction BAX system. Journal of food Protection, 61 (7) : 792 – 795.
- Baker, D.A., Smitherman, R.O. and AsCaskey, T.A., 1983, Longevity of *Salmonella typhimurium* in *Tilapia aurea* and Water From Pools Fertilized with Swine Waste. Appl. Environ. Microbiol.; 45, 1548-1554.
- Barrow, P.A., 1993, *Salmonella* Control, Past, Present and Future . Avian Pathol. 22: 651-699.
- Bej, A.K., Mahbubani, M.H., Atlas, R.M., 1991, Amplification of Nucleic Acids by Polymerase Chain Reaction (PCR) and Other Method and Their Amplications. Critical Reviews in Biochemistry and molecular Biology. 26 (3.4) 301-334.
- Bekar, M., 1997, *Salmonella*'ların Genel Karekterleri ve Tanı Yöntemleri Etilik Vet. Kont. ve Araşt. Enst., Ankara.
- Bernoth, E.M., 1990, Risiken Beim Umgang mit Fischen Durch Bewegliche Aeromonaden. Arztl. Lab., 36: 213-217.
- Bilecik, N., 1989, Midye Yetiştiriciliği. Tarım Orman ve Köy İşleri Bakanlığı, Su Ürünleri Araştırma Enst. Müd., Seri A, Yayın No: 2, Bodrum, 40 s.

- Bilgehan, H., 1995, Klinik Mikrobiyolojik Tanı. Barış Yayıncılık, Fakülteler Kitabevi, Şafak Matbaacılık , II. Baskı, Ankara, 364-451.
- Bilgin, F.H., 1980, Batı Anadolu'nun Bazı Önemli Tatlı Sularından Toplanan Mollusca Türlerinin Sistemiği ve Dağılışı. Dicle Üniv. Tıp Fak. Dergisi. Volüm: 8, sayı: 2, 1-64.
- Bilgin, F. H. ve Şeşen, R., 1991, Diyarbakır, Mardin ve Şanlıurfa İllerinin Bazı Tatlı Sularından Toplanan Mollusca Türleri Üzerinde Zoocoğrafik ve Taksonomik Çalışmalar. Dicle Üniv., Diyarbakır.
- Bocek, A.J., Brady, Y.J. and Rogers, W.A., 1992, Exposure of *Silver carp*, *Hypophthalmichthys*, to *Salmonella typhimurium*. Aquaculture; 103, 1: 9-16.
- Bolloock, A.M., 1989, Laboratory Methods. In: Fish Pathology, Second Edition. Bailliere Tindall, London, 374-407.
- Carter, G.R., 1984, Enterobactericeae, Diagnostic Procedures in Veterinary Bacteriology and Mycology, U.S.A., 93-103.
- Cohen, N.D., McGruder, E.D., Neigbergs, H.L., Behle, R.W., Wallis, D.E. and Hargis, B.M., 1994, Detection of *Salmonella enteritidis*' in Faeces from Poultry using Booster Polymerase Chain Reaction and Oligonucleotide Primers Specific for all Members of the Genus *Salmonella*. Poultry Science; 73: 2, 354-357.
- Connel, J. J., 1980, Control of Fish Quality. 2nd Ed., Fishing News Books Ltd. Farnham, Surrey. England.
- Coote, U.G., 1990, Amplification of Nucleic Acids by the Polymerase Chain Reaction. Article, 57-59.
- Çağlar, M., 1974, Omurgasız Hayvanlar, Anatomi - Sistematis. İstanbul Üni. Fen Fak. Basımevi, İstanbul, 407 s.
- Çağlayan, S.H., 1991, Polimeraz Zincir Reaksiyonu: Nükleik Asitleri Çoğaltma Tekniği ve Uygulama Alanları. Doğa-Tr. J. of Biology 15, 9-21.
- Çetinkaya, O., 1996, A Freshwater Mussel Species *Unio stevenionus* Krynicki 1837 (Mollusca: Bivalvia: Unionidae) from the River Karasu Flowing into Lake Van, Turkey. Tr. J. Of Zoology, Sayı. 20, 169-173.
- Çetinkaya, B., 1998, Polimeraz Zincir Reaksiyonu (PCR) Temel Prensipler. F.Ü. Sağlık Bilimleri Dergisi 12(2), Elazığ, 149-156.

