

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**UZAYSAL VE UZAY-ZAMANSAL
HÜCRESEL SİNİR AĞI FİLTRELERİ**

Elektronik ve Haberleşme Yük. Müh. S. Nergis TURAL POLAT

**FBE Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı Elektronik Programında
Hazırlanan**

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 20 Temmuz 2009

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Vedat TAVŞANOĞLU (YTÜ)

Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Oruç BİLGİÇ (YTÜ)

Prof. Dr. Sabri ARIK (İÜ)

Doç. Dr. Müştak YALÇIN (İTÜ)

Yrd. Doç. Dr. Ertuğrul SAATÇİ (İKÜ)

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. HÜCRESEL SİNİR AĞLARI	5
2.1.1 Standart Hücresel Sinir Ağı (HSA) Yapısı	5
2.1.2 Standart HSA Denklemleri	7
2.1.3 Konumdan Bağımsız HSA	8
2.1.4 Lineer HSA	10
2.1.5 Standart HSA Devre Modeli	10
2.1.6 HSA'nın Vektör-Matris Diferansiyel Denklemi	12
2.2 HSA İle Lineer Görüntü İşleme	14
2.3 Sonuçlar	18
3. SÜREKLİ-UZAY VE UZAY-ZAMAN FİLTRELERİ	19
3.1 1-Boyutlu Analog Filtreler	19
3.2 Sürekli-Uzay Filtreleri (SUF)	21
3.2.1 Alçak Geçiren Sürekli-Uzay Filtresi	22
3.2.2 Yüksek Geçiren Sürekli-Uzay Filtresi	25
3.2.3 Bant Geçiren Sürekli-uzay Filtresi	29
3.2.4 Bant Söndüren Sürekli-uzay Filtresi	31
3.2.5 Uzaysal Gabor Filtreleri	33
3.3 Sürekli-Uzay-Zaman Filtreleri	36
3.3.1 Alçak Geçiren Sürekli-Uzay-Zaman Filtresi	37
3.3.2 Yönlü Alçak Geçiren Sürekli-uzay-Zaman Filtresi (Hız Ayarlı Filtre, HAF)	40
3.4 Sonuçlar	42
4. HSA İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN UZAYSAL FİLTRELER	43
4.1 Dairesel Simetrik Uzaysal Alçak Geçiren HSA Filtresi	43
4.1.1 HSA Denklemine Euler Yaklaşıklığı ile Ayrık Zaman Simülasyonu	46
4.1.2 Dairesel Simetrik Uzaysal Alçak Geçiren Filtrenin HSA Simülasyonu	47
4.2 Yönlü Uzaysal Alçak Geçiren HSA Filtresi	49

4.3	Dairesel Simetrik Uzaysal Yüksek Geçiren HSA Filtresi	52
4.4	Yönlü Uzaysal Yüksek Geçiren HSA Filtresi	54
4.5	Uzaysal Bant Geçiren HSA Filtresi	56
4.6	Uzaysal Bant Söndüren HSA Filtresi	60
4.7	Uzaysal Gabor HSA Filtresi	64
4.7.1	Uzaysal Gabor Tipi Filtrenin HSA Simülasyonu	67
4.8	Sonuçlar	70
5.	HSA İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN UZAY-ZAMANSAL FİLTRELER.....	71
5.1	Dairesel Simetrik Uzay-Zamansal Alçak Geçiren HSA Filtresi	71
5.1.1	Uzay-Zamansal HSA Simülasyonunun Uzaysal HSA Simülasyonundan Farkı ...	72
5.1.2	Uzay-Zamansal AGF HSA Simülasyonu	74
5.2	Yönlü Uzay-Zamansal Alçak Geçiren HSA Filtresi (Hız Ayarlı Filtre).....	76
5.2.1	Hız Ayarlı Filtre Simülasyonları	78
5.3	Uzay-Zamansal Gabor Tipi HSA Filtresi	87
5.3.1	Uzay-Zamansal Gabor Tipi Filtrenin HSA Simülasyonu.....	88
5.4	Sonuçlar	90
6.	ZAMAN TÜREVLİ HÜCRESEL SİNİR AĞLARI	92
6.1	Zaman Türevli HSA Genel Yapısı	93
6.2	ZTHSA SIMULINK Simülasyonları.....	100
6.3	ZTHSA İle İlgili Özgün Çalışmalar	112
6.3.1	ZTHSA Denklemine MATLAB “Ode” Fonksiyonu İle Simülasyonu	112
6.3.2	ZTHSA Vektör-Matris Denklemine Runge Kutta Yaklaşıklığı İle Simülasyonu	115
6.3.3	ZTHSA Vektör-Matris Denklemine Euler Yaklaşıklığı İle Simülasyonu	117
6.3.4	ZTHSA Simülasyonu İçin Tasarlanan Yeni Yöntem	118
6.4	Sonuçlar	128
7.	SONUÇLAR.....	129
Ek 1. MATLAB “isosurface” komutu ile eşyüzey eğrisi çizimi		132
Ek 2. Sabit Hızla Hareket Modeli.....		133
Ek 3. HSA Filtre Dizisi		136
ÖZGEÇMİŞ.....		146

SİMGE LİSTESİ

u_{ij}, x_{ij}, y_{ij}	Bir HSA hücresinin sırasıyla giriş, durum ve çıkış değişkenleri
(i,j)	HSA hücre indisi
r	HSA komşuluğu
A	Geri besleme klonlayıcı şablonu
B	İleri besleme klonlayıcı şablonu
$\dot{x}_{ij}$	Bir HSA hücresinin durum değişkeninin türevi
R	Bir HSA hücresinin lineer direnci
C	Bir HSA hücresinin lineer kapasite elemanı
$H(e^{j\omega})$	Ayrık zaman (veya ayrık uzay) Fourier dönüşümü
$H(j\Omega)$	Sürekli zaman (veya sürekli-uzay) Fourier dönüşümü
x_e	Karmaşık değerli durum değişkeninin gerçel kısmı
x_o	Karmaşık değerli durum değişkeninin sanal kısmı
g_e	Çift fazlı Gabor tipi filtre impuls yanıtı
g_o	Tek fazlı Gabor tipi filtre impuls yanıtı
σ_x, σ_y	Gabor filtresinin x ve y yönünde standart sapması
θ_0	Gabor filtresinin yönü
A_l	1. türev geri besleme klonlayıcı şablonu
τ	Bir HSA hücresinin zaman sabiti
T_s	HSA ayrık simülasyon adımı
T_F	Hareketli görüntünün periyodu

KISALTMA LİSTESİ

AUFD	Ayrık Uzay Fourier Dönüşümü
AGF	Alçak Geçiren Filtre
BGF	Bant Geçiren Filtre
BSF	Bant Söndüren Filtre
CNN	Cellular Neural/Nonlinear Networks
GTF	Gabor Tipi Filtre
GYAK	Gerilimle Yönetilen Akım Kaynağı
FAF	Frekans Ayarlı Filtre
FIR	Finite Impulse Response
HAF	Hız Ayarlı Filtre
HSA	Hücrel Sinir Ağları
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIR	Infinite Impulse Response
OPL	Outer Plexiform Layer
SISO	Single Input Single Output
SUF	Sürekli-uzay Filtresi
SUZF	Sürekli-uzay-Zaman Filtresi
TDCNN	Time Derivative Cellular Neural Networks
TGF	Tüm Geçiren Filtre
VLSI	Very Large Scale Integration
VTF	Velocity Tuned Filter
YGF	Yüksek Geçiren Filtre
ZTHSA	Zaman Türevli HSA

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Retinanın OPL katmanı (Torralba, 1999).....	1
Şekil 1.2 Yatay hücre modeli (RC analog ağ) (Mead, 1989)	2
Şekil 1.3 Aktif dirençsel yayılma ağları (Torralba, 1999).....	3
Şekil 2.1 Dörtgensel HSA yapısı (Chua ve Roska, 2002).....	6
Şekil 2.2 (a) $r = 1$ (3x3 komşuluk) (b) $r = 2$ (5x5 komşuluk) (Chua ve Roska, 2002).....	7
Şekil 2.3 Standart çıkış nonlineerliği (Chua ve Roska, 2002).....	7
Şekil 2.4 (i,j) hücresine ilişkin standart HSA devre modeli (Chua ve Roska, 2002)	11
Şekil 2.5 (i,j) hücresine ilişkin standart HSA blok diyagramı (Chua ve Roska, 2002).....	12
Şekil 2.6 (a) satır satır paketleme, (b) köşegensel paketleme, (c) sütun sütun paketleme	13
Şekil 2.7 $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrislerinin genel yapısı	13
Şekil 3.1 İkinci dereceden AGF, YGF, BGF, BSF ve TGF genlik frekans yanıtları	21
Şekil 3.2 (a) $\gamma = 1$ (b) $\gamma = 2$ için dairesel simetrik alçak geçiren sürekli-uzay filtresi genlik frekans yanıtları	23
Şekil 3.3 Yönlü SUF genlik frekans yanıtının yönü.....	24
Şekil 3.4 (a) $\gamma = 1, \alpha = \sqrt{3}, \beta = 1 \left(\theta = \frac{\pi}{3} \right)$ ve (b) $\gamma = 1, \alpha = -\sqrt{3}, \beta = 1 \left(\theta = -\frac{\pi}{3} \right)$ için yönlü alçak geçiren SUF genlik frekans yanıtları.....	25
Şekil 3.5 (a) $\gamma = 1$ (b) $\gamma = 2$ için dairesel simetrik yüksek geçiren sürekli-uzay filtresi genlik frekans yanıtları	27
Şekil 3.6 (a) $\gamma = 1, \alpha = \sqrt{3}, \beta = 1 \left(\theta = \frac{\pi}{3} \right)$ ve (b) $\gamma = 1, \alpha = -\sqrt{3}, \beta = 1 \left(\theta = -\frac{\pi}{3} \right)$ için yönlü yüksek geçiren SUF genlik frekans yanıtları.....	28
Şekil 3.7 (a) $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1, \mu = 1, \nu = 1$, (b) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 1, \mu = 1, \nu = 1$, (c) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 1, \mu = -1, \nu = 1$ için bant geçiren SUF genlik frekans yanıtları.....	30
Şekil 3.8 (a) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 20, \mu = 10, \nu = 1$, (b) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 20, \mu = 10, \nu = 10$ için bant geçiren SUF genlik frekans yanıtları	31
Şekil 3.9 (a) $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1, \eta = 1$, (b) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 1, \eta = 0.5$, (c) $\gamma = 2, \alpha = -1, \beta = 1, \eta = 0.5$ için bant söndüren SUF genlik frekans yanıtları.....	33
Şekil 3.10 Çift Gabor filtresinin yönü (a) impuls yanıtı (b) genlik frekans yanıtı	35
Şekil 3.11 Tek ve çift Gabor filtreleri impuls ve genlik frekans yanıtları.....	36
Şekil 3.12 (a) $\gamma = 0.5, \tau = 1$, (b) $\gamma = 1, \tau = 1$, (c) $\gamma = 1, \tau = 0.5$ için alçak geçiren SUZF genlik frekans yanıtları. En solda üç boyutlu çizim, ortada Ω_x, Ω_t kesiti ve sağda	

Ω_x, Ω_y kesiti görülmektedir. Bu filtre hem uzaysal hem zamansal frekanslarda alçak geçiren yapıdadır, γ ve τ değerleri ile filtrenin uzaysal ve zamansal frekanslardaki bant genişliği ayarlanmaktadır.	38
Şekil 3.13 (a) $v_x = 0, v_y = 0$, (b) $v_x = 4, v_y = 0$, (c) $v_x = 0, v_y = 3$, (d) $v_x = 2, v_y = 2$ için hız ayarlı SUZF genlik frekans yanıtları. Sıfır hızına ayarlı filtre aynı zamanda alçak geçiren SUZF'dir. (b), (c) ve (d)'deki HAF genlik frekans yanıtları uzay-zaman ekseninde yönlüdür.	41
Şekil 3.14 $v_x = 3, v_y = 0, \Omega_{t0} = 5$ için zamanda alçak geçiren ve bant geçiren HAF genlik frekans yanıtları	42
Şekil 4.1 Dairesel simetrik alçak geçiren HSA filtresi (i,j) hücresi	45
Şekil 4.2 Temel RC analog ağı	45
Şekil 4.3 $\gamma = 1$ için uzaysal AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	48
Şekil 4.4 $\gamma = 2$ için uzaysal AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	48
Şekil 4.5 Yönlü uzaysal alçak geçiren HSA filtresi (i,j) hücresi	50
Şekil 4.6 $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 2$ için Yönlü AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	51
Şekil 4.7 $\gamma = 1, \alpha = 2, \beta = 4$ için Yönlü AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	51
Şekil 4.8 $\gamma = 1, \alpha = -2, \beta = 4$ için Yönlü AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	52
Şekil 4.9 $\gamma = 1$ için uzaysal YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	53
Şekil 4.10 $\gamma = 2$ için uzaysal YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	53
Şekil 4.11 $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1$ için Yönlü YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	55
Şekil 4.12 $\gamma = 2, \alpha = 2, \beta = 4$ için Yönlü YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	55
Şekil 4.13 $\gamma = 2, \alpha = -2, \beta = 4$ için Yönlü YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları ...	56
Şekil 4.14 $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1, \mu = 1, \nu = 1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları ..	57
Şekil 4.15 $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1, \mu = -1, \nu = 1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	58
Şekil 4.16 $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 1, \mu = 1, \nu = 1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları .	58
Şekil 4.17 $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 2, \mu = -2, \nu = 1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	59
Şekil 4.18 $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 20, \mu = 10, \nu = 1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	59
Şekil 4.19 $\gamma = 2, \alpha = 10, \beta = 20, \mu = -10, \nu = 10$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	60
Şekil 4.20 $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1, \eta = 1$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	61
Şekil 4.21 $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 1, \eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	62
Şekil 4.22 $\gamma = 2, \alpha = -1, \beta = 1, \eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	62

Şekil 4.23 $\gamma = 2, \alpha = 4, \beta = 2, \eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları.....	63
Şekil 4.24 $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 5, \eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları	63
Şekil 4.25 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = \frac{\pi}{4}, \lambda = 0.5$ için analog Gabor tipi filtre genlik frekans yanıtı	66
Şekil 4.26 Uzaysal Gabor tipi filtre (i,j) düğümü ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin HSA devresi.....	67
Şekil 4.27 Bir boyutlu Uzaysal Gabor tipi filtre gerçel ve sanal impuls yanıtları.....	68
Şekil 4.28 İki boyutlu uzaysal Gabor tipi filtre gerçel ve sanal impuls yanıtlarının belli t anlarındaki değerleri. $t = 40T_s$ 'e gelindiğinde devre çıkışlarında iki boyutlu Gabor tipi filtre elde edilmektedir.....	69
Şekil 5.1 Uzay-zamansal HSA AGF (i,j) düğümü	72
Şekil 5.2 (a) uzaysal (b) uzay-zamansal HSA simülasyonu zaman sabiti seçimi	73
Şekil 5.3 $\gamma^2 = 2, \tau = 1$ için bir boyutlu uzay-zamansal AGF HSA simülasyonu impuls ve genlik frekans yanıtları	75
Şekil 5.4 $\gamma^2 = 0.2, \tau = 1$ için iki boyutlu uzay-zamansal AGF HSA simülasyonu impuls ve genlik frekans yanıtları	76
Şekil 5.5 Uzay-zamansal yönlü AGF (HAF) (i,j) hücresi.....	77
Şekil 5.6 $v_x = +1$ ve $v_x = -1$ için bir boyutlu alçak geçiren HAF impuls yanıtları. HAF impuls yanıtları uzay-zaman düzleminde yönlüdür.....	79
Şekil 5.7 Hareketli giriş görüntüsü.....	80
Şekil 5.8 $v_x = v_y = 0$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Bu filtre giriş işaretinde ortadaki duran noktayı seçmektedir. Filtre bu hıza ayarlı olduğu için sadece ortadaki nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.....	81
Şekil 5.9 $v_x = 3, v_y = 0$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sağ üst tarafındaki $v_x = 3, v_y = 0$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.....	82
Şekil 5.10 $v_x = 0, v_y = 2$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün üst orta tarafındaki $v_x = 0, v_y = 2$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.....	83

Şekil 5.11 $v_x = 3, v_y = 2$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sol üst tarafındaki $v_x = 3, v_y = 2$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.....	84
Şekil 5.12 $v_x = -4, v_y = 0$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sağ alt tarafındaki $v_x = -4, v_y = 0$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.....	85
Şekil 5.13 $v_x = 0, v_y = -3$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sol alt tarafındaki $v_x = 0, v_y = -3$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.....	86
Şekil 5.14 Gabor tipi uzay-zamansal bant geçiren filtre (i,j) düğümü ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin HSA devresi.....	88
Şekil 5.15 Bir boyutlu uzay-zamansal Gabor tipi filtre gerçel ve sanal impuls yanıtları.....	89
Şekil 5.16 $\gamma^2 = 2, \tau = 1$ için iki boyutlu uzay-zamansal Gabor tipi filtre impuls ve frekans yanıtları	90
Şekil 6.1 Genel bir komşu hücreden türevsel yayılım (Ip vd., 2008a).....	93
Şekil 6.2 $a_0 = 3.9, G_{XC} = G_{YC} = -1, G_{XS} = G_{YS} = 1.5, A_R = 5, B_R = 10$ için ZTHSA genlik frekans yanıtı.....	99
Şekil 6.3 Bir ZTHSA hücresi ve blok gösterimi	102
Şekil 6.4 5x5 boyutlu ZTHSA devresi	104
Şekil 6.5 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı. Türevli geri besleme katsayısı düşük olduğundan türevli bağlantının çıkışa bir etkisi olmamaktadır.....	106
Şekil 6.6 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı.....	107
Şekil 6.7 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı.....	108

Şekil 6.8 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı 109

Şekil 6.9 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı 110

Şekil 6.10 $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki bant geçiren filtre SIMULINK simülasyon sonuçları. $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ ve $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ frekanslı giriş çıkışta en büyük değere ulaşmış, diğer frekanslar için çıkış genliği düşmüştür. 111

Şekil 6.11 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ için çeşitli zamansal frekanslardaki bant geçiren filtre SIMULINK simülasyon sonuçları. $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ ve $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ frekanslı giriş çıkışta en büyük değere ulaşmış, diğer frekanslar için çıkış genliği düşmüştür. 112

Şekil 6.12 $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki ode45 simülasyonu çıkışları. $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ ve $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ frekanslı giriş çıkışta en büyük değere ulaşmış, diğer frekanslar için çıkış genliği düşmüştür. 114

Şekil 6.13 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ için çeşitli zamansal frekanslardaki ode45 simülasyonu çıkışları..... 114

Şekil 6.14 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$, $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ için çeşitli hücrelerin zamanla değişimi. 20,20 hücresi sınır koşullarından etkilendiğinden bulanıklaşmaktadır..... 115

Şekil 6.15 $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki interpolasyonlu RK4 iterasyonu çıkışları..... 117

Şekil 6.16 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ için çeşitli zamansal frekanslardaki interpolasyonlu RK4 iterasyonu çıkışları 117

Şekil 6.17 $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki interpolasyonlu Euler iterasyonu çıkışları..... 118

Şekil 6.18 Tasarlanan yöntemin $\Omega_{t_0} = 8rad / s$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki çıkışları. 119

Şekil 6.19 Tasarlanan yöntemin $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ için çeşitli zamansal frekanslardaki çıkışları..... 120

Şekil 6.20 Tasarlanan yöntemin $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942rad / pix$ ve çeşitli zamansal frekanslarda

10,10 hücresinin piksel değerlerinin zamanla değişimi	120
Şekil 6.21 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı	124
Şekil 6.22 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı	125
Şekil 6.23 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı	126
Şekil 6.24 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı	127
Şekil Ek 1.1 $\gamma = 1, \tau = 1$ için $H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2) + j\tau\Omega_t}$ genlik frekans yanıtı. En solda üç boyutlu çizim, ortada Ω_x, Ω_t kesiti ve sağda Ω_x, Ω_y kesiti görülmektedir. Elipsoitin içinde kalan frekans bölgesi filtrenin geçirme bandını, dışındaki frekans bölgesi de söndürme bandını göstermektedir.	132
Şekil Ek 2.1 Sabit hızla hareket (Adelson ve Bergen, 1985)	133
Şekil Ek 2.2 Sabit hızla hareket eden işaretin uzay-zaman düzlemi ve uzay-zamansal Fourier dönüşümü. İşaretin uzay-zaman düzlemindeki hareketinin bıraktığı iz dörtgensel olduğundan bunun Fourier dönüşümü de üç boyutlu Sinc fonksiyonudur.	134
Şekil Ek 2.3 İki boyutlu bir sinüzoidal işaret ve frekans spektrumu	135
Şekil Ek 3.1 Bir boyutlu HSA filtre dizisi i . hücresi	136
Şekil Ek 3.2 Bir boyutlu HSA filtre dizisinin blok diyagramı	137
Şekil Ek 3.3 A ve B1'den oluşan filtrenin genlik frekans spektrumu	139
Şekil Ek 3.4 Farklı hızdaki girişler için HSA filtre dizisi çıkışları ve hareket enerjileri. x_{b1} çıkışı A ve B1'den oluşan HSA çıkışını, x_{b2} çıkışı da A ve B2'den oluşan HSA çıkışını göstermektedir.	139
Şekil Ek 3.4 Devamı	140

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 6.1 ZTHSA bant geçiren filtrenin yukarıda incelenen yöntemlerle yapılan simülasyon sonuçları ($\Omega_t = 8rad / s$).....	121
Çizelge 6.2 ZTHSA bant geçiren filtrenin normalize edilmiş simülasyon sonuçları ($\Omega_t = 8rad / s$)	122
Çizelge 6.3 ZTHSA Simülasyon süreleri	123

ÖNSÖZ

Öncelikle doktora çalışmam boyunca sadece zekâsına ve engin bilgisine değil, aynı zamanda ders anlatma stiline ve öğrencileriyle arasındaki yakın ilişkiye de hayran olduğum, bana bundan sonraki kariyerimde her yönden örnek oluşturan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili danışman hocam Prof. Dr. Vedat TAVŞANOĞLU'na,

Lisans ve lisansüstü öğrenimim boyunca daima bilgi ve desteğini esirgemeyen, bana benden çok inanan, bu günlere erişmemde büyük katkısı ve üzerimde bir öğretmenden öte bir baba gibi emeği olan değerli hocam Prof. Dr. Atilla ATAMAN'a,

Her türlü bilgiyi paylaşmaktan kaçınmayan ve çoğu yazılım kaynaklı sorunlarımı çözmekte büyük yardımları dokunan, birlikte zaman geçirmekten zevk aldığım sevgili çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Oğuzhan YAVUZ, Arş. Gör. Nerhun YILDIZ, Arş. Gör. Evren CESUR, Arş. Gör. Murathan ALPAY ve Dr. Kamer KAYAER'e,

Beni büyük fedakârlıklarla tek başına yetiştiren ve bugünlere getiren canım annem Dr. Ayşıl TURAL'a ve her zaman en büyük neşe kaynağım ve maddi manevi destekçim biricik kardeşim Cengiz TURAL'a,

Ve son olarak tez sürecinin tüm sıkıntılarını benimle birlikte yaşayan, bana olan inancı, desteği ve güveniyle her zaman yüzümü güldüren sevgili hayat arkadaşım Ekrem POLAT'a yürekten teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Biyolojik organizmalar yüksek miktarda veriyi gerçek zamanlı olarak işlemekte uzmanlaşmıştır ancak bilgisayarda aynı işlemleri yapmak bilgisayarların nokta işlemci yapısından dolayı oldukça zordur. Dolayısıyla bilgisayarda görme çalışmalarında biyolojik sistemleri taklit eden makineler geliştirilmesi yolunda büyük çaba sarf edilmiştir. Böyle görme makineleri retinadakine benzer temel düşük seviyeli özellik algılayıcılarına ihtiyaç duymaktadır. Bu özellik algılayıcılar ölçek, yön, hız gibi yerel görüntü özelliklerini ölçmektedir. Az sayıda bağlantıya sahip aktif dirençsel yayılma ağları olarak adlandırılan modelin bu temel seviyeli özellik algılayıcıların gerçekleştirilmesinde ortak bir yapı sunduğu literatürde gösterilmiştir.

Hücrel sinir ağları (HSA) hücre olarak adlandırılan ve yalnızca en yakın komşularıyla haberleşen temel işlem birimlerinin uzayda düzgün dizilmesiyle oluşan bir ağ yapısıdır. HSA yapısı hem biyolojik organizmalara çok benzer bir yapıdadır hem de hücrelerin sadece en yakın komşularıyla bağlantılı olması ve her bir hücre için bağlantı ağırlıklarının genellikle konumla değişmemesi gibi nedenlerden ötürü analog VLSI gerçekleştirme için çok uygundur.

Bu çalışmanın konusu HSA ile gerçekleştirilen ve görme sistemlerinin temel özellik çıkarma işlemlerinde kullanılan uzay-zamansal filtre yapılarıdır. Literatürde bu konuda üç temel filtre vardır. Bu filtreler Gabor tipi uzay-zamansal yön seçici filtreler (frekans ayarlı filtreler), hız ayarlı filtreler ve zaman türevli HSA ile gerçekleştirilen bant geçiren filtrelerdir. Bu tez çalışmasında tüm bu filtreler ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiş ve simülasyonları yapılmıştır. Uzay-zamansal HSA simülasyonunun aşamaları ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmiştir. HSA filtre şablon katsayıları tek tek hesaplanmış ve bazı şablon katsayıları ile ilgili düzeltmeler önerilmiştir.

Zaman türevli HSA yapısı literatürde yeni ortaya atılan bir kavramdır. ZTHSA yapısının literatürde var olan tek simülasyonu SIMULINK blok diyagramları kullanarak yapılmıştır ve bu yöntem oldukça karmaşık, çok zaman harcayan ve hataya açık bir yöntemdir. Bu çalışmada ZTHSA için çok basit yapıda ve SIMULINK simülasyonundan yaklaşık 10^5 kat daha hızlı çalışan bir simülasyon yöntemi tasarlanmıştır.

SPATIAL AND SPATIO-TEMPORAL CNN FILTERS

ABSTRACT

Biological organisms excel at processing large amount of data in real time whereas computers usually are not good at such tasks because of their point processor architecture. Thus a great deal of effort has been spent on the development of machines that mimic biological systems in computer vision studies. Such vision machines require the simple low-level feature detectors similar in that of the retina. The low-level feature detectors measure local image properties as scale, orientation, and velocity. It has been shown that active resistive diffusion networks with low connectivity offer a common framework for the implementation of the low-level feature detectors commonly used in vision.

Cellular Neural Networks consist of regular arrays of simple processing units that interact with only their nearest neighbors. The CNN architecture bears striking resemblance to aforementioned biological organisms and they are tailor-made for analog VLSI implementations because of their nearest neighbor connections and usually space invariant connection weights.

The scope of this thesis is spatio-temporal filters which are used in the feature extraction layer of computer vision systems and are implemented via CNN architecture. There are three main filter architectures of this kind, namely Gabor type spatio-temporal orientation selective filters (frequency tuned filters), velocity tuned filters and time derivative CNN bandpass filters. All of these filters are analyzed and simulated in detail. Spatio-temporal simulation steps of CNN are given. The template coefficients of all of the aforementioned filters are calculated and some corrections on the filter template values are proposed.

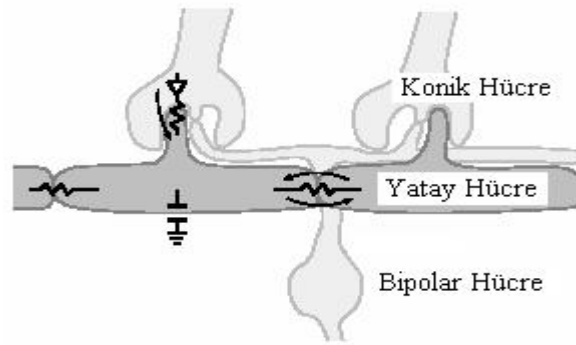
Time derivative CNN architecture has been introduced recently in literature. The only existing simulation method for TDCNN is achieved by using SIMULINK block diagrams. This is a very cumbersome; error-prone and extremely time consuming method. In this study, a much simpler and approximately five orders of magnitude faster simulation method is designed for TDCNN.

1. GİRİŞ

İnsan ve hayvan davranışını taklit eden makineler yaratma düşü teknolojinin başlangıcından beri mevcuttur. Ucuz ve güçlü dijital bilgisayarların üretilmesiyle bu düş gerçekleşmeye başlamıştır. Ancak dijital bilgisayarlar, görsel bilgiyi işlemekte çok zorlanmaktadır çünkü işlenmesi gereken görsel veri miktarı çok fazladır. Örneğin 1s uzunluğundaki sıkıştırılmamış bir NTSC görüntü yaklaşık 22MB veri demektir. Bu kadar büyük veriyi işlemek, kaydetmek ve iletmek dijital bilgisayarlar için oldukça güçtür ancak bu zor işlerin hepsi bir sinek tarafından rahatlıkla gerçekleştirilebilmektedir.

Günümüzde birçok üniversitede kedi, sinek, maymun ve tavşan gibi çeşitli hayvanların görsel algılama yapıları incelenmektedir. Aynı zamanda, bir Silisyum yonganın destekleyeceği karmaşıklık derecesi de gün geçtikçe artmaktadır. Bu gelişmelerden ve incelemelerden yola çıkılarak canlı hücrelerin temel görsel veri işleme davranışını taklit eden, nöromorfik (nöron benzeri) tümleşik devreler olarak anılan bazı devreler geliştirilmiştir ve artık birtakım ürünlerde kullanılabilecek düzeye erişmişlerdir. Uzun vadede, nöromorfik tasarım kuralları sayesinde makinelerin çevreleriyle klavye vb. birimlerle değil gerçek zamanlı, sağlam, hızlı, ucuz, küçük ve akıllı sensör yapıları aracılığıyla etkileşebileceği düşünülmektedir.

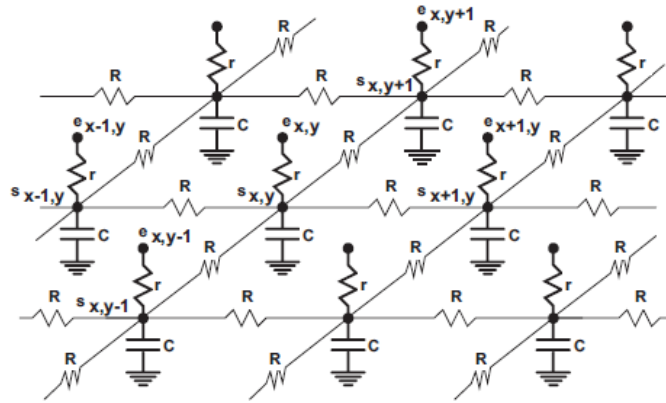
İnsanlar ve diğer memeliler için görme sisteminden daha önemli bir sensör yapısı yoktur. Biyolojik görme sisteminin ilk ve en iyi bilinen kısmı retinadır. Retina sadece bir görsel alıcı veya statik kamera olmanın ötesinde sürekli giriş ve çok sayıda paralel çıkış kanalına sahip karmaşık bir özellik ön-işleyicisidir. Birbirleriyle etkileşim halindeki bu kanallardan gelen veriler yorumlanarak görüntü algılanır. Retinada kenar belirleme, ışık ve gürültü seviyesi ayarı, renk ön-işleme, hareket algılama gibi temel işlemler gerçekleştirilmektedir. Şekil 1.1’de retinanın OPL (Outer Plexiform Layer) denilen ilk katmanı görülmektedir.



Şekil 1.1 Retinanın OPL katmanı (Torralba, 1999)

OPL katmanında temel olarak üç tip hücre bulunur; foto reseptörler (konik ve çubuk hücreler), yatay hücreler ve bipolar hücreler. Konik ve çubuk hücreler görüntü parlaklığını algılayarak yatay ve bipolar hücrelere gönderir. Yatay hücreler foto reseptörlere ve diğer yatay hücrelere elektriksel sinapslarla bağlıdır ve gelen görüntü üzerinde bir alçak geçiren filtre etkisi yaparak görüntüyü düzgünleştirir. Bipolar hücreler de foto reseptör ve yatay hücrelerden gelen işaretlerin farkını alarak görüntüdeki çeşitli özelliklerin belirlenmesini sağlarlar.

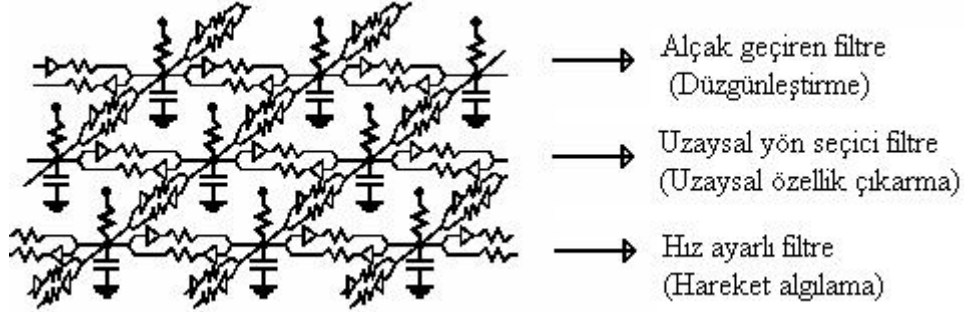
Retinanın yatay hücrelerinin elektriksel olarak modellenmesi ilk defa C. Mead tarafından yapılmıştır. Şekil 1.2’de Mead (1989) ile Mahowald ve Mead’de (1991) verilen retina modeli görülmektedir. Burada yatay hücrelerin sinapsları dirençlerle ve membran hücreleri de kondansatörlerle modellenmiştir. Elde edilen model dirençler ve kondansatörlerden oluşan dörtgensel bir ızgara yapısıdır. Bu yapı RC analog ağ olarak da adlandırılır. Biyolojik retinanın daha ayrıntılı özelliklerini içeren modeller Boahen (1999) ve Andreou vd. (1991a;1991b;1995) tarafından geliştirilmiştir.



Şekil 1.2 Yatay hücre modeli (RC analog ağ) (Mead, 1989)

Yukarıda bahsedildiği gibi biyolojik sistemlerin benzeri olan görme makinelerinin gerçekleştirilmesinde önemli adımlardan biri basit yapıda temel özellik algılayıcılarının geliştirilmesidir. Düşük seviyeli özellik algılayıcılar ölçek, yön, hız gibi yerel görüntü özelliklerini algırlar. Bu işlemleri yerine getiren çok çeşitli yapıda algılayıcılar literatürde önerilmiştir. Bunlardan aktif dirençsel yayılma ağları yukarıdaki algılayıcıları gerçekleştirebilecek temel (ve ortak) bir devre yapısıdır. Aktif dirençsel yayılma ağlarının RC ağından farkı dört yöndeki direnç değerlerinin birbirinden farklı olmasıdır. Bu dirençler değişik şekillerde seçilerek farklı özellikte filtreler (alçak geçiren filtreler, yönlü filtreler ve

hız ayarlı filtreler) elde edilebilir (Şekil 1.3). Son yıllarda bu temel yapıya hücreler arasında türevli ilişki oluşturacak kondansatörlü bağlantıların eklenmesiyle daha geniş kapsamlı uzay-zamansal filtrelerin gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir (Ip vd., 2006; 2008a).



Şekil 1.3 Aktif dirençsel yayılma ağı (Torralba, 1999)

Yukarıdaki retina modellerinin gerçekleştirilmesinde hücresel sinir ağı (HSA) yaygın olarak kullanılmaktadır. İleride belirtileceği gibi yukarıdaki dirençsel ağı ve yayılma ağı aslında birer HSA devresidir. Hücresel sinir ağı (HSA), analog, nonlinear ve dinamik yapıya işlemcilerin birbirlerine bağlanmasından oluşan Hopfield Sinir Ağlarının bir özel halidir. HSA’da her bir hücre yalnızca en yakın komşu hücrelere doğrudan bağlıdır. Buna “yerel bağlantı özelliği” denir. Doğasından gelen paralel işlem yeteneği sayesinde HSA görüntü işleme uygulamalarında çok yüksek hızlara erişebilmektedir. Konumla değişmeyen HSA’da ise her bir hücrenin komşularına bağlılık katsayıları her hücre için aynı olduğundan bu tür HSA’lar yerel olarak kendilerini yineleyen bir yapıya sahiptir. Yerel bağlantı ve yerel yineleme özellikleri ise HSA’yı VLSI teknolojisi ile gerçekleştirmeye çok uygun kılmaktadır. Ayrıca HSA insan görme sistemi ile çeşitli benzer özelliklere sahiptir.

Bu çalışmada HSA ile gerçekleştirilen temel uzay-zamansal filtre yapıları ayrıntılı olarak incelenmiş, simülasyonları yapılmış ve bu yapılardan birisi olan türevli HSA simülasyonu literatürde var olan yöntemden farklı bir şekilde yapılarak simülasyonun çok daha hızlı gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Bölüm 2’de HSA yapısı incelenmiştir. HSA’nın temel denklemleri, devre yapısı ve blok diyagramı verilerek HSA’nın temel çalışma mantığı hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’de ikinci dereceden zamansal analog filtre yapılarından esinlenerek çeşitli sürekli-uzay filtrelerinin transfer fonksiyonları ve diferansiyel denklemleri elde edilmiştir. Ardından bu filtrelerin transfer fonksiyonlarına zaman değişkeninin eklenmesiyle sürekli-uzay-zaman

filtreleri elde edilmiştir.

Bölüm 4’de HSA ile gerçekleştirilen temel uzaysal filtre yapıları üzerinde durulmuştur. Bu filtreler Bölüm 3’deki sürekli-uzay filtrelerinin uzayda ayrıklaştırılmasıyla elde edilmektedir. Her bir filtrenin impuls ve frekans yanıtları verilmiştir. Bu filtrelerin HSA ile gerçekleştirilmesi için gerekli filtre şablon değerleri hesaplanmıştır. Bu bölümde ayrıca HSA ile uzaysal filtre simülasyonları hakkında bilgi verilmiş ve incelenen filtrelerin simülasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Bölüm 4’de incelenen uzaysal filtreler bölüm 5’deki uzay-zamansal filtrelerin temelini oluşturmaktadır.

Bölüm 5’de çeşitli temel uzay-zamansal filtre yapıları ve bu yapıların HSA ile simülasyonu ile ilgili bilgi verilmiştir. HSA ile uzay-zamansal filtrelemenin uzaysal filtrelemeden farkı açıklanmıştır. İncelenen filtre yapılarının şablon katsayıları hesaplanmış ve bu katsayılar kullanılarak gerçekleştirilen HSA simülasyon sonuçları verilmiştir.

Bölüm 6’da bu tezin özünü oluşturan zaman türevli HSA (ZTHSA) yapıları incelenmiştir. ZTHSA’lar ile lineer HSA’ların modelleyemediği çeşitli filtre yapılarını gerçekleştirmek mümkündür. Bu bölümde ZTHSA yapısının ayrıntıları verilerek kaynaklardaki bazı yanlışlar ve eksiklikler belirlenmiş ve düzeltilmiştir. Literatürde ZTHSA’nın simülasyonu SIMULINK blok diyagramları kullanılarak yapılmıştır. Bu bölümde bu simülasyon yöntemi ayrıntılı olarak incelenmekte ve eksiklikleri vurgulanmaktadır. Daha sonra ZTHSA denklemi matrisel olarak ifade edilmiş ve bu matrisel denklemin çeşitli yöntemlerle simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlardan elde edilen deneyim ile ZTHSA için çok basit yapıda ve çok hızlı yeni bir simülasyon yöntemi geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen yöntemin çeşitli devre boyutları ve çeşitli girişler için simülasyon süreleri SIMULINK simülasyon süreleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiş ve yöntemin hız avantajı vurgulanmıştır.

2. HÜCRESEL SİNİR AĞLARI

Hücresel Sinir Ağları (HSA), L. O. Chua ve L. Yang tarafından 1988 de icat edilmiştir (Chua ve Yang, 1988a; 1988b). HSA, her biri birbiriyle aynı özellikteki ‘hücre’ olarak adlandırılan işlem birimlerinin N-boyutlu uzayda düzgün dizilmesiyle oluşmuş dinamik bir ağıdır. Bu hücreler iki temel özelliğe sahiptir: (i) bağlantılar sonlu bir r yarıçapı içinde yereldir, (ii) tüm durum değişkenleri sürekli değerlidir. Hücrelerin sadece en yakın komşularıyla sınırlı sayıda bağlantısının olması önemli bir sınırlama değildir, çünkü bir hücredeki bilgi hücreler arası bağlantılar ile zamanla global olarak yayılabilmektedir.

Yapay sinir ağlarında tipik olarak işlem birimlerinin arasında tam bağlantı vardır ve devre gerçekleştirmesinde bu ara bağlantıların yapılması ve bağlantı ağırlıklarının saklanması için geniş bir tümdevre alanı gerekmektedir. Buna karşılık HSA yapısının yerel bağlantı özelliği sayesinde gereken alan oldukça küçülmekte ve dolayısıyla aynı alanda daha büyük ağ yapısının gerçekleşmesine olanak sağlamaktadır. Buna ek olarak konumdan bağımsız HSA’nın her hücresinin bağlantı ağırlıkları aynı olduğundan devre tasarımı ve ölçeklenmesi kolaylaşmaktadır. Bu özellikleri sayesinde HSA, analog VLSI teknolojisi ile gerçeklemeye çok uygundur ki bu da yüksek hızlı görüntü işleme donanımlarının gerçekleştirilmesi için çok önemlidir.

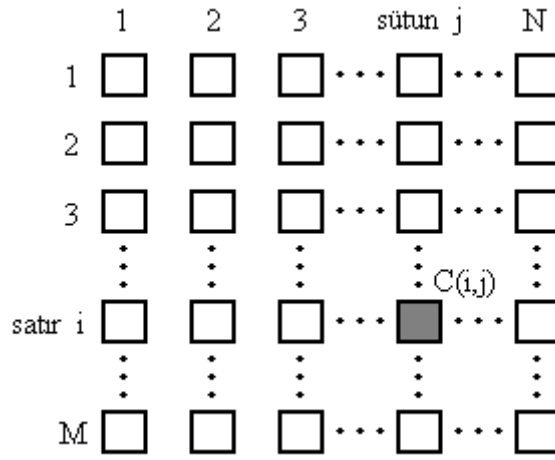
Görüntü işleme uygulamalarında HSA yapısındaki her bir hücre görüntünün bir pikseline karşı düşmektedir, dolayısıyla HSA’nın yapısal paralelliği işleme hızını oldukça arttırmaktadır. Ayrıca bu ağlar ayrık-uzay, sürekli-zaman, sürekli-durum sistemleri olduklarından gerçek zamanlı görüntü işlemeye uygundur.

Bu bölümün amacı hücresel sinir ağı yapısını tanıtmak, temel kavramlarını ve matematiksel modelini ortaya koyarak sonraki bölümlerde incelenen HSA ile gerçekleştirilen uzaysal ve uzay-zamansal filtre yapıları için temel oluşturmaktır.

2.1.1 Standart Hücresel Sinir Ağı (HSA) Yapısı

Standart hücresel sinir ağı birbirinin aynısı olan ve hücre olarak adlandırılan devre parçalarının uzayda düzgün bir biçimde dizilmesinden oluşan bir ağ yapısıdır. Her bir hücre sadece en yakın komşu hücreleriyle haberleşmektedir (Chua ve Yang, 1988a). Birbirine doğrudan bağlı olmayan hücreler de (her bir hücrenin komşu hücrelerine bağlı olması nedeniyle) belli bir süre sonra birbirini dolaylı olarak etkileyebilmektedir. Bir $M \times N$ HSA, M satır ve N sütundan oluşan iki boyutlu bir dizidir ve i . satır ve j . sütundaki hücre $C(i,j)$ hücresi

olarak adlandırılır. Şekil 2.1’de dörtgensel olarak dizilmiş ızgara yapısı görülmektedir (Chua ve Roska, 2002).



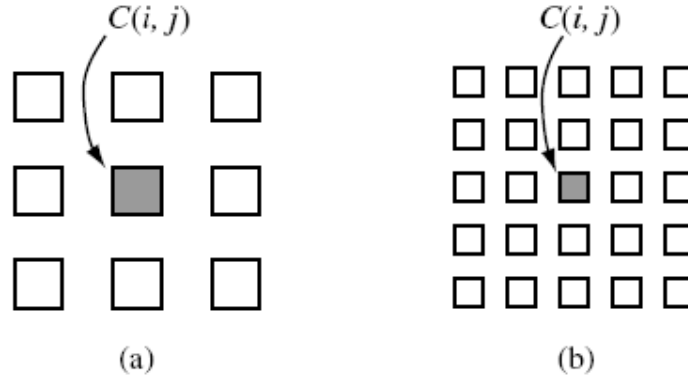
Şekil 2.1 Dörtgensel HSA yapısı (Chua ve Roska, 2002)

Daha yüksek boyutlu veya dörtgensel olmayan diğer düzgün geometrik ızgaralı (üçgensel veya altıgensel) HSA tanımları yapılmıştır. Ancak görüntü işleme uygulamaları için dörtgensel dizilimde hücreler işlenecek görüntüdeki piksellere birebir karşı düştüğünden bu tezde iki boyutlu ve dörtgensel dizilmiş hücre yapısı üzerinde durulacaktır.