- Demirsoy, A., 1999, Genel ve Türkiye Zoocoğrafyası. Meteksan A.Ş., 3. Baskı, Ankara, 677-718.
- Enç, S., 1973, Türkiye Sularında Midyelerin Ekonomik Açıdan Etüdü. Balık ve Balıkçılık, 5-15.
- Erlich, H.A., Gelfand, D. And Sninsky, J.J., 1991, Recent Advances in the Polymerase Chain Reaction. Science 252, 1643-1651.
- Ertaş, H.B., Çetinkaya, B., Şeker, E., Muz, A., Sarıeyyüpoğlu, M., 1999, Elazığ ve Çevresindeki Çeşitli Su Kaynaklarından Temin Edilen Balıklardan *Salmonella* İzolasyonu ve PCR ile Teyit Edilmesi. F.U. Sağlık Bil. Dergisi, 13(2), 15-20.
- Farmer, J.J., Wells, G. And Griffin, M.D., 1987, Diagnostic Procedures for Bacterial Infections. Enterobactericeae Infections. 7th Edition. Chapter 14, 234-295.
- Fluit, A. C., Widjojoatmodjo, M.N., Box, A.T., Torensma, R. and Verhoef, j., 1993, Rapid Detection of *Salmonella* in Poultry with the Magnetic Immunopolymerase Chain Reaction Assay Appl. Environ. Microbiol, 29 : 1342 – 1346.
- Fricker, C.R., Quail, E., McGibbon, L. and Girdwood, R.W.A., 1985, An Evaluation of Commerically Available Dehidrated Rappaport Vassiliadis Medium For the Isolation of *Salmonella* from Poultry. J. Hyg. Camb., 95: 337-344.
- Gonzalez, C.J., Perez-Cardenal, D., Prieto, M., Otero, A. and Garcia-Lopez, M.L., 1993, Microbiological Quality of Fresh Rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and Microbiol Evolution During Its Chill Storage. Actas Del IV Congreso National de Aquacultura; 563- 568.
- Göğüş, A.K., Kolsarıcı, N., 1992, Su Ürünleri Teknolojisi. Ankara Univ. Ziraat Fak. Yayınları, No: 1243, Ankara, 261 s.
- Göktan, D., 1983, Kabuklu Deniz Ürünlerinin ve Üreme Alanlarının Mikrobiyolojik Nitelikleri Üzerine Bir Araştırma. Ege Üni. Mühendislik Fak. Dergisi, Cilt 1, Sayı:1, 119-134.
- Grabow, W.O.K., Morris, R. and Bothzenhart, K., 1991, An Assessment of Methods for the Microbiological Analysis of Shellfish. Healt - Related - Water Microbiologiy. vol.24, No:2, 413-416.
- Guthrie, R.K., 1992, *Salmonella* CRC Press Inc. London.

- Haas, F., 1969, Superfamilia *Unioniacea* Das Tierreich eine Zusammen-Stellung und Kenzeichnung der Rezenten Tierformen. Walter de Gruyler und Co Berlin 88: 1-663.
- Hickman – Brenner, F. W., Stubbs, A. D. and Farmer, J. J., 1991, Phage typing of *Salmonella enteritidis* in the United States. J. Clin. Microbiol. 29 : 2817 – 2823.
- İnal, T., Beşe, M., Uğur, M., Tantaş, A., 1979, İzmir Liman Suları ve Buradan Elde Edilen Su Ürünlerinin *Salmonella*'larla Kontaminasyonunda Mezbaha Kirli Sularının Rolü. Tübitak VHAG 293 sayılı Araştırma, Ankara.
- İnal, T., 1992, Besin Hijyeni. Final Ofset, İkinci Baskı, İstanbul, 783 s.
- İstanbulluoğlu, E., 1978, Septicaemia Neonatorumlu Buzağılardan İzole Edilen *Escherichia coli* Suşlarının Biyokimyasal, Serolojik, Enterotoksijenik, Antibiyotiklerle Duyarlılık Bulaşıcı Tip Plasmid (R-Faktör) Taşıma Özellikleri ile Enfekte ve Normal Buzağılardan Elde Edilen Serum Örneklerinin Immunoglobulin (IgG, IgA, IgM) Miktarları Üzerinde İncelemeler. Ankara Univ. Doçentlik Tezi.