Bir HSA’da bir hücrenin r -komşuluklu olması o hücrenin her yönde etrafındaki r tane yan komşu hücreye bağlı olduğunu ifade eder. Yani r , hücrenin bağlantı derecesini temsil eder. Bir $M \times N$ HSA’da $C(i,j)$ hücresinin “ r -komşuluğu” şu şekilde tanımlanır:

$$S_r(i,j) = \{C(k,l) \mid \max\{|k-i|, |l-j|\} \leq r, 1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N\} \quad (2.1)$$

Yukarıda r komşuluk yarıçapını gösteren pozitif bir tam sayıdır. Genellikle “ r -komşuluk” “ $(2r+1) \times (2r+1)$ komşuluk” olarak da adlandırılır. Örneğin $r = 1$ komşuluk aynı zamanda 3×3 komşuluk, $r = 2$ ise 5×5 komşuluk olarak da anılır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 (a) $r = 1$ (3x3 komşuluk) (b) $r = 2$ (5x5 komşuluk) (Chua ve Roska, 2002)

2.1.2 Standart HSA Denklemleri

Standart HSA yapısında her bir $C(i, j)$ hücresi matematiksel olarak şu şekilde tanımlanır:

1. Durum denklemi

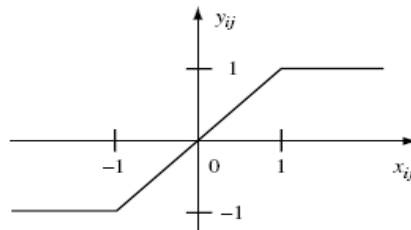
$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} A(i, j; k, l) y_{k,l} + \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} B(i, j; k, l) u_{k,l} + z_{i,j} \quad (2.2)$$

Burada $C(i, j)$ hücresi için $x_{i,j} \in R$ durum, $y_{i,j} \in R$ çıkış, $u_{i,j} \in R$ giriş ve $z_{i,j} \in R$ eşik değeri olarak adlandırılır. A ve B sırasıyla geri besleme ve ileri besleme sinaptik ağırlıkları veya şablonlarıdır.

2. Çıkış denklemi

$$y_{i,j} = f(x_{i,j}) = \frac{1}{2} (|x_{i,j} + 1| - |x_{i,j} - 1|) \quad (2.3)$$

(2.3) denklemi standart nonlinearlik olarak bilinir. $y_{i,j} = f(x_{i,j})$ değişimi Şekil 2.3'de verilmektedir.



Şekil 2.3 Standart çıkış nonlinearliği (Chua ve Roska, 2002)

3. Sınır koşulları

Sınır koşulları $M \times N$ ızgaranın kenarlarındaki hücrelerin $S_r(i, j)$ etki alanı içindeki $y_{i,j}$ ve $u_{i,j}$ değerlerini belirleyen kurallardır.

4. Durumun başlangıç değeri

$$x_{i,j}(0), \quad i = 1, \dots, M, \quad j = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

$u_{i,j}$ girişi genellikle görüntünün piksel parlaklık değeridir ve $-1 \leq u_{i,j} \leq +1$ 'dir. -1 siyah, $+1$ beyaz renge karşı düşer. Durgun bir görüntü için $u_{i,j}$ her t anında sabittir. Hareketli görüntüde (video) ise $u_{i,j}$ zamanın fonksiyonu olarak değişir. En genel durumda $A(i, j; k, l)$, $B(i, j; k, l)$ ve $z_{i,j}$ zamanın ve (i, j) konumunun bir fonksiyonudur ancak birçok durumda zamandan ve konumdan bağımsız olarak alınır.

2.1.3 Konumdan Bağımsız HSA

Adından da anlaşılacağı gibi konumdan bağımsız HSA'da $A(i, j; k, l)$, $B(i, j; k, l)$ ve $z_{i,j}$ her (i, j) konumu için sabittir. Bu durumda

$$\begin{aligned} \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} A(i, j; k, l) y_{k,l} &= \sum_{|k-i| \leq r} \sum_{|l-j| \leq r} A(i-k, j-l) y_{k,l} \\ \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} B(i, j; k, l) u_{k,l} &= \sum_{|k-i| \leq r} \sum_{|l-j| \leq r} B(i-k, j-l) u_{k,l} \\ z_{i,j} &= z \end{aligned} \quad (2.5)$$

olur. Konumdan bağımsız ve 1-komşuluklu bir HSA'da $C(i, j)$ hücresinin etki alanı (komşuluğu) aşağıdaki gibidir.

$C(i-1, j-1)$	$C(i-1, j)$	$C(i-1, j+1)$
$C(i, j-1)$	$C(i, j)$	$C(i, j+1)$
$C(i+1, j-1)$	$C(i+1, j)$	$C(i+1, j+1)$

Tanım:

$$A \triangleq \begin{bmatrix} a_{-1,-1} & a_{-1,0} & a_{-1,1} \\ a_{0,-1} & a_{0,0} & a_{0,1} \\ a_{1,-1} & a_{1,0} & a_{1,1} \end{bmatrix}, \quad B \triangleq \begin{bmatrix} b_{-1,-1} & b_{-1,0} & b_{-1,1} \\ b_{0,-1} & b_{0,0} & b_{0,1} \\ b_{1,-1} & b_{1,0} & b_{1,1} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

matrislerine, sırasıyla 1-komşuluklu geri besleme ve ileri besleme şablonları denir.

Tanım:

$$Y_{i,j} \triangleq \begin{bmatrix} y_{i-1,j-1} & y_{i-1,j} & y_{i-1,j+1} \\ y_{i,j-1} & y_{i,j} & y_{i,j+1} \\ y_{i+1,j-1} & y_{i+1,j} & y_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

matrisi (i,j) hücresi ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin çıkış görüntüsü;

$$U_{i,j} \triangleq \begin{bmatrix} u_{i-1,j-1} & u_{i-1,j} & u_{i-1,j+1} \\ u_{i,j-1} & u_{i,j} & u_{i,j+1} \\ u_{i+1,j-1} & u_{i+1,j} & u_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

matrisi ise, (i,j) hücresi ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin giriş görüntüsüdür.

A ve B şablonları konumdan bağımsız ise aynı şablon değerleri tüm görüntü boyunca görüntü üzerinde kaydırılarak çıkış görüntüsü elde edildiğinden bu şablonlar klonlayıcı şablonlar olarak da adlandırılır.

$C(i,j)$ hücresi için A ve B şablonlarının katkılarını inceleyelim

$$\begin{aligned} \sum_{C(k,l) \in S_1(i,j)} A(i,j;k,l) y_{k,l} &= a_{-1,-1} y_{i-1,j-1} + a_{-1,0} y_{i-1,j} + a_{-1,1} y_{i-1,j+1} + a_{0,-1} y_{i,j-1} + a_{0,0} y_{i,j} \\ &\quad + a_{0,1} y_{i,j+1} + a_{1,-1} y_{i+1,j-1} + a_{1,0} y_{i+1,j} + a_{1,1} y_{i+1,j+1} \\ &= \sum_{k=-1}^{+1} \sum_{l=-1}^{+1} a_{k,l} y_{i+k,j+l} \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\sum_{C(k,l) \in S_1(i,j)} A(i,j;k,l) y_{k,l} \triangleq \begin{bmatrix} a_{-1,-1} & a_{-1,0} & a_{-1,1} \\ a_{0,-1} & a_{0,0} & a_{0,1} \\ a_{1,-1} & a_{1,0} & a_{1,1} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} y_{i-1,j-1} & y_{i-1,j} & y_{i-1,j+1} \\ y_{i,j-1} & y_{i,j} & y_{i,j+1} \\ y_{i+1,j-1} & y_{i+1,j} & y_{i+1,j+1} \end{bmatrix} = A \otimes Y_{i,j} \quad (2.10)$$

Burada $\otimes$ işlemi eleman değerlerinin karşılıklı çarpımlarının toplamı anlamında şablon nokta çarpımı olarak adlandırılır.

$$\sum_{C(k,l) \in S_1(i,j)} B(i,j;k,l) u_{k,l} \triangleq \begin{bmatrix} b_{-1,-1} & b_{-1,0} & b_{-1,1} \\ b_{0,-1} & b_{0,0} & b_{0,1} \\ b_{1,-1} & b_{1,0} & b_{1,1} \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} u_{i-1,j-1} & u_{i-1,j} & u_{i-1,j+1} \\ u_{i,j-1} & u_{i,j} & u_{i,j+1} \\ u_{i+1,j-1} & u_{i+1,j} & u_{i+1,j+1} \end{bmatrix} = B \otimes U_{i,j} \quad (2.11)$$

HSA durum denklemi nokta çarpım ifadelerini kullanarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + A \otimes Y_{i,j} + B \otimes U_{i,j} + z_{i,j} \quad (2.12)$$

2.1.4 Lineer HSA

Lineer HSA’da çıkış değişkeni durum değişkeninin lineer bir fonksiyonudur. HSA durum denkleminde $y_{i,j} = x_{i,j}$ alındığında denklem

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} A(i,j;k,l)x_{k,l} + \sum_{C(k,l) \in S_r(i,j)} B(i,j;k,l)u_{k,l} + z_{i,j} \quad (2.13)$$

haline gelir. Lineer HSA’nın (i,j) hücresi ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin çıkış ve durum görüntüsü

$$X_{i,j} \triangleq \begin{bmatrix} x_{i-1,j-1} & x_{i-1,j} & x_{i-1,j+1} \\ x_{i,j-1} & x_{i,j} & x_{i,j+1} \\ x_{i+1,j-1} & x_{i+1,j} & x_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

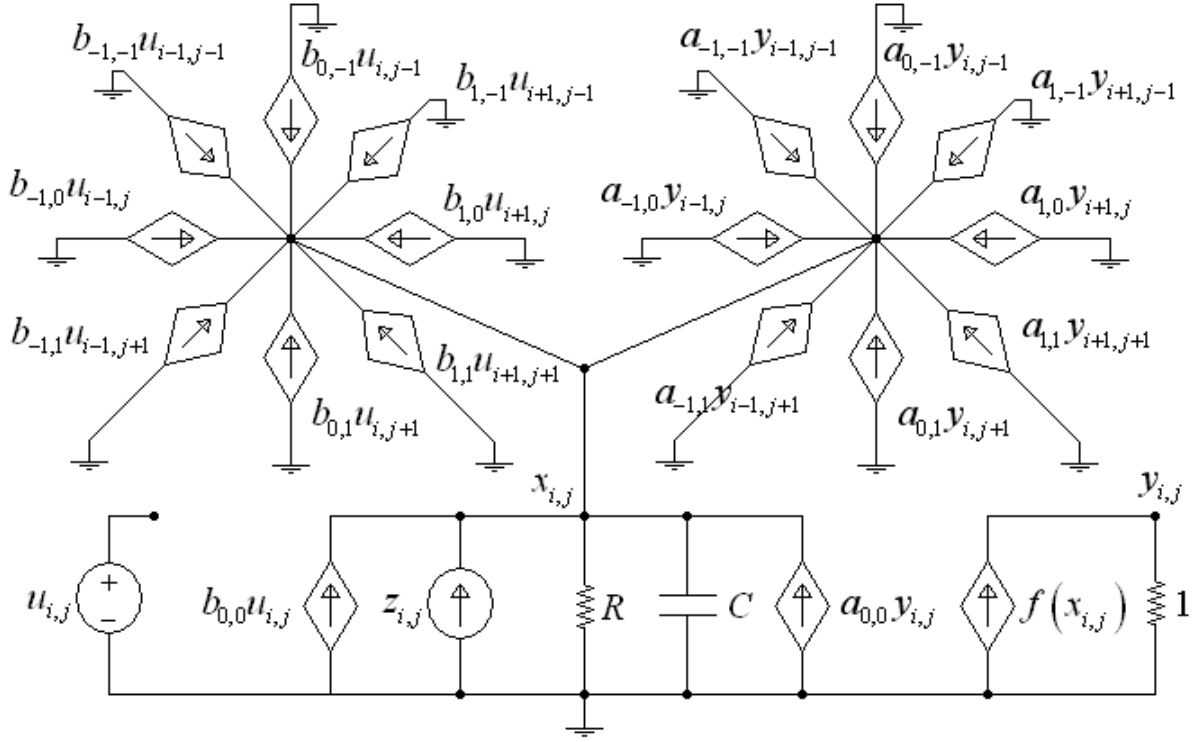
olarak tanımlanırsa konumdan bağımsız ve lineer HSA durum denklemini de

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + A \otimes X_{i,j} + B \otimes U_{i,j} + z_{i,j} \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir.

2.1.5 Standart HSA Devre Modeli

Standart HSA denklemleri lineer direnç, kapasite elemanı ve lineer ve lineer olmayan gerilimle yönetilen akım kaynakları ile modellenebilir. Şekil 2.4’de $u_{i,j}$, $x_{i,j}$ ve $y_{i,j}$ ilgili düğümlerin gerilim değerlerini ifade etmek üzere (i,j) hücresine ilişkin standart HSA devre modeli görülmektedir.



Şekil 2.4 (i,j) hücrelerine ilişkin standart HSA devre modeli (Chua ve Roska, 2002)

Şekil 2.4'deki devrede C lineer kapasite elemanı devrenin tek hafıza elemanıdır. $u_{i,j}$ giriş gerilimi girişteki bağımsız gerilim kaynağı tarafından sağlanmakta ve devrenin geçici yanıtı sırasında sabit kabul edilmektedir. $x_{i,j}$ durum değişkeni C kapasite elemanı üzerindeki gerilimdir. $x_{i,j}$ düğümüne komşu girişler ve çıkışlardan gelen etkiler sırasıyla $b_{k,l}u_{i+k,j+l}$ ve $a_{k,l}y_{i+k,j+l}$ ile gösterilen lineer gerilimle yönetilen akım kaynakları (GYAK) ile modellenmiştir. $y_{i,j}$ çıkış geriliminin değeri de lineer olmayan GYAK tarafından sağlanmaktadır.

$x_{i,j}$ düğümü için akım denklemleri yazılırsa

$$C \frac{dx_{i,j}}{dt} = -\frac{1}{R} x_{i,j} + A \otimes Y_{i,j} + B \otimes U_{i,j} + z_{i,j} \quad (2.16)$$

$$\frac{dx_{i,j}}{dt} = -\frac{1}{RC} x_{i,j} + \frac{1}{C} [A \otimes Y_{i,j} + B \otimes U_{i,j} + z_{i,j}] \quad (2.17)$$

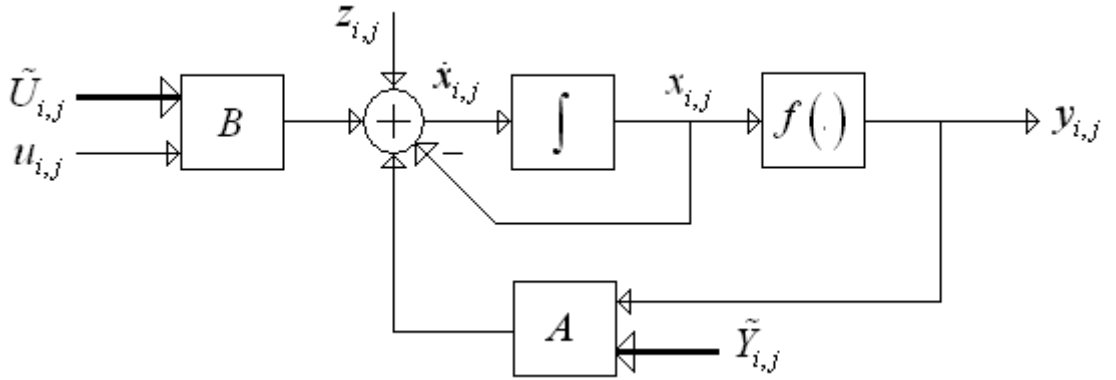
bulunur. Devrenin zaman sabiti $\tau = RC = 1$ olacak şekilde $R = 1$ ve $C = 1$ seçilirse (2.2) denklemi elde edilir.

(i,j) hücresi ve bir komşuluklu çevresine ilişkin giriş görüntüsü $U_{i,j}$ ve çıkış görüntüsü $Y_{i,j}$ aşağıdaki şekilde merkez ve çevre matrislerine ayrılırsa

$$U_{i,j}^0 \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_{i,j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{U}_{i,j} \triangleq \begin{bmatrix} u_{i-1,j-1} & u_{i-1,j} & u_{i-1,j+1} \\ u_{i,j-1} & 0 & u_{i,j+1} \\ u_{i+1,j-1} & u_{i+1,j} & u_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$Y_{i,j}^0 \triangleq \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{i,j} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \tilde{Y}_{i,j} \triangleq \begin{bmatrix} y_{i-1,j-1} & y_{i-1,j} & y_{i-1,j+1} \\ y_{i,j-1} & 0 & y_{i,j+1} \\ y_{i+1,j-1} & y_{i+1,j} & y_{i+1,j+1} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

bu değerleri kullanarak (i,j) hücresine ilişkin standart HSA denkleminin blok diyagramı Şekil 2.5'deki gibi elde edilir.



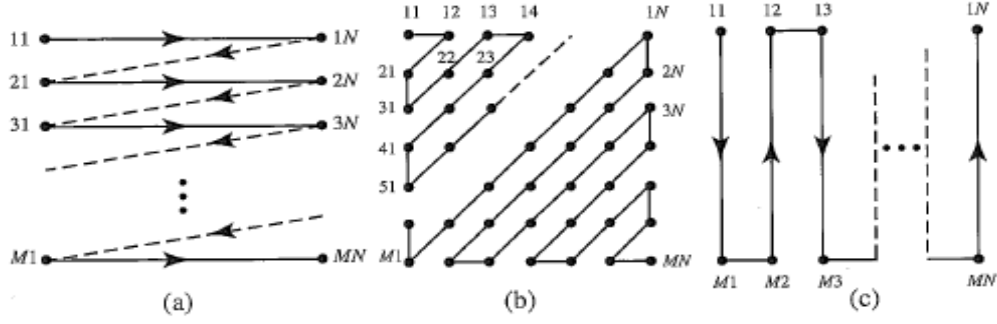
Şekil 2.5 (i,j) hücresine ilişkin standart HSA blok diyagramı (Chua ve Roska, 2002)

2.1.6 HSA'nın Vektör-Matris Diferansiyel Denklemi

Diferansiyel denklem sistemlerini çözmek için kullanılan teoremler ve nümerik teknikler için diferansiyel denklemler genellikle vektör-matris formunda ifade edilir. HSA denklemini de vektör-matris formunda ifade etmek için kullanılan çeşitli sıralama şemaları mevcuttur. Bu şemaların en sık kullanılanları

- satır satır paketleme
- köşegensel paketleme
- sütun sütun paketleme

olarak ifade edilir. Bu paketleme şemaları Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



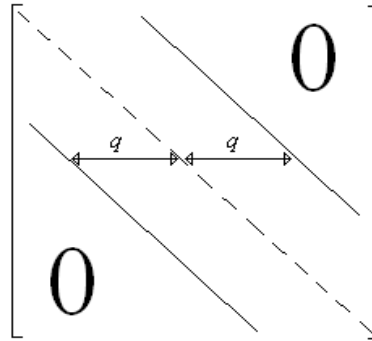
Şekil 2.6 (a) satır satır paketleme, (b) köşegenel paketleme, (c) sütun sütun paketleme

HSA’nın her (i,j) hücresi için yazılmış toplam $M \times N$ tane diferansiyel denklemden $(M \times N) \times 1$ boyutlu bir tane diferansiyel denklem elde edilecek şekilde değişkenler yukarıdaki paketleme şemalarından herhangi biri kullanılarak vektörel formda sıralandığında

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 \\ \vdots \\ \dot{\hat{x}}_{M \times N} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \vdots \\ \hat{x}_{M \times N} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{y}_1 \\ \hat{y}_2 \\ \vdots \\ \hat{y}_{M \times N} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{A}}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{u}_1 \\ \hat{u}_2 \\ \vdots \\ \hat{u}_{M \times N} \end{bmatrix}}_{\hat{\mathbf{B}}} + \begin{bmatrix} \hat{z}_1 \\ \hat{z}_2 \\ \vdots \\ \hat{z}_{M \times N} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = -\mathbf{x} + \hat{\mathbf{A}}\mathbf{y} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \mathbf{z} \quad (2.21)$$

elde edilir. Burada $\mathbf{x}$, $\mathbf{y}$, $\mathbf{u}$ ve $\mathbf{z}$ vektörleri $(M \times N) \times 1$ boyutludur ve sırasıyla durum, çıkış, giriş ve eşik vektörlerini göstermektedir. $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrisleri $(M \times N) \times (M \times N)$ boyutludur ve sıfırdan farklı değerleri matrisin köşegeni ve civarında yerleşmiş şablon katsayılarından oluşan seyrek matrislerdir.



Şekil 2.7 $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrislerinin genel yapısı

$M = N$ için $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrislerinin sıfırdan farklı elemanlarının oluşturduğu bandın genişliği

$$\omega = 2q + 1 \quad (2.22)$$

olur ve farklı paketleme şemaları için q değerleri de

$$\begin{aligned} q &= N + 1 && \text{satır satır} \\ q &= 2N - 2 && \text{köşegensel} \\ q &= 2N - 1 && \text{sütun sütun} \end{aligned} \quad (2.23)$$

şeklindedir. Örneğin $M = N = 1000$ için $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrislerinin boyutları $(M \times N) \times (M \times N) = 10^6 \times 10^6$, satır satır paketleme için $q = 1001$ ve $\omega = 2003$ olur. Yani 10^6 elemanlı bir satırda sıfırdan farklı 2003 eleman bulunur bu da satırın % 0.2'si sıfırdan farklı demektir. Bu örnekten de anlaşılacağı gibi $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrisleri çok seyrek matrislerdir.

2.2 HSA İle Lineer Görüntü İşleme

HSA ile Lineer görüntü işleme için önce A geribesleme şablonunu sıfır kabul edelim. Bu tip HSA sıfır geribeslemeli HSA veya ileri beslemeli HSA olarak adlandırılır. r -komşuluklu, sıfır geribeslemeli bir HSA için durum denklemi

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r b_{k,l} u_{i+k,j+l} \quad (2.24)$$

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=r}^{-r} \sum_{l=r}^{-r} b_{-k,-l} u_{i-k,j-l} \quad (2.25)$$

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=r}^{-r} \sum_{l=r}^{-r} h_{k,l} u_{i-k,j-l} \quad (2.26)$$

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r h_{k,l} u_{i-k,j-l} \quad (2.27)$$

olur. $h_{k,l} \triangleq b_{-k,-l}$ eleman değerlerinden oluşan matrisi H olarak adlandıralım. Bu durumda H matrisi B matrisinin $b_{0,0}$ merkez elemanı etrafında 180 derece döndürülmüştür. 1-komşuluklu HSA için H ve B matrisleri aşağıdaki gibidir.

$$B = \begin{bmatrix} b_{-1,-1} & b_{-1,0} & b_{-1,1} \\ b_{0,-1} & b_{0,0} & b_{0,1} \\ b_{1,-1} & b_{1,0} & b_{1,1} \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,0} & b_{1,-1} \\ b_{0,1} & b_{0,0} & b_{0,-1} \\ b_{-1,1} & b_{-1,0} & b_{-1,-1} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$B = H$ ise B matrisi simetriktir.

(2.27) denkleminin sağ tarafındaki toplam sembolleri içindeki işlem işaret işlemede kullanılan standart bir nümerik operasyon olan impuls yanıtı matrisi H ile giriş matrisi $U_{i,j}$ 'nin konvolüsyonu işlemidir ve $*$ işareti ile gösterilir.

$$H * U_{i,j} \triangleq \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r h_{k,l} u_{i-k,j-l} \quad (2.29)$$

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + H * U_{i,j} \quad (2.30)$$

(2.30) diferansiyel denkleminin çözümü

$$x_{i,j}(t) = x_{i,j}(0)e^{-t} + (H * U_{i,j})(1 - e^{-t}), \quad t \geq 0 \quad (2.31)$$

şeklindedir. $t \rightarrow \infty$ için

$$x_{i,j}(\infty) \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} x_{i,j}(t) = H * U_{i,j} \quad (2.32)$$

olur. Her sıfır geribeslemeli HSA kararlıdır. Herhangi bir $x_{i,j}(0)$ ilk koşulu için (2.30) denklemindeki $x_{i,j}(t)$ durumu $t \rightarrow \infty$ için H ile $U_{i,j}$ 'nin konvolüsyonu olan sabit bir değere yakınsar. Dolayısıyla diferansiyel denklemin çözümü başlangıç koşulundan bağımsızdır.

Uzaysal konvolüsyon işleminin frekans düzlemindeki özelliklerine kısaca göz atalım. Bunun için ayrık uzaydaki değişkenlerimizi $f_{i,j}(t)$ yerine $f_t(n_1, n_2)$ şeklinde gösterelim. Burada n_1 ve n_2 ayrık uzay değişkenlerini ifade etmektedir. n_1 ve n_2 'ye karşı düşen sürekli frekans düzlemi değişkenlerini de ω_x ve ω_y ile ve $f_t(n_1, n_2)$ 'nin Ayrık Uzay Fourier Dönüşümünü (AUFD) $\tilde{F}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$ ile gösterelim. Ayrık Uzay Fourier Dönüşümü çifti aşağıda verilmektedir.

$$\begin{aligned}\tilde{F}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} f_t(n_1, n_2) e^{-j\omega_x n_1} e^{-j\omega_y n_2} \\ f_t(n_1, n_2) &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tilde{F}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) e^{j\omega_x n_1} e^{j\omega_y n_2} d\omega_x d\omega_y\end{aligned}\quad (2.33)$$

Uzaysal düzlemde konvolüsyon frekans düzleminde çarpmaya karşı düşmektedir.

(2.30) denkleminin ayrık uzay Fourier dönüşümü (AUFĐ) alınır

$$\frac{d}{dt} \tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = -\tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) + \tilde{H}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \quad (2.34)$$

(2.34) diferansiyel denkleminin çözümü

$$\tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{X}_0(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) e^{-t} + \tilde{H}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) (1 - e^{-t}), \quad t \geq 0 \quad (2.35)$$

şeklindedir. $t \rightarrow \infty$ için

$$\tilde{X}_\infty(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{H}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \quad (2.36)$$

Simetrik B şablonu için $\tilde{H}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$ olduğundan

$$\tilde{X}_\infty(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \quad (2.37)$$

elde edilir. (2.37) denkleminde görüldüğü gibi sıfır geribeslemeli HSA ile lineer görüntü işleme uzaysal FIR filtrelemeye karşı düşer. HSA ile görüntü işlemede yalnızca B şablonu değil, A şablonu da kullanılırsa uzaysal IIR filtreleme gerçekleştirilir. Şimdi de bu durumu inceleyelim:

$z = 0$ olan bir lineer HSA durum denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r a_{k,l} x_{i+k,j+l} + \sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r b_{k,l} u_{i+k,j+l} \quad (2.38)$$

Ayrık uzay değişkenleri için n_1 ve n_2 kullanarak HSA denklemi konvolüsyonlarla ifade edilir

$$\frac{d}{dt} x_t(n_1, n_2) = \alpha(n_1, n_2) * x_t(n_1, n_2) + \beta(n_1, n_2) * u_t(n_1, n_2) \quad (2.39)$$

bulunur. Burada

$$\alpha(n_1, n_2) = \begin{cases} a_{0,0} - 1, & n_1 = 0, n_2 = 0 \\ a_{-n_1, -n_2}, & |n_1| \leq r, |n_2| \leq r \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad \beta(n_1, n_2) = \begin{cases} b_{-n_1, -n_2}, & |n_1| \leq r, |n_2| \leq r \\ 0, & \text{diğer} \end{cases} \quad (2.40)$$

şeklindedir. A şablonu simetrikse matrisin ortasındaki değer hariç her $\alpha(n_1, n_2) = a_{n_1, n_2}$ olur, (2.38) denkleminin sağ tarafındaki ilk terim de matrisin içine katıldığından $\alpha(0, 0) = a_{0,0} - 1$ olmalıdır. B şablonu simetrikse tüm şablon değerleri için $\beta(n_1, n_2) = b_{n_1, n_2}$ 'dir.

(2.38) denkleminde bir (i, j) hücrenin durumunun türevi yalnızca (i, j) hücrenin durumuna değil, komşu durum değişkenlerine de bağlıdır. Bu durumda elde edilen $M \times N$ diferansiyel denklem birbiriyle kuplajlıdır ve bir hücrenin durumunun değişimine komşu hücrenin durumunun etkisini analiz etmek neredeyse imkansızdır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için (2.39) denkleminin AUFD'sini alalım.

$$\frac{d}{dt} \tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) + \tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \quad (2.41)$$

Böylece her ω_x ve ω_y için elde edilen HSA diferansiyel denklemi frekansta kuplajsız hale gelir. Ayrıca $\tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$, $\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$, $\tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$ ve $\tilde{U}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$ ω_x ve ω_y 'ye göre 2π ile periyodiktir. Dolayısıyla $\tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$ 'nin $-\pi \leq \omega_x \leq \pi$ ve $-\pi \leq \omega_y \leq \pi$ aralığında çözümünü bulmak yeterlidir.

Giriş görüntüsünün zamanla değişmediğini kabul edelim, yani $\tilde{U}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})$ olsun. (2.41) lineer diferansiyel denkleminin çözümü $\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \neq 0$ için

$$\begin{aligned} \tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) &= e^{\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})t} \tilde{X}_0(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \\ &+ \frac{1}{\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})} \left(e^{\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})t} - 1 \right) \tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \end{aligned} \quad (2.42)$$

olur, $\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = 0$ için ise

$$\tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \tilde{X}_0(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) + t \tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \quad (2.43)$$

olarak bulunur. $\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) < 0$ özel durumu için $e^{\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})t} \rightarrow 0$ olacağından

$$\tilde{X}_\infty(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \triangleq \lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{X}_t(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = - \left[\frac{\tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})}{\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})} \right] \tilde{U}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \quad (2.44)$$

elde edilir. Lineer HSA filtresinin transfer fonksiyonu da

$$\tilde{H}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = - \frac{\tilde{B}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})}{\tilde{A}(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})} = - \frac{\sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r \beta(k, l) e^{-j\omega_x k} e^{-j\omega_y l}}{\sum_{k=-r}^r \sum_{l=-r}^r \alpha(k, l) e^{-j\omega_x k} e^{-j\omega_y l}} \quad (2.45)$$

olur.

2.3 Sonuçlar

Bu bölümde hücrel sinir ağları genel hatlarıyla incelenmiştir. Hücrel sinir ağlarında yapay sinir ağlarından farklı olarak hücreler arası bağlantılar yerel olup bu özellik HSA'nın VLSI gerçekleştirmesini olanaklı kılmaktadır. Buna ek olarak konumdan bağımsız HSA'da her bir hücrenin komşu hücreleriyle bağlantı ağırlıkları aynıdır. Bu nedenle tüm ağın devre serimi için tek bir hücrenin tasarımının yapılması ve aynı yapının her hücre için tekrarlanması yeterli olacaktır. Böylece devre tasarımı ve ölçeklenmesi kolaylaşmaktadır.

Görüntü işleme uygulamalarında yapılan işlem genellikle (HSA'da olduğu gibi) görüntü pikselinin konumuna göre değişmediği için HSA topolojisi görüntü işleme uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca görüntünün her bir pikseli HSA'daki bir hücreye birebir karşı düşmektedir ve bu yoğun paralel yapı dijital bilgisayarlarla karşılaştırıldığında bir hız avantajı sunmaktadır.

Yalnız B şablonu kullanarak HSA ile yapılan lineer görüntü işleme uzaysal FIR filtrelemeye karşı düşerken, A ve B şablonları ile yapılan lineer görüntü işleme uzaysal IIR filtrelemeye karşı düşmektedir. IIR filtreleme ile nispeten küçük şablon boyutları ile bile keskin filtre karakteristikleri elde etmek mümkündür.

3. SÜREKLİ-UZAY VE UZAY-ZAMAN FİLTRELERİ

Bu bölümde ikinci dereceden sürekli-uzay filtreleri ile sürekli-uzay-zaman filtreleri incelenecektir. Bölüm 4 ve Bölüm 5’de incelenecek olan uzaysal ve uzay-zamansal HSA filtreleri bu bölümdeki sürekli-uzay ve uzay-zaman filtrelerinin uzayda ayrıklaştırılmasıyla elde edilmektedir. Bu bölümde iki boyutlu sürekli-uzay ve üç boyutlu sürekli-uzay-zaman filtrelerinin transfer fonksiyonları ve diferansiyel denklemleri ayrıntılı olarak verilecektir.

İki boyutlu ikinci dereceden sürekli-uzay filtreleri bir boyutlu ikinci dereceden genel zamansal analog filtre transfer fonksiyonlarından esinlenerek oluşturulmuştur. Bu bölümde önce bir boyutlu analog filtrelere kısaca değinilecek, daha sonra bu filtre transfer fonksiyonlarından yola çıkarak sürekli-uzay filtreleri incelenecektir. Ardından sürekli-uzay filtrelerinin diferansiyel denklemlerine zaman değişkeninin de eklenmesiyle sürekli-uzay-zaman filtreleri elde edilecektir.

Ek 2’de ayrıntıları verilen sabit hızla hareket modelinde sabit hızın uzay-zaman düzleminde bir yön olarak yorumlanabileceği kabul edilmektedir. Dolayısıyla uzay-zaman düzleminde yönlü filtreler aynı zamanda hız algılayıcı filtreler olarak düşünülebilir. Gabor filtreleri de yön seçici özelliktedir ve bu amaçla kullanılabilir. Gabor filtrelerinin impuls ve frekans yanıtları da bu bölümde incelenecektir.

3.1 1-Boyutlu Analog Filtreler

İkinci dereceden bir boyutlu bir sistemin genel transfer fonksiyonu

$$H(s) = \frac{b_0 s^2 + b_1 s + b_2}{a_0 s^2 + a_1 s + a_2} \quad \text{Equation Section (Next)(3.1)}$$

olarak verilir. Bu genel transfer fonksiyonunda a_k ve b_k katsayıları uygun seçilerek çeşitli filtre yapılarını elde etmek mümkündür. İkinci dereceden bir analog alçak geçiren filtrenin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$H_{AG}(s) = \frac{\Omega_0^2}{s^2 + \frac{\Omega_0}{Q}s + \Omega_0^2} \quad (3.2)$$

Burada Ω_0 filtrenin kesim frekansı, Q ise kalite faktörü olarak adlandırılır. İkinci dereceden bir boyutlu yüksek geçiren, bant geçiren, bant söndüren ve tüm geçiren filtrelerin transfer

fonksiyonları ise sırasıyla aşağıdaki gibidir. Tüm bu ikinci dereceden analog filtre ifadelerinde genlik normalizasyonu yapılmıştır.

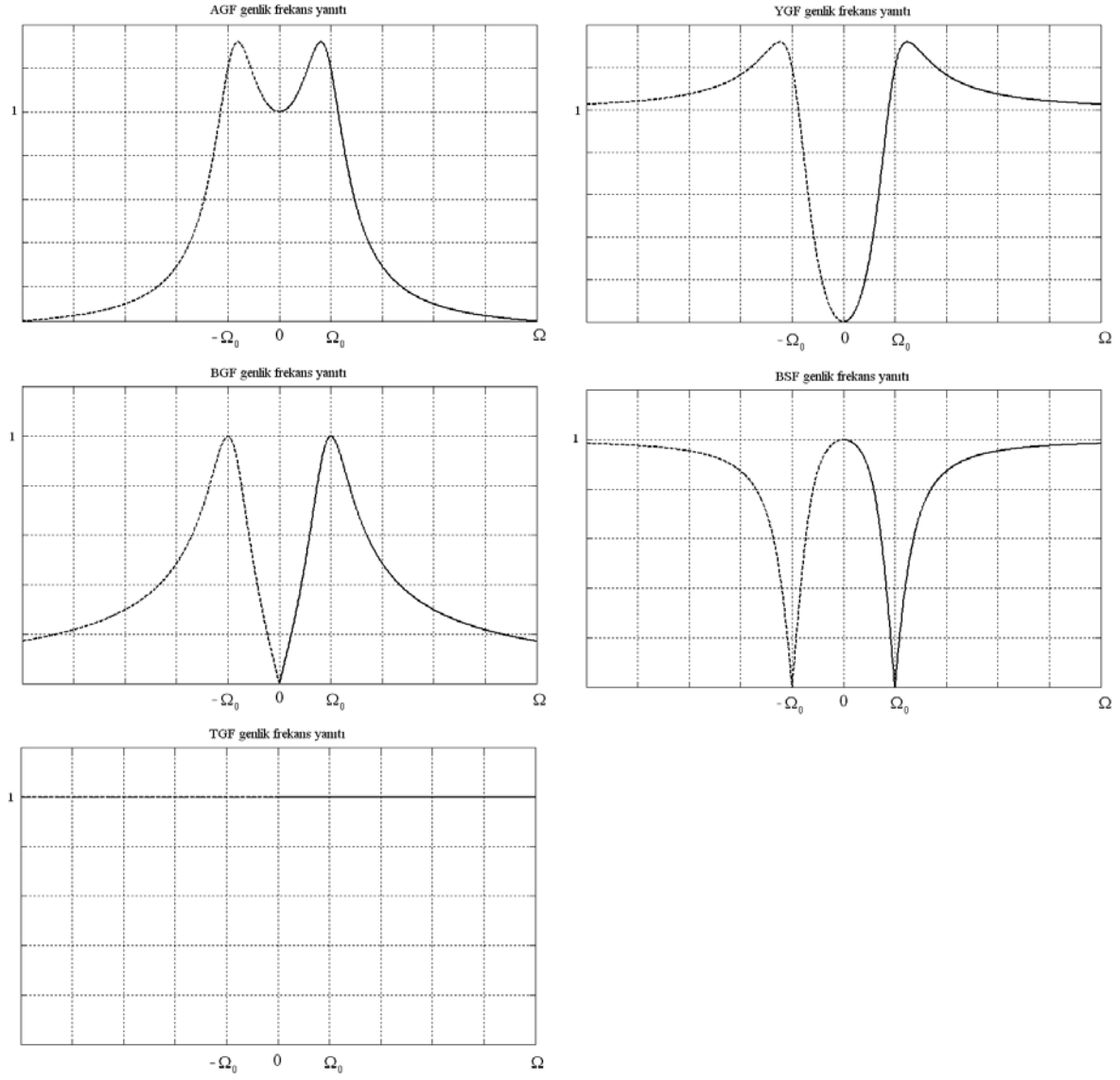
$$H_{YG}(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\Omega_0}{Q}s + \Omega_0^2} \quad (3.3)$$

$$H_{BG}(s) = \frac{\frac{\Omega_0}{Q}s}{s^2 + \frac{\Omega_0}{Q}s + \Omega_0^2} \quad (3.4)$$

$$H_{BS}(s) = \frac{s^2 + \Omega_0^2}{s^2 + \frac{\Omega_0}{Q}s + \Omega_0^2} \quad (3.5)$$

$$H_{TG}(s) = \frac{s^2 - \frac{\Omega_0}{Q}s + \Omega_0^2}{s^2 + \frac{\Omega_0}{Q}s + \Omega_0^2} \quad (3.6)$$

Bu filtrelerin genlik frekans yanıtları Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 İkinci dereceden AGF, YGF, BGF, BSF ve TGF genlik frekans yanıtları

3.2 Sürekli-Uzay Filtreleri (SUF)

Yukarıda verilen filtre transfer fonksiyonları zamandadır ve bir boyutludur. Bu transfer fonksiyonlarından hareketle iki boyutu uzaysal filtre transfer fonksiyonlarını elde etmek için $s = j\Omega_t$ yerine $s_x = j\Omega_x$ ve $s_y = j\Omega_y$ olmak üzere uzaysal Laplace değişkenleri alalım. Bu durumda iki boyutlu uzaysal bir sistemin genel transfer fonksiyonu

$$H(s_x, s_y) = \frac{b_{0x}s_x^2 + b_{0y}s_y^2 + b_{1x}s_x + b_{1y}s_y + b_{2x} + b_{2y}}{a_{0x}s_x^2 + a_{0y}s_y^2 + a_{1x}s_x + a_{1y}s_y + a_{2x} + a_{2y}} \quad (3.7)$$

olarak bulunur. Şimdi bu ana yapıdan yola çıkarak alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren

ve bant söndüren sürekli-uzay filtrelerini teker teker elde edelim.

3.2.1 Alçak Geçiren Sürekli-Uzay Filtresi

Bir boyutlu AGF transfer fonksiyonu (3.2)'den, iki boyutlu alçak geçiren sürekli-uzay filtresi elde etmek için iki boyutlu genel transfer fonksiyonunun payında sabit terim olması gerektiği görülmektedir. AGF transfer fonksiyonunu

$$H(s_x, s_y) = \frac{V(s_x, s_y)}{U(s_x, s_y)} = \frac{1}{1 - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2)} = \frac{-\frac{1}{\gamma^2}}{s_x^2 + s_y^2 - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3.8)$$

olarak alalım. Bu durumda filtre katsayıları

$$\begin{aligned} b_{0x} = b_{0y} = b_{1x} = b_{1y} = 0, \quad b_{2x} + b_{2y} &= -\frac{1}{\gamma^2} \\ a_{0x} = a_{0y} = 1, \quad a_{1x} = a_{1y} = 0, \quad a_{2x} + a_{2y} &= -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Filtrenin genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y) \right| = \left| \frac{1}{1 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \right| = \frac{1}{1 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \quad (3.10)$$

olur. $\Omega_x^2 + \Omega_y^2 = \frac{1}{\gamma^2}$ filtrenin kesim frekansını verir. Dolayısıyla bu filtrenin geçirme bandı

daireseldir. Filtre dairesel simetrik alçak geçiren sürekli-uzay filtresi olarak adlandırılır. İki farklı γ değeri için elde edilen genlik frekans yanıtları Şekil 3.2'de görülmektedir.

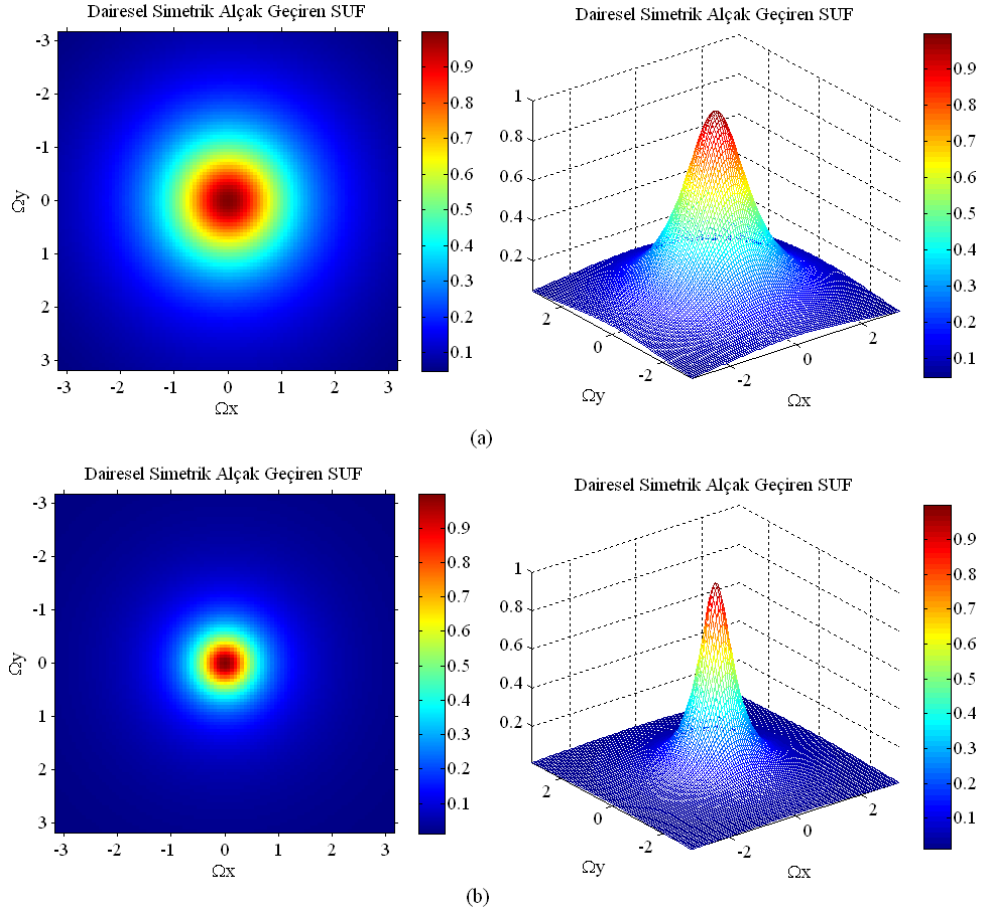
$v(x, y)$ ve $u(x, y)$ sırasıyla filtrenin iki boyutlu uzaysal çıkış ve giriş değişkenlerini göstermek üzere dairesel simetrik alçak geçiren sürekli-uzay filtresinin diferansiyel denklemi de

$$v(x, y) - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} \right) = u(x, y) \quad (3.11)$$

olarak bulunur. $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)$ uzaysal Laplasien olarak alınırsa diferansiyel denklem

$$v(x, y) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = u(x, y) \quad (3.12)$$

haline gelir.



Şekil 3.2 (a) $\gamma = 1$ (b) $\gamma = 2$ için dairesel simetrik alçak geçiren sürekli-uzay filtresi genlik frekans yanıtları

Dairesel simetrik AGF transfer fonksiyonunun paydasına birinci dereceden terimlerin eklenmesiyle yönlü alçak geçiren sürekli-uzay filtresi elde edilir. Yönlü alçak geçiren SUF'nin transfer fonksiyonu ise

$$H(s_x, s_y) = \frac{V(s_x, s_y)}{U(s_x, s_y)} = \frac{1}{1 + \alpha s_x + \beta s_y - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2)} = \frac{-\frac{1}{\gamma^2}}{(s_x^2 + s_y^2) - \frac{\alpha}{\gamma^2} s_x - \frac{\beta}{\gamma^2} s_y - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3.13)$$

şeklindedir. Filtre katsayıları

$$\begin{aligned}
 b_{0x} = b_{0y} = b_{1x} = b_{1y} = 0, \quad b_{2x} + b_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \\
 a_{0x} = a_{0y} = 1, \quad a_{1x} = -\frac{\alpha}{\gamma^2}, \quad a_{1y} = -\frac{\beta}{\gamma^2}, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2}
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

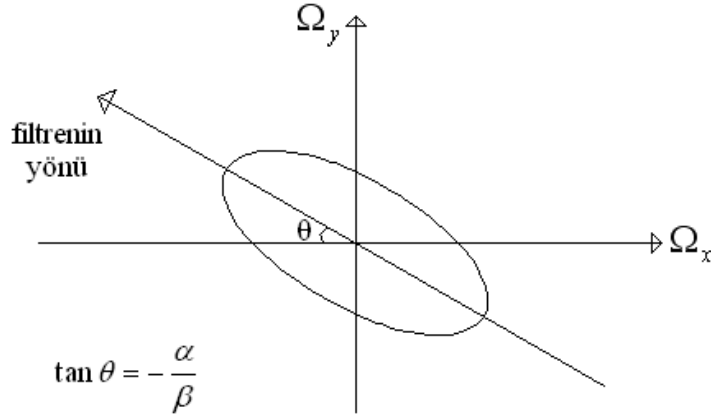
olmalıdır. Bu filtrenin genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y) \right| = \left| \frac{1}{1 + j(\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y) + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \right| = \frac{1}{\sqrt{[1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)]^2 + (\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y)^2}} \tag{3.15}$$

olarak bulunur. $\Omega_x^2 + \Omega_y^2 = \text{sabit}$ eğrisi üzerinde giderken $\frac{1}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} = \text{sabit}$ olur.

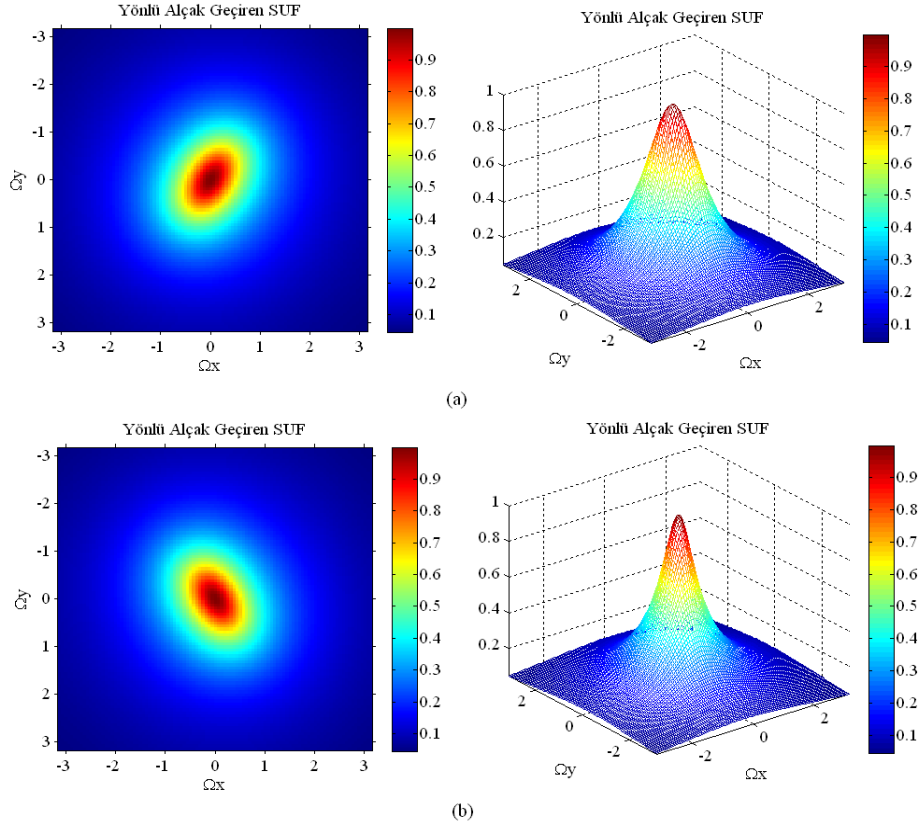
(3.15) ifadesi ise $\alpha\Omega_x = -\beta\Omega_y$ için, yani $\frac{\Omega_y}{\Omega_x} = -\frac{\alpha}{\beta}$ doğrusu üzerinde maksimum olur (Şekil

3.3)



Şekil 3.3 Yönlü SUF genlik frekans yanıtının yönü

İki farklı α, β değeri için elde edilen yönlü alçak geçiren SUF genlik frekans yanıtları Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 (a) $\gamma=1$, $\alpha=\sqrt{3}$, $\beta=1$ $\left(\theta=\frac{\pi}{3}\right)$ ve (b) $\gamma=1$, $\alpha=-\sqrt{3}$, $\beta=1$ $\left(\theta=-\frac{\pi}{3}\right)$ için yönlü alçak geçiren SUF genlik frekans yanıtları

Yönlü alçak geçiren SUF'nin diferansiyel denklemi ise

$$v(x,y) + \alpha \frac{\partial v(x,y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x,y)}{\partial y} - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 v(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x,y)}{\partial y^2} \right) = u(x,y) \quad (3.16)$$

$$v(x,y) + \alpha \frac{\partial v(x,y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x,y)}{\partial y} - \gamma^2 \nabla^2 v(x,y) = u(x,y) \quad (3.17)$$

olarak bulunur. Dairesel simetrik alçak geçiren SUF'nin diferansiyel denklemine uzaysal birinci türevlerin eklenmesiyle yönlü AGF elde edilmiştir.

3.2.2 Yüksek Geçiren Sürekli-Uzay Filtresi

Bir boyutlu yüksek geçiren filtre transfer fonksiyonundan hareketle iki boyutlu genel filtre yapısında payda yalnız s^2 'li terim bırakılarak yüksek geçiren sürekli-uzay filtresi elde edilir.

Transfer fonksiyonunu

$$H(s_x, s_y) = \frac{V(s_x, s_y)}{U(s_x, s_y)} = \frac{-(s_x^2 + s_y^2)}{1 - \gamma^2(s_x^2 + s_y^2)} = \frac{\frac{1}{\gamma^2}(s_x^2 + s_y^2)}{s_x^2 + s_y^2 - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3.18)$$

olarak alalım. Filtre katsayıları

$$\begin{aligned} b_{0x} = b_{0y} &= \frac{1}{\gamma^2}, \quad b_{1x} = b_{1y} = b_{2x} = b_{2y} = 0 \\ a_{0x} = a_{0y} &= 1, \quad a_{1x} = a_{1y} = 0, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.19)$$

olur. Filtrenin genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y) \right| = \left| \frac{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \right| = \frac{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \quad (3.20)$$

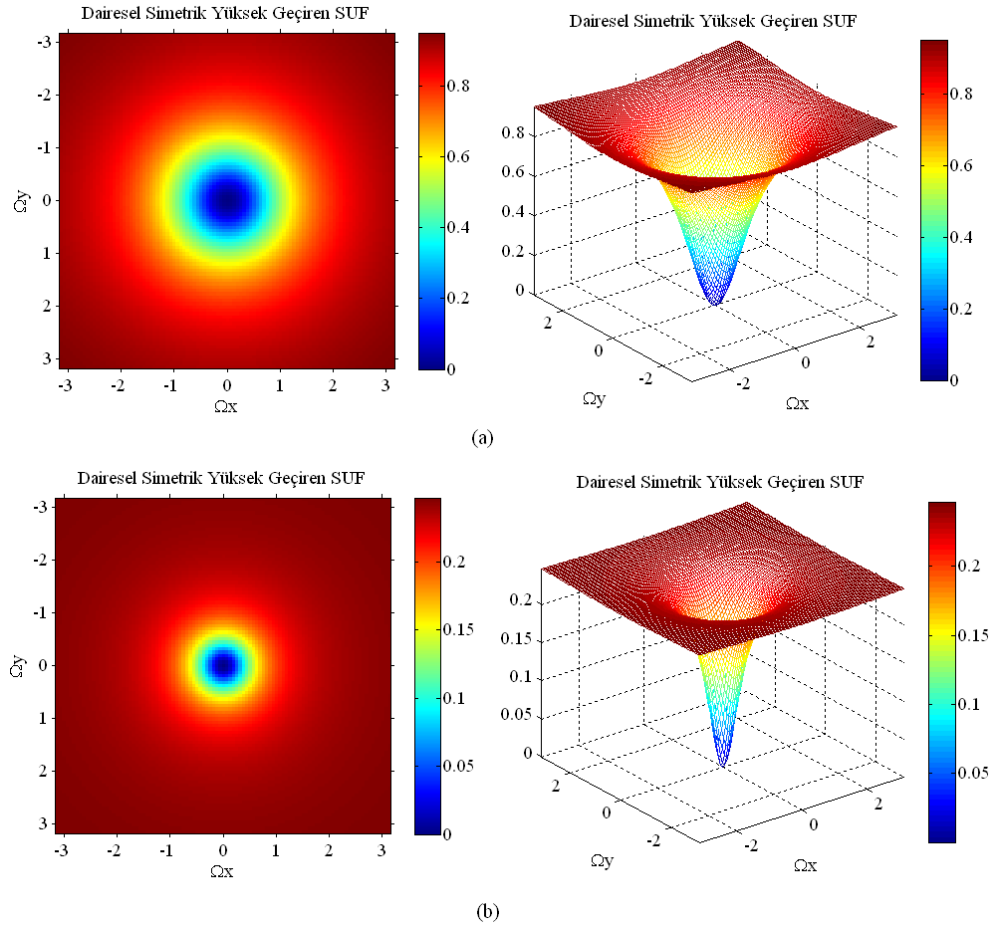
bulunur. Burada γ değeri filtrenin uzaysal bant genişliğini gösterir. İki farklı γ değeri için elde edilen genlik frekans yanıtları Şekil 3.5’de görülmektedir.

Filtrenin diferansiyel denklemi ise

$$v(x, y) - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} \right) = - \left(\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad (3.21)$$

$$v(x, y) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = -\nabla^2 u(x, y) \quad (3.22)$$

şeklindedir. Bu diferansiyel denklemde dairesel simetrik AGF diferansiyel denkleminde farklı olarak girişin uzaysal Laplasienini bulunmaktadır.



Şekil 3.5 (a) $\gamma = 1$ (b) $\gamma = 2$ için dairesel simetrik yüksek geçiren sürekli-uzay filtresi genlik frekans yanıtları

Alçak geçiren filtre yapısında olduğu gibi bu filtrenin de transfer fonksiyonunun paydasına birinci dereceden terimleri ekleyerek yönlü yüksek geçiren sürekli-uzay filtresi elde edilebilir:

$$H(s_x, s_y) = \frac{-(s_x^2 + s_y^2)}{1 + \alpha s_x + \beta s_y - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2)} = \frac{\frac{1}{\gamma^2} (s_x^2 + s_y^2)}{(s_x^2 + s_y^2) - \frac{\alpha}{\gamma^2} s_x + \frac{\beta}{\gamma^2} s_y - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3.23)$$

Bu filtrenin katsayıları da

$$\begin{aligned} b_{0x} = b_{0y} &= \frac{1}{\gamma^2}, \quad b_{1x} = b_{1y} = b_{2x} = b_{2y} = 0 \\ a_{0x} = a_{0y} &= 1, \quad a_{1x} = -\frac{\alpha}{\gamma^2}, \quad a_{1y} = -\frac{\beta}{\gamma^2}, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.24)$$

olarak bulunur. Yönlü yüksek geçiren SUF'nin genlik frekans yanıtı

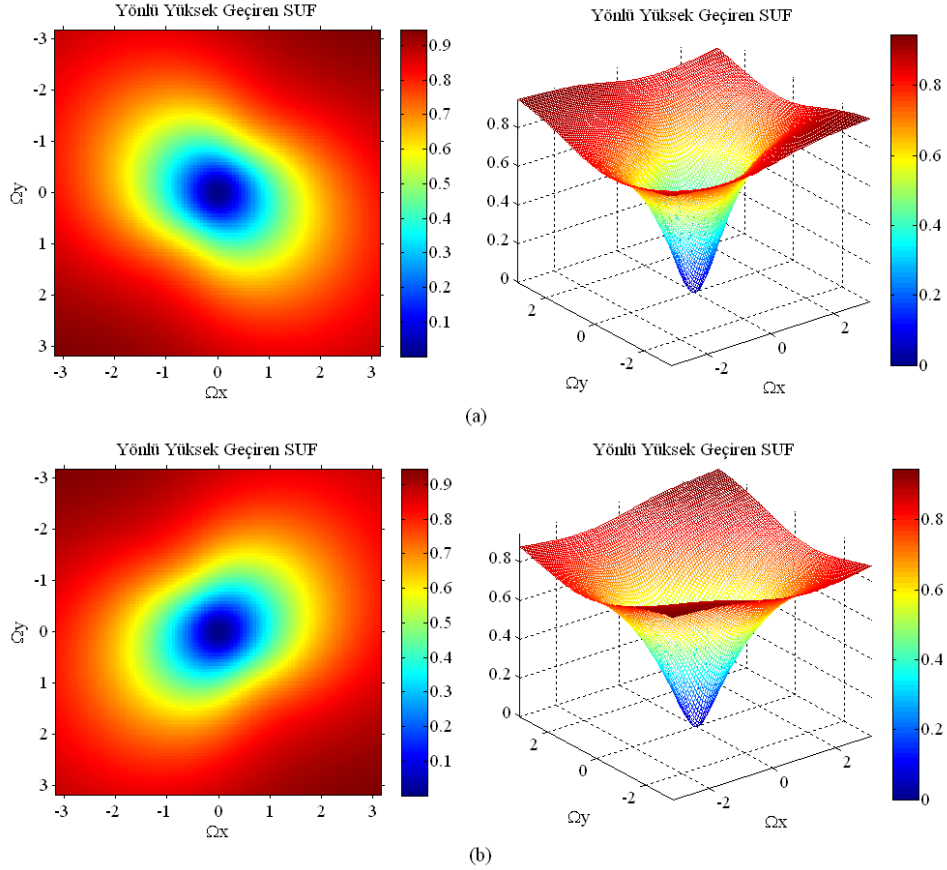
$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y) \right| = \left| \frac{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}{1 + j(\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y) + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \right| = \frac{\Omega_x^2 + \Omega_y^2}{\sqrt{\left[1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)\right]^2 + (\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y)^2}}$$

olur. İki farklı α, β, γ değeri için elde edilen genlik frekans yanıtları Şekil 3.6'da verilmektedir. Bu filtrenin diferansiyel denklemi ise

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} \right) = - \left(\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad (3.25)$$

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = - \nabla^2 u(x, y) \quad (3.26)$$

olarak bulunur.



Şekil 3.6 (a) $\gamma = 1$, $\alpha = \sqrt{3}$, $\beta = 1$ $\left(\theta = \frac{\pi}{3} \right)$ ve (b) $\gamma = 1$, $\alpha = -\sqrt{3}$, $\beta = 1$ $\left(\theta = -\frac{\pi}{3} \right)$ için yönlü yüksek geçiren SUF genlik frekans yanıtları

3.2.3 Bant Geçiren Sürekli-uzay Filtresi

Bat geçiren sürekli-uzay filtresinin payında birinci dereceden terimler bulunmalıdır. Bant geçiren SUF'nin transfer fonksiyonunu

$$H(s_x, s_y) = \frac{\mu s_x + \nu s_y}{1 + \alpha s_x + \beta s_y - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2)} = \frac{-\frac{\mu}{\gamma^2} s_x - \frac{\nu}{\gamma^2} s_y}{(s_x^2 + s_y^2) - \frac{\alpha}{\gamma^2} s_x - \frac{\beta}{\gamma^2} s_y - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3.27)$$

olarak alalım. Bu durumda filtre katsayıları

$$\begin{aligned} b_{1x} &= \frac{\mu}{\gamma^2}, \quad b_{1y} = \frac{\nu}{\gamma^2}, \quad b_{0x} = b_{0y} = b_{2x} = b_{2y} = 0 \\ a_{0x} &= a_{0y} = 1, \quad a_{1x} = -\frac{\alpha}{\gamma^2}, \quad a_{1y} = -\frac{\beta}{\gamma^2}, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.28)$$

elde edilir. Bant geçiren SUF'nin frekans yanıtı ise

$$H(j\Omega_x, j\Omega_y) = \frac{j(\mu\Omega_x + \nu\Omega_y)}{1 + j(\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y) + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \quad (3.29)$$

olur. Filtrenin genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y) \right| = \frac{(\mu\Omega_x + \nu\Omega_y)}{\sqrt{[1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2)]^2 + (\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y)^2}} \quad (3.30)$$

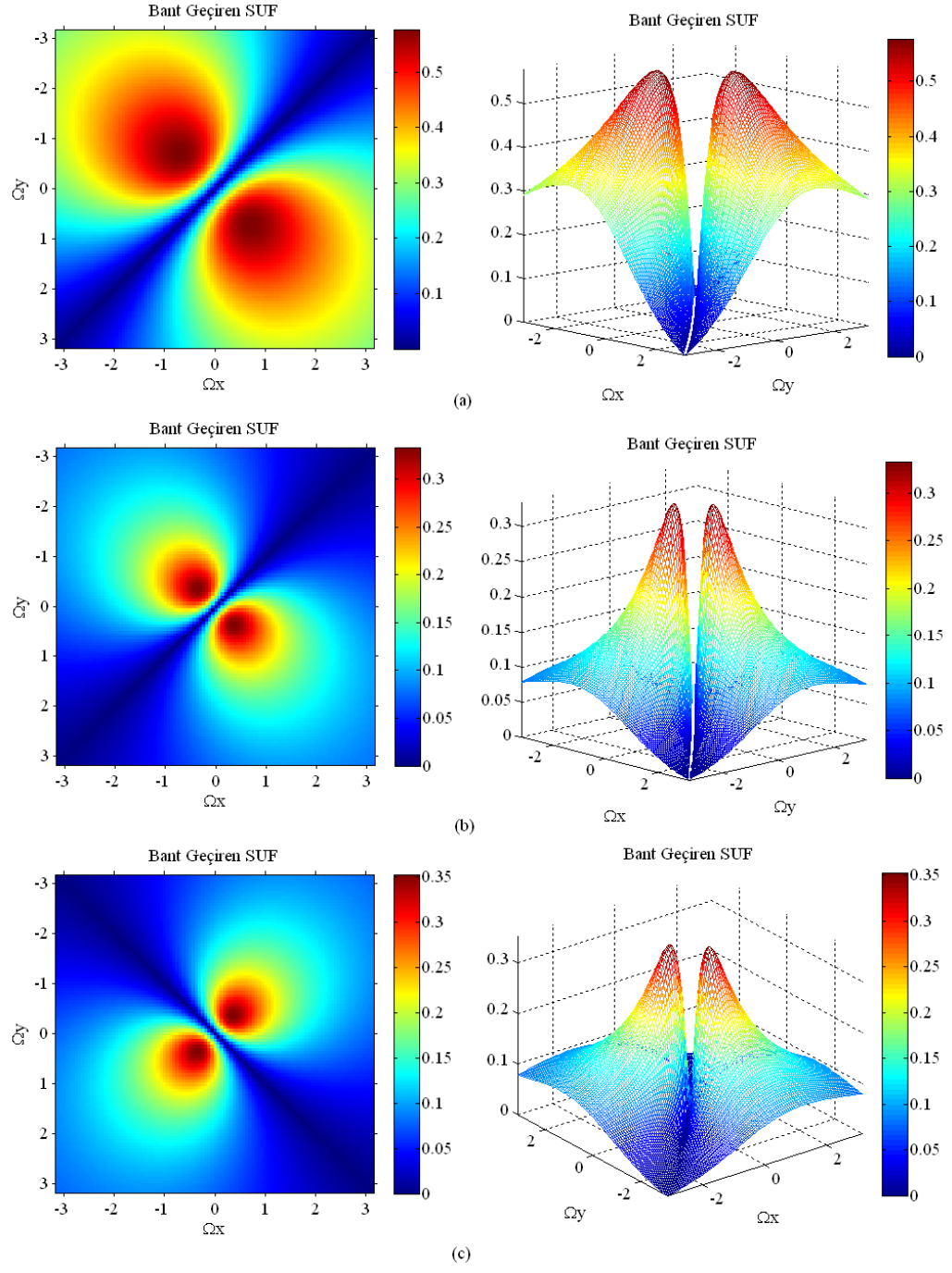
olarak bulunur. Çeşitli katsayı değerleri için elde edilen genlik frekans yanıtları Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi bant geçiren SUF'nin merkez frekansı μ ve ν değerleri ile ayarlanmaktadır.

Filtrenin diferansiyel denklemi de

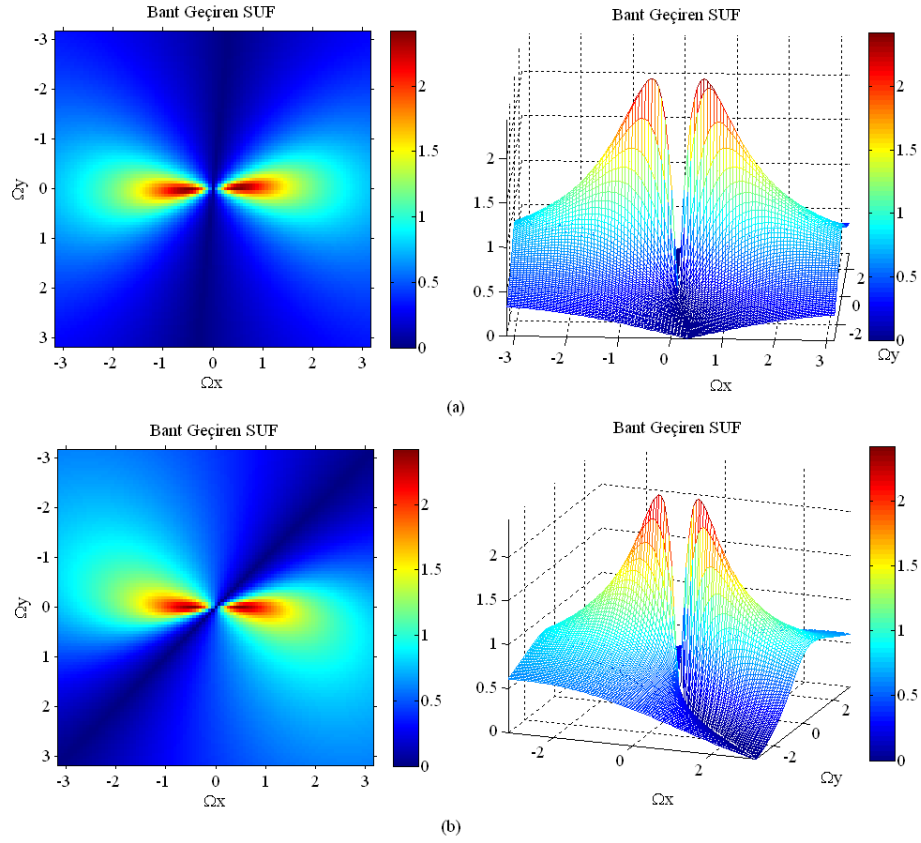
$$\nu(x, y) + \alpha \frac{\partial \nu(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial \nu(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 \nu(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \nu(x, y)}{\partial y^2} \right) = \mu \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \nu \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \quad (3.31)$$

$$\nu(x, y) + \alpha \frac{\partial \nu(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial \nu(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \nabla^2 \nu(x, y) = \mu \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \nu \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \quad (3.32)$$

olarak bulunur.



Şekil 3.7 (a) $\gamma=1, \alpha=1, \beta=1, \mu=1, \nu=1$, (b) $\gamma=2, \alpha=1, \beta=1, \mu=1, \nu=1$, (c) $\gamma=2, \alpha=1, \beta=1, \mu=-1, \nu=1$ için bant geçiren SUF genlik frekans yanıtları



Şekil 3.8 (a) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 20, \mu = 10, \nu = 1$, (b) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 20, \mu = 10, \nu = 10$ için bant geçiren SUF genlik frekans yanıtları

3.2.4 Bant Söndüren Sürekli-uzay Filtresi

Bant söndüren sürekli-uzay filtresinin payında ise ikinci dereceden ve sabit terimler bulunmalıdır. Bant söndüren SUF'nin transfer fonksiyonunu

$$H(s_x, s_y) = \frac{\eta^2 - (s_x^2 + s_y^2)}{1 + \alpha s_x + \beta s_y - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2)} = \frac{\frac{1}{\gamma^2} (s_x^2 + s_y^2) - \frac{\eta^2}{\gamma^2}}{(s_x^2 + s_y^2) - \frac{\alpha}{\gamma^2} s_x - \frac{\beta}{\gamma^2} s_y - \frac{1}{\gamma^2}} \quad (3.33)$$

olarak alalım. Bant söndüren SUF'nin filtre katsayıları

$$\begin{aligned} b_{0x} = b_{0y} = \frac{1}{\gamma^2}, \quad b_{1x} = b_{1y} = 0, \quad b_{2x} + b_{2y} = -\frac{\eta^2}{\gamma^2} \\ a_{0x} = a_{0y} = 1, \quad a_{1x} = -\frac{\alpha}{\gamma^2}, \quad a_{1y} = -\frac{\beta}{\gamma^2}, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.34)$$

elde edilir. Bant geçiren SUF'nin frekans yanıtı ise

$$H(j\Omega_x, j\Omega_y) = \frac{\eta^2 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)}{1 + j(\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y) + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)} \quad (3.35)$$

olur. Filtrenin genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y) \right| = \frac{\eta^2 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2)}{\sqrt{\left[1 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right]^2 + (\alpha\Omega_x + \beta\Omega_y)^2}} \quad (3.36)$$

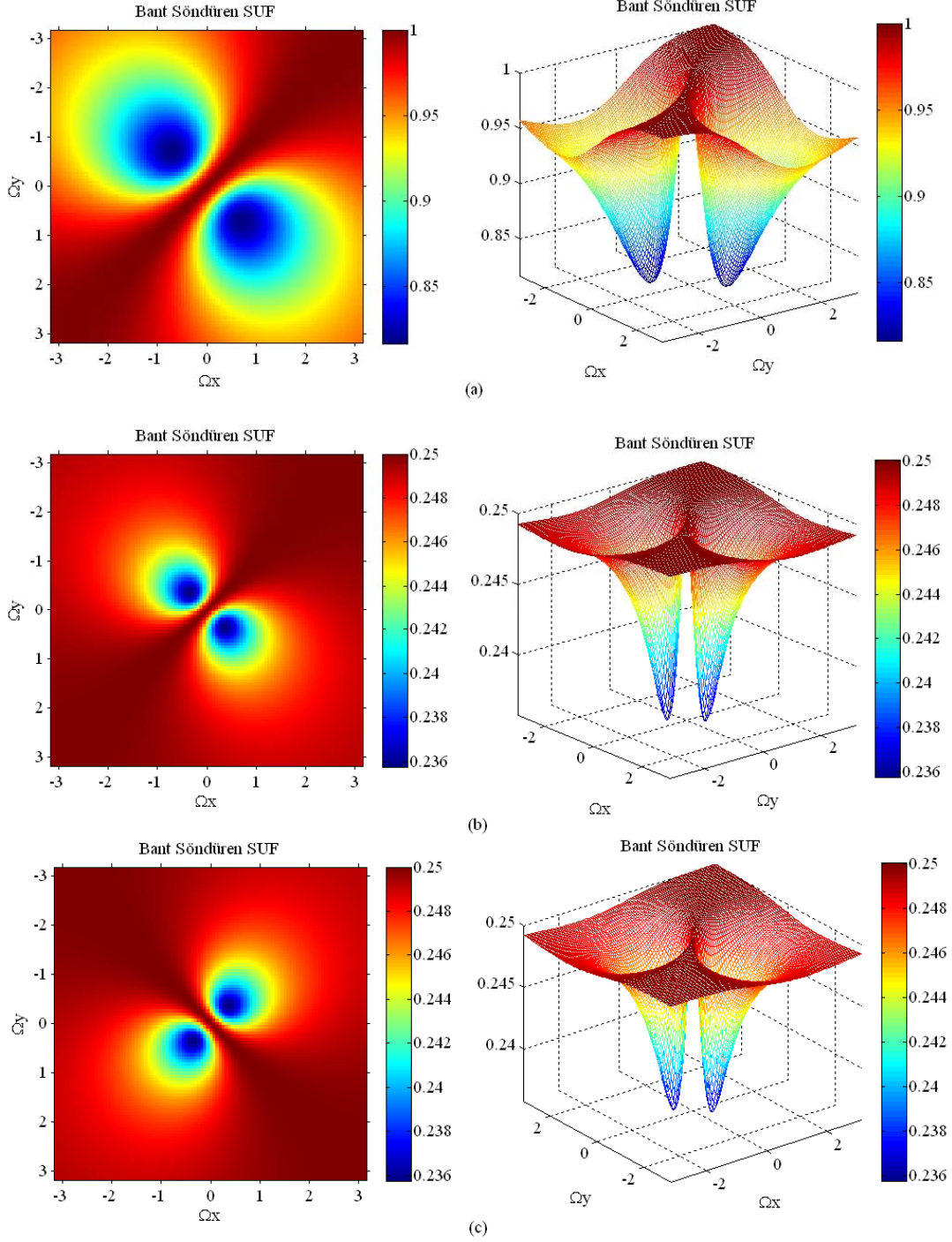
olarak bulunur. Bu filtrenin çeşitli katsayılar için elde edilen genlik frekans yanıtı da Şekil 3.9'da verilmektedir.

Filtrenin diferansiyel denklemi ise

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \left(\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} \right) = \eta^2 u(x, y) - \left(\frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u(x, y)}{\partial y^2} \right) \quad (3.37)$$

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = \eta^2 u(x, y) - \nabla^2 u(x, y) \quad (3.38)$$

olarak bulunur.



Şekil 3.9 (a) $\gamma = 1, \alpha = 1, \beta = 1, \eta = 1$, (b) $\gamma = 2, \alpha = 1, \beta = 1, \eta = 0.5$,
(c) $\gamma = 2, \alpha = -1, \beta = 1, \eta = 0.5$ için bant söndüren SUF genlik frekans yanıtları

3.2.5 Uzaysal Gabor Filtreleri

İki boyutlu Gabor filtresi iki boyutlu bir Gauss fonksiyonu ile modüle edilmiş bir sinüzoidal düzlemsel dalgadır. Gabor filtresi karmaşık değerlidir, belli bir frekansa ve doğrultuya sahiptir. İki boyutlu bir Gauss filtresinin impuls yanıtı

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \quad (3.39)$$

ve Gauss filtresinin iki boyutlu uzaysal Fourier dönüşümü

$$F(j\Omega_x, j\Omega_y) = e^{-\left(\frac{\sigma_x^2\Omega_x^2}{2} + \frac{\sigma_y^2\Omega_y^2}{2}\right)} \quad (3.40)$$

şeklindedir. Gauss filtresinin Fourier dönüşümü yine Gauss fonksiyonudur. Gabor filtresinin impuls yanıtı ise

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \cdot e^{j(\Omega_{x0}x + \Omega_{y0}y)} = f(x, y) \cdot e^{j(\Omega_{x0}x + \Omega_{y0}y)} \quad (3.41)$$

olarak verilir. Fourier dönüşümünün modülasyon özelliğinden dolayı Gabor filtresinin Fourier dönüşümü, Gauss filtresinin Fourier dönüşümünün $(\Omega_{x0}, \Omega_{y0})$ frekansına ötelenmiştir.

Dolayısıyla Gabor filtresi merkez frekansı $(\Omega_{x0}, \Omega_{y0})$ olan bant geçiren bir filtredir.

$$G(j\Omega_x, j\Omega_y) = F(j(\Omega_x - \Omega_{x0}), j(\Omega_y - \Omega_{y0})) = e^{-\left[\frac{\sigma_x^2}{2}(\Omega_x - \Omega_{x0})^2 + \frac{\sigma_y^2}{2}(\Omega_y - \Omega_{y0})^2\right]} \quad (3.42)$$

Gabor filtresinin gerçel ve sanal kısımları sırasıyla çift Gabor filtresi (g_e) ve tek Gabor filtresi (g_o) olarak da adlandırılır. Tek ve çift Gabor filtresinin impuls yanıtları

$$g_e(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \cdot \cos(\Omega_{x0}x + \Omega_{y0}y) \quad (3.43)$$

$$g_o(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} e^{-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)} \cdot \sin(\Omega_{x0}x + \Omega_{y0}y) \quad (3.44)$$

ve Fourier dönüşümleri

$$G_e(j\Omega_x, j\Omega_y) = \frac{1}{2} e^{-\left[\frac{\sigma_x^2}{2}(\Omega_x - \Omega_{x0})^2 + \frac{\sigma_y^2}{2}(\Omega_y - \Omega_{y0})^2\right]} + \frac{1}{2} e^{-\left[\frac{\sigma_x^2}{2}(\Omega_x + \Omega_{x0})^2 + \frac{\sigma_y^2}{2}(\Omega_y + \Omega_{y0})^2\right]} \quad (3.45)$$

$$G_o(j\Omega_x, j\Omega_y) = \frac{1}{2j} e^{-\left[\frac{\sigma_x^2}{2}(\Omega_x - \Omega_{x0})^2 + \frac{\sigma_y^2}{2}(\Omega_y - \Omega_{y0})^2\right]} - \frac{1}{2j} e^{-\left[\frac{\sigma_x^2}{2}(\Omega_x + \Omega_{x0})^2 + \frac{\sigma_y^2}{2}(\Omega_y + \Omega_{y0})^2\right]} \quad (3.46)$$

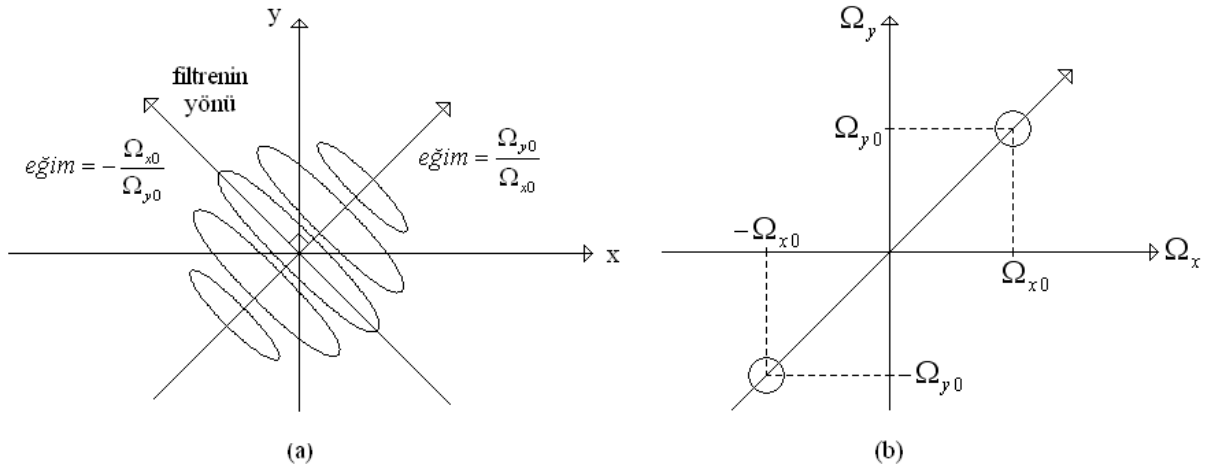
olarak verilir. Tek ve çift Gabor filtresi birbirinin Hilbert çiftidir.

Bu filtrenin yön seçici özelliği yukarıdaki diğer yönlü filtreler gibi frekans yanıtının yönlü olmasından değil, modülasyon özelliği nedeniyle frekans yanıtının $(\Omega_{x0}, \Omega_{y0})$ 'a ötelenmesinden kaynaklanmaktadır.

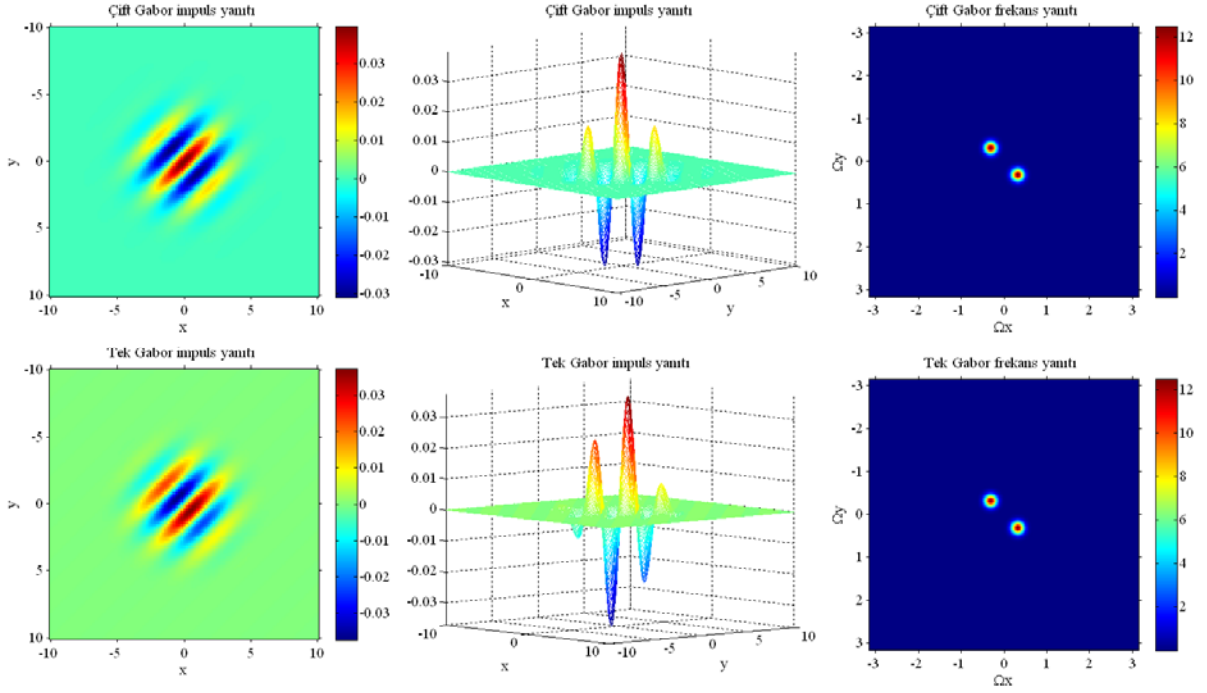
Çift Gabor filtresi $\cos(\Omega_{x0}x + \Omega_{y0}y)$ işaretini en yüksek genlikte geçirir. Seçilen doğrultu $\Omega_{x0}x + \Omega_{y0}y = \text{sabit}$ 'den

$$y = -\frac{\Omega_{x0}}{\Omega_{y0}}x + \frac{\text{sabit}}{\Omega_{y0}} \quad (3.47)$$

olarak bulunur.



Şekil 3.10 Çift Gabor filtresinin yönü (a) impuls yanıtı (b) genlik frekans yanıtı



Şekil 3.11 Tek ve çift Gabor filtreleri impuls ve genlik frekans yanıtları

3.3 Sürekli-Uzay-Zaman Filtreleri

Yukarıda incelenen sürekli-uzay filtrelerinden yola çıkarak zamanda ve uzayda sürekli uzay-zamansal filtre (SUZF) yapıları elde edilebilir. Bunun için uzaysal filtre transfer fonksiyonlarına $s_t = j\Omega_t$ zamansal Laplace değişkenini eklemek gerekir. Bu durumda genel üç boyutlu sürekli-uzay-zaman filtresinin transfer fonksiyonu

$$H(s_x, s_y, s_t) = \frac{b_{0x}s_x^2 + b_{0y}s_y^2 + b_{1x}s_x + b_{1y}s_y + b_{2x} + b_{2y}}{a_{0x}s_x^2 + a_{0y}s_y^2 + a_{1x}s_x + a_{1y}s_y + a_{2x} + a_{2y} + a_{1t}s_t} \quad (3.48)$$

haline gelir.

Bu bölümde incelenen filtreler üç boyutlu olduğu için bu filtrelerin genlik frekans yanıtları MATLAB programında 'isosurface' komutu kullanarak çizdirilmiştir. 'isosurface' komutu üç boyutlu bir fonksiyonun $f(x, y, z) = \text{sabit}$ olan eşyüzey eğrisini çizmektedir. Sabit değer genliğin maksimum değerinin $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 'si seçilirse kapalı yüzeylerin içinde kalan frekans bölgesi filtrelerin geçirme bandını, dışında kalan frekans bölgesi de söndürme bandını göstermektedir. 'isosurface' komutu hakkında ayrıntılı bilgi Ek.1'de verilmiştir.

Şimdi yukarıda ayrıntıları verilen sürekli- uzay filtrelerinin bazılarını zaman boyutunu da ekleyerek sürekli-uzay-zaman filtrelerini elde edelim.

3.3.1 Alçak Geçiren Sürekli-Uzay-Zaman Filtresi

Alçak geçiren sürekli-uzay filtresine zamansal Laplace değişkenin ekleyerek alçak geçiren sürekli-uzay-zaman filtresi

$$H(s_x, s_y, s_t) = \frac{1}{1 - \gamma^2(s_x^2 + s_y^2) + \tau s_t} = \frac{-\frac{1}{\gamma^2}}{(s_x^2 + s_y^2) - \frac{1}{\gamma^2} + \frac{\tau}{\gamma^2} s_t} \quad (3.49)$$

olarak elde edilir. Filtre katsayıları ise

$$\begin{aligned} b_{0x} = b_{0y} = b_{1x} = b_{1y} = 0, \quad b_{2x} + b_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \\ a_{0x} = a_{0y} = 1, \quad a_{1x} = a_{1y} = 0, \quad a_{1t} = -\frac{\tau}{\gamma^2}, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.50)$$

bulunur. Bu filtrenin frekans yanıtı

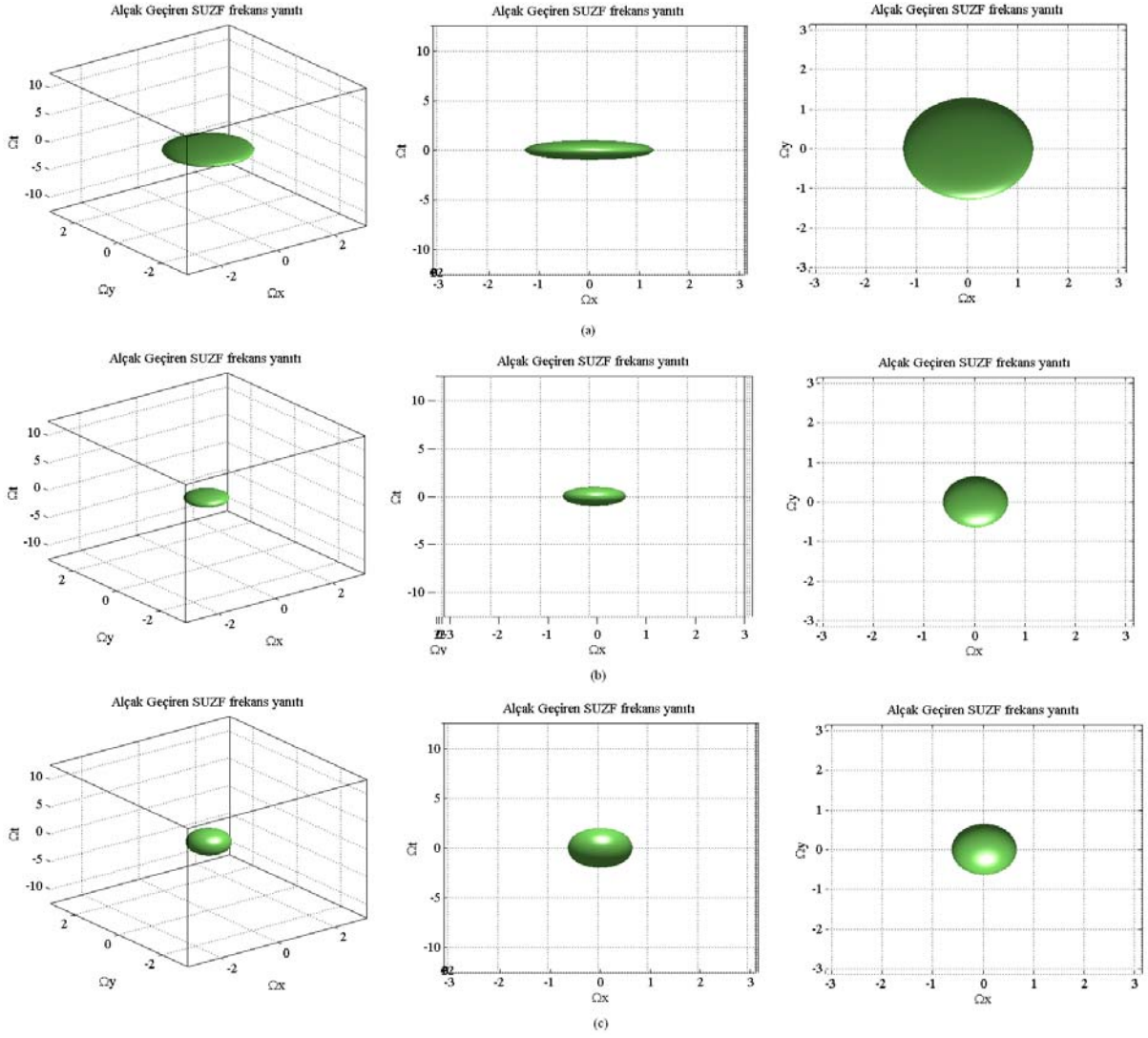
$$H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2) + j\tau\Omega_t} \quad (3.51)$$

olur. Filtrenin genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right]^2 + (\tau\Omega_t)^2}} \quad (3.52)$$

incelendiğinde genlik frekans yanıtının $\tau\Omega_t = 0$, yani $\Omega_t = 0$ için maksimum olduğu görülür.