- Jehl-Pietri, C.; Hugues, B.; Celoince, R., 1990, Viral and Bacterial Contamination of Mussels (*Mytilus edulis*) Exposed in an Unpolluted Marine Environment. Lett.- Appl.- Microbiol., vol. 11, No: 3, 126-129.
- Kalender, H., Muz, A., 1999, Elazığ Bölgesindeki Tavuklardan İzole Edilen *Salmonella* Türlerinin Tiplendirilmesi. Tr. J.of Veterinary and Animal Sciences TÜBİTAK. Sayı. 2, 297-303.
- Karagül, E., Dündar, V., Özyürek, S., Akgül, A., Selçuk, S., 1992, Haydarpaşa Numune Hastanesi İnfeksiyon Hastalıkları Polikliniğine Başvuran Hastalarda *Salmonella enteritidis*'in Neden Olduğu Gastroenterit Olguları. İnfeks. Derg., 6,3, 197-198.
- Kınacigil, H. T., 1994, Süyo (Homa) Dalyanında Avlanan Akivadeslerin Gelişmeleri Üzerine Araştırmalar , E.Ü. Su Ürünleri Y.O. Bornova- İzmir, 440 s.
- Koral, S. ve Ayval, C., 1982, Genel Zooloji. İstanbul, 189 - 190.
- Krieg, N.R., 1984, Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. Facultatively Anaerobic Gram- Negative rods. Volume 1, Section 5., 408-418.

- Kubilay, A. ve Timur, G., 1997, Gökkuşağı Alabalıklarında (*Oncorhynchus mykiss*) *Yersinia ruckeri* Bakterisine Karşı Antikor Üretiminin Aglutinasyon Yöntemleriyle Tespiti Üzerine Bir Araştırma. IX. Ulusal Su Ürünleri Sempozyumu, Cilt II, Isparta, 642-650.
- Lagatolla, C., Dolzani, L., Tonin, E., Lavenia, A., Michele, M.D., Tommasini, T., and Monti – Bragadin, C., 1996, PCR Ribotyping for Characterizing *Salmonella* Isolates of Different Serotypes. J. Clin. Microbiol., 34 (10) : 2440 – 2443.
- Lassen, J., 1975, Rapid Identification of Gram-Negative Rods Using a Three-Tube Method Combined With a Dichotomic Key. Acta Path. Microbiol. Scand. Sect. 83 : 525 – 533.
- Lewis, D.H., 1975, Retention of *Salmonella typhimurium* by Certain Species of Fish and Shrimp. J. Am. Vet. Med. Assoc.; 168 : 551-552.
- Lin, C.K., and Tsen H.Y., 1996, Use of two 16S DNA Targeted Oligonucleotides as PCR Primers for the Specific Detection of *Salmonella* in Foods. Journal of Applied Bacteriology. 80 : 659-666.
- Love, T.D. and Minkler, B.H., 1972, Studies of *Salmonella* Potential in Catfish Feeds. Commercial Fisheries review; 34: 5-7.
- Mahon, J. And Lax, A.J., 1993, A Quantitative Polymerase Chain Reaction Method for the Detection in Avian Faeces of Salmonellas Carrying the *spvR* Gene. Epidemiol. Infect.; 445-464.
- Martínez, E., Moránigo, M.A., Cornax, R., Egea, A.F., Borrego, J., 1991, Relationship between Classical Indicators and Several Pathogenic Microorganism Involved in Shellfish-Borne Diseases. J. Food. Protec, 54: 711-717.
- Marx, J.L., 1988, Multiplying Genes by Leaps and Bounds. Science, Vol. 240., 1408-1410.
- Meçgel, E., 1992, Balık ve Midyelerde *Salmonella*, *Vibrio* ve *Aeromonas* Cinsi Bakteriler (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Merchant, I.A., Packer, R.A., 1967, The Genus *Salmonella*, Veterinary Bacteriology and Virology, The Iowa State university Press, U.S.A., 286-307.
- Mizuno, T., Chou, M.Y., Inouye, M., 1983, A Comparative Study on Genes of Three Porins of the *Escherichia coli* Outer Membrane: DNA Sequence of the Osmoregulated Gene. J. Biol. Chem. , 258, 6932-6940.