Bu filtre hem zamanda hem uzayda alçak geçiren filtredir.



Şekil 3.12 (a) $\gamma = 0.5, \tau = 1$, (b) $\gamma = 1, \tau = 1$, (c) $\gamma = 1, \tau = 0.5$ için alçak geçiren SUZF genlik frekans yanıtları. En solda üç boyutlu çizim, ortada Ω_x, Ω_y kesiti ve sağda Ω_x, Ω_t kesiti görülmektedir. Bu filtre hem uzaysal hem zamansal frekanslarda alçak geçiren yapıdadır, γ ve τ değerleri ile filtrenin uzaysal ve zamansal frekanslardaki bant genişliği ayarlanmaktadır.

Filtrenin diferansiyel denklemi ise

$$v(x, y, t) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y, t) + \tau \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial t} = u(x, y, t) \quad (3.53)$$

şeklindedir. Dairesel simetrik SUF diferansiyel denkleminde ek olarak bu denklemde çıkışın zamansal birinci türevi yer alır.

Alçak geçiren sürekli-uzay-zaman filtresinin frekans yanıtının uzay-zamansal ters Fourier dönüşümü alınarak filtrenin impuls yanıtı hesaplanabilir. Hesaplamayı kolaylaştırmak için tek boyutlu uzay-zamansal filtreyi göz önüne alalım.

$$H(j\Omega_x, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 \Omega_x^2 + j\tau \Omega_t} = \frac{1/\tau}{\frac{1 + \gamma^2 \Omega_x^2}{\tau} + j\Omega_t} \quad (3.54)$$

$$h(x, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1/\tau}{\frac{1 + \gamma^2 \Omega_x^2}{\tau} + j\Omega_t} e^{j\Omega_t t} e^{j\Omega_x x} d\Omega_t d\Omega_x = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} e^{-\frac{\gamma^2 t}{\tau} \Omega_x^2} e^{j\Omega_x x} d\Omega_x \quad (3.55)$$

$$h(x, t) = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\gamma^2 t}{\tau} \Omega_x^2} e^{j\Omega_x x} d\Omega_x \quad (3.56)$$

$a = \frac{\tau}{4\gamma^2 t}$ olarak tanımlayalım

$$h(x, t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \left\{ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{\Omega_x^2}{4a}} e^{j\Omega_x x} d\Omega_x \right\} = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \left(\mathfrak{F}^{-1} \left\{ e^{-\frac{\Omega_x^2}{4a}} \right\} \right) \quad (3.57)$$

$g(x) = e^{-ax^2}$ 'nin Fourier dönüşümü

$$\mathfrak{F} \left\{ e^{-ax^2} \right\} = \sqrt{\frac{\pi}{a}} e^{-\frac{\Omega_x^2}{4a}} \quad (3.58)$$

olarak bilinmektedir. Yani bir Gauss fonksiyonunun Fourier dönüşümü yine bir Gauss fonksiyonudur. Bu dönüşüm formülü (3.57) eşitliğine uyarlanırsa

$$h(x, t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \sqrt{\frac{a}{\pi}} e^{-ax^2} \quad (3.59)$$

$$h(x, t) = \frac{1}{2\gamma\sqrt{\pi\tau t}} e^{-\frac{t}{\tau}} e^{-\frac{\tau x^2}{4\gamma^2 t}} \quad (3.60)$$

elde edilir. Alçak geçiren sürekli-uzay-zaman filtresinin impuls yanıtı dairesel simetriktr.

3.3.2 Yönlü Alçak Geçiren Sürekli-uzay-Zaman Filtresi (Hız Ayarlı Filtre, HAF)

Yönlü alçak geçiren SUF transfer fonksiyonuna zaman değişkenini ekleyerek

$$H(s_x, s_y, s_t) = \frac{1}{1 + \alpha s_x + \beta s_y - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2) + \tau s_t} = \frac{1}{1 - \gamma^2 (s_x^2 + s_y^2) + \tau \left(s_t + \frac{\alpha}{\tau} s_x + \frac{\beta}{\tau} s_y \right)} \quad (3.61)$$

elde edilir. Filtre katsayıları ise

$$\begin{aligned} b_{0x} = b_{0y} = b_{1x} = b_{1y} = 0, \quad b_{2x} + b_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \\ a_{0x} = a_{0y} = 1, \quad a_{1x} = -\frac{\alpha}{\gamma^2}, \quad a_{1y} = -\frac{\beta}{\gamma^2}, \quad a_{1t} = -\frac{\tau}{\gamma^2}, \quad a_{2x} + a_{2y} = -\frac{1}{\gamma^2} \end{aligned} \quad (3.62)$$

olur. Filtrenin frekans yanıtı

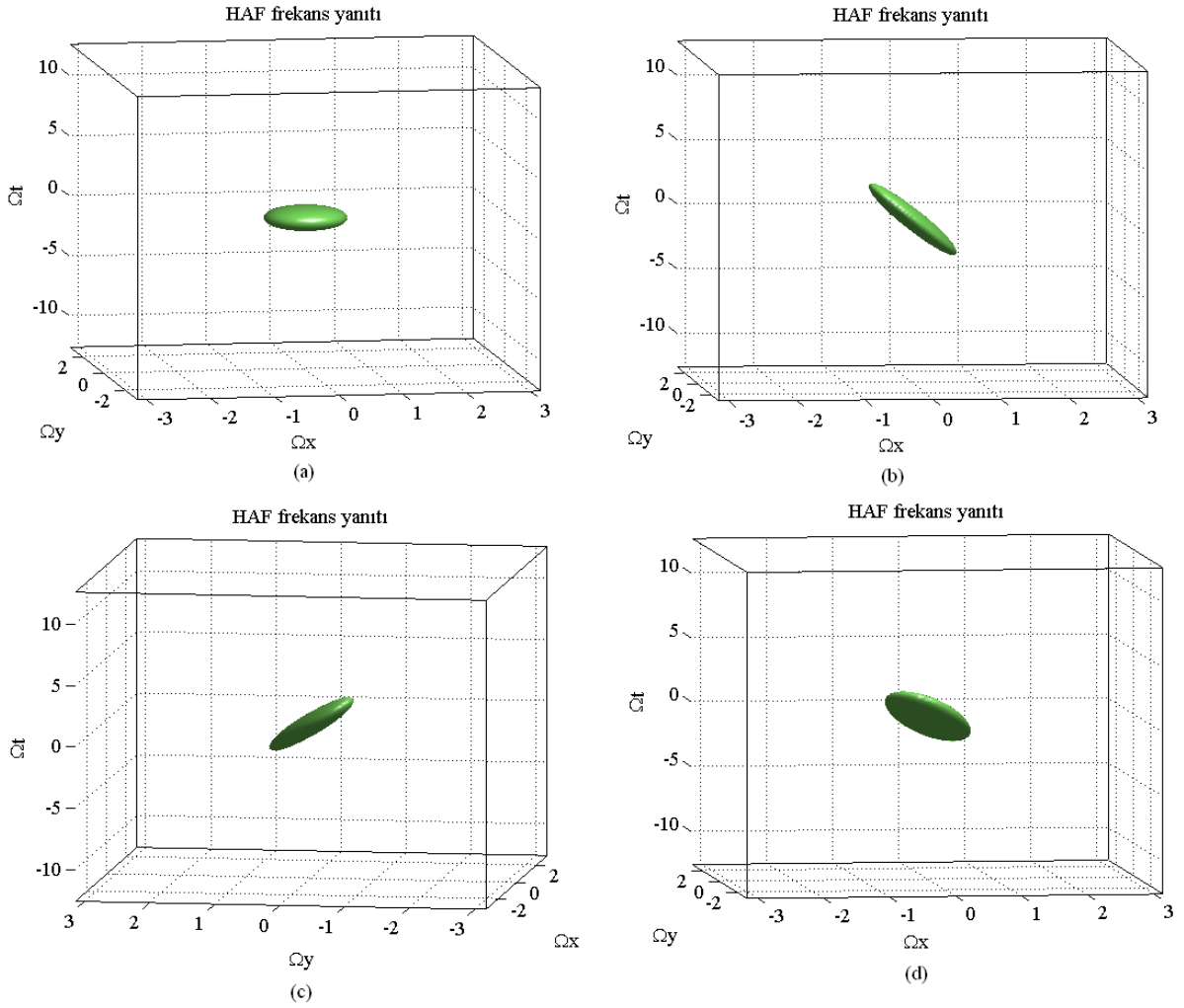
$$H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) + j\tau \left(\Omega_t + \frac{\alpha}{\tau} \Omega_x + \frac{\beta}{\tau} \Omega_y \right)} \quad (3.63)$$

ve genlik frekans yanıtı

$$\left| H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) \right| = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \gamma^2 (\Omega_x^2 + \Omega_y^2) \right]^2 + \tau^2 \left(\Omega_t + \frac{\alpha}{\tau} \Omega_x + \frac{\beta}{\tau} \Omega_y \right)^2}} \quad (3.64)$$

olarak elde edilir. Genlik frekans yanıtı $\Omega_t + \frac{\alpha}{\tau} \Omega_x + \frac{\beta}{\tau} \Omega_y = 0$, yani $\Omega_t = -\frac{\alpha}{\tau} \Omega_x - \frac{\beta}{\tau} \Omega_y$ için

maksimum olur. $\frac{\alpha}{\tau} = v_x$, $\frac{\beta}{\tau} = v_y$ olarak kabul edilirse bu filtre v_x, v_y hızına ayarlı filtre olarak yorumlanabilir. Alçak geçiren SUZF de sıfır hızına ayarlı uzay-zaman filtresi olarak düşünülebilir.



Şekil 3.13 (a) $v_x = 0, v_y = 0$, (b) $v_x = 4, v_y = 0$, (c) $v_x = 0, v_y = 3$, (d) $v_x = 2, v_y = 2$ için hız ayarlı SUZF genlik frekans yanıtları. Sıfır hızına ayarlı filtre aynı zamanda alçak geçiren SUZF'dir. (b), (c) ve (d)'deki HAF genlik frekans yanıtları uzay-zaman ekseninde yönlüdür.

Filtrenin diferansiyel denklemi ise

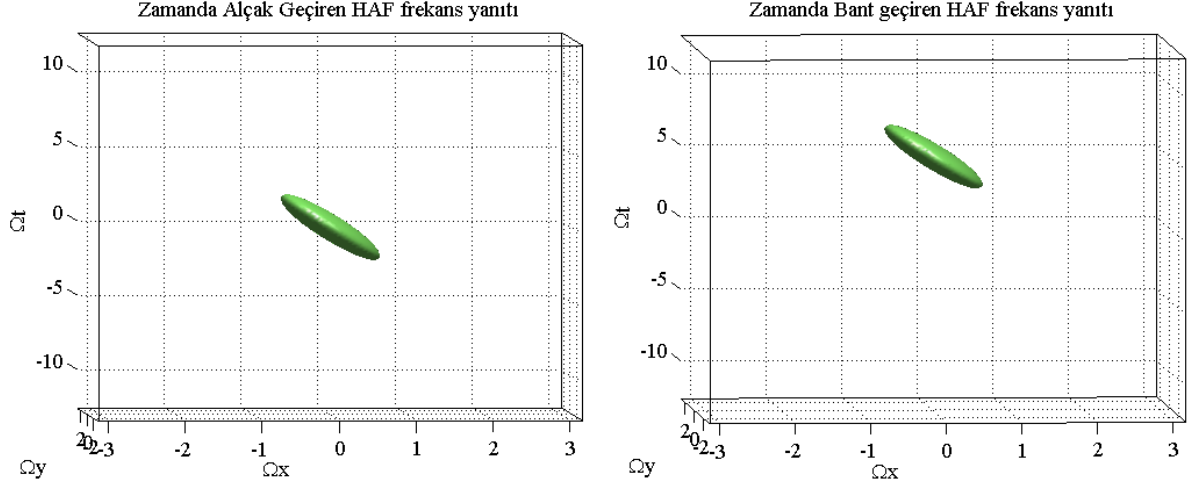
$$v(x, y, t) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y, t) + \tau \left(\frac{\partial v(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\alpha}{\tau} \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\beta}{\tau} \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial y} \right) = u(x, y, t) \quad (3.65)$$

olarak bulunur.

Şekil 3.13'den de görüleceği gibi hız ayarlı filtreler zamanda alçak geçiren yapıdadır. Buradan zamanda da bant geçiren HAF elde etmek için HAF frekans yanıtı $\Omega_t - \Omega_{t_0}$ frekansına ötelenirse

$$H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2) + j\tau(\Omega_t - \Omega_{t0} + \nu_x\Omega_x + \nu_y\Omega_y)} \quad (3.66)$$

elde edilir. Şekil 3.14’de alçak ve bant geçiren HAF genlik frekans yanıtları görülmektedir.



Şekil 3.14 $\nu_x = 3, \nu_y = 0, \Omega_{t0} = 5$ için zamanda alçak geçiren ve bant geçiren HAF genlik frekans yanıtları

3.4 Sonuçlar

Bu bölümde ikinci dereceden sürekli-uzay ve sürekli-uzay-zaman filtrelerinin diferansiyel denklemleri ve transfer fonksiyonları incelenmiştir. Sürekli-uzay filtrelerinin transfer fonksiyonları ikinci dereceden bir boyutlu analog filtre yapılarından esinlenerek oluşturulmuştur. Alçak geçiren, yüksek geçiren, bant geçiren ve bant söndüren filtrelerin transfer fonksiyonları elde edilmiş ve çeşitli parametre değerleri için genlik frekans yanıtlarının değişimi incelenmiştir.

Ardından sürekli-uzay filtrelerin transfer fonksiyonlarına zaman değişkeni eklenerek sürekli-uzay-zaman filtreleri elde edilmiştir. Bu bölümde tüm bu filtrelerin diferansiyel denklemleri ve transfer fonksiyonlarının birlikte verilmesiyle bir genelleştirme yapmak amaçlanmıştır.

4. HSA İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN UZAYSAL FİLTRELER

Bu bölümde HSA ile gerçekleştirilen ayrık-uzay filtreleri incelenecektir. Bölüm 3'te verilen sürekli-uzay filtreleri uzayda ayrıklaştırılarak HSA gibi ızgara şeklindeki yapılarla gerçekleştirilebilirler. Böylece elde edilen filtreler ayrık-uzay filtreleridir. Bu filtrelerin bazıları retina modellenmesinde kullanılan çeşitli temel özellik çıkarıcı (düzgünleştirme, yön seçme hız seçme vb.) filtrelerdir. Elde edilen filtreler basit yapılarına rağmen ilgili filtreleme işlemlerini başarıyla gerçekleştirmektedir.

Bu ve bundan sonraki bölümlerde adı geçen HSA ile gerçekleştirilen tüm uzaysal ve uzay-zamansal filtreler ayrık-uzay filtreleridir, filtre isimlerinin çok uzun olmaması için her birinin yanına tekrar yazılmayacaktır.

Bu bölümde HSA ile gerçeklenmiş çeşitli uzaysal filtrelerin diferansiyel denklemleri, transfer fonksiyonları ve HSA şablon değerleri birlikte verilerek bu filtreler arasında bir karşılaştırma yapma olanağı sağlamak ve bir sonraki bölümde değinilecek olan uzay-zamansal filtreler için temel oluşturmak amaçlanmaktadır.

4.1 Dairesel Simetrik Uzaysal Alçak Geçiren HSA Filtresi

Dairesel simetrik alçak geçiren SUF'nin diferansiyel denklemi bölüm 3.2.1'de elde edilmişti. Bu diferansiyel denklemi burada tekrar yazalım:

$$v(x, y) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = u(x, y) \quad \text{Equation Section (Next)}(4.1)$$

Bu diferansiyel denklemi uzayda ayrıklaştırmak için $v(x, y)$, $u(x, y)$, $\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2}$ ve

$\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2}$ x ve y boyutlarında $x = i\Delta x$, $y = j\Delta y$ alınarak örneklenirse

$$v(x, y) = v(i\Delta x, j\Delta y) = v(i, j) = v_{i,j} \quad (4.2)$$

bulunur. Öte yandan

$$\begin{aligned}
\frac{\partial v(x, y)}{\partial x} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{v(x + \Delta x, y) - v(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \cong \frac{v(x + \Delta x, y) - v(x - \Delta x, y)}{2\Delta x} \\
\frac{\partial v(x, y)}{\partial y} &= \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{v(x, y + \Delta y) - v(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \cong \frac{v(x, y + \Delta y) - v(x, y - \Delta y)}{2\Delta y} \\
\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} &= \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{v(x + \Delta x, y) - v(x, y)}{\Delta x} - \frac{v(x, y) - v(x - \Delta x, y)}{\Delta x}}{\Delta x} \\
\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} &\cong \frac{v(x + \Delta x, y) - 2v(x, y) + v(x - \Delta x, y)}{(\Delta x)^2} \\
\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} &= \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\frac{v(x, y + \Delta y) - v(x, y)}{\Delta y} - \frac{v(x, y) - v(x, y - \Delta y)}{\Delta y}}{\Delta y} \\
\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} &\cong \frac{v(x, y + \Delta y) - 2v(x, y) + v(x, y - \Delta y)}{(\Delta y)^2}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

şeklinde ifade edilir. $\Delta x = \Delta y = 1$ alınırsa

$$\begin{aligned}
\frac{\partial v(x, y)}{\partial x} &= \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2} \\
\frac{\partial v(x, y)}{\partial y} &= \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2} \\
\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} &= v_{i+1,j} - 2v_{i,j} + v_{i-1,j} \\
\frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} &= v_{i,j+1} - 2v_{i,j} + v_{i,j-1}
\end{aligned} \tag{4.4}$$

elde edilir. (4.4)'den Laplasien için de

$$\nabla^2 v(x, y) = \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} = v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j} \tag{4.5}$$

ifadesi bulunur. Öyleyse (4.1) denklemini örneklendiğinde

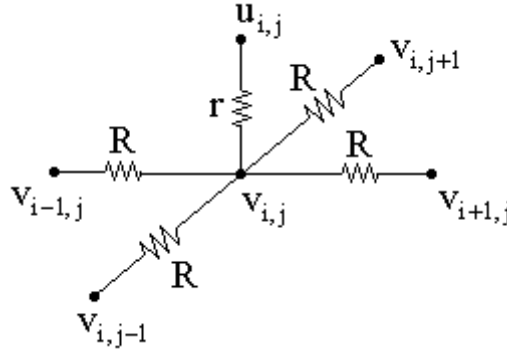
$$v_{i,j} - \gamma^2 (v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) = u_{i,j} \tag{4.6}$$

elde edilecektir. Burada $\gamma^2 = \frac{r}{R}$ alınarak

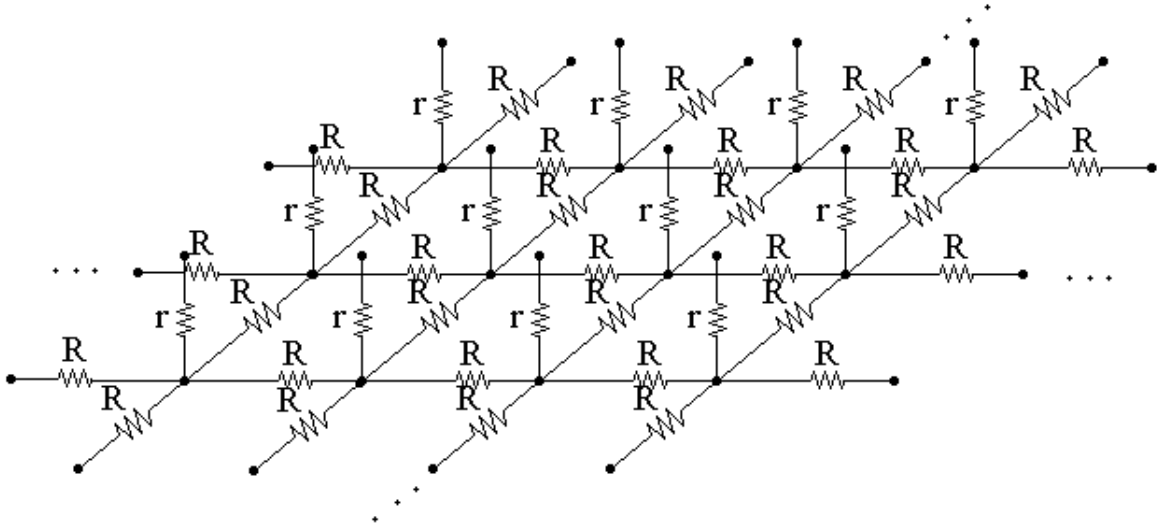
$$\frac{r}{R} v_{i-1,j} + \frac{r}{R} v_{i+1,j} + \frac{r}{R} v_{i,j-1} + \frac{r}{R} v_{i,j+1} - \left(4 \frac{r}{R} + 1\right) v_{i,j} + u_{i,j} = 0 \tag{4.7}$$

$$\frac{v_{i-1,j} - v_{i,j}}{R} + \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{R} + \frac{v_{i,j-1} - v_{i,j}}{R} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{R} + \frac{u_{i,j} - v_{i,j}}{r} = 0 \quad (4.8)$$

bulunur. Bu denklemde $v_{i,j}$, (i,j) düğümünün gerilimi; $v_{i-1,j}$, $v_{i,j-1}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$ komşu düğümlerin gerilimleri olarak düşünüldüğünde (4.8) denklemi Şekil 4.1'deki ızgara yapısındaki devrenin (i,j) düğümü için yazılmış düğüm denklemidir. Şekil 4.1'deki devre aynı zamanda RC analog ağı (Şekil 4.2) olarak adlandırılan ızgara yapısının bir hücresidir.



Şekil 4.1 Dairesel simetrik alçak geçiren HSA filtresi (i,j) hücresi



Şekil 4.2 Temel RC analog ağı

Bu filtreyi HSA ile gerçekleştirmek için (4.6) denklemi HSA denklemine benzer şekilde matrisel olarak düzenlenirse

$$0 = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 & 0 \\ \gamma^2 & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 \\ 0 & \gamma^2 & 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0 & v_{i,j-1} & 0 \\ v_{i-1,j} & v_{i,j} & v_{i+1,j} \\ 0 & v_{i,j+1} & 0 \end{bmatrix} + u_{i,j} = A \otimes V_{i,j} + B \otimes U_{i,j} \quad (4.9)$$

bulunur. Geri besleme ve ileri besleme şablonları

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 & 0 \\ \gamma^2 & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 \\ 0 & \gamma^2 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

olarak elde edilir.

4.1.1 HSA Denkleminin Euler Yaklaşıklığı ile Ayrık Zaman Simülasyonu

HSA durum değişkeninin türevini sayısal olarak hesaplamak için bir yaklaşıklık yöntemi kullanılmalıdır. Euler yaklaşıklığı basit yapısı nedeniyle genellikle tercih edilir. Bu yaklaşıklıkta T_s örnekleme adımının seçimi önem taşımaktadır. Örnekleme adımının en uygun şekilde seçimi hakkında bir analiz Saatçi ve Tavşanoğlu (2002) tarafından yapılmıştır.

HSA simülasyonunda bir diğer önemli parametre devrenin kapasite elemanı ve direnç değerlerinin oluşturduğu zaman sabitidir. Devrenin zaman sabiti genel görüntü işleme uygulamalarında çok küçük seçilir, böylece giriş uygulandıktan çok kısa süre sonra (μs veya ns mertebesinde) geçici haller sıfıra gider ve çıkış görüntüsü sabit bir değere ulaşır. Uzay-zamansal görüntü işleme uygulamalarında ise zaman sabitinin daha büyük seçilmesi gerekmektedir. HSA ile uzay-zamansal görüntü işlemeye Bölüm 5’de değinilecektir. Bu çalışma boyunca konumdan bağımsız lineer HSA yapısı kullanılmıştır. Dolayısıyla aşağıda konumdan bağımsız lineer HSA durum denkleminin ayrık zaman simülasyonu üzerinde durulmaktadır.

Konumdan bağımsız lineer HSA denklemi

$$\dot{x}_{i,j} = -x_{i,j} + A \otimes X_{i,j} + B \otimes U_{i,j} \quad (4.11)$$

idi. Denklemin sağ tarafındaki $-x_{i,j}$ terimini de A şablonunun içine ekleyelim:

$$\tilde{A} \triangleq \begin{bmatrix} a_{-1,-1} & a_{-1,0} & a_{-1,1} \\ a_{0,-1} & a_{0,0}-1 & a_{0,1} \\ a_{1,-1} & a_{1,0} & a_{1,1} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Ayrıca z değeri sadece durumun ortalama değerini kaydıran bir eşik değeri olduğu için bu tez çalışması boyunca tüm uygulamalarda $z_{i,j} = 0$ alınmıştır. Bu durumda HSA denklemi

$$\dot{x}_{i,j} = \tilde{A} \otimes X_{i,j} + B \otimes U_{i,j} \quad (4.13)$$

olur. Türev ifadesi yerine Euler ileri yaklaşıklığı kullanılarak

$$\frac{x_{i,j}(n+1) - x_{i,j}(n)}{T_s} = \tilde{A} \otimes X_{i,j}(n) + B \otimes U_{i,j}(n) \quad (4.14)$$

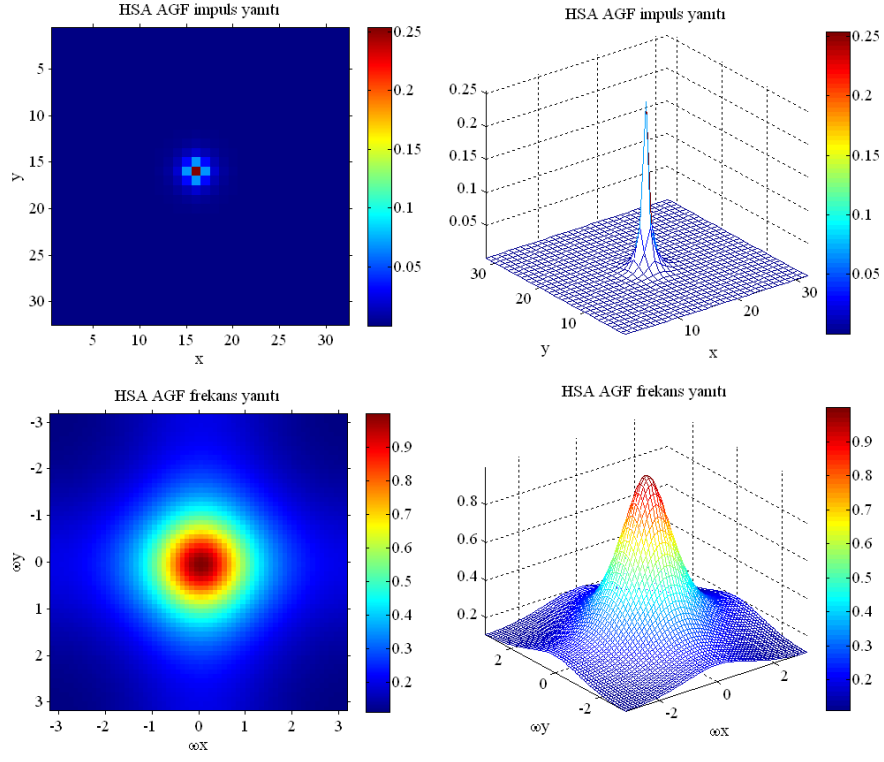
$$x_{i,j}(n+1) = x_{i,j}(n) + T_s \left[\tilde{A} \otimes X_{i,j}(n) + B \otimes U_{i,j}(n) \right] \quad , i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N \quad (4.15)$$

elde edilir. İterasyona başlarken durumun başlangıç değeri $x(0)$ herhangi bir sabit olarak alınabilir. Bölüm 2.2’de gösterildiği gibi iterasyon sonucu başlangıç koşullarından bağımsızdır. Durumun başlangıç değeri giriş görüntüsü olarak da alınabilir. Bu çalışma boyunca $x(0) = 0$ alınmıştır.

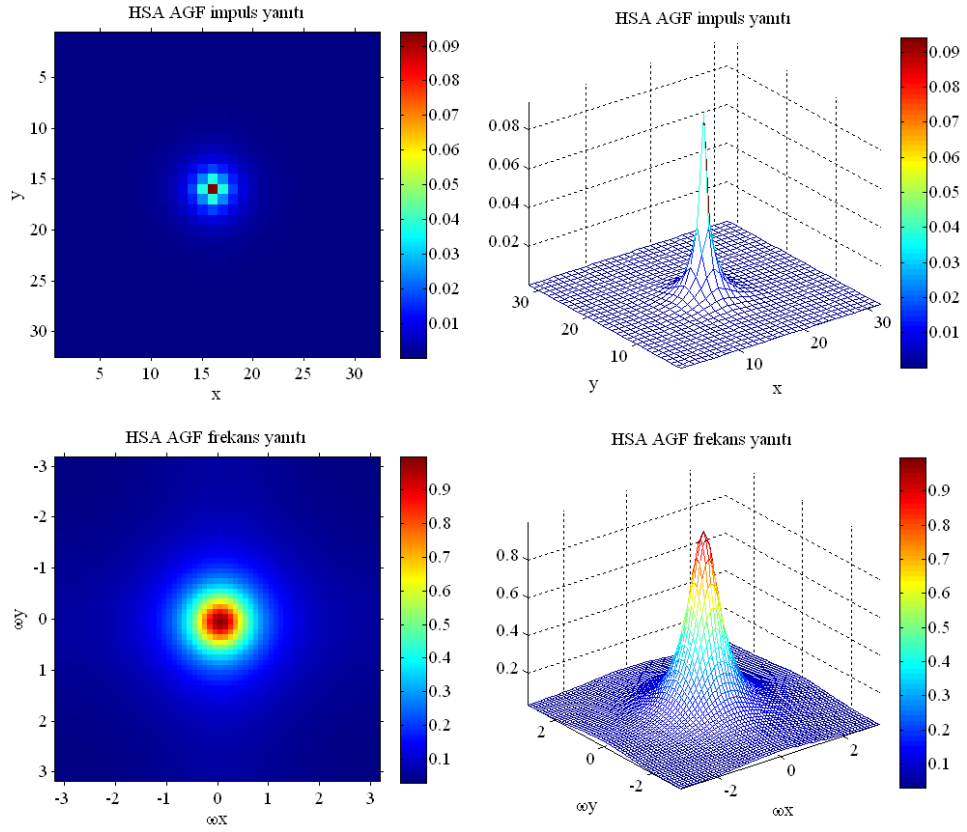
Durgun görüntüler için U girişi her iterasyon için sabittir, hareketli görüntüler için ise zamanla değişmektedir. T_s örnekleme adımı devrenin zaman sabitinden çok küçük seçilir. İterasyon $x(n+1) = x(n)$ oluncaya kadar yani durum artık değişmeyinceye kadar devam ettirilir. Bu bölümde giriş işareti olarak görüntünün en ortasındaki pikseli 1, diğer pikselleri 0 olan uzaysal impuls girişi kullanılmıştır. Böylece çıkışta filtrelerin impuls yanıtları elde edilmektedir.

4.1.2 Dairesel Simetrik Uzaysal Alçak Geçiren Filtrenin HSA Simülasyonu

Şablonları denklem (4.10) ile verilen HSA’nın 32x32 boyutlu uzaysal impuls girişi için impuls ve genlik frekans yanıtları Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.3 $\gamma = 1$ için uzaysal AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.4 $\gamma = 2$ için uzaysal AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları

4.2 Yönlü Uzaysal Alçak Geçiren HSA Filtresi

Bölüm 3’te yönlü alçak geçiren sürekli-uzay filtresinin diferansiyel denklemi

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = u(x, y) \quad (4.16)$$

olarak bulunmuştur. Bu denklem uzayda örneklendiğinde

$$v_{i,j} + \alpha \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2} + \beta \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2} - \gamma^2 (v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) = u_{i,j} \quad (4.17)$$

elde edilir. (4.17) denklemi düzenlenirse

$$u_{i,j} - v_{i,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) v_{i+1,j} + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) v_{i-1,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j+1} + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j-1} - 4\gamma^2 v_{i,j} = 0 \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} u_{i,j} - v_{i,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) (v_{i+1,j} - v_{i,j}) + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) (v_{i-1,j} - v_{i,j}) \\ + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) (v_{i,j+1} - v_{i,j}) + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) (v_{i,j-1} - v_{i,j}) = 0 \end{aligned} \quad (4.19)$$

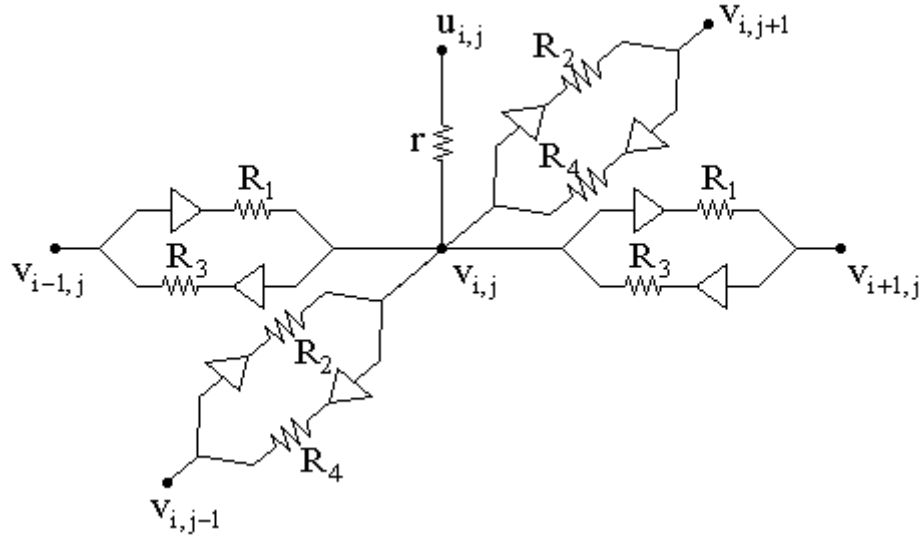
bulunur. $\left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{r}{R_1}$, $\left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{r}{R_3}$, $\left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) = \frac{r}{R_2}$, $\left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) = \frac{r}{R_4}$ olarak alınır

ise $\frac{r}{R_1} + \frac{r}{R_3} = \frac{r}{R_2} + \frac{r}{R_4} = 2\gamma^2$, $\frac{r}{R_1} - \frac{r}{R_3} = \alpha$ ve $\frac{r}{R_2} - \frac{r}{R_4} = \beta$ olur. (4.19) denklemi ise

$$u_{i,j} - v_{i,j} + \frac{r}{R_1} (v_{i-1,j} - v_{i,j}) + \frac{r}{R_3} (v_{i+1,j} - v_{i,j}) + \frac{r}{R_2} (v_{i,j-1} - v_{i,j}) + \frac{r}{R_4} (v_{i,j+1} - v_{i,j}) = 0 \quad (4.20)$$

$$\frac{u_{i,j} - v_{i,j}}{r} + \frac{v_{i-1,j} - v_{i,j}}{R_1} + \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{R_3} + \frac{v_{i,j-1} - v_{i,j}}{R_2} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{R_4} = 0 \quad (4.21)$$

haline gelir. Bu denklemde yine $v_{i,j}$ (i,j) düğümünün gerilimi; $v_{i-1,j}$, $v_{i,j-1}$, $v_{i+1,j}$, $v_{i,j+1}$ komşu düğümlerin gerilimleri olarak düşünüldüğünde (4.8) denklemi Şekil 4.5’teki ızgara yapısındaki devre ile gerçekleştirilebilir. Şekil 4.5’teki devrede tüm komşu düğümlerin (i,j) düğüme etkisi birbirinden farklıdır. Dolayısıyla aradaki bağlantılar tek yönlü dirençlerle ifade edilmiştir. Böylece örneğin ($i+1,j$) düğüme de solundaki (i,j) düğümünden R_1 ile orantılı bir akım, sağındaki ($i+2,j$) düğümünden R_3 ile orantılı bir akım akar.



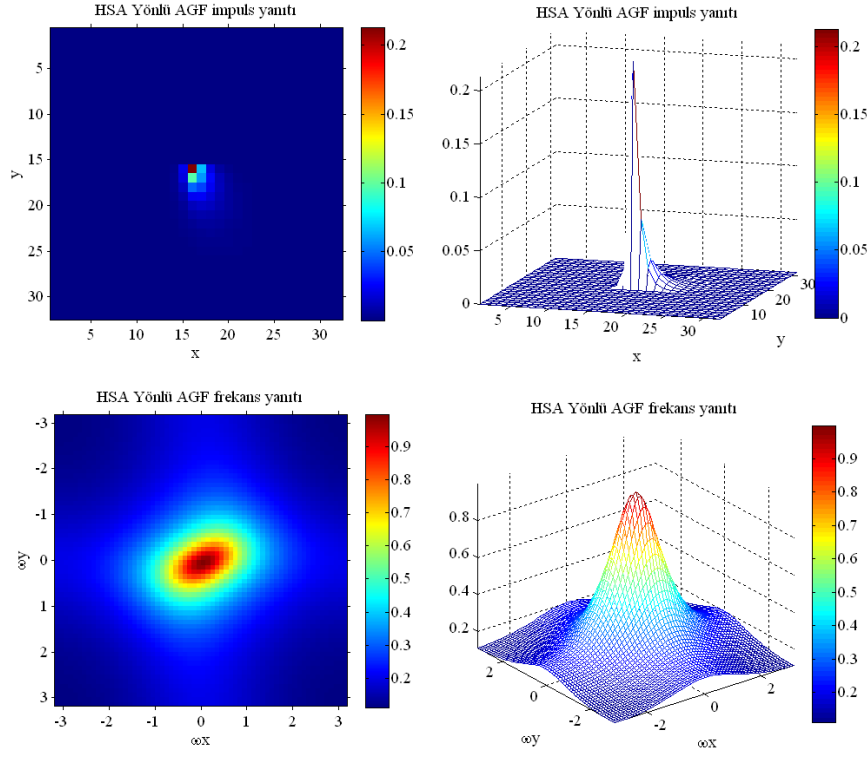
Şekil 4.5 Yönlü uzaysal alçak geçiren HSA filtresi (i,j) hücresi

Yönlü uzaysal alçak geçiren filtreyi HSA ile gerçekleştirmek için gerekli şablonlar ise (4.19) denkleminde

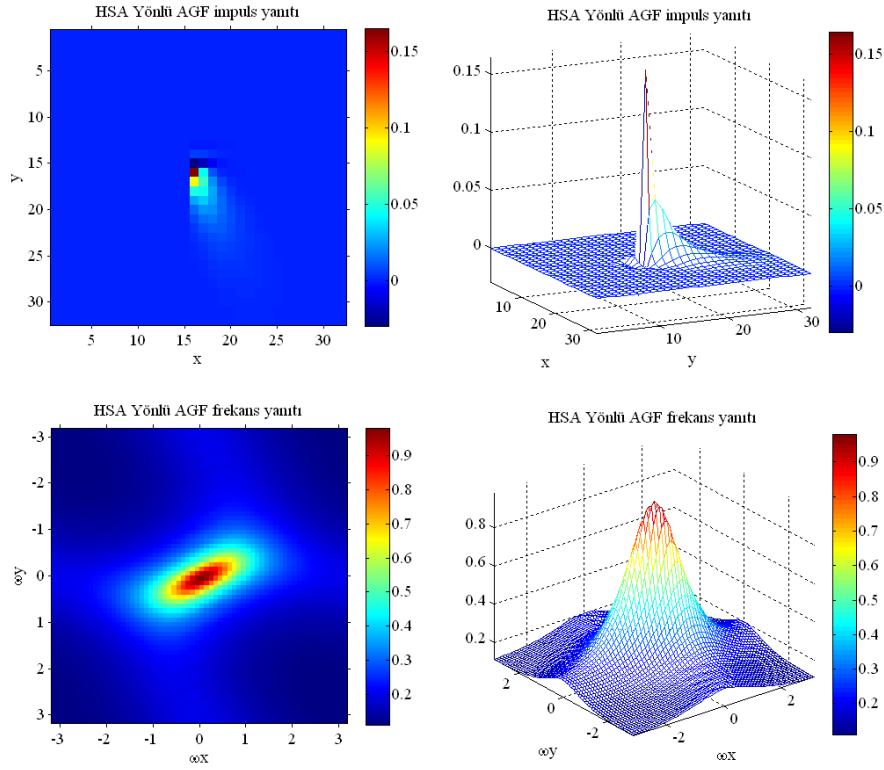
$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 + \frac{\beta}{2} & 0 \\ \gamma^2 + \frac{\alpha}{2} & -(1 + 4\gamma^2) & \gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \\ 0 & \gamma^2 - \frac{\beta}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

olarak elde edilir.

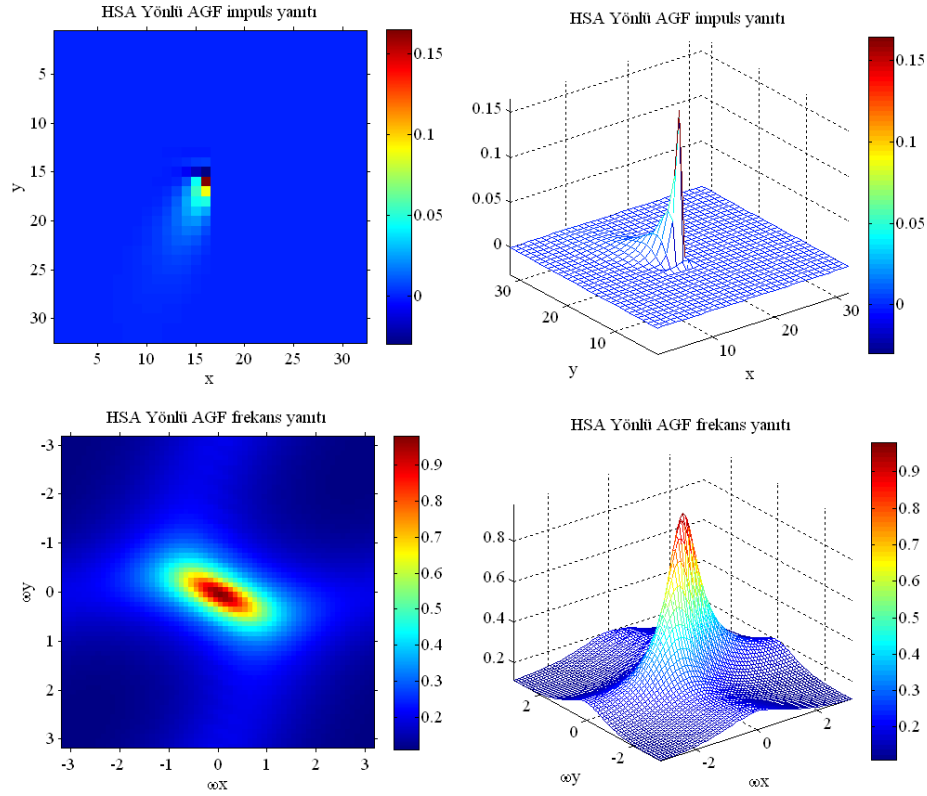
Üç farklı değer için elde edilen yönlü AGF HSA simülasyon sonuçları Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi α ve β değerleri uygun seçilerek istenen yönü seçen filtreler elde etmek mümkündür.



Şekil 4.6 $\gamma=1$, $\alpha=1$, $\beta=2$ için Yönlü AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.7 $\gamma=1$, $\alpha=2$, $\beta=4$ için Yönlü AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.8 $\gamma = 1$, $\alpha = -2$, $\beta = 4$ için Yönlü AGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları

4.3 Dairesel Simetrik Uzaysal Yüksek Geçiren HSA Filtresi

Dairesel simetrik yüksek geçiren sürekli-uzay filtresinin diferansiyel denklemini tekrar ele alalım.

$$v(x, y) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = -\nabla^2 u(x, y) \quad (4.23)$$

Bu denklem de uzayda örneklenirse

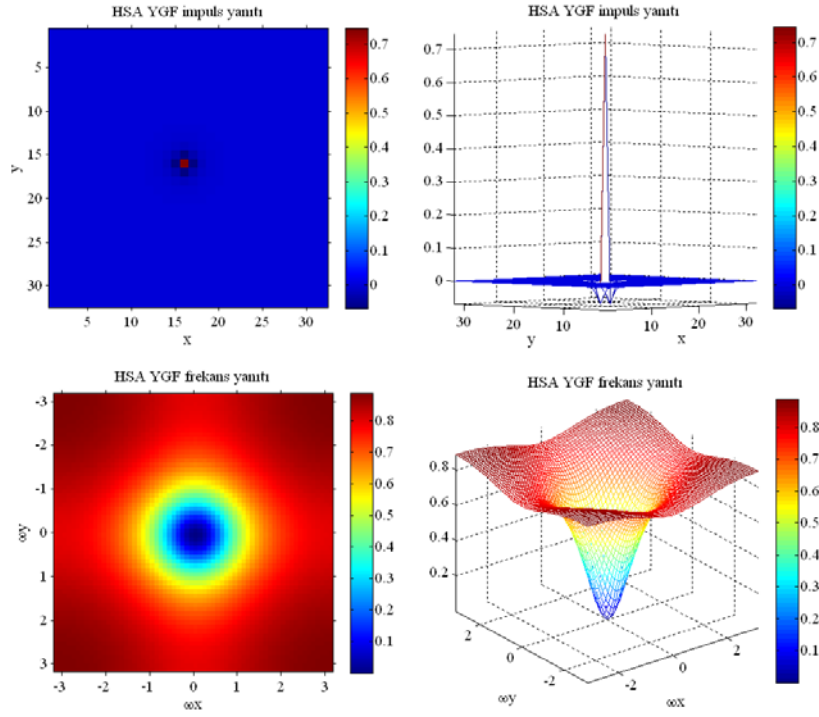
$$v_{i,j} - \gamma^2 (v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) = -(u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - 4u_{i,j}) \quad (4.24)$$

$$-u_{i+1,j} - u_{i-1,j} - u_{i,j+1} - u_{i,j-1} + 4u_{i,j} + \gamma^2 v_{i+1,j} + \gamma^2 v_{i-1,j} + \gamma^2 v_{i,j+1} + \gamma^2 v_{i,j-1} - (1 + 4\gamma^2) v_{i,j} = 0 \quad (4.25)$$

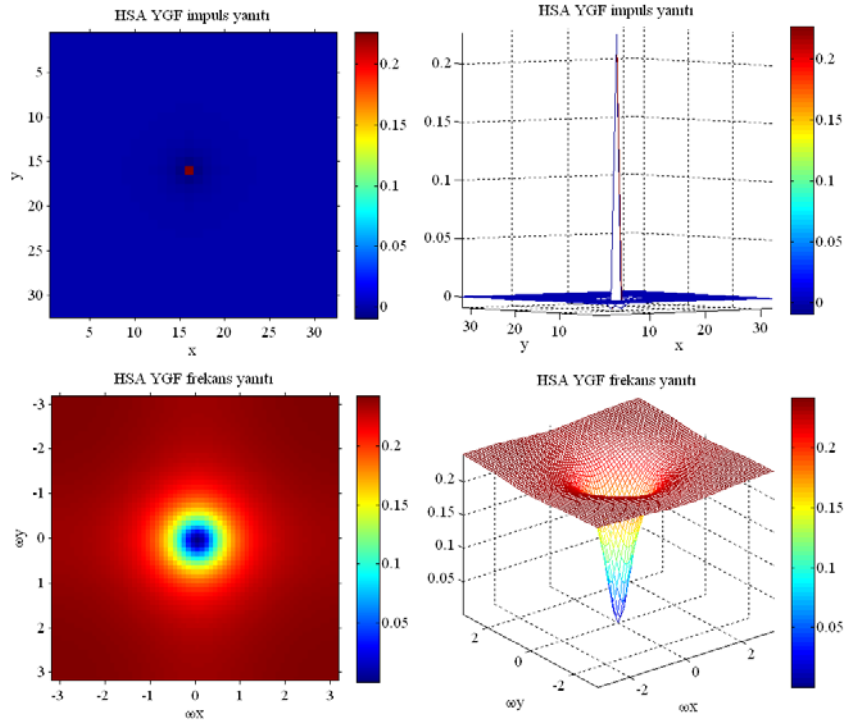
bulunur. Bu filtreyi gerçekleştirmek için gerekli A ve B şablonları

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 & 0 \\ \gamma^2 & -(1 + 4\gamma^2) & \gamma^2 \\ 0 & \gamma^2 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

olarak elde edilir. İki farklı γ değeri için elde edilen HSA simülasyonu sonuçları Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.9 $\gamma = 1$ için uzaysal YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.10 $\gamma = 2$ için uzaysal YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları

4.4 Yönlü Uzaysal Yüksek Geçiren HSA Filtresi

Yönlü yüksek geçiren sürekli-uzay filtresinin diferansiyel denklemi

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = -\nabla^2 u(x, y) \quad (4.27)$$

idi. Bu denklem uzayda örneklendiğinde

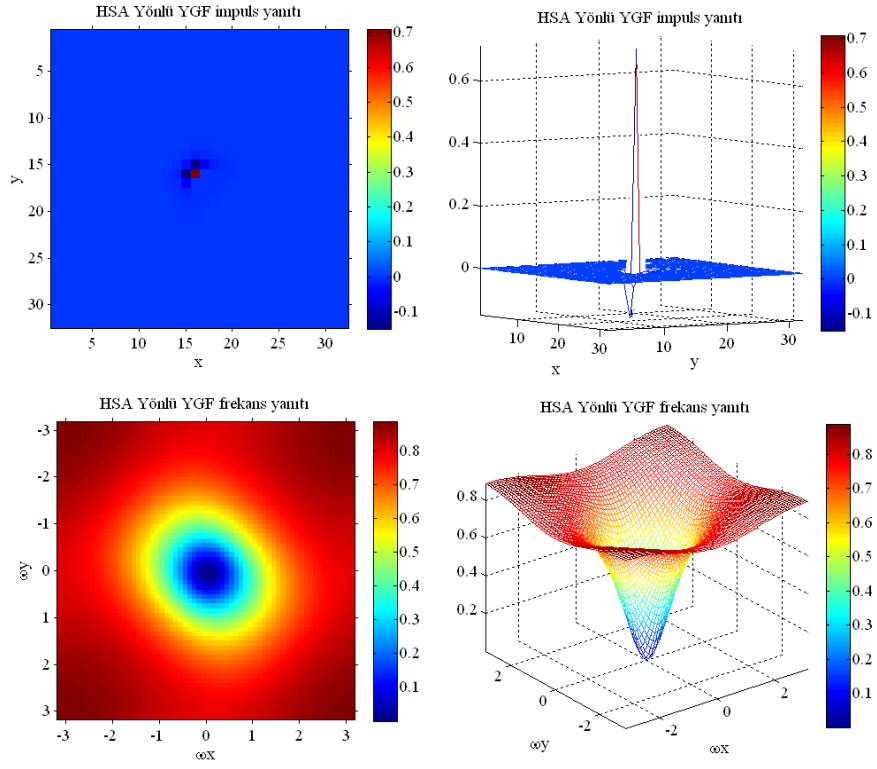
$$\begin{aligned} v_{i,j} + \alpha \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2} + \beta \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2} - \gamma^2 (v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) \\ = - (u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - 4u_{i,j}) \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} -u_{i+1,j} - u_{i-1,j} - u_{i,j+1} - u_{i,j-1} + 4u_{i,j} \\ + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) v_{i+1,j} + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) v_{i-1,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j+1} + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j-1} - (1 + 4\gamma^2) v_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

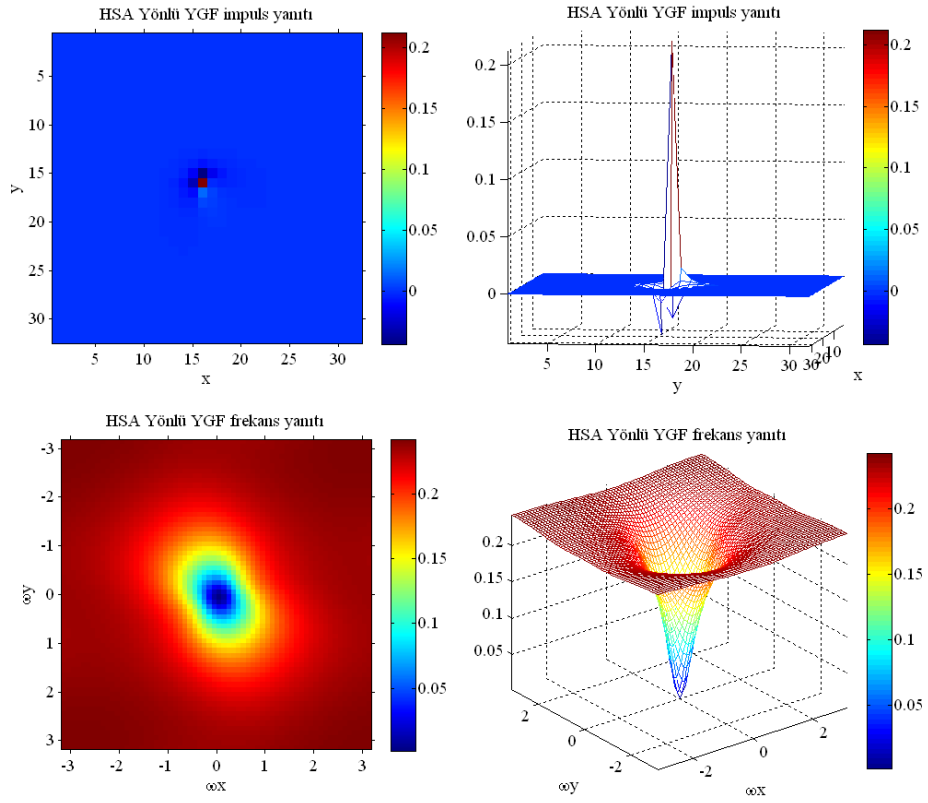
elde edilir. Bu filtreyi gerçekleştirmek için gerekli A ve B şablonları da

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 + \frac{\beta}{2} & 0 \\ \gamma^2 + \frac{\alpha}{2} & -(1 + 4\gamma^2) & \gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \\ 0 & \gamma^2 - \frac{\beta}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

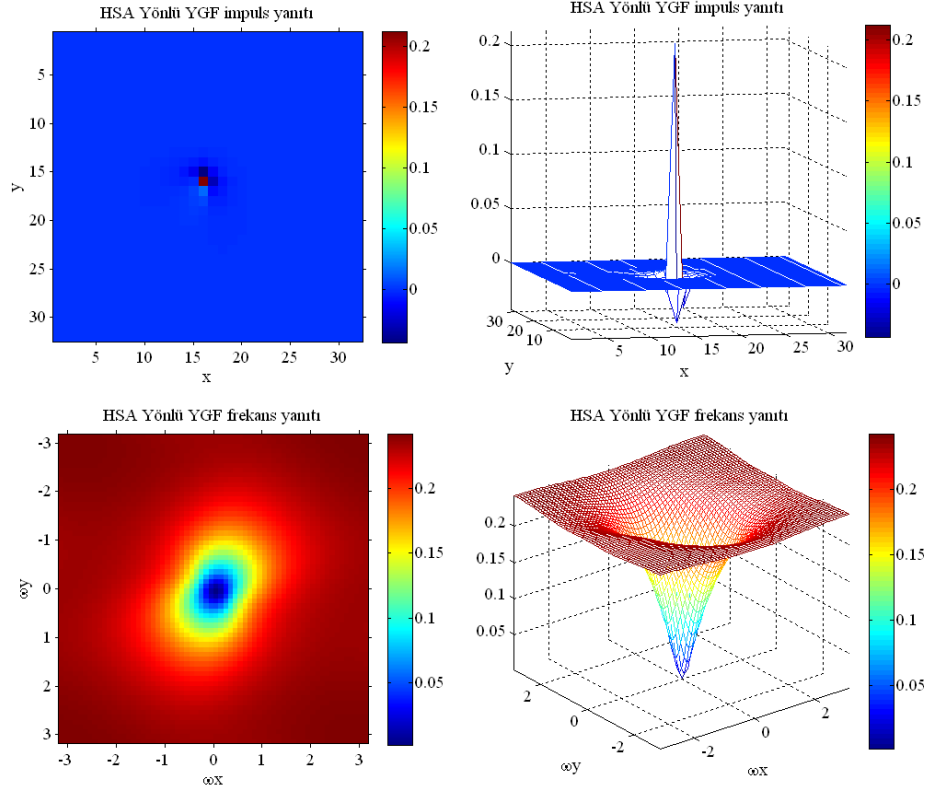
olarak bulunur. Çeşitli γ, α, β değerleri için elde edilen impuls ve genlik frekans yanıtları Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de verilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi α ve β değerleri ile filtrenin yönü belirlenmektedir.



Şekil 4.11 $\gamma=1$, $\alpha=1$, $\beta=1$ için Yönlü YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.12 $\gamma=2$, $\alpha=2$, $\beta=4$ için Yönlü YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.13 $\gamma = 2$, $\alpha = -2$, $\beta = 4$ için Yönlü YGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları

4.5 Uzaysal Bant Geçiren HSA Filtresi

Bant geçiren sürekli-uzay filtresinin diferansiyel denklemi

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = \mu \frac{\partial u(x, y)}{\partial x} + \nu \frac{\partial u(x, y)}{\partial y} \quad (4.31)$$

olarak bulunmuştur. Bu denklem örneklenerek

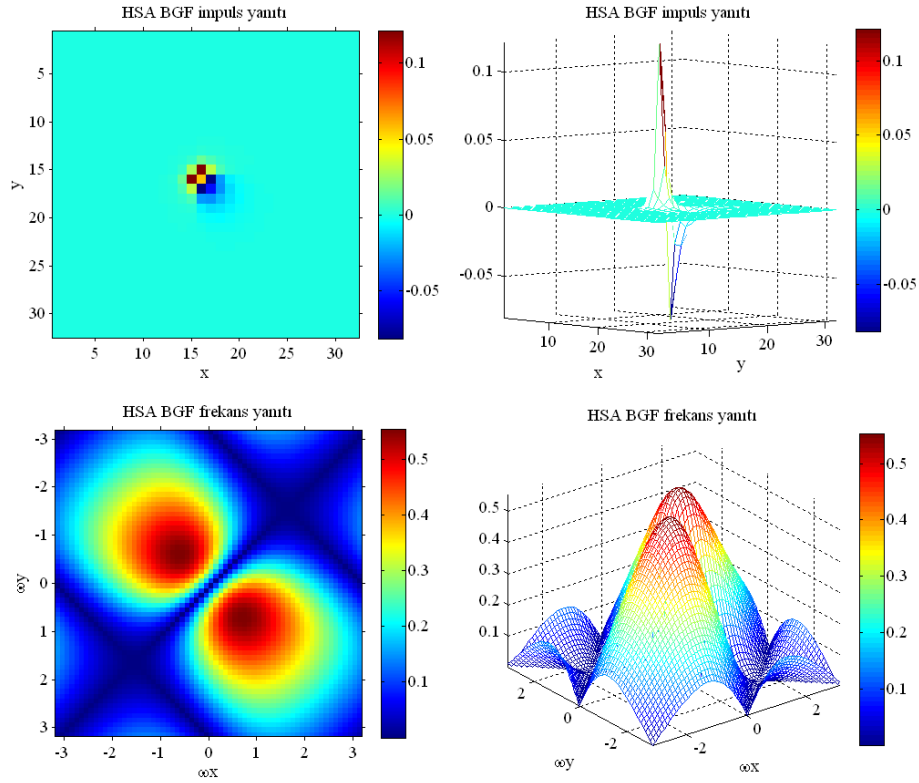
$$\begin{aligned} v_{i,j} + \alpha \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2} + \beta \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2} - \gamma^2 (v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) \\ = \mu \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2} + \nu \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2} \end{aligned} \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{2} u_{i+1,j} - \frac{\mu}{2} u_{i-1,j} + \frac{\nu}{2} u_{i,j+1} - \frac{\nu}{2} u_{i,j-1} \\ + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) v_{i+1,j} + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) v_{i-1,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j+1} + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j-1} - (1 + 4\gamma^2) v_{i,j} = 0 \end{aligned} \quad (4.33)$$

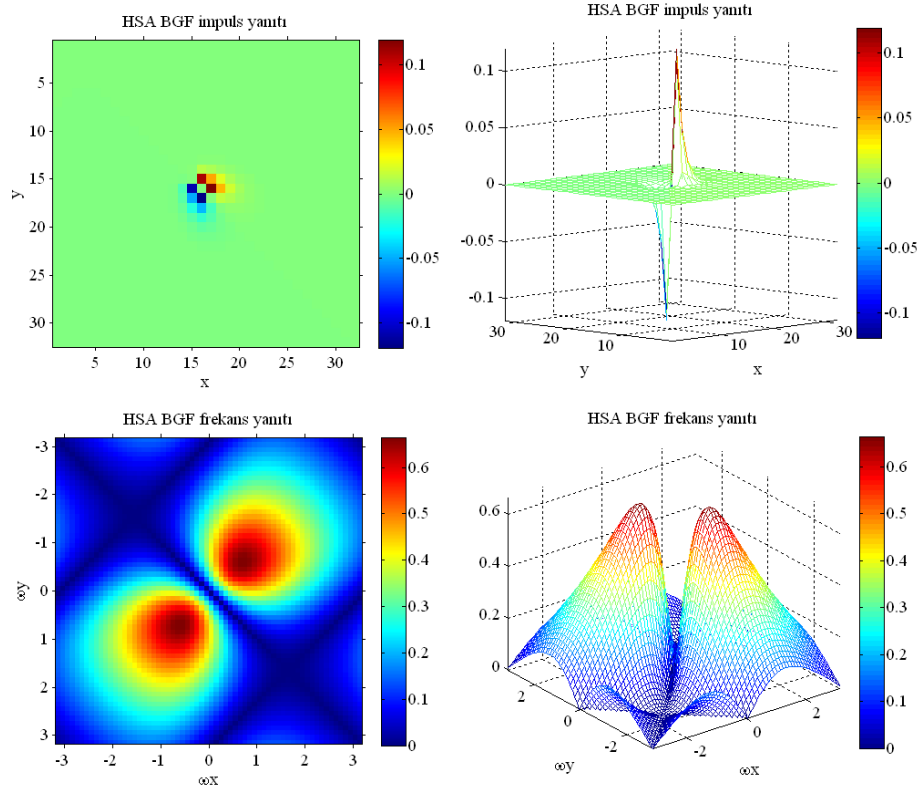
elde edilir. Bu filtrenin HSA şablonları ise

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 + \frac{\beta}{2} & 0 \\ \gamma^2 + \frac{\alpha}{2} & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \\ 0 & \gamma^2 - \frac{\beta}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\nu}{2} & 0 \\ -\frac{\mu}{2} & 0 & \frac{\mu}{2} \\ 0 & \frac{\nu}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

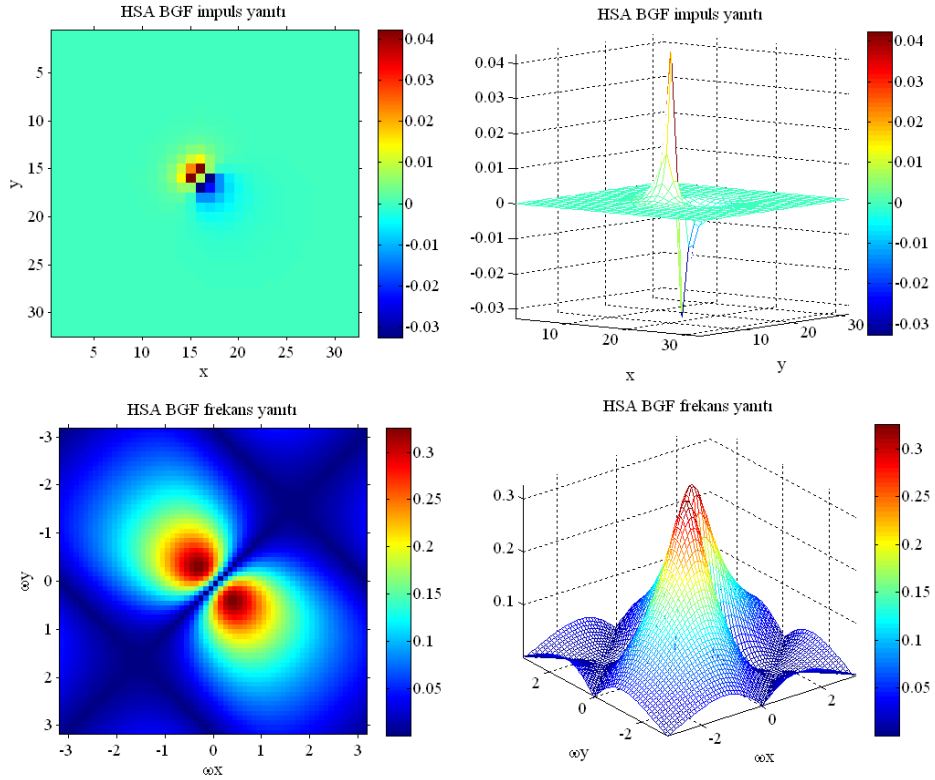
olarak bulunur. Çeşitli $\gamma, \alpha, \beta, \mu, \nu$ değerleri için elde edilen impuls ve genlik frekans yanıtları Şekil 4.14, Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.19'da verilmiştir.



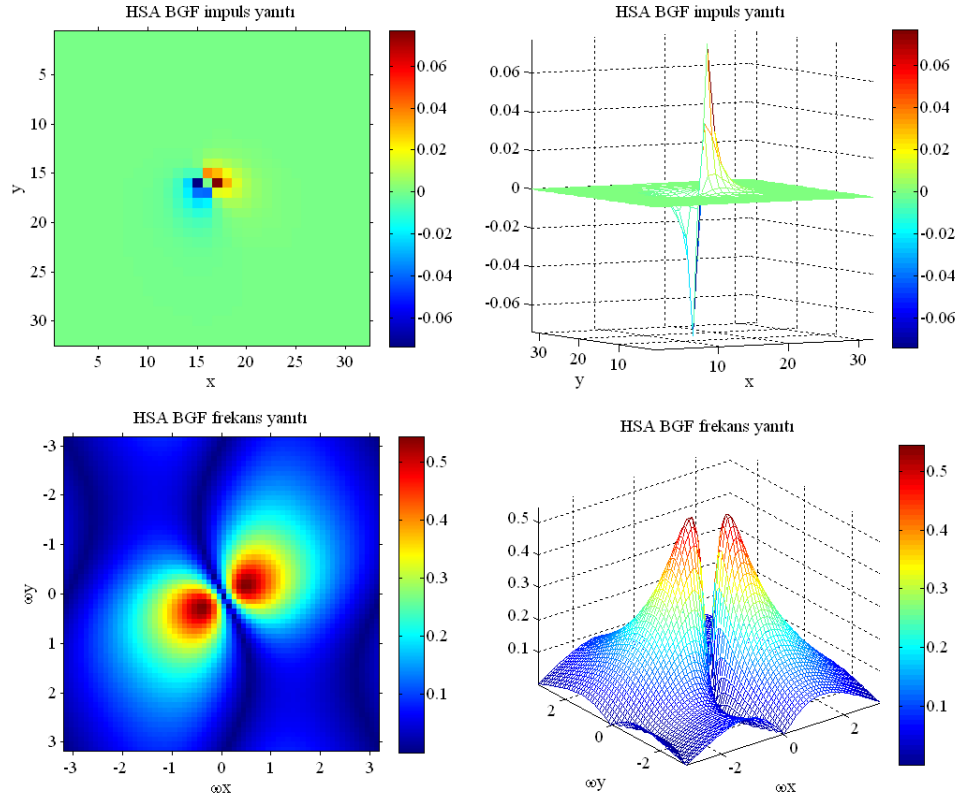
Şekil 4.14 $\gamma=1, \alpha=1, \beta=1, \mu=1, \nu=1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



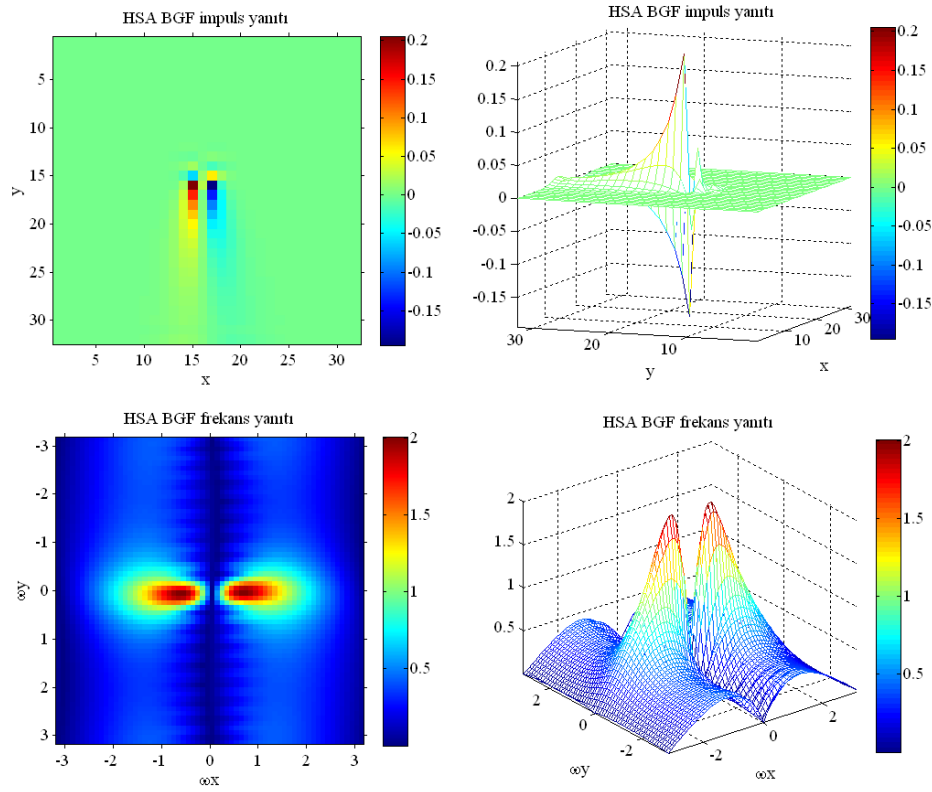
Şekil 4.15 $\gamma=1, \alpha=1, \beta=1, \mu=-1, \nu=1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



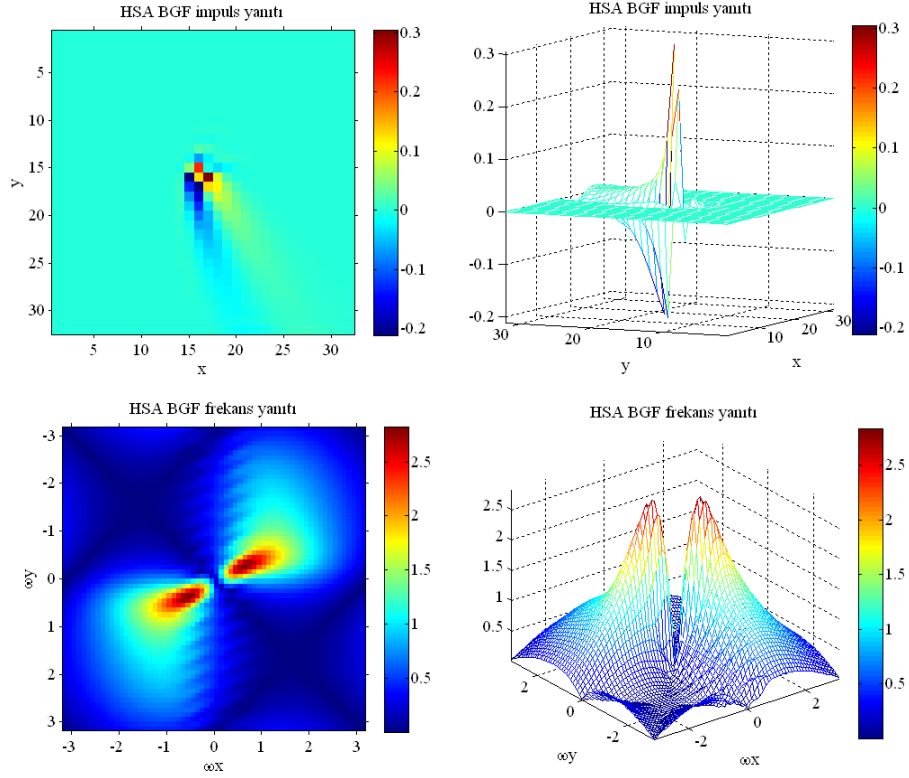
Şekil 4.16 $\gamma=2, \alpha=1, \beta=1, \mu=1, \nu=1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.17 $\gamma=1, \alpha=1, \beta=2, \mu=-2, \nu=1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.18 $\gamma=2, \alpha=1, \beta=20, \mu=10, \nu=1$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.19 $\gamma = 2, \alpha = 10, \beta = 20, \mu = -10, \nu = 10$ için BGF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları

4.6 Uzaysal Bant Söndüren HSA Filtresi

Bant söndüren sürekli-uzay filtresinin diferansiyel denklemi

$$v(x, y) + \alpha \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + \beta \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y) = \eta^2 u(x, y) - \nabla^2 u(x, y) \quad (4.35)$$

olarak bulunmuştu. Bu denklem örneklenerek

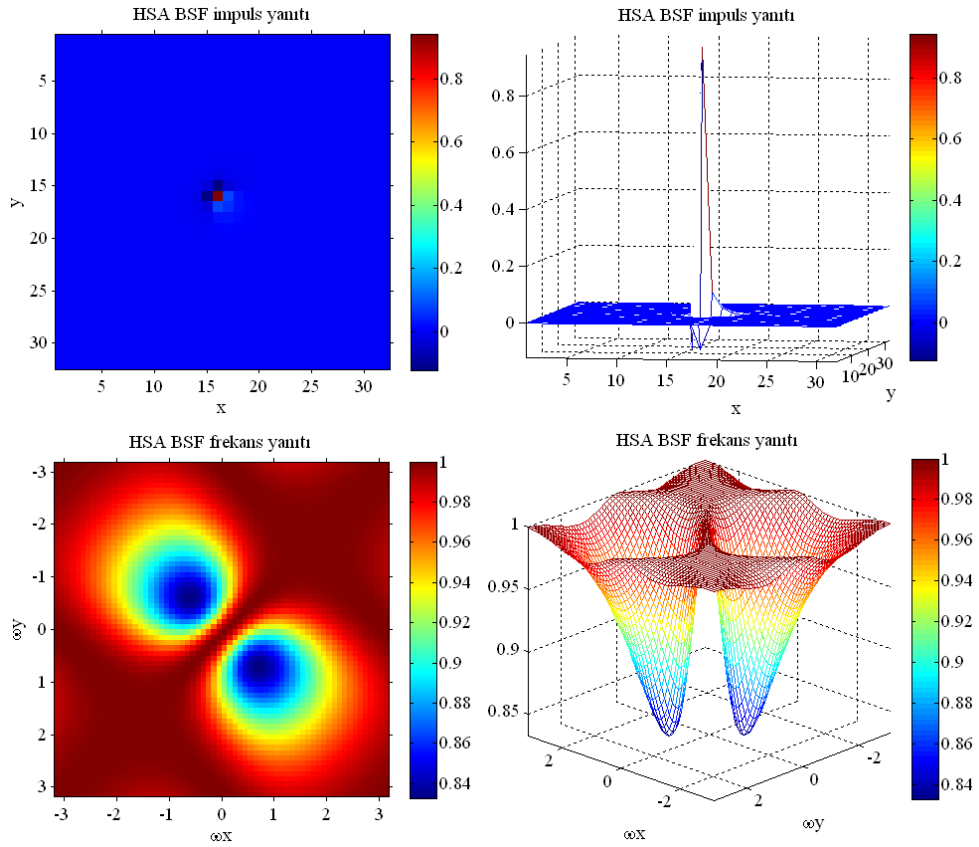
$$v_{i,j} + \alpha \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2} + \beta \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2} - \gamma^2 (v_{i+1,j} + v_{i-1,j} + v_{i,j+1} + v_{i,j-1} - 4v_{i,j}) = \eta^2 u_{i,j} - (u_{i+1,j} + u_{i-1,j} + u_{i,j+1} + u_{i,j-1} - 4u_{i,j}) \quad (4.36)$$

$$-u_{i+1,j} - u_{i-1,j} - u_{i,j+1} - u_{i,j-1} + (\eta^2 + 4)u_{i,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2}\right)v_{i+1,j} + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2}\right)v_{i-1,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2}\right)v_{i,j+1} + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2}\right)v_{i,j-1} - (1 + 4\gamma^2)v_{i,j} = 0 \quad (4.37)$$

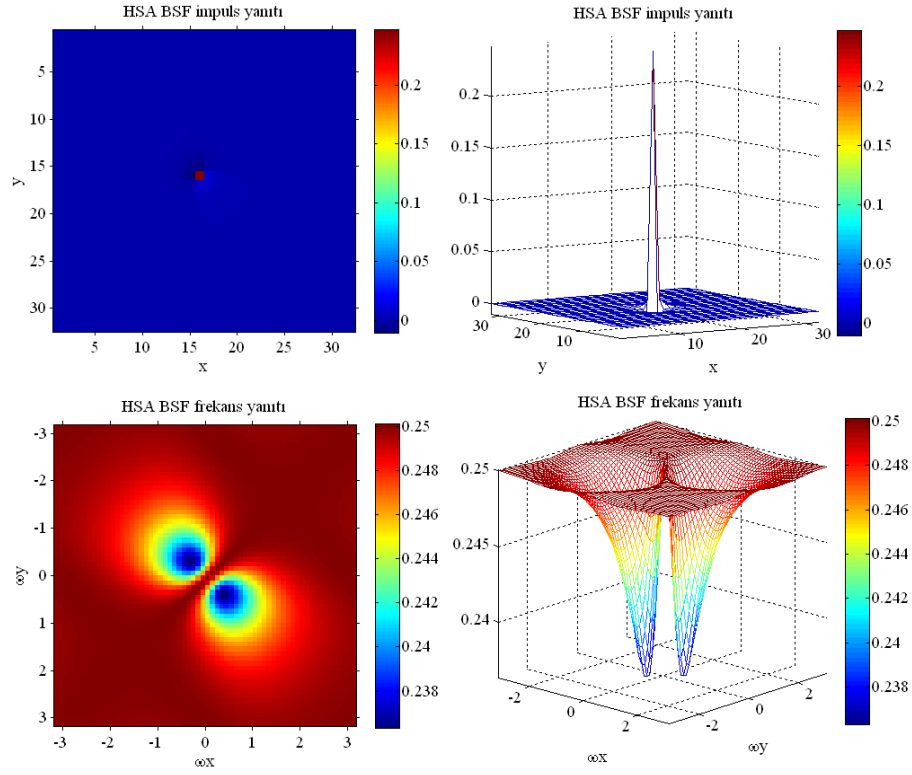
elde edilir. Bu filtrenin HSA şablonları ise

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 + \frac{\beta}{2} & 0 \\ \gamma^2 + \frac{\alpha}{2} & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \\ 0 & \gamma^2 - \frac{\beta}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & \eta^2 + 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

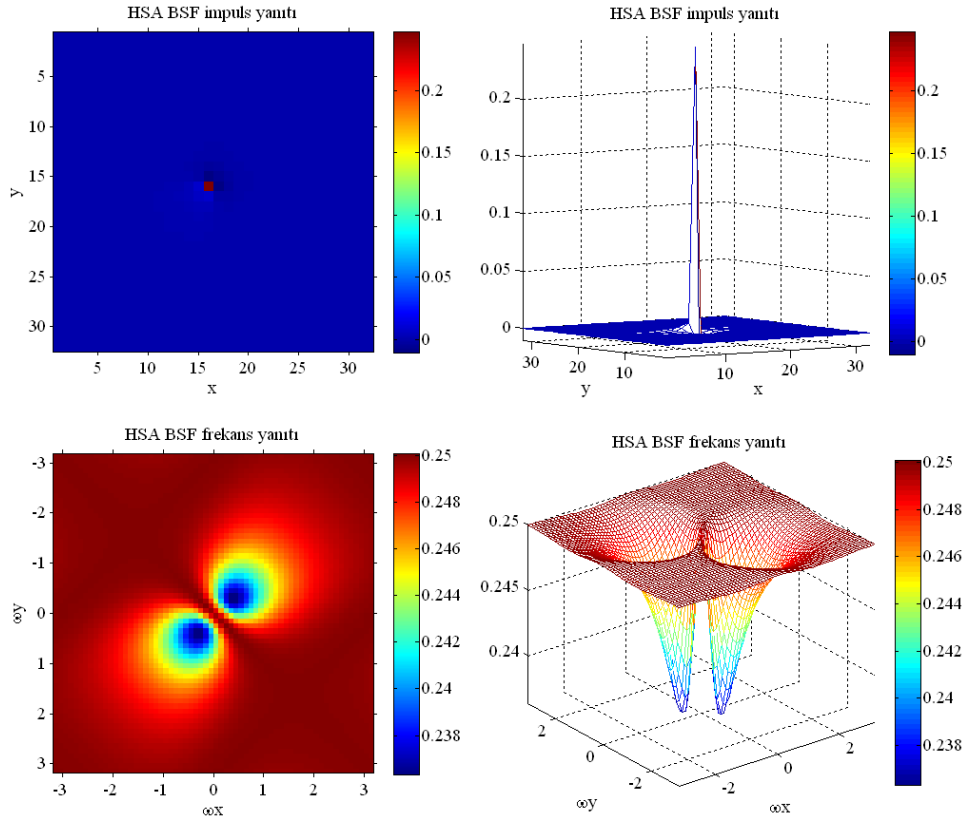
olarak bulunur. Çeşitli $\gamma, \alpha, \beta, \eta$ değerleri için elde edilen impuls ve genlik frekans yanıtları Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23 ve Şekil 4.24’de verilmiştir.



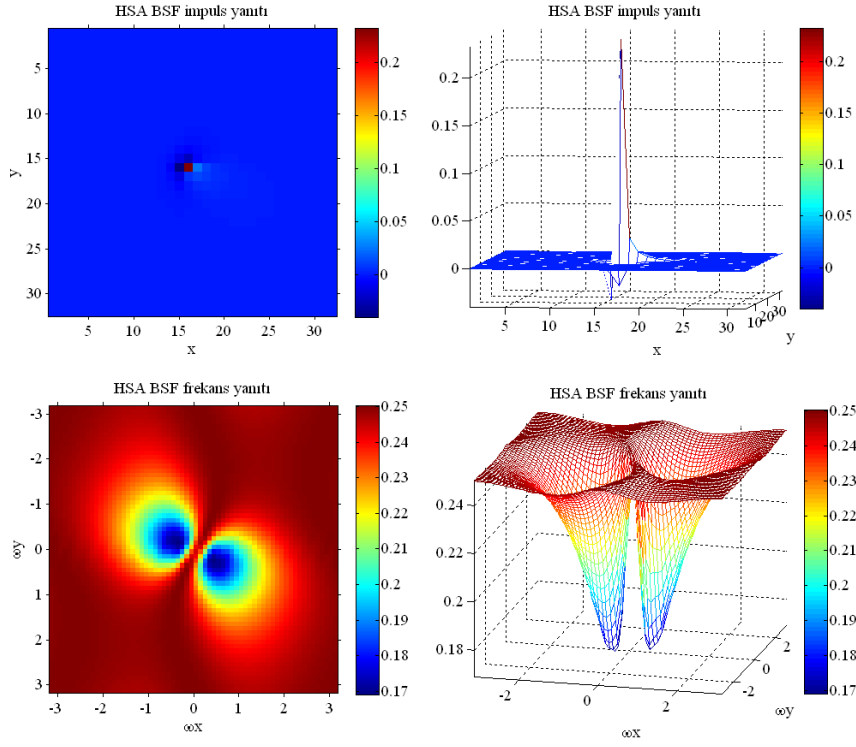
Şekil 4.20 $\gamma=1, \alpha=1, \beta=1, \eta=1$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



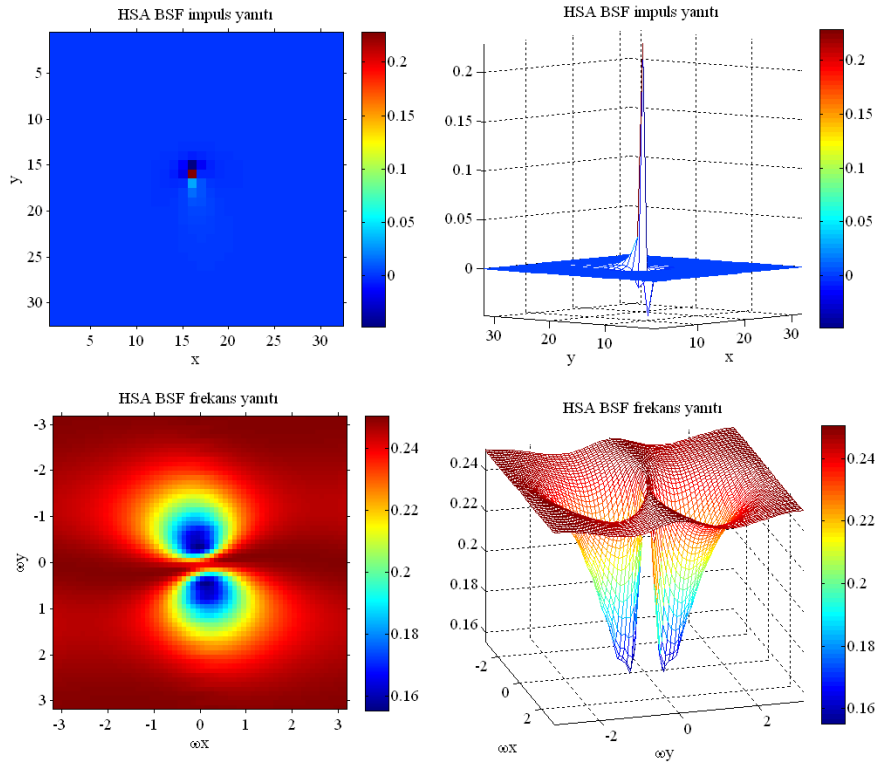
Şekil 4.21 $\gamma = 2$, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.22 $\gamma = 2$, $\alpha = -1$, $\beta = 1$, $\eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.23 $\gamma = 2$, $\alpha = 4$, $\beta = 2$, $\eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 4.24 $\gamma = 2$, $\alpha = 1$, $\beta = 5$, $\eta = 0.5$ için BSF HSA impuls ve genlik frekans yanıtları

4.7 Uzaysal Gabor HSA Filtresi

Gabor filtrelerinin sakıncası konvolüsyon işlemi nedeniyle yoğun işlem gücü gerektirmeleridir. Bu filtreler HSA ile gerçekleştirildiğinde bu işlem yoğunluğu problemi ortadan kalkmaktadır. Shi çeşitli çalışmalarında Gabor filtresi benzeri filtreleri HSA ile gerçekleştirmiştir (Shi, 1998). HSA ile gerçekleştirilebilen Gabor filtresi benzeri filtrelerin zarfı Gauss fonksiyonu şeklinde değil, üstel fonksiyon şeklindedir. Shi çalışmalarında bu filtreleri Gabor tipi filtreler olarak adlandırmaktadır.

Gauss benzeri filtreyi HSA ile gerçekleştirmek için gereken şablon değerleri

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -(4 + \lambda^2) & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

olarak verilmektedir (Shi, 1993). Bu şablon değerleri $\lambda = \frac{1}{\gamma}$ alınırsa dairesel simetrik uzaysal alçak geçiren HSA filtresinin şablonlarının aynısıdır.

Bu şekilde oluşturulan lineer HSA filtresinin transfer fonksiyonu bölüm 2.2’de gösterildiği gibi

$$\frac{V(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})}{U(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y})} = H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = - \frac{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 B(k, l) e^{jk\omega_x} e^{jl\omega_y}}{\sum_{k=-1}^1 \sum_{l=-1}^1 A(k, l) e^{jk\omega_x} e^{jl\omega_y}} \quad (4.40)$$

$$\begin{aligned} H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) &= \frac{\lambda^2}{4 + \lambda^2 - 2 \cos \omega_x - 2 \cos \omega_y} = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2(1 - \cos \omega_x) + 2(1 - \cos \omega_y)} \\ &= \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2 \left(2 \sin^2 \frac{\omega_x}{2} \right) + 2 \left(2 \sin^2 \frac{\omega_y}{2} \right)} \end{aligned} \quad (4.41)$$

olarak bulunur. ω_x ve ω_y küçük ise $\sin^2 \frac{\omega}{2} = \left(\frac{\omega}{2} \right)^2 = \frac{\omega^2}{4}$ yazılabilir. Bu durumda

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \cong \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + \omega_x^2 + \omega_y^2} \quad (4.42)$$

olur. $(\omega_{x0}, \omega_{y0})$ merkez frekanslı bir Gabor tipi filtrenin HSA şablon katsayıları ise

$$A = \begin{bmatrix} 0 & e^{j\omega_{y0}} & 0 \\ e^{j\omega_{x0}} & -(4 + \lambda^2) & e^{-j\omega_{x0}} \\ 0 & e^{-j\omega_{y0}} & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

olarak verilmektedir (Shi, 1993). Bu filtrenin transfer fonksiyonu da

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2(1 - \cos(\omega_x - \omega_{x0})) + 2(1 - \cos(\omega_y - \omega_{y0}))} \quad (4.44)$$

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2\left(2 \sin^2 \frac{\omega_x - \omega_{x0}}{2}\right) + 2\left(2 \sin^2 \frac{\omega_y - \omega_{y0}}{2}\right)} \quad (4.45)$$

elde edilir. Yine ω_x ve ω_y küçük ise $\sin^2 \frac{\omega}{2} = \left(\frac{\omega}{2}\right)^2 = \frac{\omega^2}{4}$ yazılabilir. Böylece

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}) \approx \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + (\omega_x - \omega_{x0})^2 + (\omega_y - \omega_{y0})^2} \quad (4.46)$$

bulunur. Gabor tipi HSA filtresinin frekans yanıtı Gauss tipi HSA filtresinin frekans yanıtının $(\omega_{x0}, \omega_{y0})$ frekansına ötelenmiştir.