- Morse, E.V., Duncan, M.A. and Myhrom, E.P., 1978a, *Salmonella* Serotypes Isolated From the Aquatic Environment (Wabash river, Indiana, 1973-1976). Am. J. Vet. Res.; 39: 717-719.
- Morse, E.V., Greenwood, D.E., Meyers, E.P., Anderson, V.L. and Duncan, M.A., 1978b, Experimental *Salmonella* Infections in *Carassius auratus* (Goldfish). J. Environ. Sci. Health; 13: 325-335.
- Mullis, K. B., 1990, The Unusual Origin of the Polymerase Chain Reaction. Sci. Am. 262 (4) : 56 – 65.
- Muz, A., Sarieyyüpoğlu, M., Ertaş, H.B., Şimşek, A., 1995, Keban Baraj Gölünden Yakalanan Bazı Balıkların Çeşitli Organlarının Aerobik ve Mikroaerofilik Bakteriler Yönünden İncelenmesi. F.Ü. Sağlık Bilimleri Dergisi, 9 (2), 212-220.
- Muz, A., Sarieyyüpoğlu, M., Ertaş, H.B., Çetinkaya, B., Şeker, E., Kalender, H., Öngör, H., 1999, Aynalı Sazanda (*Cyprinus carpio*) *Salmonella enteritidis* ve *Salmonella typhimurium* ile oluşturulan Deneysel Enfeksiyonların İncelenmesi. F.Ü. Sağlık Bil. Dergisi, 13(2), 27-32.
- Nielsen, T., Holmostrom, K. And Molin, S., 1997, Visualization of Specific Gene Expression in Individual *Salmonella typhimurium* Cells by In Situ PCR. Appl.-and Environ. Microbiol., 63 (11), 4196 – 4203.
- Nishio, T., Nakamori, J., Miyazaki, K., 1981, Zbl. Bakt. Hyg. , I. Abt. Orig.B 172, 415-426.
- Özek, Ö., Çetin, E.T., Anğ, Ö., Töreci, K., 1965, Kaplumbağaların *Salmonella* Epidemiyolojisindeki Önemi. İstanbul Univ. Tip fak. Mec.; 28:1.
- Özek, Ö., Çetin, E.T., Anğ, Ö., Güvener, Z., 1970, İstanbul' da Balık ve Midyelerde *Salmonella* Araştırması. Haseki Tip Bül.; 8:229.
- Perssing, D.H., 1991, Polymerase Chain Reaction : Trenches to Benches. J, Clin. Microbiol. 29, 1281-1285.
- Plumb, A.J., Bowser, R.P., 1983, Microbial Fish Disease Laboratory Manual. Brown Printing Company, Montgomery, Alabama, 95 p.
- Pohl, P., Lintermans, H., Marin, M., Couturier, M., 1991, Epidemiological Study of *Salmonella enteritidis* Strains of Animal Origin in Belgium. Epidemiol. Infect., 106, 11-16.

- Quinn, P.J., Carter, M.E., Markey, B.K. and Carter, G.R., 1994, Enterobactericeae, Clinical Veterinary Microbiology, Wolfe Publ., Spain, 209-218.
- Quirke, P., 1992, Molecular Biology and Infections of the Gut. Gut, 33: 1441-1443.
- Reda, W.W., 1993, Studies on Fish as a Source of *Salmonella* Serotypes in Fish in Retail Trade in Kochi. Fish. Technol. Soc.; 41,3: 13-16.
- Ripabelli, G., Sammarco, M.L., Grasso, G.M., Fanelli, I., Caprioli, A. and Luzzi, I., 1999, Occurrence of Vibrio and other Pathogenic Bacteria in *Mytilus galloprovincialis* (Mussels) Harvested from Adriatic Sea, Italy. Int. J. Food Microbiol, Vol. 49, sayı 1-2, Netherlands, 8-43.
- Ropes, J.W. and Jearld, A., 1987, Age Determination of Ocean Bivalves. Age and Growth of Fish, Edited Robert C. Summerfelt and Gordon E. Hall. The Iowa State University Press., 517-526.