Gabor tipi filtrenin HSA diferansiyel denklemi

$$\frac{dv_{i,j}}{dt} - \left(v_{i-1,j} e^{j\omega_{x0}} + v_{i+1,j} e^{-j\omega_{x0}} + v_{i,j-1} e^{j\omega_{y0}} + v_{i,j+1} e^{-j\omega_{y0}} - 4v_{i,j} \right) + \lambda^2 v_{i,j} = \lambda^2 u_{i,j} \quad (4.47)$$

şeklindedir. Bu denklem

$$\frac{dv_{i,j}}{dt} = \left(v_{i-1,j} e^{j\omega_{x0}} + v_{i+1,j} e^{-j\omega_{x0}} + v_{i,j-1} e^{j\omega_{y0}} + v_{i,j+1} e^{-j\omega_{y0}} \right) - (4 + \lambda^2) v_{i,j} + \lambda^2 u_{i,j} \quad (4.48)$$

veya

$$\begin{aligned} \frac{dv_{i,j}}{dt} &= \cos \omega_{x0} (v_{i-1,j} - 2v_{i,j} + v_{i+1,j}) + \cos \omega_{y0} (v_{i,j-1} - 2v_{i,j} + v_{i,j+1}) \\ &\quad + j \sin \omega_{x0} (v_{i-1,j} - v_{i+1,j}) + j \sin \omega_{y0} (v_{i,j-1} - v_{i,j+1}) \\ &\quad \left[-(4 + \lambda^2) + 2 \cos \omega_{x0} + 2 \cos \omega_{y0} \right] v_{i,j} + \lambda^2 u_{i,j} \end{aligned} \quad (4.49)$$

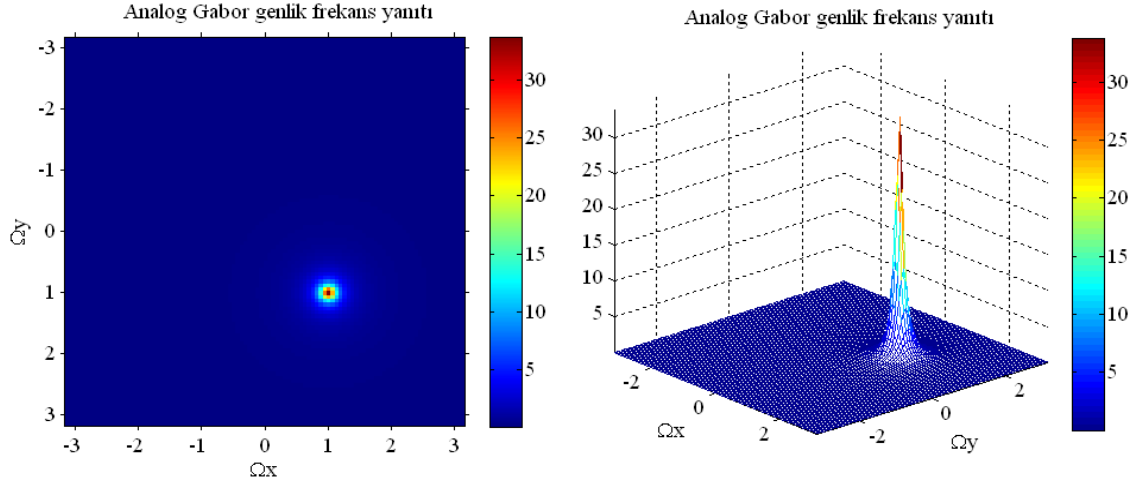
şeklinde yazılabilir. Uzaysal türevler için (4.4) eşitliği ile verilen yaklaşıklıklar kullanılırsa Gabor tipi filtrenin sürekli diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$-\cos \omega_{x0} \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial x^2} - \cos \omega_{y0} \frac{\partial^2 v(x, y)}{\partial y^2} + j2 \sin \omega_{x0} \frac{\partial v(x, y)}{\partial x} + j2 \sin \omega_{y0} \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} + \left[(4 + \lambda^2) - 2 \cos \omega_{x0} - 2 \cos \omega_{y0} \right] v(x, y) = \lambda^2 u(x, y) \quad (4.50)$$

Bu denklemin uzaysal Fourier dönüşümü alınarak transfer fonksiyonu

$$H(j\Omega_x, j\Omega_y) = \frac{\lambda^2}{(\cos \omega_{x0})\Omega_x^2 + (\cos \omega_{y0})\Omega_y^2 - 2(\sin \omega_{x0})\Omega_x - 2(\sin \omega_{y0})\Omega_y + (4 + \lambda^2) - 2 \cos \omega_{x0} - 2 \cos \omega_{y0}} \quad (4.51)$$

olarak elde edilir. Analog Gabor tipi filtrenin genlik frekans yanıtı Şekil 4.25’de verilmektedir. Bu filtrenin impuls yanıtının zarfı Gauss fonksiyonu değil, üstel fonksiyondur.



Şekil 4.25 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = \frac{\pi}{4}$, $\lambda = 0.5$ için analog Gabor tipi filtre genlik frekans yanıtı

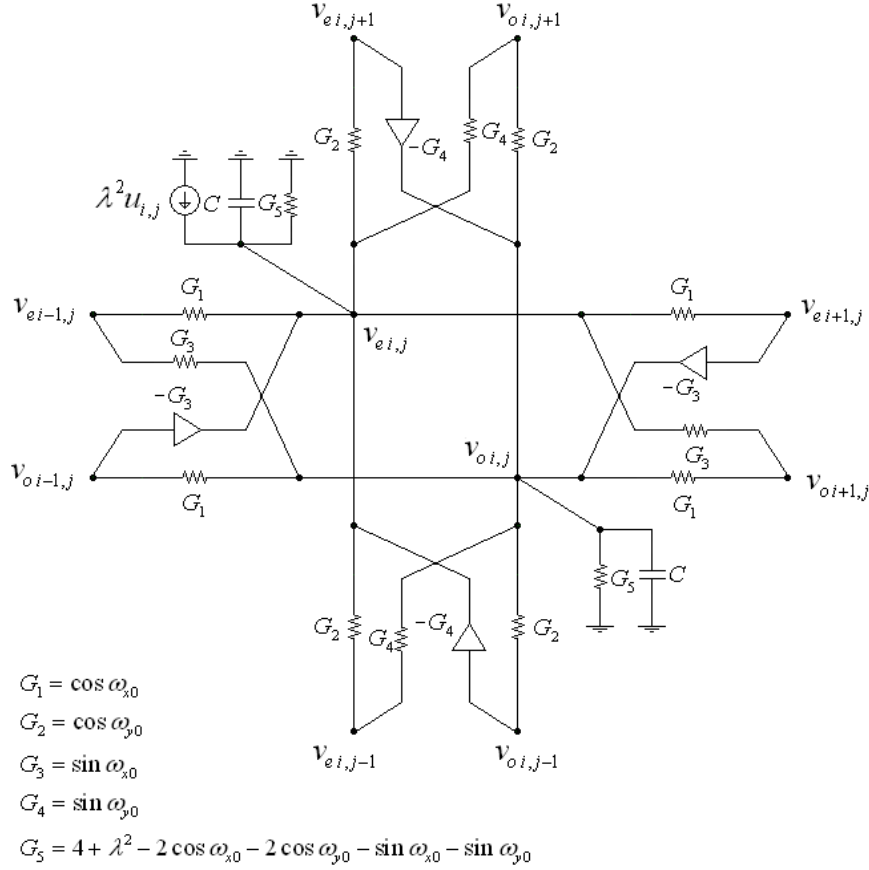
Gabor tipi filtrenin katsayıları karmaşık değerli olduğu için filtrenin gerçel ve sanal kısımlarının iki ayrı HSA katmanı ile gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bunun için (4.48) denklemini gerçel ve sanal kısımlarına ayırılım.

$$v_{i,j} = v_{ei,j} + jv_{oi,j} \quad (4.52)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ei,j}}{dt} = & v_{ei-1,j} \cdot \cos \omega_{x0} - v_{oi-1,j} \sin \omega_{x0} + v_{ei+1,j} \cdot \cos \omega_{x0} + v_{oi+1,j} \sin \omega_{x0} \\ & + v_{ei,j-1} \cos \omega_{y0} - v_{oi,j-1} \sin \omega_{y0} + v_{ei,j+1} \cos \omega_{y0} + v_{oi,j+1} \sin \omega_{y0} - (4 + \lambda^2) v_{ei,j} + \lambda^2 u_{i,j} \end{aligned} \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{oi,j}}{dt} = & v_{ei-1,j} \cdot \sin \omega_{x0} + v_{oi-1,j} \cos \omega_{x0} - v_{ei+1,j} \cdot \sin \omega_{x0} + v_{oi+1,j} \cos \omega_{x0} \\ & + v_{ei,j-1} \sin \omega_{y0} + v_{oi,j-1} \cos \omega_{y0} - v_{ei,j+1} \sin \omega_{y0} + v_{oi,j+1} \cos \omega_{y0} - (4 + \lambda^2) v_{oi,j} \end{aligned} \quad (4.54)$$

Gabor tipi filtreyi gerçekleştiren HSA devresinin (i,j) düğümü Şekil 4.26'da verilmiştir.



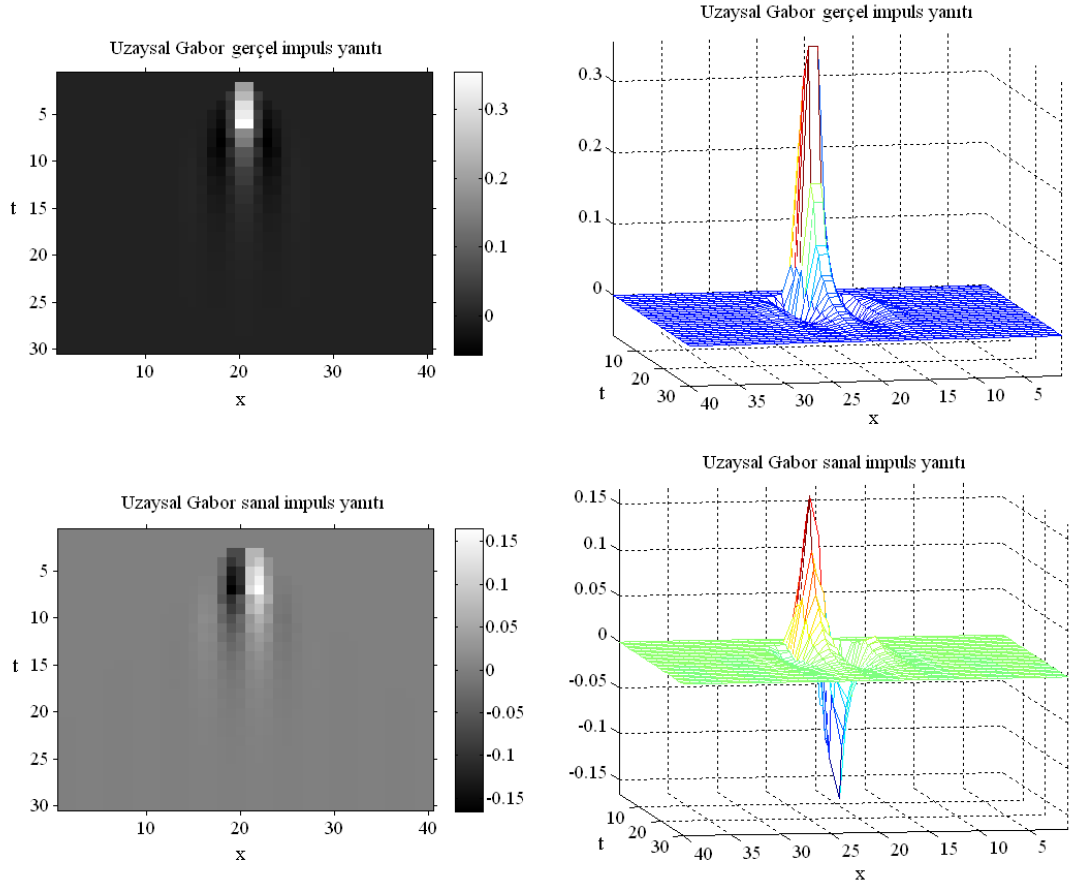
Şekil 4.26 Uzaysal Gabor tipi filtre (i,j) düğümü ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin HSA devresi

4.7.1 Uzaysal Gabor Tipi Filtrenin HSA Simülasyonu

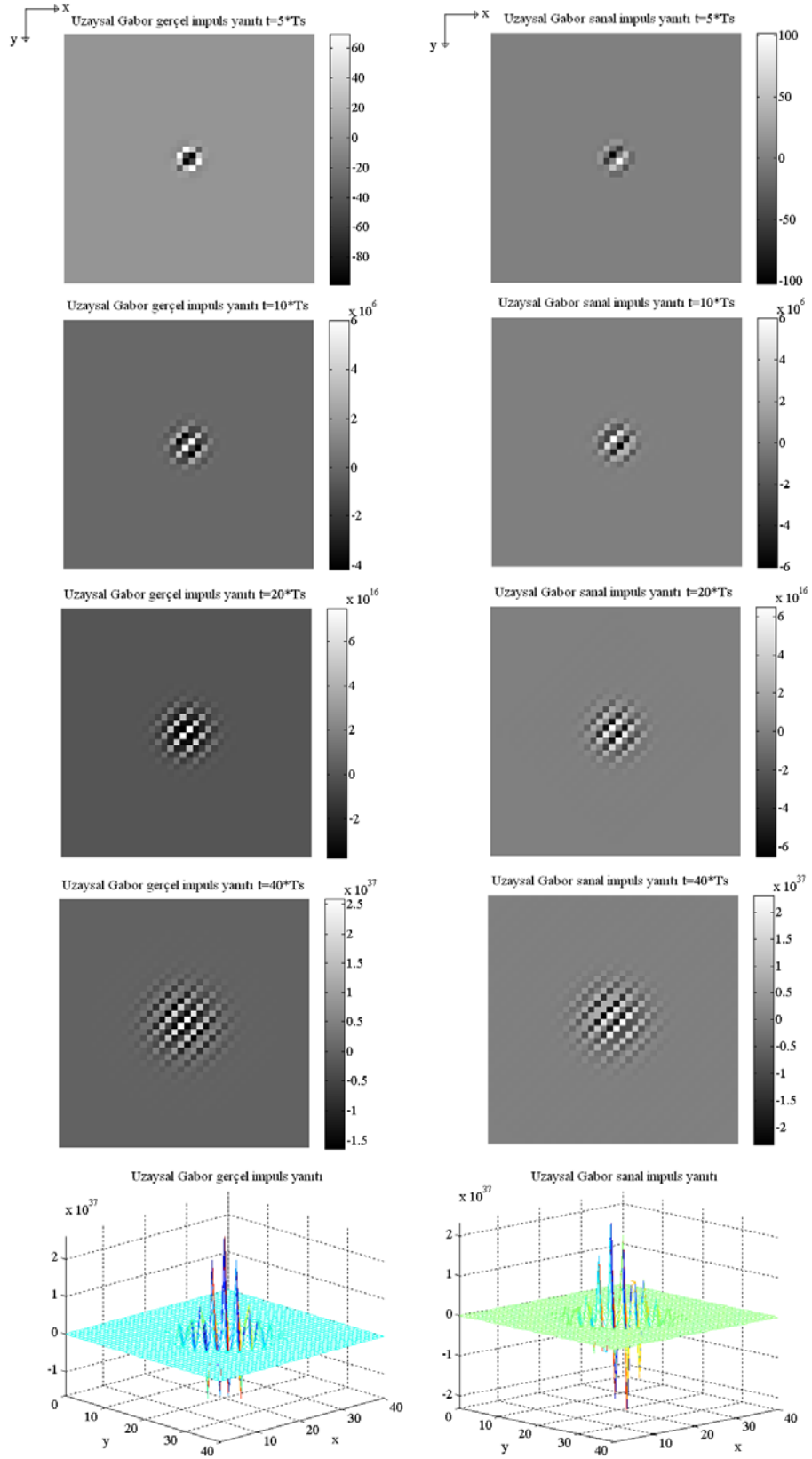
Uzaysal Gabor tipi filtrenin gerçel (denklem (4.53)) ve sanal (denklem (4.54)) kısımlarını ifade eden HSA denklemlerinin simülasyonu, uzaysal filtrenin zamanla değişimini aynı şekil üzerinde görebilmek için önce bir boyutlu HSA için yapılmıştır (Şekil 4.27). Giriş görüntüsü olarak yalnızca ortadaki piksel değeri 1, diğer pikselleri sıfır olan uzaysal impuls girişi kullanılmıştır. Böylece elde edilen çıkış işareti filtrenin impuls yanıtıdır. Şekil 4.27'den görüleceği gibi filtrenin impuls yanıtı x yönünde Gabor fonksiyonudur.

İki boyutlu uzaysal Gabor filtresinin simülasyon sonuçları Şekil 4.28'de verilmektedir. Çıkış

işaretinin belli t anlarındaki değerleri şekilde gösterilmiştir. Belli bir süre sonra impuls yanıtının iki boyutlu Gabor fonksiyonu haline geldiği görülmektedir.



Şekil 4.27 Bir boyutlu Uzaysal Gabor tipi filtre gerçel ve sanal impuls yanıtları



Şekil 4.28 İki boyutlu uzaysal Gabor tipi filtre gerçel ve sanal impuls yanıtlarının belli t anlarındaki değerleri. $t = 40T_s$ 'e gelindiğinde devre çıkışlarında iki boyutlu Gabor tipi filtre elde edilmektedir.

4.8 Sonuçlar

Bu bölümde görme sistemlerinin modellenmesinde özellik çıkarıcı filtreler olarak kullanılan çeşitli uzaysal filtre yapılarının HSA ile gerçekleştirilmesi hakkında bilgi verilmiştir. Bu filtreler görüntüdeki uzaysal bileşenlerin analizinde kullanılırlar ve HSA ile gerekleştirildiklerinde büyük hız avantajı sağlarlar.

Dairesel simetrik alçak geçiren filtreler görüntüdeki yüksek frekanslı bileşenleri süzerler ve işaret geçişlerini yumuşatırlar. Uzaysal yönlü filtreler ve Gabor filtreleri görüntüdeki belli yöndeki veya belli frekanstaki işaretleri seçmek için kullanılırlar. Bu temel filtre yapılarına zamansal değişimlerin eklenmesi ile Bölüm 5'deki uzay-zamansal filtre yapıları elde edilecektir. Bu bölümde bahsi geçen filtrelerin HSA ile gerçekleştirilmesi için gerekli şablon katsayıları (ki bu katsayılar literatürde genellikle verilmemektedir) ayrıntılı olarak hesaplanmıştır ve filtrelerin HSA simülasyonları sonucunda elde edilen uzaysal impuls yanıtları verilmiştir.

5. HSA İLE GERÇEKLEŞTİRİLEN UZAY-ZAMANSAL FİLTRELER

Bu bölümde ise bölüm 3’de incelenen sürekli-uzay-zaman filtrelerinin HSA ile gerçekleştirilmesi hakkında bilgi verilecektir. Bunun için yine filtre diferansiyel denklemleri uzayda ayrıklaştırılacaktır. HSA ile gerçekleştirilen uzay-zamansal filtreler ayrık-uzay, sürekli zaman filtreleridir. Bu bölümde incelenen uzay-zamansal filtreler, retinanın OPL katmanında gerçekleştirilen temel özellik çıkarma işlemlerini gerçekleştirmektedir.

HSA ile uzaysal görüntü işleme uygulamalarında çıkış işareti HSA denkleminde sol taraftaki türevli ifade sıfıra gittiğinde elde edilir. Uzay-zamansal filtreleme işlemlerinde ise zamanla değişim sürerken yani türevli ifade sıfırdan farklıken çıkış elde edilir.

Bölüm 4’de verilen uzaysal HSA filtreleri zamanda alçak geçiren filtrelerdir çünkü belli bir süre sonra zamansal değişimler (türevler) sıfırlanmaktadır. Bu bölümde zamansal değişimlerin var olduğu durum incelenecektir.

5.1 Dairesel Simetrik Uzay-Zamansal Alçak Geçiren HSA Filtresi

Alçak geçiren SUZF’nin diferansiyel denklemi bölüm 3.3.1’de elde edilmişti. Bu diferansiyel denklemi burada tekrar yazalım:

$$v(x, y, t) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y, t) + \tau \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial t} = u(x, y, t) \quad \text{Equation Section (Next)} \quad (5.1)$$

Bu diferansiyel denklemi uzayda ayrıklaştırmak için yine $v(x, y, t)$, $u(x, y, t)$, $\frac{\partial^2 v(x, y, t)}{\partial x^2}$ ve

$\frac{\partial^2 v(x, y, t)}{\partial y^2}$ x ve y boyutlarında örneklenirse

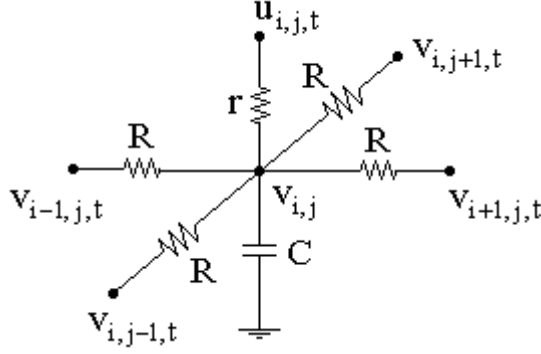
$$v_{i,j,t} - \gamma^2 (v_{i+1,j,t} + v_{i-1,j,t} + v_{i,j+1,t} + v_{i,j-1,t} - 4v_{i,j,t}) + \tau \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = u_{i,j,t} \quad (5.2)$$

elde edilir. Burada $\gamma^2 = \frac{r}{R}$ ve $\tau = rC$ alınarak

$$rC \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = \frac{r}{R} v_{i-1,j,t} + \frac{r}{R} v_{i+1,j,t} + \frac{r}{R} v_{i,j-1,t} + \frac{r}{R} v_{i,j+1,t} - \left(4 \frac{r}{R} + 1\right) v_{i,j,t} + u_{i,j,t} \quad (5.3)$$

$$C \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = \frac{v_{i-1,j,t} - v_{i,j,t}}{R} + \frac{v_{i+1,j,t} - v_{i,j,t}}{R} + \frac{v_{i,j-1,t} - v_{i,j,t}}{R} + \frac{v_{i,j+1,t} - v_{i,j,t}}{R} + \frac{u_{i,j,t} - v_{i,j,t}}{r} \quad (5.4)$$

bulunur. Bu denklemde $v_{i,j,t}$, (i,j) düğümünün t anındaki gerilimi; $v_{i-1,j,t}$, $v_{i,j-1,t}$, $v_{i+1,j,t}$, $v_{i,j+1,t}$ komşu düğümlerin t anındaki gerilimleri olarak düşünüldüğünde (5.4) denklemi Şekil 5.1'deki ızgara yapısındaki devre ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.1 Uzay-zamansal HSA AGF (i,j) düğümü

Şekil 5.1'deki devrenin uzaysal HSA AGF devresinden (Şekil 4.1) farkı her (i,j) düğümü ile referans düğümü arasındaki kapasite elemanıdır. HSA denklemindeki durumun zamanla değişimi devrede kapasite elemanı ile modellenmektedir.

Dairesel simetrik alçak geçiren HSA filtresinin transfer fonksiyonu ise

$$V(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t) \left[1 - \gamma^2 (e^{j\omega_x} + e^{-j\omega_x} + e^{j\omega_y} + e^{-j\omega_y} - 4) + \tau j\Omega_t \right] = U(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t) \quad (5.5)$$

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + 2\gamma^2 (1 - \cos \omega_x) + 2\gamma^2 (1 - \cos \omega_y) + j\tau\Omega_t} \quad (5.6)$$

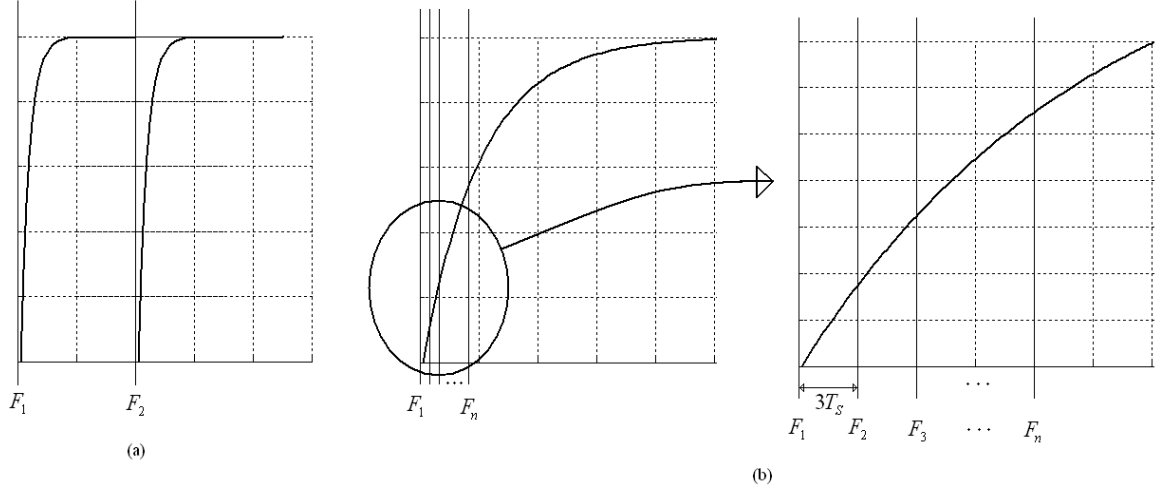
olarak bulunur.

5.1.1 Uzay-Zamansal HSA Simülasyonunun Uzaysal HSA Simülasyonundan Farkı

HSA ile görüntü işleme uygulamalarının birçoğunda HSA'nın seçilme nedeni konvolüsyon temelli dijital sistemlere kıyasla analog HSA devresinin doğası gereği çok kısa süre sonra çıkış işaretini oluşturmasıdır. Dolayısıyla genel uzaysal görüntü işleme uygulamalarında hızlı sonuç almak için devrenin zaman sabiti çok küçük seçilir (Şekil 5.2.(a)). HSA ile uzay-zamansal filtrelerin gerçekleştirilmesi için ise kapasite elemanı üzerindeki gerilimin zamanla

değişimi sürerken, yani $\frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t}$ sıfırdan farklıken girişin değişiminin devreye uygulanması gerekmektedir. Dolayısıyla uzay-zamansal görüntü işleme uygulamaları için kapasite

elemanının geriliminin, giriş işaretinin frekansına göre çok daha yavaş değiştiği kabul edilir (Şekil 5.2.(b)). Şekil 5.2’de HSA hücresinin zaman sabiti τ , simülasyonda kullanılan integrasyon adım aralığı T_s , hareketli görüntünün F_1 ve F_2 ile gösterilen iki çerçevesinin sisteme uygulanması arasında geçen süre T_F ’dir. Bu sürelerin birbirine oranla nasıl seçileceği konusu başlangıçta karmaşaya neden olan ve literatürde belirtilmeyen önemli bir ayrıntıdır.



Şekil 5.2 (a) uzaysal (b) uzay-zamansal HSA simülasyonu zaman sabiti seçimi

Yukarıda belirtildiği gibi HSA hücresinde kapasite elemanının geriliminin zamanla değişimi türevli ifadeyi temsil etmektedir. Dolayısıyla uzay-zamansal hareketli görüntülerin işlenmesi sırasında HSA hücresindeki kapasite geriliminin zamanla yavaş değiştiği kabul edilmelidir. Giriş görüntüsünün art arda gelen iki çerçevesinin düğüm geriliminin zamanla değişimi sıfırdan farklıyken devreye uygulanması gerekir, yani $T_s \approx T_F \ll \tau$ olmalıdır. Yapılan

uygulamalarda $T_s = \frac{1}{|A(0,0)|}$ seçilmektedir. $T_F = T_s$ seçildiğinde de simülasyon doğru

sonuçlar vermemiştir, deneme yanılma yoluyla $T_F = 3T_s, 4T_s$ gibi değerlerde istenen çıkışlar elde edilmiştir. U giriş görüntüsü T_F aralıklarla değiştiğinden sistemin simülasyonu şu şekilde yapılmaktadır: F_1 çerçevesi sisteme uygulanmakta, HSA denklemi 3-4 iterasyon için bu çerçeveyi sabit giriş kabul etmekte daha sonra F_2 girişi uygulanmakta ve iterasyon bu şekilde devam etmektedir. Toplam iterasyon süresi de zaman sabiti τ ’dan küçüktür.

(5.2) denklemi HSA denklemi şeklinde matrisel olarak düzenlenirse

$$\frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \left[\gamma^2 v_{i+1,j,t} + \gamma^2 v_{i-1,j,t} + \gamma^2 v_{i,j+1,t} + \gamma^2 v_{i,j-1,t} - (1 + 4\gamma^2) v_{i,j,t} + u_{i,j,t} \right] \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 & 0 \\ \gamma^2 & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 \\ 0 & \gamma^2 & 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} v_{i-1,j-1,t} & v_{i,j-1,t} & v_{i+1,j-1,t} \\ v_{i-1,j,t} & v_{i,j,t} & v_{i+1,j,t} \\ v_{i-1,j+1,t} & v_{i,j+1,t} & v_{i+1,j+1,t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} u_{i-1,j-1,t} & u_{i,j-1,t} & u_{i+1,j-1,t} \\ u_{i-1,j,t} & u_{i,j,t} & u_{i+1,j,t} \\ u_{i-1,j+1,t} & u_{i,j+1,t} & u_{i+1,j+1,t} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Elde edilir. Geri ve ileri besleme şablonları

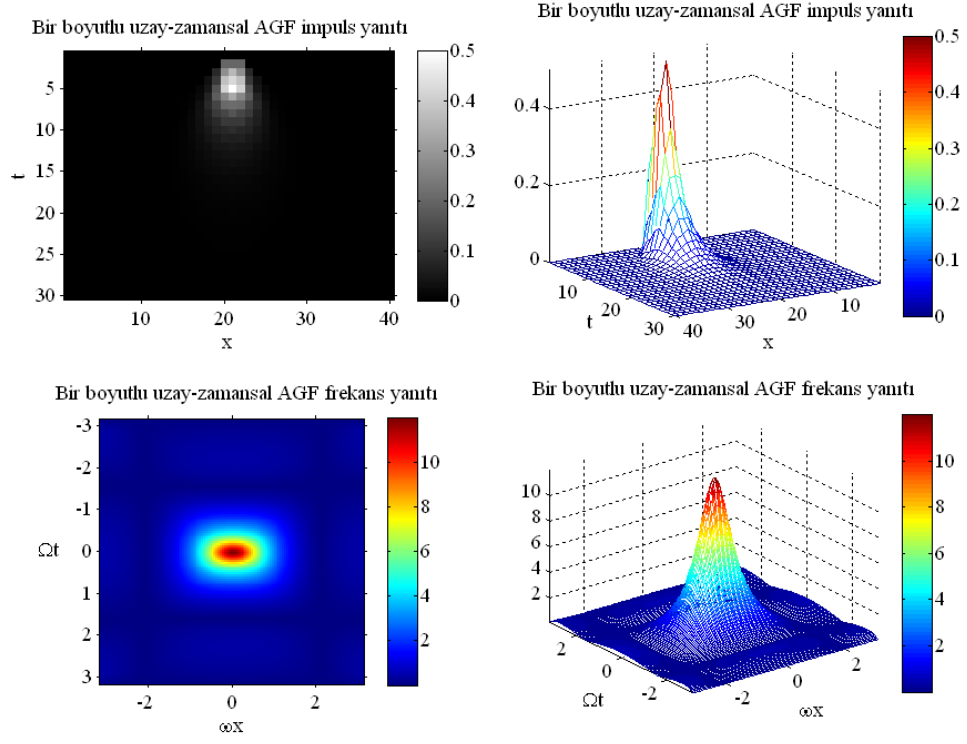
$$A = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 & 0 \\ \gamma^2 & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 \\ 0 & \gamma^2 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

olarak bulunur.

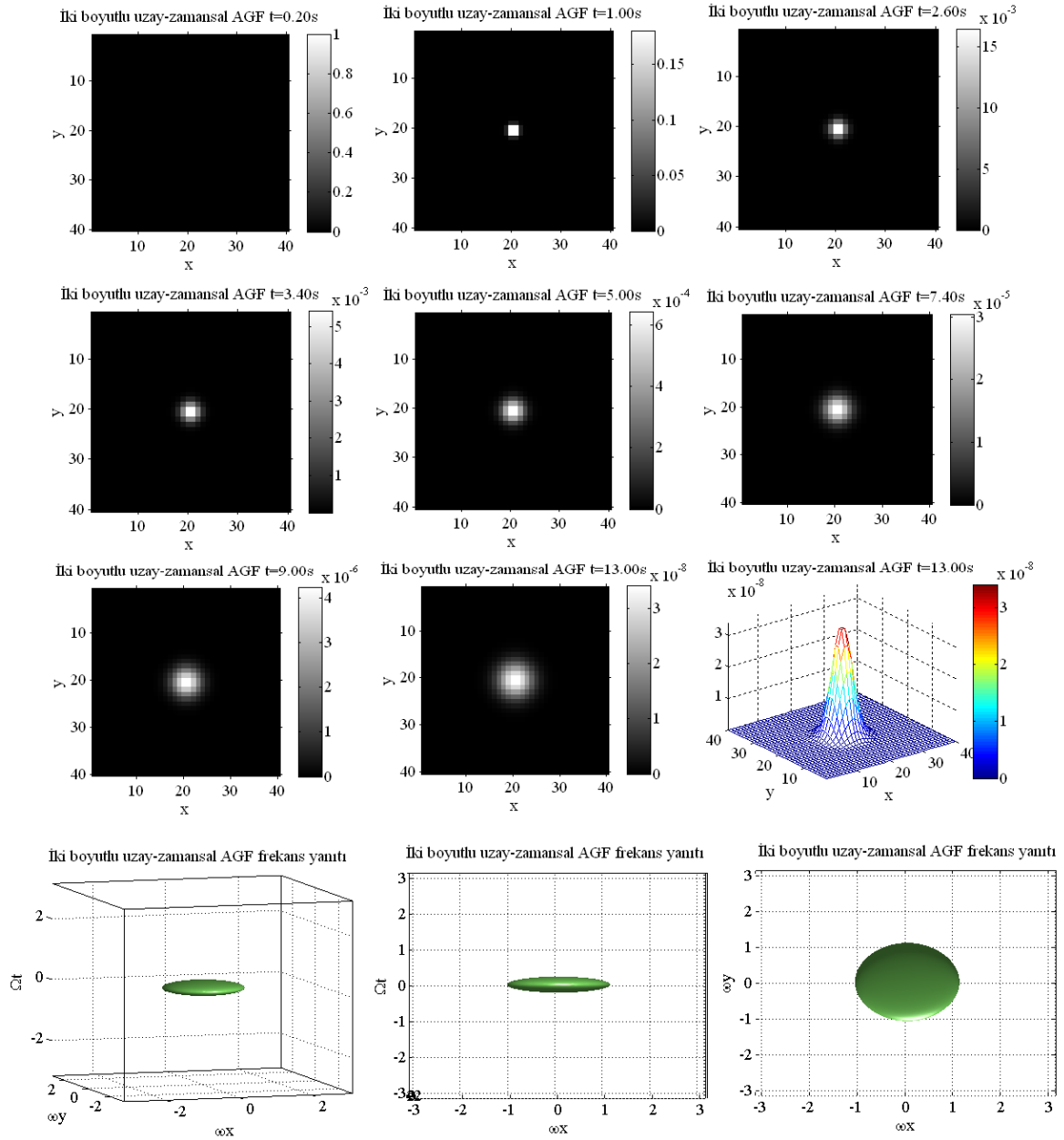
5.1.2 Uzay-Zamansal AGF HSA Simülasyonu

İki boyutlu hareketli görüntü iki uzaysal ve bir zamansal boyuta bağlı 3 değişkenli bir fonksiyondur. $f(x, y, t)$ gibi bir fonksiyonu 3 boyutta çizmek mümkün olmadığından önce bir boyutlu hareketli görüntünün simülasyonu yapılmış, $f(x, t)$ gibi bir impuls yanıtının değişimi incelenmiş, daha sonra iki boyutlu hareketli görüntü simülasyonuna geçilmiştir. İki boyutlu hareketli görüntünün simülasyon sonuçları belli t anları için verilerek sistemin iki boyutlu hareketli görüntü için de alçak geçiren filtreleme yaptığı gösterilmektedir.

Simülasyonlarda kullanılan uzay-zamansal impuls girişi ise sadece ilk çerçevesinin ortasındaki pikseli 1, diğer piksel değerleri 0 ve diğer tüm çerçevelerin de tüm piksel değerleri 0 olacak şekilde oluşturulmaktadır.



Şekil 5.3 $\gamma^2 = 2$, $\tau = 1$ için bir boyutlu uzay-zamansal AGF HSA simülasyonu impuls ve genlik frekans yanıtları



Şekil 5.4 $\gamma^2 = 0.2$, $\tau = 1$ için iki boyutlu uzay-zamansal AGF HSA simülasyonu impuls ve genlik frekans yanıtları

5.2 Yönlü Uzay-Zamansal Alçak Geçiren HSA Filtresi (Hız Ayarlı Filtre)

Yönlü alçak geçiren sürekli-uzay-zaman filtresinin diferansiyel denklemi

$$v(x, y, t) - \gamma^2 \nabla^2 v(x, y, t) + \tau \left(\frac{\partial v(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\alpha}{\tau} \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial x} + \frac{\beta}{\tau} \frac{\partial v(x, y, t)}{\partial y} \right) = u(x, y, t) \quad (5.10)$$

olarak ifade edilmişti. Bu diferansiyel denklem uzayda ayrıklaştırılırsa

$$v_{i,j,t} - \gamma^2 (v_{i+1,j,t} + v_{i-1,j,t} + v_{i,j+1,t} + v_{i,j-1,t} - 4v_{i,j,t}) + \tau \left(\frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} + \frac{\alpha}{\tau} \frac{v_{i+1,j,t} - v_{i-1,j,t}}{2} + \frac{\beta}{\tau} \frac{v_{i,j+1,t} - v_{i,j-1,t}}{2} \right) = u_{i,j,t} \quad (5.11)$$

elde edilir. (5.11) denklemi düzenlenirse

$$\tau \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = u_{i,j} - v_{i,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) v_{i+1,j} + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) v_{i-1,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j+1} + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) v_{i,j-1} - 4\gamma^2 v_{i,j} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} \tau \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = & u_{i,j} - v_{i,j} + \left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) (v_{i+1,j} - v_{i,j}) + \left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) (v_{i-1,j} - v_{i,j}) \\ & + \left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) (v_{i,j+1} - v_{i,j}) + \left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) (v_{i,j-1} - v_{i,j}) \end{aligned} \quad (5.13)$$

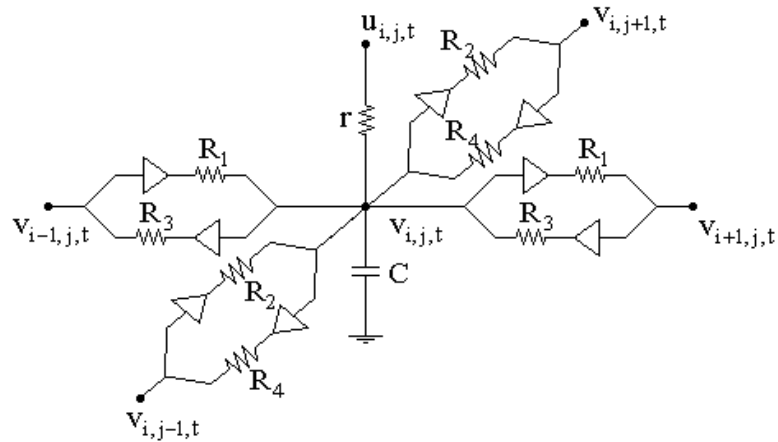
bulunur. $\left(\gamma^2 + \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{r}{R_1}$, $\left(\gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \right) = \frac{r}{R_3}$, $\left(\gamma^2 + \frac{\beta}{2} \right) = \frac{r}{R_2}$, $\left(\gamma^2 - \frac{\beta}{2} \right) = \frac{r}{R_4}$ ve $\tau = rC$ olarak

alınırsa $\frac{r}{R_1} + \frac{r}{R_3} = \frac{r}{R_2} + \frac{r}{R_4} = 2\gamma^2$, $\frac{r}{R_1} - \frac{r}{R_3} = \alpha$ ve $\frac{r}{R_2} - \frac{r}{R_4} = \beta$ olur. (5.13) denklemi ise

$$rC \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = u_{i,j} - v_{i,j} + \frac{r}{R_1} (v_{i-1,j} - v_{i,j}) + \frac{r}{R_3} (v_{i+1,j} - v_{i,j}) + \frac{r}{R_2} (v_{i,j-1} - v_{i,j}) + \frac{r}{R_4} (v_{i,j+1} - v_{i,j}) \quad (5.14)$$

$$C \frac{\partial v_{i,j,t}}{\partial t} = \frac{u_{i,j} - v_{i,j}}{r} + \frac{v_{i-1,j} - v_{i,j}}{R_1} + \frac{v_{i+1,j} - v_{i,j}}{R_3} + \frac{v_{i,j-1} - v_{i,j}}{R_2} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j}}{R_4} \quad (5.15)$$

haline gelir. Bu denklemde $v_{i,j,t}$, (i,j) düğümünün t anındaki gerilimi; $v_{i-1,j,t}$, $v_{i,j-1,t}$, $v_{i+1,j,t}$, $v_{i,j+1,t}$ komşu düğümlerin t anındaki gerilimleri olarak düşünüldüğünde (5.15) denklemi Şekil 5.5'deki devre ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 5.5 Uzay-zamansal yönlü AGF (HAF) (i,j) hücresi

Hız ayarlı filtreyi HSA ile gerçekleştirmek için gerekli şablonlar ise (5.13) denkleminde

$$A = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 0 & \gamma^2 + \frac{\beta}{2} & 0 \\ \gamma^2 + \frac{\alpha}{2} & -(1+4\gamma^2) & \gamma^2 - \frac{\alpha}{2} \\ 0 & \gamma^2 - \frac{\beta}{2} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

olarak elde edilir. Filtrenin transfer fonksiyonu ise

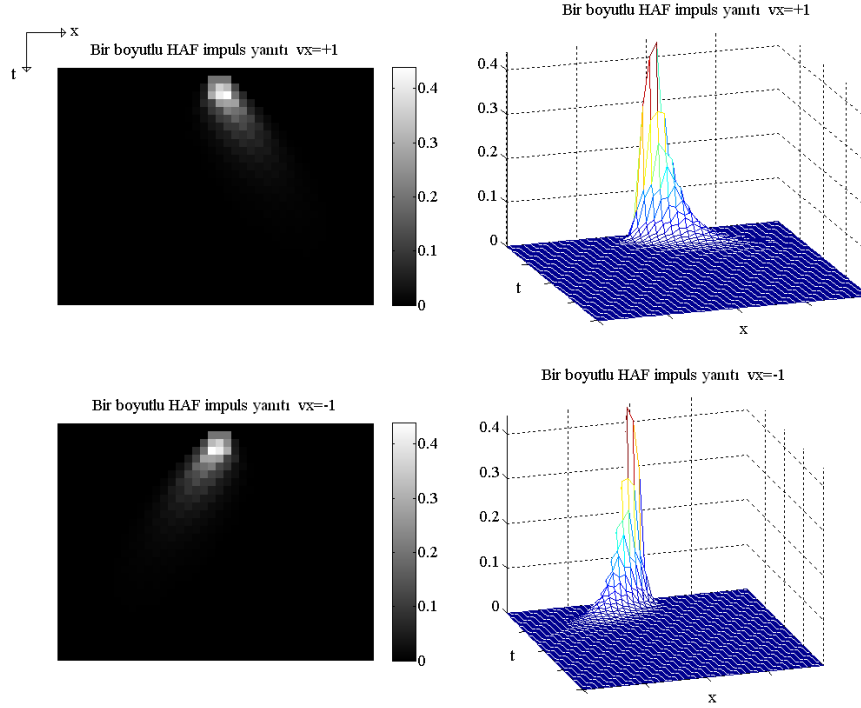
$$\frac{V(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t)}{U(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t)} = \frac{1}{1 - \gamma^2 (e^{j\omega_x} + e^{-j\omega_x} + e^{j\omega_y} + e^{-j\omega_y} + 4) + \tau \left(j\Omega_t + \frac{\alpha}{\tau} \frac{e^{j\omega_x} - e^{-j\omega_x}}{2} + \frac{\beta}{\tau} \frac{e^{j\omega_y} - e^{-j\omega_y}}{2} \right)} \quad (5.17)$$

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + 2\gamma^2 (1 - \cos \omega_x) + 2\gamma^2 (1 - \cos \omega_y) + j\tau \left(\Omega_t - \frac{\alpha}{\tau} \sin \omega_x - \frac{\beta}{\tau} \sin \omega_y \right)} \quad (5.18)$$

olarak bulunur.