- Saiki, R.K., Gelfand, D.H., Stoffel, S., Scharf, S.J., Higuchi, R., Horn, G.T., Mullis, K.B. and Erlich, H.A., 1988, Primer-Directed Enzymatic Amplification of DNA with a Thermostable DNA Polymerase. Science; 239, 487-491.
- Sanderson, J.D., Hermon-Taylor, J., 1992, Mycobacterial Diseases of Gut: Some Impact from Molecular Biology. Gut. 33, 145-147.
- Sarıeyyüpoğlu, M., 1984, Gökkuşağı Alabalıklarında (*Oncorhynchus mykiss*) Mide ve Barsak Bakteriyel Florasının Aerobik Yönden İncelenmesi. Doğa Bilim Dergisi, D1; 8,3: 281-287.
- Sarıeyyüpoğlu, M., 1987, *Salmonella* Potential in Aquarium Fish Feeds. J. Fırat Üniv. Dergisi; 2(2): 59-62.
- Sarımehmetoğlu, B., Pamukçu, T., Küplülü, O., 1995, Kızılırmak Havzası Yüzey Sularında Koliform ve Fekal Koliform Grubu Mikroorganizma. Turkish Journal of Veterinary Animal Sciences. Cilt. 20, Sayı, 4, 257-260.
- Sarkar, G. and Sommer, S., 1990, Shedding Light on PCR Contamination, Nature 343, 27.
- Schutt, H., 1992, Die Großen Sübwassermuscheln von Dalaman (Türkei) (Eullamellibranchiata : Unionacea). Maalakol. Abh. Mus. Tierkd. Dresden 16, Nr.8, Frankfurt.

- Schutt, H., Şeşen, R., 1993, Pseudamnicola Species and Other Freshwater Gastropods (Mollusca, Gastropoda) from East Anatolia (Turkey), the Ukraine and the Lebanon, *Basteria*, 57:4-6, 161-171.
- Souther, B.W., Sonstegaurd, R.A. and McDermott, L.A., 1972, Enteric Bacteria in Carp (*Cyprinus carpio*) and white Suckers (*Catostoma commersoni*). *J. Fish. Res. Board Can.*; 33: 1401-1403.
- Soylu, E., 1990, Sapanca Gölü Mollusk Faunası The Mollusk Fauna of The Sapanca Lake. *İstanbul Üniversitesi Su Ürünleri Dergisi*, 4,1:73-88.
- Steffan, R.J. and Atlas, R.M., 1991, Polymerase Chain Reaction: Applications in Environmental Microbiology. *Annu. Rev. Microbiol.* 45, 137-161.
- Şeker, E., Sarıeyyüpoğlu, M., 1998, Keban Baraj Gölünün Koçkale Bölgesinden Toplanan Tatlı Su Midyesinde (*Unio elongatulus eucirrus* Bourguignat, 1860) Mide ve Bağırsakların Fekal Koliformlar Yönünden İncelenmesi. *F.Ü. Fen ve Müh. Bilimleri Dergisi*, 10(1), 45-53.
- Şentürk, A., (1994). Bazı Değerlendirilmiş Kabuklu Su Ürünlerinin Mikrobiyolojik Özellikleri Üzerine Etkili Olan Faktörlerin Araştırılması. *T.C. Tarım ve Köyişleri Bakanlığı, Tarımsal Araştırmalar Genel Müd.*, Genel Yayın No: 20, 9-33.
- Tanrikul, T., Çağırgan, H. ve Tokşen, E., 1996, Bakteriyal Balık Hastalıkları. Veteriner Kontrol ve Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü Dergisi. Cilt: 20, Sayı: 34, Bornova, 105-127.
- Taylor, J., 1968, *Salmonella* in Wild Animals., *Symp. Zool. Soc. London*; 24: 51-73.
- Taylor, G.R., 1993, Polymerase Chain Reaction: Basic Principles and Automation. In PCR: A Practical Approach, Eds: McPherson, M.J., Quirke, P. and Taylor, G.R. Oxford University Press, Oxford, 1-14.
- Töreci, K., Anğ, Ö., 1989, Ülkemizde Yeterince İncelenmeyen Enterik Patojenler. *Anadolu Univ. Yayın.*, Eskişehir.