5.2.1 Hız Ayarlı Filtre Simülasyonları

Tek uzaysal boyutlu iki farklı hıza ayarlı HAF için elde edilen impuls yanıtları Şekil 5.6'da görülmektedir. Şekillerden görüleceği gibi hız ayarlı filtrenin impuls yanıtı uzay-zaman düzleminde yönlüdür. Yani HAF çeşitli hızlarda hareket eden işaretlerden oluşan giriş görüntüsüne uygulanırsa yalnızca filtrenin ayarlandığı hızda giden işaret çıkışta kuvvetlendirilir (seçilmiş olur), diğer hızdakiler bulanıklaşır (seçilmemiş olur). İkinci olarak HAF'nin bu özelliğine yönelik bir simülasyon yapılmıştır.



Şekil 5.6 $v_x = +1$ ve $v_x = -1$ için bir boyutlu alçak geçiren HAF impuls yanıtları. HAF impuls yanıtları uzay-zaman düzleminde yönlüdür.

Hız seçme simülasyonunda Şekil 5.7’de gösterilen hareketli giriş görüntüsü kullanılmaktadır. Bu görüntüde siyah zemin üzerinde beyaz renkli kutucuklar çeşitli yönlerde doğru çeşitli hızlarda hareket etmektedir. Algılanmak istenen hız büyüklükleri sisteme giriş olarak verilmektedir. Yazılan program istenen hız için gereken A ve B şablonlarını hesaplamakta ve bu şablonlarla ayırık HSA denklemin iterasyonunu yapmaktadır. Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13’de farklı HAF çıkışları görülmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi filtre yalnız istenen hızda giden kutucuğu seçmekte, diğer kutucukları bulanıklaştırmaktadır.

Verilen $v_x = \frac{\alpha}{\tau}$ ve $v_y = \frac{\beta}{\tau}$ için A şablonu değerleri

$$a_x = \frac{2\gamma^2 + \tau v_x}{2}, b_x = \frac{2\gamma^2 - \tau v_x}{2}, a_y = \frac{2\gamma^2 + \tau v_y}{2}, b_y = \frac{2\gamma^2 - \tau v_y}{2} \quad (5.19)$$

bulunur. A şablonu simetrik olmadığından simülasyondaki nokta çarpım işlemleri için MATLAB içindeki hazır konvolüsyon fonksiyonu kullanılırsa şablon katsayılarının x ve y yönünde ters çevrilmesi gerektiğine dikkat edilmelidir. Döndürülmüş A ve B şablonları

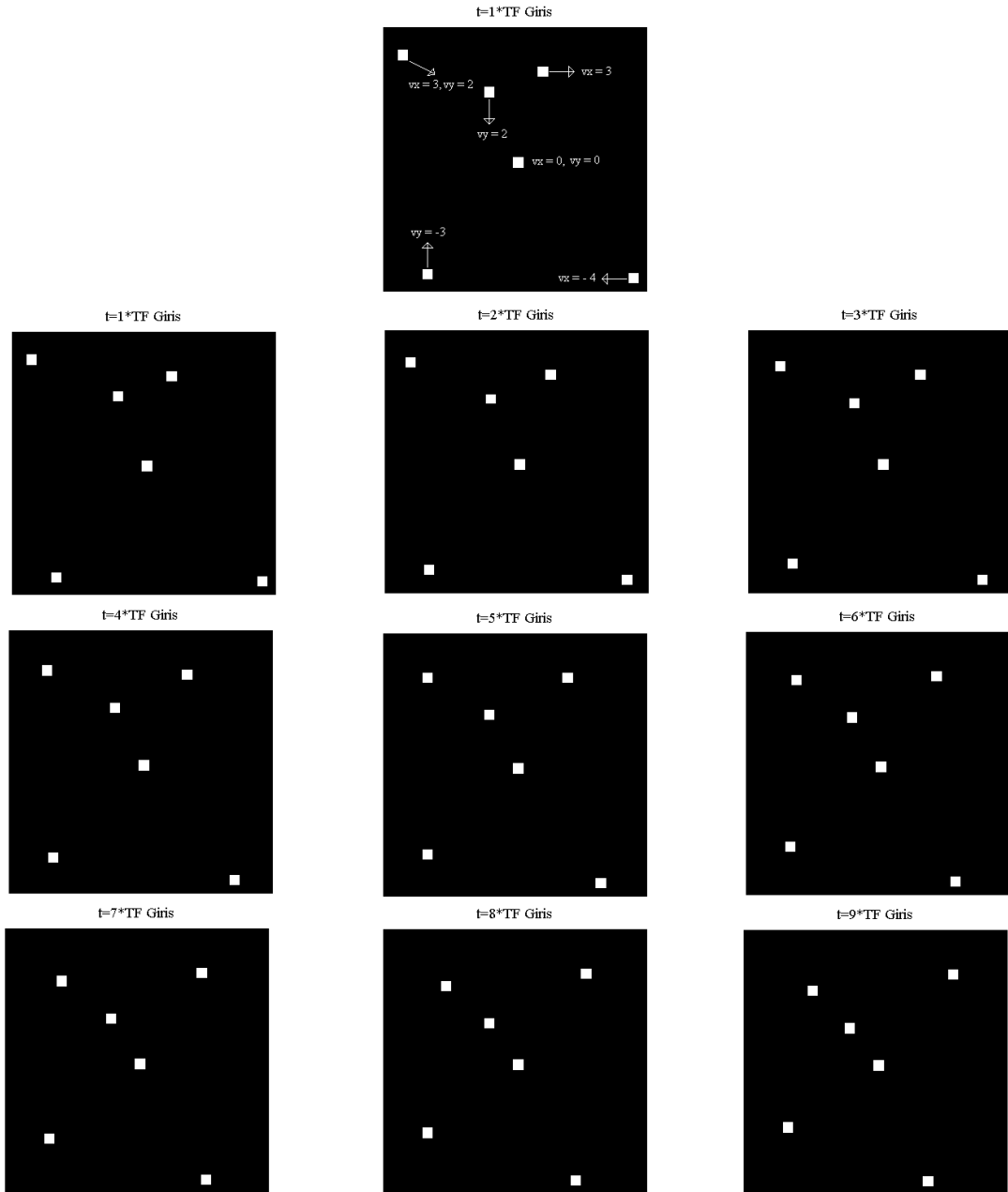
$$A = \frac{1}{\tau} \begin{bmatrix} 0 & b_y & 0 \\ b_x & -(1+4\gamma^2) & a_x \\ 0 & a_y & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

olarak elde edilir. Ayrıca uzaysal birinci türevler ayrıklaştırılırken

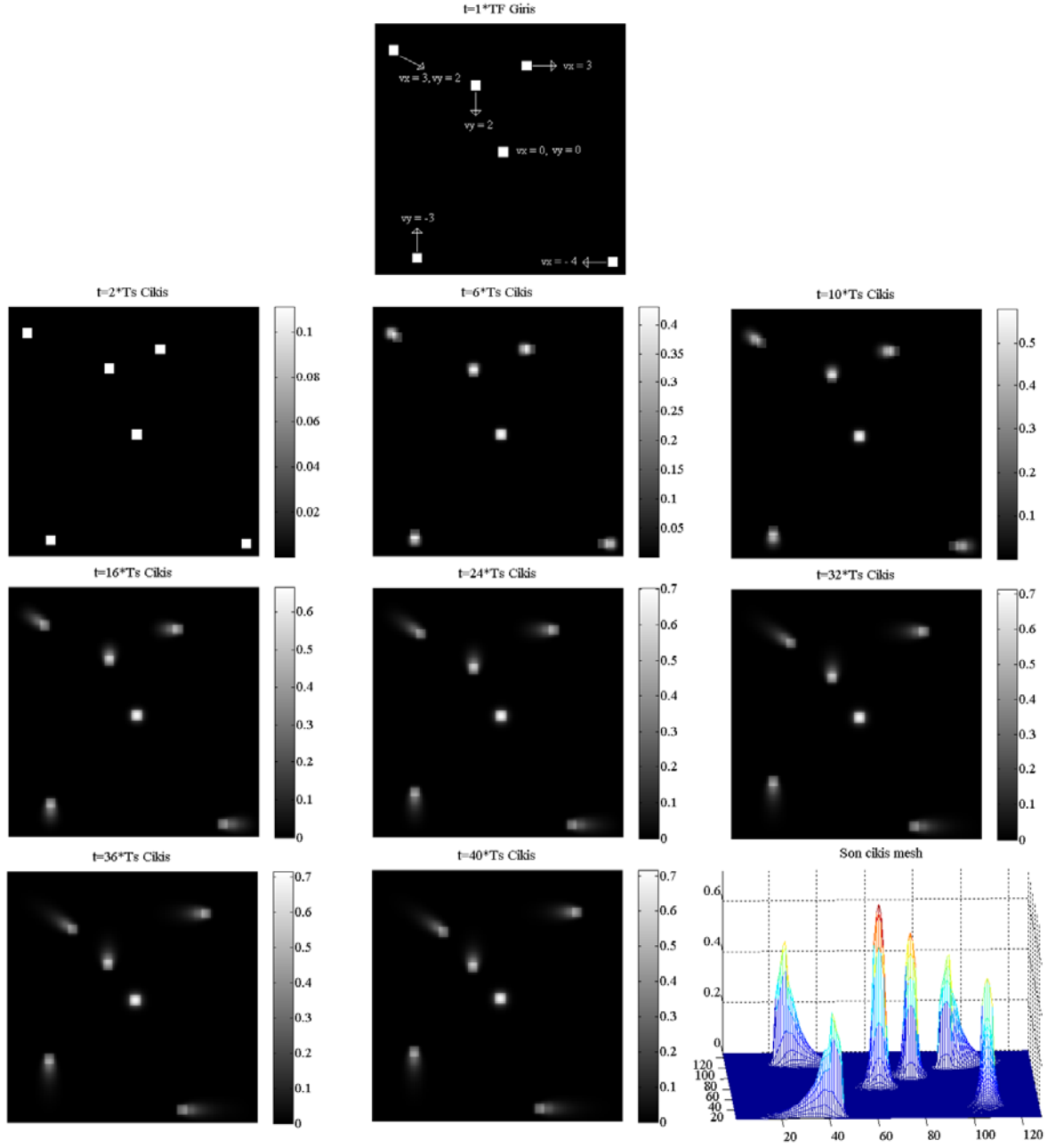
$$\frac{\partial v(x, y)}{\partial x} = \frac{v_{i+1,j} - v_{i-1,j}}{2}, \quad \frac{\partial v(x, y)}{\partial y} = \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2}$$

yaklaşıklıkları kullanıldığından simülasyonda

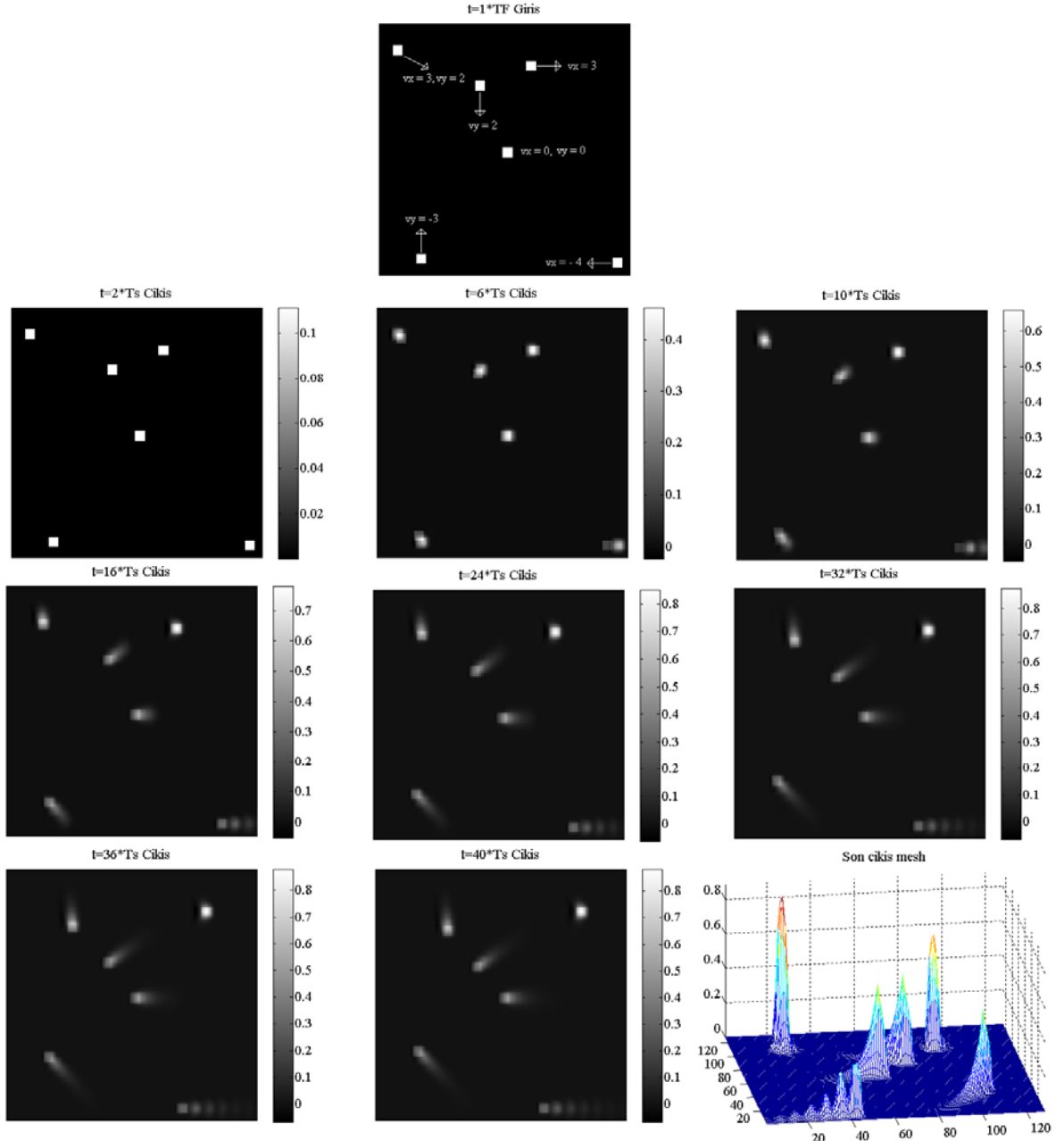
v_x, v_y için seçilmek istenen hızın iki katı alınmalıdır.



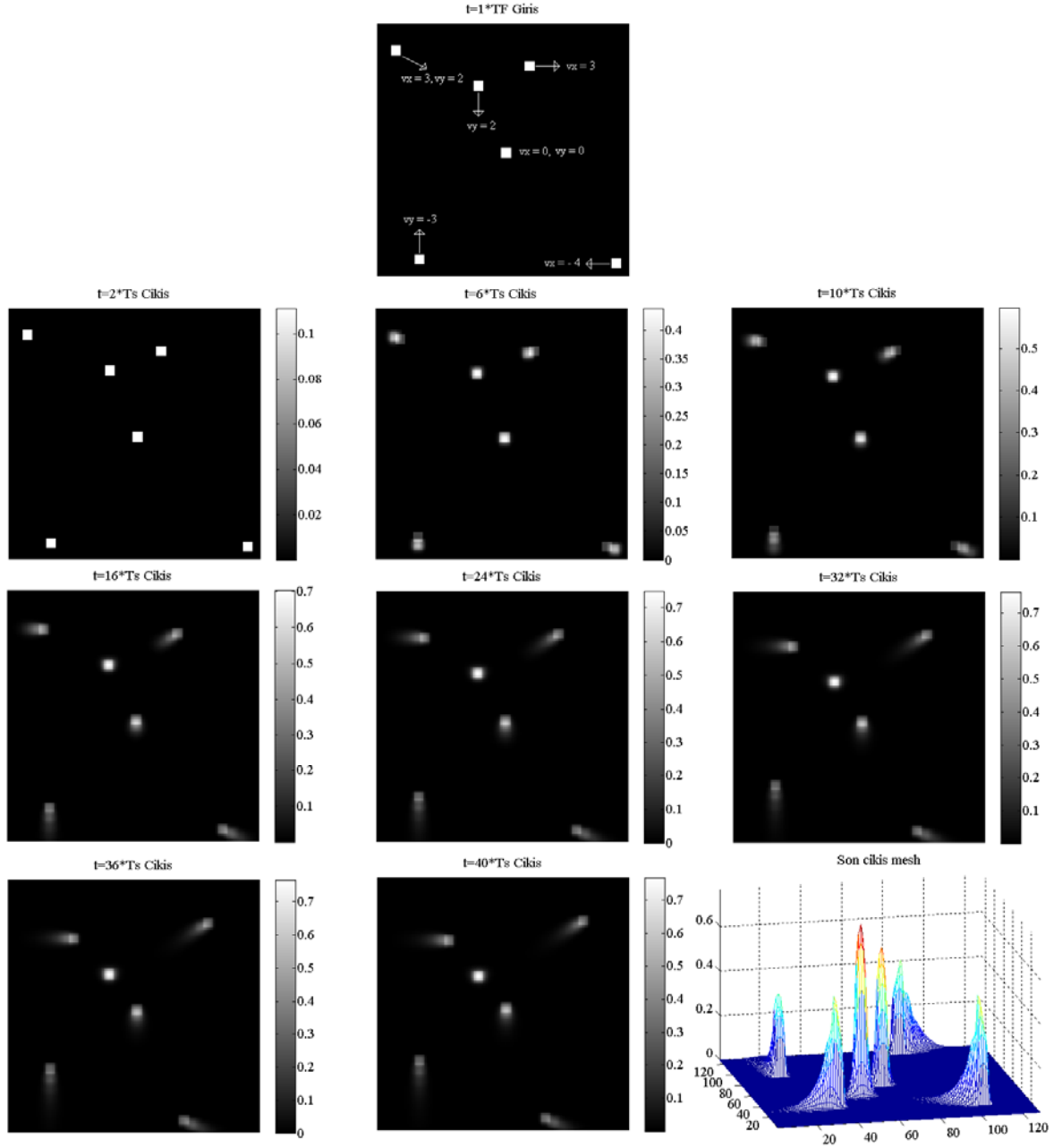
Şekil 5.7 Hareketli giriş görüntüsü



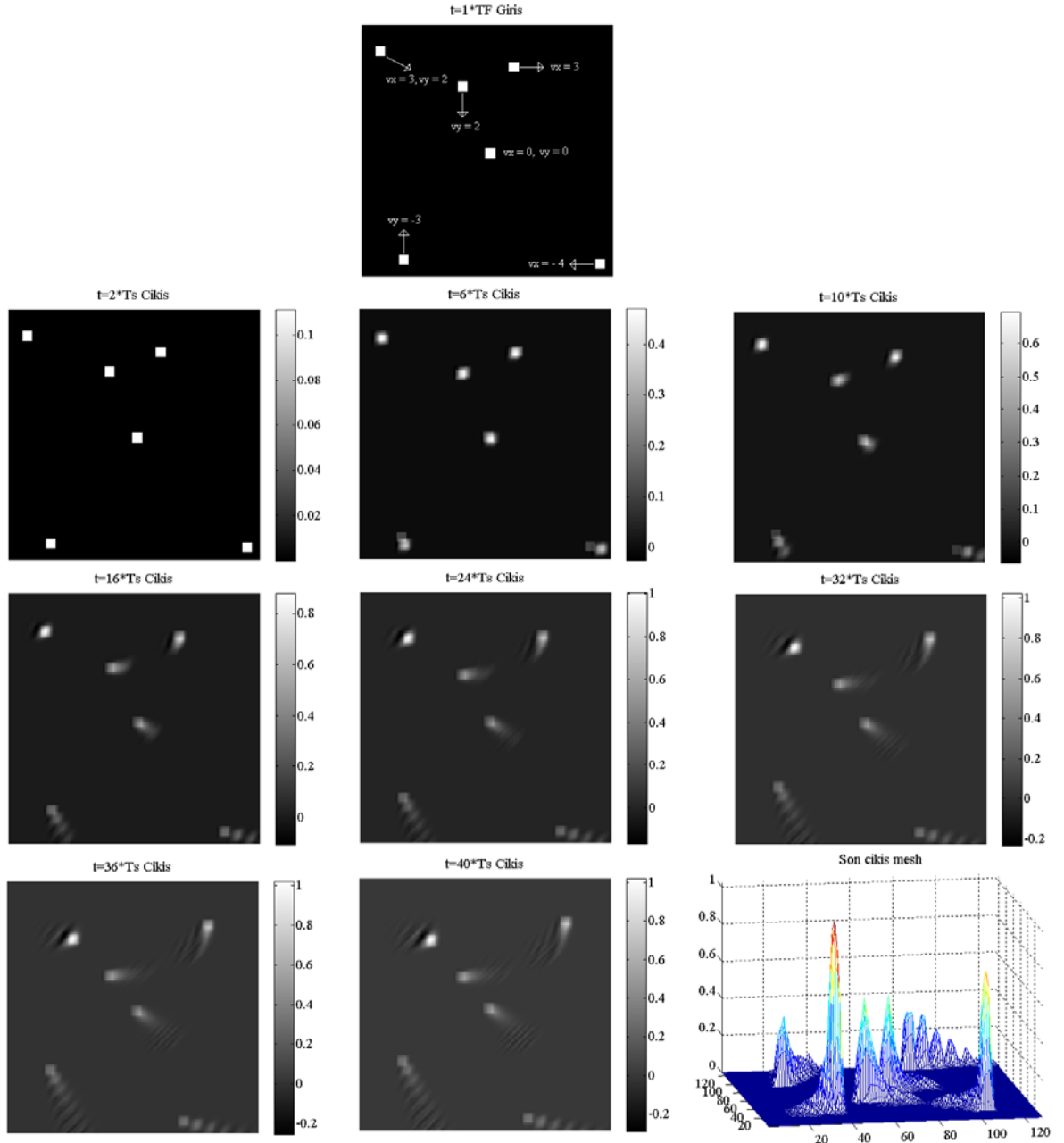
Şekil 5.8 $v_x = v_y = 0$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Bu filtre giriş işaretinde ortadaki duran noktayı seçmektedir. Filtre bu hıza ayarlı olduğu için sadece ortadaki nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.



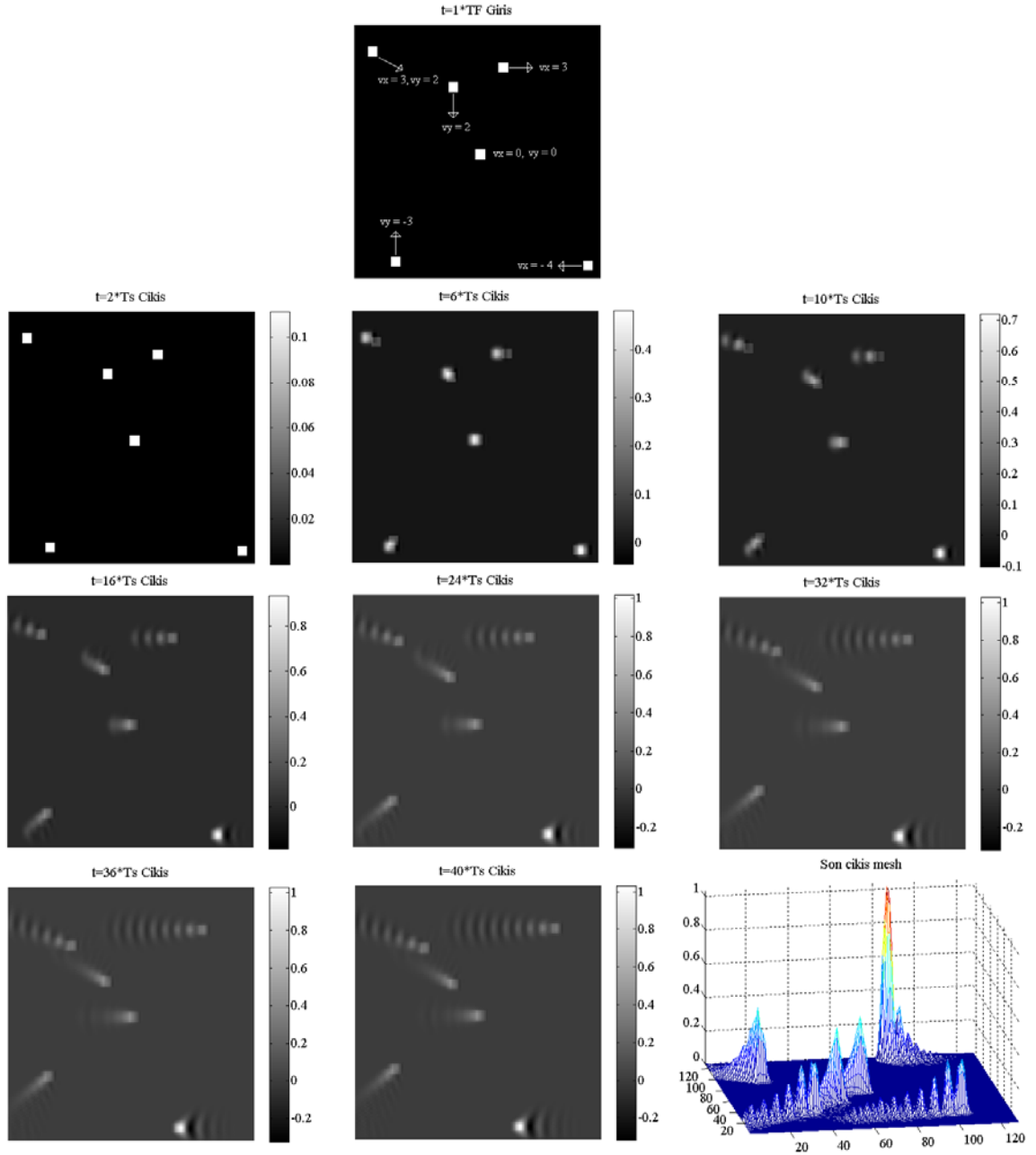
Şekil 5.9 $v_x = 3, v_y = 0$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sağ üst tarafındaki $v_x = 3, v_y = 0$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.



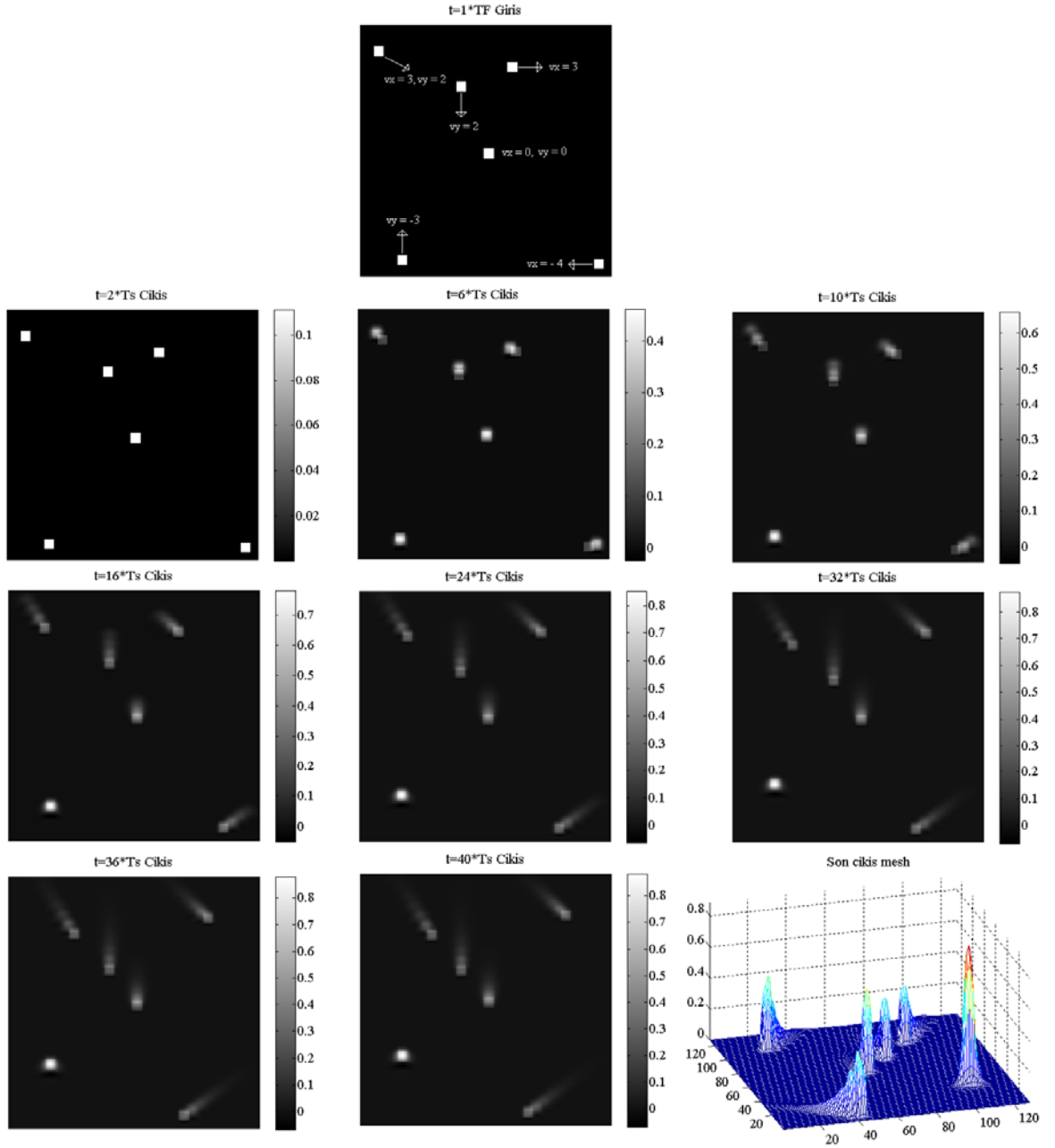
Şekil 5.10 $v_x = 0, v_y = 2$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün üst orta tarafındaki $v_x = 0, v_y = 2$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 5.11 $v_x = 3, v_y = 2$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sol üst tarafındaki $v_x = 3, v_y = 2$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 5.12 $v_x = -4, v_y = 0$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sağ alt tarafındaki $v_x = -4, v_y = 0$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.



Şekil 5.13 $v_x = 0, v_y = -3$ hızına ayarlı filtre çıkışı. Giriş görüntüsünün sol alt tarafındaki $v_x = 0, v_y = -3$ hızında giden nokta için filtre çıkışı en büyük değerini almıştır, diğer noktalar bulanıklaşmıştır. Bu durum en sondaki “mesh” grafiğinde de görülmektedir.

5.3 Uzay-Zamansal Gabor Tipi HSA Filtresi

Bölüm 4.7'deki Gabor tipi filtre diferansiyel denkleminde türevlerin sıfıra gitmediği durumu göz önüne alalım. Bu durumda

$$\frac{dv_{i,j}}{dt} = \left(v_{i-1,j} e^{j\omega_{x0}} + v_{i+1,j} e^{-j\omega_{x0}} + v_{i,j-1} e^{j\omega_{y0}} + v_{i,j+1} e^{-j\omega_{y0}} - 4v_{i,j} \right) - \lambda^2 v_{i,j} + \lambda^2 u_{i,j} \quad (5.21)$$

ve transfer fonksiyonu

$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j\Omega_t) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2(1 - \cos \omega_x) + 2(1 - \cos \omega_y) + j\Omega_t} \quad (5.22)$$

olarak elde edilir. Eşitlik (5.22) ile verilen filtre de zamansal frekansta alçak geçiren yapıdadır ve (4.44) eşitliği ile verilen uzaysal Gabor filtresi ile aynı frekans yanıtını verir. Sistemi zamanda bant geçiren yapmak için frekans yanıtı $\Omega_t - \Omega_{t0}$ 'a ötelenirse

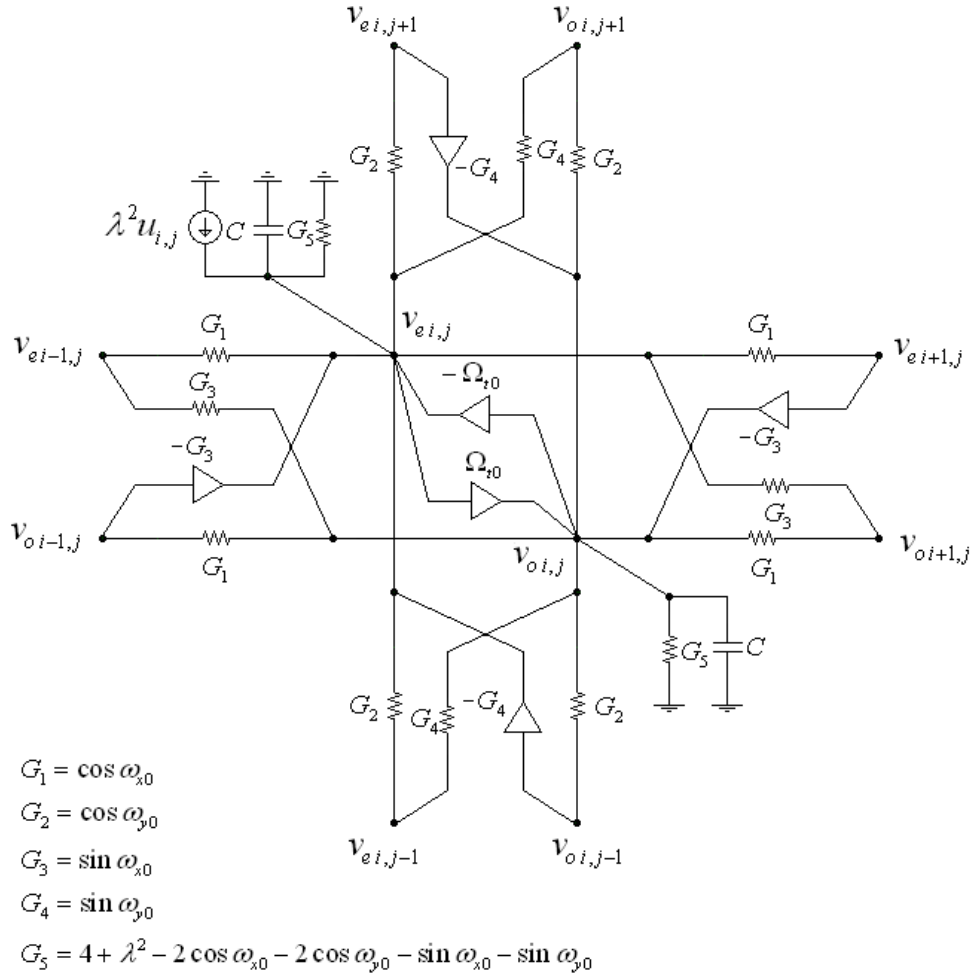
$$H(e^{j\omega_x}, e^{j\omega_y}, j(\Omega_t - \Omega_{t0})) = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 2(1 - \cos \omega_x) + 2(1 - \cos \omega_y) + j(\Omega_t - \Omega_{t0})} \quad (5.23)$$

bulunur. Bu filtre hem uzayda hem zamanda Gabor tipi filtredir. Bu filtrenin gerçel ve sanal kısmı için elde edilen HSA denklemleri de aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ei,j}}{dt} = & v_{ei-1,j} \cdot \cos \omega_{x0} - v_{oi-1,j} \sin \omega_{x0} + v_{ei+1,j} \cdot \cos \omega_{x0} + v_{oi+1,j} \sin \omega_{x0} - \Omega_{t0} v_{oi,j} \\ & + v_{ei,j-1} \cos \omega_{y0} - v_{oi,j-1} \sin \omega_{y0} + v_{ei,j+1} \cos \omega_{y0} + v_{oi,j+1} \sin \omega_{y0} - (4 + \lambda^2) v_{ei,j} + \lambda^2 u_{i,j} \end{aligned} \quad (5.24)$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{oi,j}}{dt} = & v_{ei-1,j} \cdot \sin \omega_{x0} + v_{oi-1,j} \cos \omega_{x0} - v_{ei+1,j} \cdot \sin \omega_{x0} + v_{oi+1,j} \cos \omega_{x0} + \Omega_{t0} v_{ei,j} \\ & + v_{ei,j-1} \sin \omega_{y0} + v_{oi,j-1} \cos \omega_{y0} - v_{ei,j+1} \sin \omega_{y0} + v_{oi,j+1} \cos \omega_{y0} - (4 + \lambda^2) v_{oi,j} \end{aligned} \quad (5.25)$$

Bu diferansiyel denklemlere karşı düşen iki katmanlı HSA devresi Şekil 5.14'de verilmektedir.



Şekil 5.14 Gabor tipi uzay-zamansal bant geçiren filtre (i,j) düğümü ve 1-komşuluklu çevresine ilişkin HSA devresi

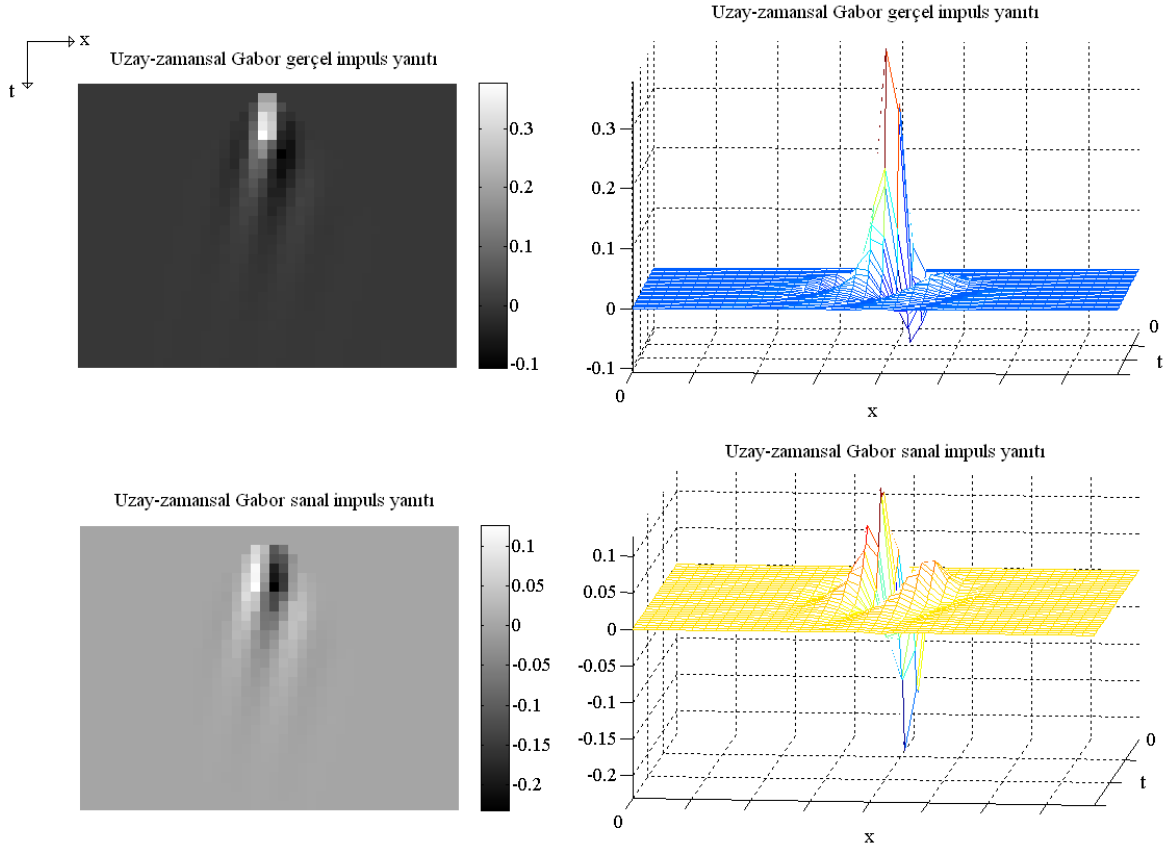
5.3.1 Uzay-Zamansal Gabor Tipi Filtrenin HSA Simülasyonu

Uzay-zamansal AGF simülasyonuna benzer şekilde Gabor tipi filtre için de önce bir boyutlu hareketli görüntünün simülasyonu yapılmış, daha sonra iki boyutlu hareketli görüntü simülasyonuna geçilmiştir. İki boyutlu hareketli görüntünün simülasyon sonuçları belli t anları için verilerek sistemin iki boyutlu hareketli görüntü için de Gabor tipi filtreleme yaptığı gösterilmektedir.

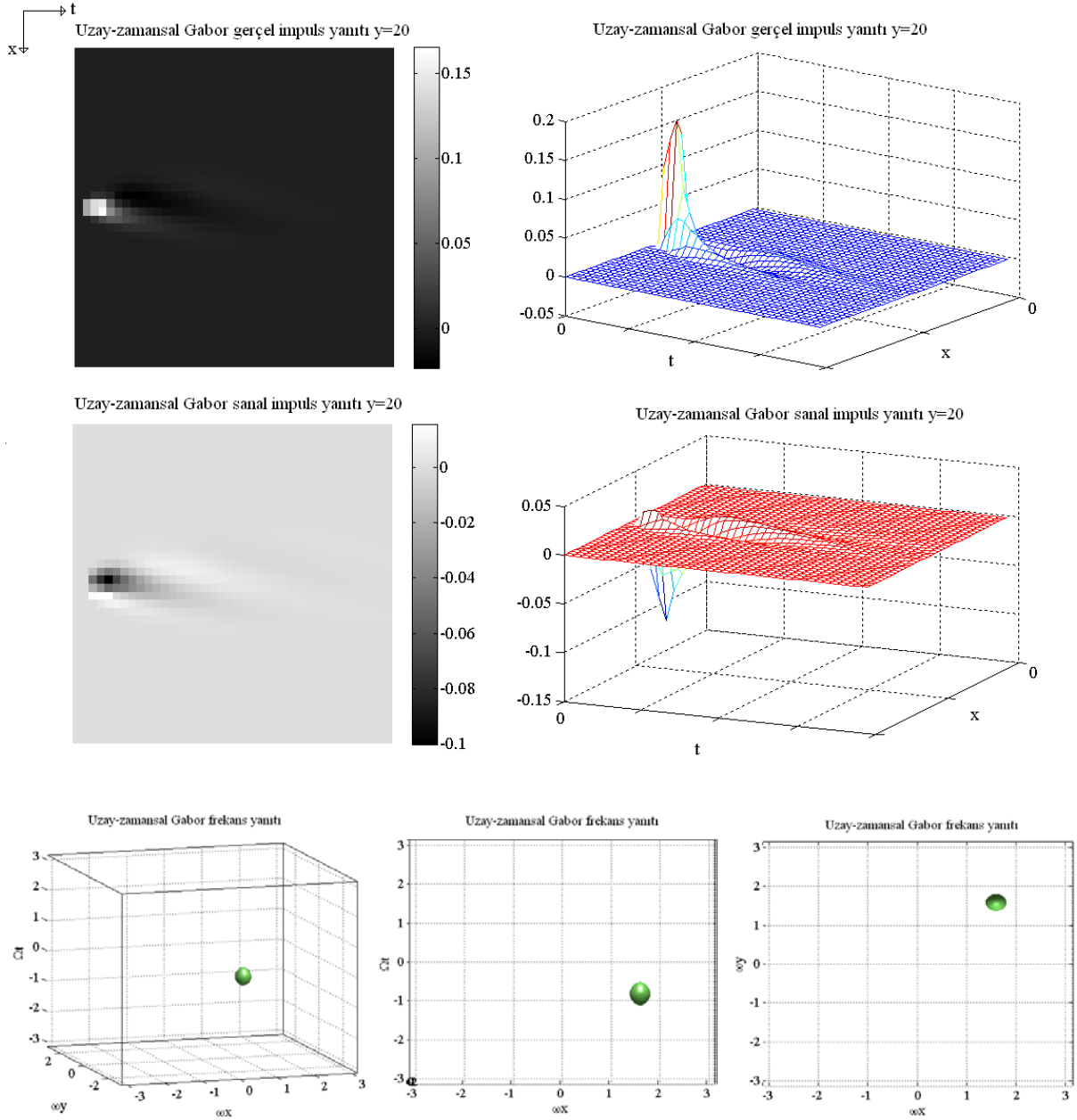
Her iki simülasyon için de giriş işareti uzay-zamansal impuls olacak şekilde verilmektedir, böylece elde edilen çıkışlar devrelerin impuls yanıtlarını verecektir. Uzay-zamansal giriş işareti T_F aralıklarla sistem girişine uygulanan durgun çerçevelerden oluşmaktadır. Giriş işaretinin uzay-zamansal impuls olması için ilk çerçevesinin hem x hem y boyutunda sadece ortadaki piksel değeri 1, diğer pikselleri 0 ve diğer tüm çerçevelerinin piksel değerlerinin de 0

olması gerekir. Bu giriş işareti ve Gabor tipi filtre HSA denklemleri ile elde edilen bir ve iki boyutlu filtre çıkışları Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da verilmektedir.

Bölüm 4’deki uzaysal Gabor filtresi çıkışları ile karşılaştırıldığında uzaysal Gabor filtresinin sadece x doğrultusunda (yani uzaysal), uzay-zamansal Gabor filtresinin ise hem x hem t doğrultusunda Gabor filtresi olduğu görülmektedir. Şekil 4.28’de iki boyutlu uzaysal Gabor filtresinin belli t anlarındaki değerleri ayrı ayrı verilmişti. Orada giriş işareti uygulandıktan belli bir süre sonra çıkışta uzaysal iki boyutlu Gabor impuls yanıtı elde edilmektedir. İki boyutlu uzay-zamansal Gabor filtresinin çıkışı ise Şekil 5.16’daki gibidir, uzaysal filtreden farkı zamanda da Gabor tipi filtreleme yapılmasıdır. Bu dağılımı göstermek amacıyla Şekil 5.16’da 40x40 giriş görüntüsünün $y=20$. pikselinin x ve t ’ye göre değişimi çizdirilmiştir. Burada beklendiği gibi t doğrultusunda da Gabor tipi bir dağılım olduğu gözlenmektedir.