- Töreci, K., Anğ, Ö., 1991, Türkiye'de Saptanmış olan *Salmonella* Serovarları ve Salmonellozların Genel Değerlendirilmesi. *Türk Mikrobiyol. Cem. Derg.*, 21, 1, 1-18.
- Tuncer, İ., Fındık, D., Erdem, B., Kart, H., 1995, *Salmonella enteritidis*'in Neden Olduğu Bir Sepsis Olgusu. *İnfeks. Derg.*, 9, 1-2, 205-206.

- Turick, C. E.; Sextone, A. J., and Bissonnette, G.K., 1988, Freshwater Mussels As Monitors Of Bacteriological Water Quality. *Water- Air- Soil- Pollut.*, vol. 40, No. 3-4, USA, 449-460.
- Twiddy, D.R., 1995, Antibiotic- Resistant Human Pathogens in Integrated Fish Farms. *Asean Food Journal.* 10,1: 22-29.
- Ulutan, F., Aktaş, F., Hizel, K., Akça, ö., Kurtar, K., 1992, *Salmonella enteritidis* ile Meydana Gelen Toplu Besin Zehirlenmesi. *Türk Mikrobiyol. Cem. Derg.*, 22, 21-24.
- Uysal, H., 1970, Türkiye Sahillerinde Bulunan Midyeler "*Mytilus galloprovincialis Lamarck*" Üzerinde Biyolojik ve Ekolojik Araştırmalar. Ege Üni. Fen Fakültesi İldi Raporlar Serisi, İzmir, 79 s.
- Ünlütürk, A., 1984, İzmir Balık Halinde Parekende Satılan Midyelerin Bakteriyolojik Niteliği Üzerinde Bir Araştırma. E.Ü. Mühendislik Fak. Dergisi, Cilt: 2, Sayı: 2, 45-51.
- Vanden Heever, D.J. and Frey, B.J., 1994, Microbiological Quality of the Catfish (*Clarias gariepinus*) Kept in Treated Waste Water and Natural Dam Water. *Water S.A.*; 20,2: 113-118.
- Vassiliadis, P., Kalapothaki, C., Trichopoulos, D., Mavromatti, C., 1981, Improved Isolation of *Salmonellae* From Naturally Contaminated Meat Products by using Rappaport- Vassiliadis Enrichment Broth. *Applied and Environmental Microbiol.* 615-618.
- Viarengo, A. and Canesi, L., 1991, Mussels as Biological Indicators of Pollution. *Aquaculture*, 94, 225-243.
- Virella, G., 1997, Microbiology Infectious Disease. Çeviri Yazarları; Serter, D., Dereli, D. Ve Ertem, E. 3. Baskı, Nobel Tıp Kitapevleri. Tayf Ofset, Savaş Ciltevi. İstanbul, 93, 275.
- Watson, J.D., Witkowski, J., Gilman, M., Zoller, M., 1992, Recombinant DNA. *Scientific American Books.* W.H. Freeman and Co. New. York., 79-98.
- White, J.T., Arnheim, N. and Erlich, H.A., 1989, The Polymerase Chain Reaction.. *Technical Focus*, Vol. 5, No: 6, 185-189.

- Widjojoatmodjo, M.N. , Fluit, A.C. Torensma, R. Geert P.H.T., 1992, Verdonk and Verhoef, J. The Magnetic Immuno Polymerase Chain Reaction Assay for direct detection of Sallonellae in fecal samples J. Clin. Microbiol., 1342 : 1346.
- Woodward, M.J. and Kirwan, S. E., 1996, Detection of *Salmonella enteritidis* in Eggs, by the Polymerase Chain Reaction Vet. Rec., 138 : 411-413.
- Wyatt, L.E., Nickolson, R. and Vanderzant, C., 1979, Occurrence and Control of *Salmonella* in Fresh Water Catfish. J. Food Sci.; 44: 1067-1073.
- Yılmaz, N., 1989, Doğu Karadeniz Midyelerinin (*Mytilus galloprovincialis, Lam.*) Bazı Biyoekolojik Özellikleri ve Biyokimyasal Yönden Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enst., Trabzon.
- Youssef, H., El-Timawy, A.K. and Ahmed, S., 1992, Role of Aerobic Intestinal Pathogens of Fresh Water Fish in Transmission of Human Diseases. J. Food Prot.; 55,9: 739-740.