Şekil 5.15 Bir boyutlu uzay-zamansal Gabor tipi filtre gerçel ve sanal impuls yanıtları



Şekil 5.16 $\gamma^2 = 2$, $\tau = 1$ için iki boyutlu uzay-zamansal Gabor tipi filtre impuls ve frekans yanıtları

5.4 Sonuçlar

Bu bölümde HSA ile gerçekleştirilen uzay-zamansal filtre yapıları hakkında bilgi verilmiştir. HSA yapısı aslında bir dirençsel ağıdır, dirençsel ağlar da retinanın OPL katmanının basit bir modelini oluşturmaktadır. Dolayısıyla bilgisayarda görme uygulamalarında HSA doğal bir tercih olarak ortaya çıkmaktadır.

Bu bölümde uzay-zamansal HSA filtrelerinin durum denklemleri, transfer fonksiyonları ve

HSA şablon değerleri elde edilmiştir.

Yukarıdaki analizden görüleceği üzere Gabor tipi filtreler uzay-zamansal frekans ayarlı filtrelerdir ve görüntüdeki sabit hızla hareket eden bir işaretin hızını seçmek için kullanılabilirler. Ancak bu tip filtreler dairesel simetrik yapısından dolayı frekans düzleminde yalnızca ilgili hıza ait olan düzlemi değil bazı başka düzlemleri de seçerler. Ayrıca Gabor tipi filtrelerin gerçekleştirilmesi iki katmanlı ağ gerektirmektedir. Hız ayarlı filtreler ise hem sadece ilgili hıza ait düzlemi seçerler, hem de tek katmanlı ağ ile gerçekleştirilirler. Ancak bu filtreler de alçak geçiren yapıdadır ve bant geçiren hale getirmek için yine iki katmanlı ağ kullanılmalıdır.

Bu bölümde yukarıdaki çalışmalara yapılan özgün katkılar ilgili kaynaklarda ayrıntısı bulunmayan şablon değerlerinin hesabı ve Gabor tipi filtrenin analog diferansiyel denkleminin elde edilmesidir.

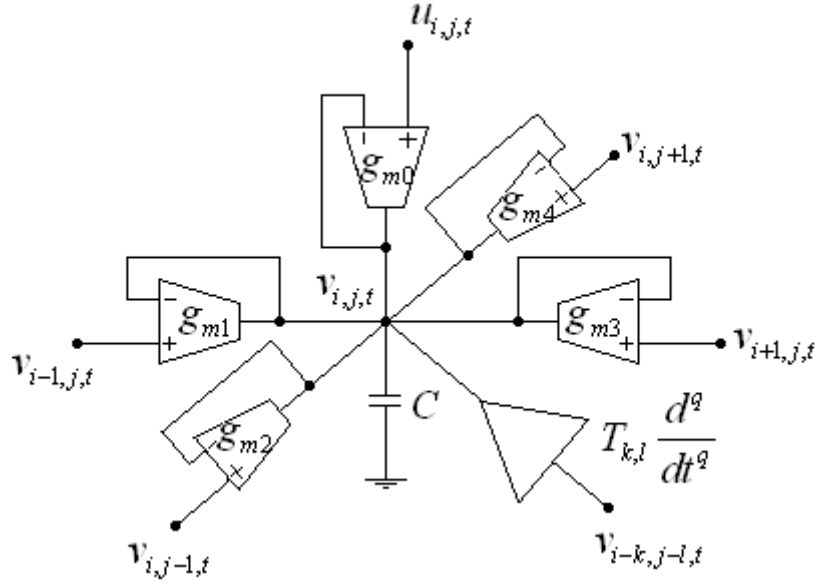
6. ZAMAN TÜREVLİ HÜCRESEL SİNİR AĞLARI

Zaman türevli HSA (ZTHSA) (Time Derivative CNN, TDCNN) yapıları yukarıda incelenen uzay-zamansal filtre yapılarının daha genel bir halidir. Ip vd çeşitli yayınlarında (2006; 2007; 2008a; 2008b; 2008c) lineer HSA ile gerçekleştirilemeyen bant geçiren filtre ve beynin görsel algı merkezi modeli gibi çeşitli 3 boyutlu uzay-zamansal transfer fonksiyonlarının ZTHSA ile gerçekleştirilebileceğini göstermiştir. ZTHSA devresinde lineer HSA devresine ek olarak komşu hücreler arasında türevli bağlantılar bulunmaktadır. Yapıya hücreler arası türevli bağlantıların eklenmesi durumunda daha genel uzay-zamansal filtrelerin gerçekleştirilebileceği belirtilmiş ve bant geçiren filtre örnekleri verilmiştir. Shi (1993)'deki yaklaşıma (Ek 3) benzer şekilde önerilen HSA yapısının uzay-zamansal transfer fonksiyonu incelenmiştir. Bu transfer fonksiyonunun kutupları uzaysal frekans bileşenleri cinsinden ifade edilerek “uzaysal frekanslara bağlı zamansal kutup” olarak adlandırılmıştır. İstenen filtre karakteristikleri için uzaysal frekanslara bağlı zamansal kutupların ve bu değerleri sağlayacak filtre şablon katsayılarının nasıl seçileceği açıklanmıştır.

Bu bölümde önce ZTHSA yapısı hakkında genel bilgi verilecektir. ZTHSA durum denklemi, transfer fonksiyonu ve HSA şablonları verilerek önceki bölümlerdeki uzay-zamansal filtreler ile arasındaki fark ortaya konacaktır. Ip vd'nin yayınları üzerinde yapılan incelemede ZTHSA devresinin bazı şablon değerlerinin hatalı olduğu tespit edilmiştir. Bu değerler ile ilgili düzeltme yapılacaktır.

Ip'in çeşitli yayınlarında ZTHSA yapısının simülasyonu MATLAB SIMULINK programı ile blok diyagramlar üzerinden yaptırılmaktadır. Bu işlem oldukça karmaşıktır ve yapının yavaşlığı nedeniyle çok uzun zaman almaktadır. Bu çalışmada var olan SIMULINK simülasyonunun ayrıntıları verilerek işlemin karmaşıklığı gözler önüne serilecektir. Daha sonraki aşamada ZTHSA durum denklemi matrisel hale getirilerek bu denklemin çeşitli yöntemlerle simülasyonları yapılacaktır. Bu simülasyonlardan elde edilen deneyim ile ZTHSA için yeni bir simülasyon yöntemi tasarlanacaktır. Yeni yöntem simülasyon süresini oldukça kısaltmaktadır ve karmaşık simülasyon adımları içermemektedir.

6.1 Zaman Türevli HSA Genel Yapısı



Şekil 6.1 Genel bir komşu hücreden türevsel yayılım (Ip vd., 2008a)

Şekil 6.1'deki devrede genel bir $i-k,j-l$ düğümünden q . mertebeden zaman türevli yayılımı inceleyelim. $T_{k,l}$ ile gösterilen “türevsel kapasite” (düşünsel olarak) değeri giriş geriliminin q .

türevi ile orantılı çıkış akımı üretmektedir $\left(i_{k,l,t} = T_{k,l} \frac{d^q}{dt^q} v_{i-k,j-l,t} \right)$. (i,j) düğümü için akım

denklemleri yazılırsa

$$\begin{aligned} & g_{m0}u_{i,j,t} + g_{m1}v_{i-1,j,t} + g_{m2}v_{i,j-1,t} + g_{m3}v_{i+1,j,t} + g_{m4}v_{i,j+1,t} + T_{k,l} \frac{d^q}{dt^q} v_{i-k,j-l,t} \\ & = C\dot{v}_{i,j,t} + \left(\sum_{i=0}^4 g_{mi} \right) v_{i,j,t} \end{aligned} \quad \text{Equation Section (Next)(6.1)}$$

elde edilir. Buradan transfer fonksiyonu

$$\frac{V(z_x, z_y, p_t)}{U(z_x, z_y, p_t)} = \frac{1}{\left(\sum_{i=0}^4 g_{mi} \right) - g_{m1}z_x^{-1} - g_{m2}z_y^{-1} - g_{m3}z_x^{+1} - g_{m4}z_y^{+1} - T_{a,b}z_x^{-a}z_y^{-b}p_t^q + Cp_t} \quad (6.2)$$

olarak bulunur. Yani genel bir $(i-k,j-l)$ çıkış noktasından q . türevli yayılım transfer fonksiyonunun paydasında $z_x^{-k}z_y^{-l}p_t^q$ terimi yaratmaktadır. Herhangi bir $(i-k,j-l)$ girişinden bağlantı olsaydı $z_x^{-k}z_y^{-l}p_t^q$ terimi transfer fonksiyonunun payına gelecekti. Sadece p_t^q terimi

oluşturmak için ise referans düğümünden türevli bağlantı yapılmalıdır. Yukarıdaki analizden, lineer HSA yapısına bu türevsel bağlantının eklenmesi ile genel rasyonel uzay-zamansal filtrelerin gerçekleştirilmesinin mümkün olacağı ortaya konmuştur. Filtrenin transfer fonksiyonunun polinom terimleri ile şablon değerleri ve ağ bağlantıları arasında bire bir karşılıklılık vardır. Genel rasyonel uzay-zamansal bir filtrenin transfer fonksiyonu

$$\frac{V(z_x, z_y, p_t)}{U(z_x, z_y, p_t)} = \frac{\sum_{q \in 0 \dots D} \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r b'_q(m, n) z_x^m z_y^n p_t^q}{\sum_{q \in 0 \dots D} \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r a'_q(m, n) z_x^m z_y^n p_t^q} \quad (6.3)$$

olur. $b'_q(m, n)$ ve $a'_q(m, n)$ karmaşık değerli katsayılar, m, n uzaysal indisler, r ise giriş ve çıkış şablonlarının komşuluk yarıçapıdır. Genel bir ZTHSA'nın durum denklemi

$$\begin{aligned} C\dot{v}_{i,j,t} = & -\frac{1}{R}\dot{v}_{i,j,t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_0(m, n) v_{i+m,j+n,t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B_0(m, n) u_{i+m,j+n,t} \\ & + \sum_{q \in 1 \dots D} \left[\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_q(m, n) \frac{d^q v_{i+m,j+n,t}}{dt^q} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B_q(m, n) \frac{d^q u_{i+m,j+n,t}}{dt^q} \right] \end{aligned} \quad (6.4)$$

olarak verilmektedir. ZTHSA ile yukarıdaki genel üç boyutlu uzay-zamansal transfer fonksiyonu (eşitlik (6.3)) terimleri karşılaştırılırsa

$$\begin{aligned} a'_0(0,0) &= \frac{1}{R} - a_0(0,0), \text{ diğer değerler } a'_0(m, n) = -a_0(m, n) \\ a'_1(0,0) &= C - a_1(0,0), \text{ diğer değerler } a'_q(m, n) = -a_q(m, n) \quad q \geq 1 \\ b'_q(m, n) &= b_q(m, n) \end{aligned} \quad (6.5)$$

olduğu görülür.

ZTHSA diferansiyel denkleminde yararlanarak ağın klonlayıcı şablonları tanımlanabilir. (6.4) diferansiyel denklemindeki ilk üç terim lineer HSA denklemi ile aynıdır, A_0 geri besleme klonlayıcı şablonu ve B_0 ileri besleme klonlayıcı şablonudur. Türevli terimler için de benzer şablonlar tanımlanabilir. $A_q = a_q(m, n)_{-r \leq m, n \leq r}$ ve $B_q = b_q(m, n)_{-r \leq m, n \leq r}$ sırasıyla q . Türev geri besleme ve ileri besleme klonlayıcı şablonları olarak adlandırılmıştır.

İp vd. (2008b; 2008c), birinci türevli bağlantılar kullanarak iki farklı ZTHSA bant geçiren filtre tasarımı yapmıştır. Birinci filtre gerçel, tek katmanlı ve beş komşuluklu ZTHSA'dır. Bu

HSA'nın geri besleme ve birinci türev geri besleme şablonları İp vd. (2008b; 2008c) 'de sırasıyla aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$A = A_R \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC} + G_{YS}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC} - G_{XS}}{2} & 0 & \frac{G_{XC} + G_{XS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC} - G_{YS}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + B_R \cdot A_1 \quad (6.6)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & 2a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} & 2a_0 G_{XC} & a_0^2 + \frac{G_{XC}^2 - G_{XS}^2 + G_{YC}^2 - G_{YS}^2}{2} & 2a_0 G_{XC} & \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & 2a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

$A_R, B_R, G_{XC}, G_{XS}, G_{YC}, G_{YS}, a_0$ gerçel sabitlerdir.

Bu ZTHSA'nın uzay-zamansal transfer fonksiyonu:

$$H_{TDR} = \frac{1}{(p_t - B_R)(a_{z_x z_y}^2 - b_{z_x z_y}^2) - A_R(a_{z_x z_y} + j b_{z_x z_y})} \quad (6.8)$$

$$a_{z_x z_y} = a_0 + \frac{1}{2} [G_{XC}(z_x + z_x^{-1}) + G_{YC}(z_y + z_y^{-1})]$$

$$b_{z_x z_y} = \frac{1}{2j} [G_{XS}(z_x - z_x^{-1}) + G_{YS}(z_y - z_y^{-1})]$$

olarak verilmiştir. İp (2007)'de birinci türevli HSA denklemi çalışmanın farklı bölümlerinde denklem (6.9) ve (6.10) ile gösterilen iki farklı şekilde ifade edilmiştir. Yapılan çalışmalardan anlaşıldığı üzere yukarıda verilen A ve A_1 şablonları denklem (6.10) ile tanımlanan sisteme ait şablonlardır. Ayrıca A ve A_1 şablonlarının eleman değerleri aşağıdaki analiz sonucu A_N ve A_{1N} ifadelerinde verildiği gibi olmalıdır.

$$\dot{v}_{i,j,t} = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m,n) \frac{dv_{i+m,j+n,t}}{dt} \quad (6.9)$$

$$\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m,n) \frac{dv_{i+m,j+n,t}}{dt} = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,t} \quad (6.10)$$

(6.10) denkleminin uzay-zamansal Fourier dönüşümü ile transfer fonksiyonu

$$H_{TD}(z_x, z_y, p_t) = \frac{1}{-\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) z_x^m z_y^n + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m,n) z_x^m z_y^n p_t} \quad (6.11)$$

olmalıdır. Buradan şablon katsayılarının hesabı için

$$A_G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC} + G_{YS}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC} - G_{XS}}{2} & 0 & \frac{G_{XC} + G_{XS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC} - G_{YS}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ diyelim.}$$

$$H_{TD}(z_x, z_y, p_t) = \frac{1}{-\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r [A_R A_G(m,n) + B_R A_1(m,n)] z_x^m z_y^n + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m,n) z_x^m z_y^n p_t} \quad (6.12)$$

$$H_{TD}(z_x, z_y, p_t) = \frac{1}{-A_R \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_G(m,n) z_x^m z_y^n + (p_t - B_R) \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m,n) z_x^m z_y^n} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m,n) z_x^m z_y^n &= \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} (z_x^2 + z_x^{-2}) + \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} (z_y^2 + z_y^{-2}) \\ &+ 2a_0 G_{XC} (z_x + z_x^{-1}) + 2a_0 G_{YC} (z_y + z_y^{-1}) \\ &+ \frac{G_{XC} G_{YC} - G_{XS} G_{YS}}{2} (z_x^{-1} z_y + z_x z_y^{-1}) \\ &+ \frac{G_{XC} G_{YC} + G_{XS} G_{YS}}{2} (z_x z_y + z_x^{-1} z_y^{-1}) \\ &+ a_0^2 + \frac{G_{XC}^2 - G_{XS}^2 + G_{YC}^2 - G_{YS}^2}{2} \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned}
\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m, n) z_x^m z_y^n &= \frac{G_{XC}^2}{4} (z_x^2 + z_x^{-2} + 2) + \frac{G_{YC}^2}{4} (z_y^2 + z_y^{-2} + 2) \\
&+ \frac{G_{XC} G_{YC}}{2} (z_x z_y + z_x^{-1} z_y + z_x z_y^{-1} + z_x^{-1} z_y^{-1}) \\
&+ \frac{G_{XS}^2}{4} (z_x^2 + z_x^{-2} - 2) + \frac{G_{YS}^2}{4} (z_y^2 + z_y^{-2} - 2) \\
&+ \frac{G_{XS} G_{YS}}{2} (z_x z_y - z_x^{-1} z_y - z_x z_y^{-1} + z_x^{-1} z_y^{-1}) \\
&+ a_0^2 + 2a_0 \left[G_{XC} (z_x + z_x^{-1}) + G_{YC} (z_y + z_y^{-1}) \right]
\end{aligned} \tag{6.15}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m, n) z_x^m z_y^n &= a_0^2 + 2a_0 \left[G_{XC} (z_x + z_x^{-1}) + G_{YC} (z_y + z_y^{-1}) \right] \\
&+ \left[\frac{G_{XC}}{2} (z_x + z_x^{-1}) + \frac{G_{YC}}{2} (z_y + z_y^{-1}) \right]^2 \\
&+ \left[\frac{G_{XS}}{2} (z_x - z_x^{-1}) + \frac{G_{YS}}{2} (z_y - z_y^{-1}) \right]^2
\end{aligned} \tag{6.16}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_G(m, n) z_x^m z_y^n &= \frac{G_{XC} + G_{XS}}{2} z_x + \frac{G_{XC} - G_{XS}}{2} z_x^{-1} + \frac{G_{YC} + G_{YS}}{2} z_y + \frac{G_{YC} - G_{YS}}{2} z_y^{-1} \\
&= \frac{G_{XC}}{2} (z_x + z_x^{-1}) + \frac{G_{YC}}{2} (z_y + z_y^{-1}) + \frac{G_{XS}}{2} (z_x - z_x^{-1}) + \frac{G_{YS}}{2} (z_y - z_y^{-1})
\end{aligned} \tag{6.17}$$

Eşitlik (6.8) ve (6.11) ile yukarıdaki $\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m, n) z_x^m z_y^n$ ve $\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_G(m, n) z_x^m z_y^n$ ifadeleri

karşılaştırılırsa

- $\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_1(m, n) z_x^m z_y^n = a_{z_x z_y}^2 - b_{z_x z_y}^2$ olması için A_1 şablonundaki $2a_0 G$ 'li katsayıların $a_0 G$ şeklinde olması gerekir.
- $\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A_G(m, n) z_x^m z_y^n = a_{z_x z_y} + j b_{z_x z_y}$ olması için de $A_G(0, 0) = a_0$ olması gerekir.

Sonuç olarak geri besleme ve birinci türev geri besleme şablonlarının sırasıyla A_N ve A_{1N} ile gösterildiği gibi olması gerekmektedir.

$$A_N = A_R A_G + B_R A_{1N} \tag{6.18}$$

$$\begin{aligned}
A_N = A_R & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC} + G_{YS}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC} - G_{XS}}{2} & a_0 & \frac{G_{XC} + G_{XS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC} - G_{YS}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\
+ B_R & \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} & a_0 G_{XC} & a_0^2 + \frac{G_{XC}^2 - G_{XS}^2 + G_{YC}^2 - G_{YS}^2}{2} & a_0 G_{XC} & \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.19)
\end{aligned}$$

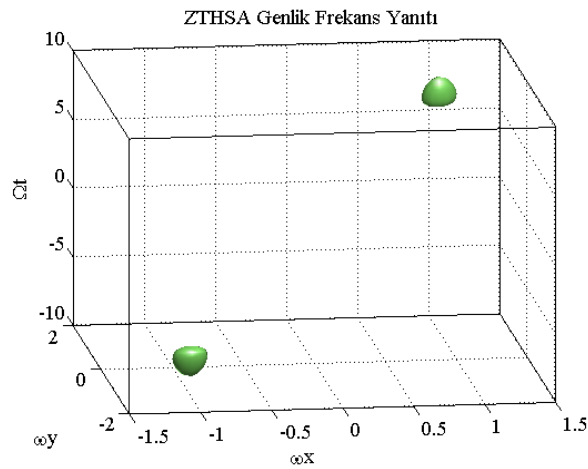
$$A_{1N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} & a_0 G_{XC} & a_0^2 + \frac{G_{XC}^2 - G_{XS}^2 + G_{YC}^2 - G_{YS}^2}{2} & a_0 G_{XC} & \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.20)$$

Ayrıca Ip in çalışmalarında verilen şablon katsayıları x yönü soldan sağa, y yönü aşağıdan yukarıya doğru alınarak elde edilen katsayılardır. Bu çalışmada ise x yönü soldan sağa, y yönü yukarıdan aşağıya doğru, yani sol üst köşedeki şablon elemanının indisi -2,-2 olarak alınmaktadır. Bu durumda şablonların y yönünde simetriğini almak gerekir:

$$A_N = \begin{bmatrix} 0 & 0 & B_R \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \\ 0 & B_R \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & A_R \frac{G_{YC} - G_{YS}}{2} + B_R a_0 G_{YC} & B_R \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ B_R \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} & A_R \frac{G_{XC} - G_{XS}}{2} + B_R a_0 G_{XC} & \left(A_R a_0 + B_R a_0^2 + \frac{B_R (G_{XC}^2 - G_{XS}^2 + G_{YC}^2 - G_{YS}^2)}{2} \right) & A_R \frac{G_{XC} + G_{XS}}{2} + B_R a_0 G_{XC} & B_R \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} \\ 0 & B_R \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & A_R \frac{G_{YC} + G_{YS}}{2} + B_R a_0 G_{YC} & B_R \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & B_R \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.21)$$

$$A_{1N} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} & a_0 G_{XC} & a_0^2 + \frac{G_{XC}^2 - G_{XS}^2 + G_{YC}^2 - G_{YS}^2}{2} & a_0 G_{XC} & \frac{G_{XC}^2 + G_{XS}^2}{4} \\ 0 & \frac{G_{XC}G_{YC} - G_{XS}G_{YS}}{2} & a_0 G_{YC} & \frac{G_{XC}G_{YC} + G_{XS}G_{YS}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{G_{YC}^2 + G_{YS}^2}{4} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.22)$$

Gerçel ZTHSA'nın eşitlik (6.11)'deki transfer fonksiyonunun genlik frekans yanıtı Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2'deki küreciklerin içinde kalan frekans aralığı filtrenin geçirme bandını göstermektedir. Buradan da görüleceği üzere 1. türevli tek katmanlı gerçel HSA denklemi ile uzay-zamansal bant geçiren filtreler elde edilebilir.



Şekil 6.2 $a_0 = 3.9$, $G_{XC} = G_{YC} = -1$, $G_{XS} = G_{YS} = 1.5$, $A_R = 5$, $B_R = 10$ için ZTHSA genlik frekans yanıtı

Denklem (6.10) ile tanımlanan ZTHSA’da denklemin sol tarafında birden fazla türevli ifade yer almaktadır. (6.10) denkleminin sol tarafında sadece (i,j) hücresinin türevini bırakıp denklemi Euler yaklaşıklığı ile ayrıklaştırarak

$$A_1(0,0) \frac{dv_{i,j,t}}{dt} = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,t} - \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) \frac{dv_{i+m,j+n,t}}{dt} \quad (6.23)$$

$$\tilde{A}_1(m,n) = \begin{cases} A_1(m,n), & (m,n) \neq (0,0) \\ 0, & (m,n) = (0,0) \end{cases} \quad (6.24)$$

$$A_1(0,0) \frac{v_{i,j,k+1} - v_{i,j,k}}{T_s} = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,k} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,k} - \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) \frac{v_{i+m,j+n,k+1} - v_{i+m,j+n,k}}{T_s} \quad (6.25)$$

$$v_{i,j,k+1} = v_{i,j,k} + \frac{T_s}{A_1(0,0)} \left(\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,k} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,k} - \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) \frac{v_{i+m,j+n,k+1} - v_{i+m,j+n,k}}{T_s} \right) \quad (6.26)$$

elde edilir. Denklem (6.26)’dan görüleceği gibi $k+1$ anında (i,j) hücresinin durum değişkeni, komşularının yine aynı $k+1$ anındaki durum değişkenine bağlı olmaktadır. Bu durumda bu $k+1$ anı için durum değişkeninin değeri hesaplanamamaktadır. Ip (2007)’de bu simülasyon SIMULINK içinde blok diyagramlarla yaptırılmıştır. Bu tez çalışmasında ise SIMULINK simülasyonuna ek olarak ZTHSA için yeni bir simülasyon yöntemi önerilmektedir.

6.2 ZTHSA SIMULINK Simülasyonları

Sistemin zaman simülasyonu önce MATLAB SIMULINK devresi kullanarak yapılmıştır. Zaman türevli HSA denklemini (SIMULINK’te kullanmak üzere) işaret akış diyagramı ile ifade etmek için (6.23) denkleminin zaman değişkenine göre Laplace dönüşümü alınırsa

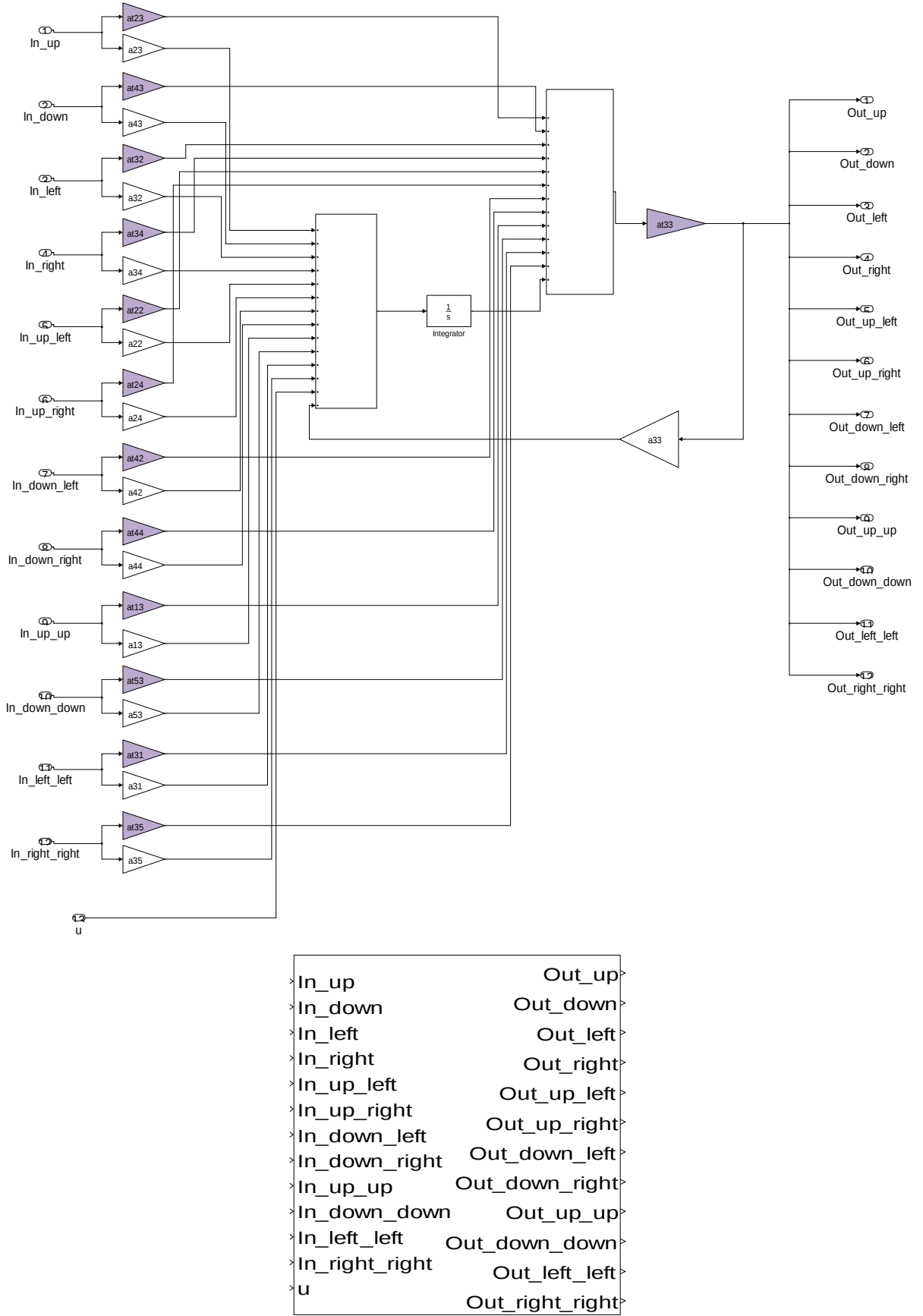
$$A_1(0,0) \cdot s_t \cdot V_{i,j,s_t} = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) V_{i+m,j+n,s_t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) U_{i+m,j+n,s_t} - s_t \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) V_{i+m,j+n,s_t} \quad (6.27)$$

$$\begin{aligned}
V_{i,j,s_t} = & \frac{1}{A_1(0,0)} \left[\frac{1}{s_t} \left(\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) V_{i+m,j+n,s_t} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) U_{i+m,j+n,s_t} \right) \right] \\
& - \frac{1}{A_1(0,0)} \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) V_{i+m,j+n,s_t}
\end{aligned} \tag{6.28}$$

bulunur. (6.28) denklemi SIMULINK'te Şekil 6.3'deki blok diyagramla ifade edilmiştir. Burada her bir hücre en yakın birer komşusuna ve üst, alt sağ ve soldaki 2. en yakın komşusuna bağlıdır, dolayısıyla her bir hücre (u girişi de dahil olmak üzere) 13 giriş ve 12 çıkışa sahiptir. A ve A_1 şablon değerleri aşağıdaki sabitlerle gösterilmiştir. Şekil 6.3'deki blok diyagram SIMULINK'te bir HSA hücresini oluşturmaktadır.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & a13 & 0 & 0 \\ 0 & a22 & a23 & a24 & 0 \\ a31 & a32 & a33 & a34 & a35 \\ 0 & a42 & a43 & a44 & 0 \\ 0 & 0 & a53 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.29}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -at13 & 0 & 0 \\ 0 & -at22 & -at23 & -at24 & 0 \\ -at31 & -at32 & 1/at33 & -at34 & -at35 \\ 0 & -at42 & -at43 & -at44 & 0 \\ 0 & 0 & -at53 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.30}$$

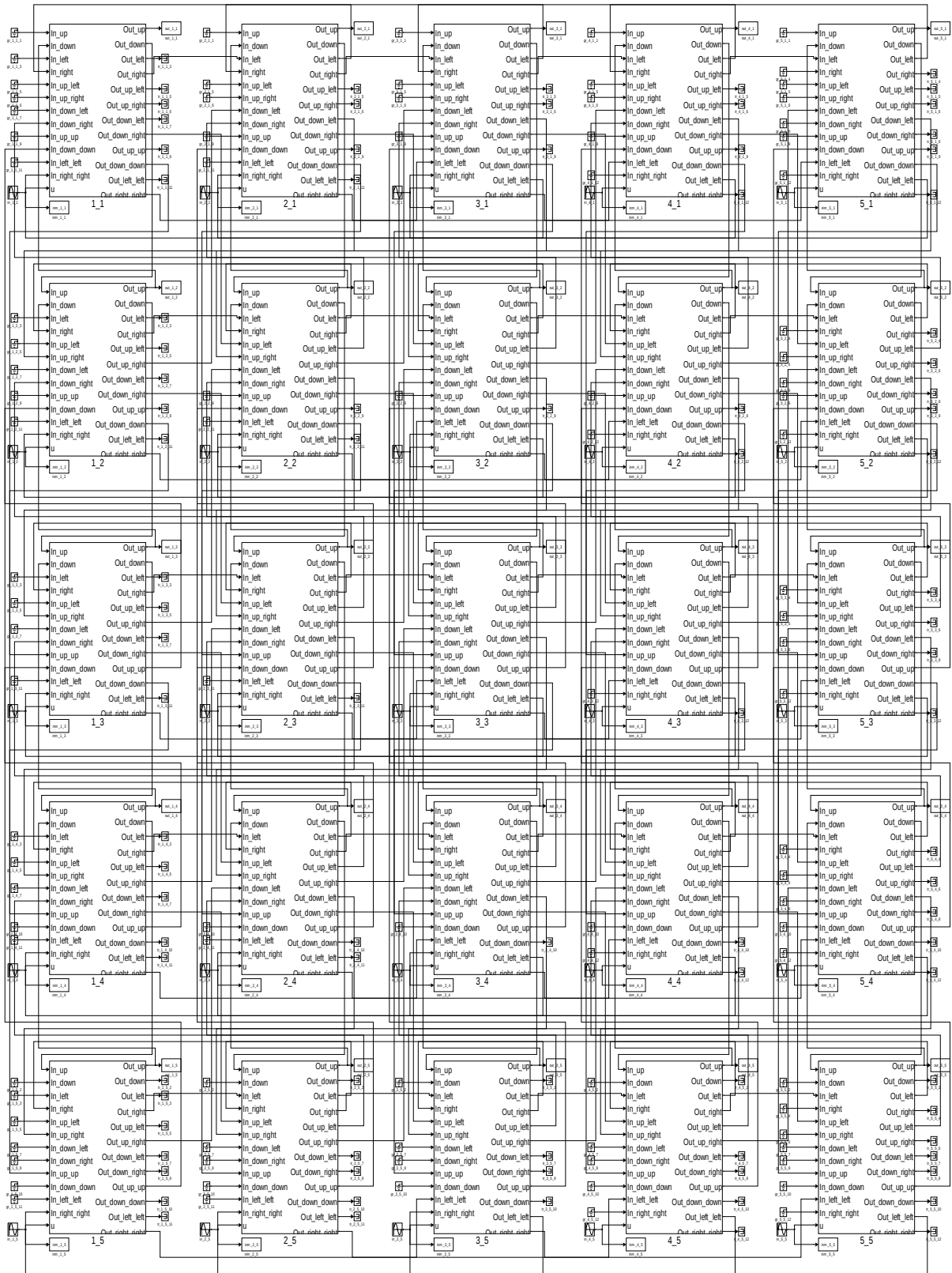


Şekil 6.3 Bir ZTHSA hücresi ve blok gösterimi

Örneğin 30x30 boyutlu bir filtrenin SIMULINK devresinin elde edilmesi için;

- yatay ekseninde 30 ve dikey ekseninde 30 olmak üzere ZTHSA bloklarından 900 tanesinin bir araya getirilmesi,
- her bir hücreden 13 giriş ve 12 çıkış bağlantısının yapılması,
- kenardaki sınır hücrelerinin boşta kalan giriş uçlarına “ground” ve boşta kalan çıkış uçlarına “terminator” sonlandırma bloklarının bağlanması,
- her bir hücrenin u girişine kaynak bağlanması ve
- giriş ve çıkışların MATLAB komut penceresine aktarılması için gerekli blok bağlantılarının yapılması gerekmektedir.

Bu işlem oldukça uzun ve hataya açık bir işlem olduğundan bu bağlantıların program kodu ile yaptırılması sağlanmıştır. Bunun için öncelikle 5x5 bir devre oluşturulup bu devrenin ortadaki hücresi için tüm bağlantılar elle yapılmıştır. Oluşan SIMULINK blok diyagramı SIMULINK dışında bir kelime işlemci programında açılarak bu elle yapılan bağlantılar için komut listesine ne yazıldığı araştırılmıştır. Buradan hareketle tüm sistemi (bloklar, bloklar arası bağlantılar, girişler ve çıkışlar) oluşturmak için nasıl bir komut listesi yazılması gerektiği anlaşılmıştır. Böylece istenen büyüklükte toplam devreyi oluşturmak için gerekli komut listesini otomatik yazdıran MATLAB kodu oluşturulmuştur. Bu şekilde yazılan program kodu yaklaşık 700 satırdan oluşmaktadır ve 50x50 boyutuna kadar (bu sınır oluşturulabilecek SIMULINK blok diyagramının sahip olabileceği maksimum boyut sınırından kaynaklanmaktadır) 1. türevli ZTHSA hücrelerinin bağlantılarını gerçekleştirmektedir. Aşağıda örnek olarak 5x5 boyutlu bir devrenin SIMULINK blok diyagramı görülmektedir.



Şekil 6.4 5x5 boyutlu ZTHSA devresi

SIMULINK devresi istenen şablon katsayıları ve giriş frekansları için oluşturulduktan sonra devrenin simülasyonu için de;

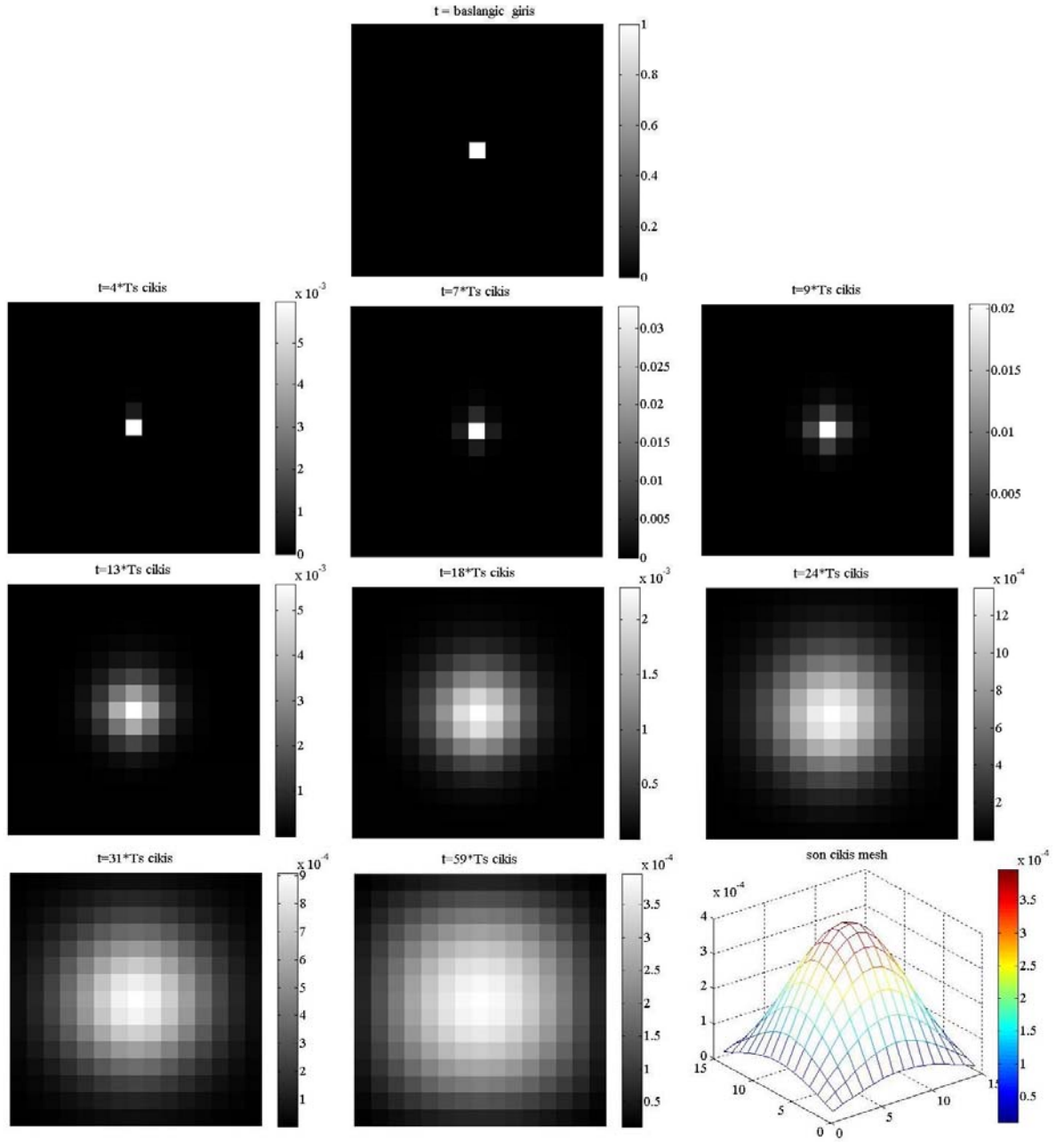
- üç boyutlu uzay-zamansal giriş görüntüsünün her bir (i,j) hücresi için bir boyutlu zamanla değişen giriş olarak ayarlanması,
- SIMULINK blok diyagramının çalıştırılması,
- SIMULINK çıkışında her bir (i,j) hücresinin zamanla değişimi şeklinde elde edilen çıkış görüntüsünün tekrar üç boyutlu uzay-zamansal çıkış görüntüsü haline dönüştürülmesi

adımlarının izlenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak sistemin simülasyonu;

- şablon ve giriş frekans değerlerinin girilmesi
- SIMULINK blok diyagramının bu şablon ve frekans değerlerine göre oluşturulmasını sağlayan MATLAB m-kodunun çalıştırılması
- SIMULINK blok diyagramının çalıştırılması
- SIMULINK'ten MATLAB'e aktarılan çıkış değerlerinin görüntülenmesi

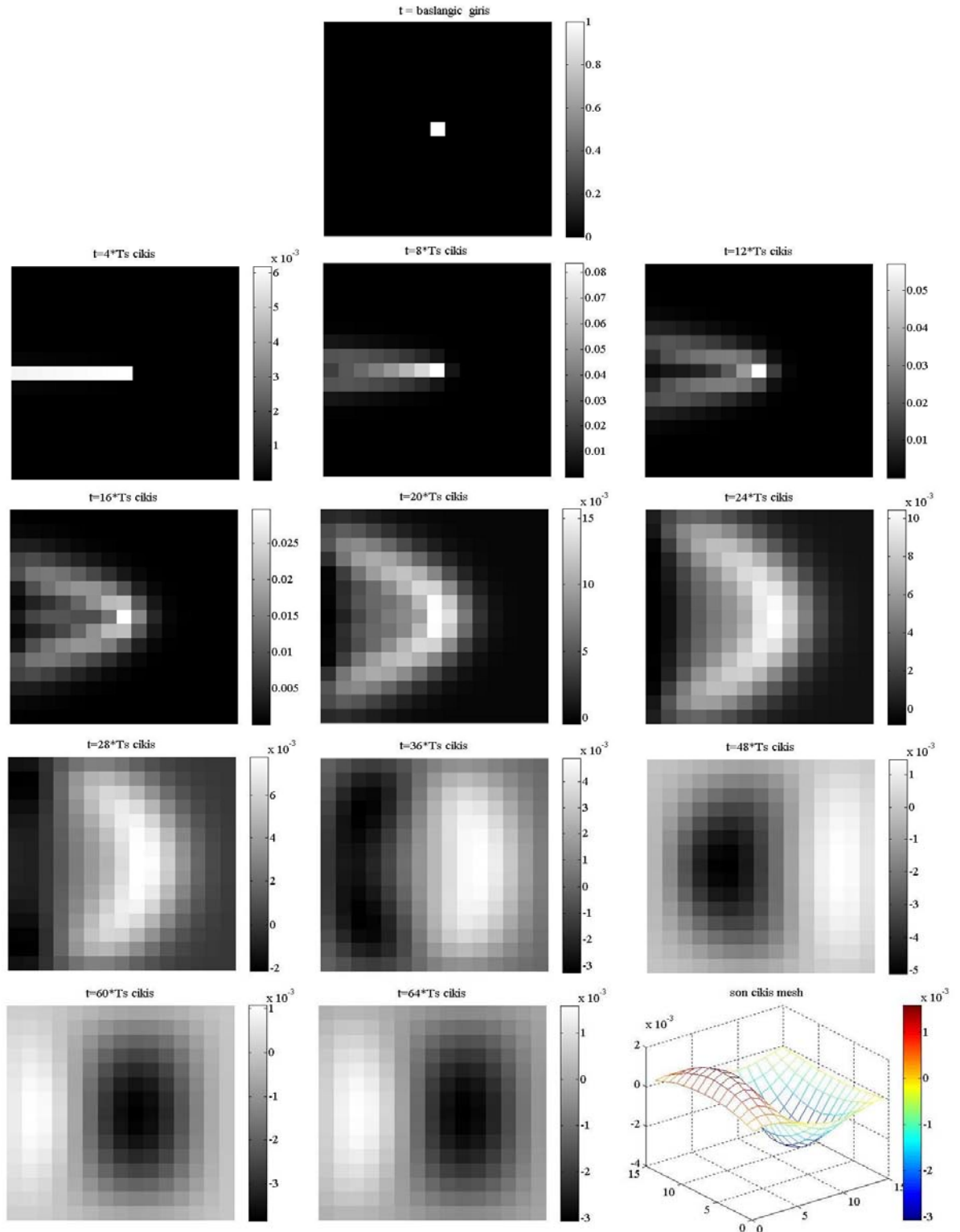
olmak üzere 4 adımda gerçekleşmektedir. Devre boyutları büyüdükçe SIMULINK blok diyagramının oluşturulması, açılması ve her bir simülasyonun yürütülmesi çok uzun zaman almaktadır. Simülasyon süreleri ile ilgili bir karşılaştırma bölüm sonunda verilecektir.

ZTHSA yapısını daha iyi yorumlayabilmek için önce 3x3 komşuluklu geri besleme ve sadece bir komşudan 1. türevli geri besleme bağlantısı içeren 15x15 boyutlu bir devrenin 3x3 komşuluklu farklı şablon katsayıları için impuls yanıtları incelenmiştir. Sonuçlar Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da verilmiştir.

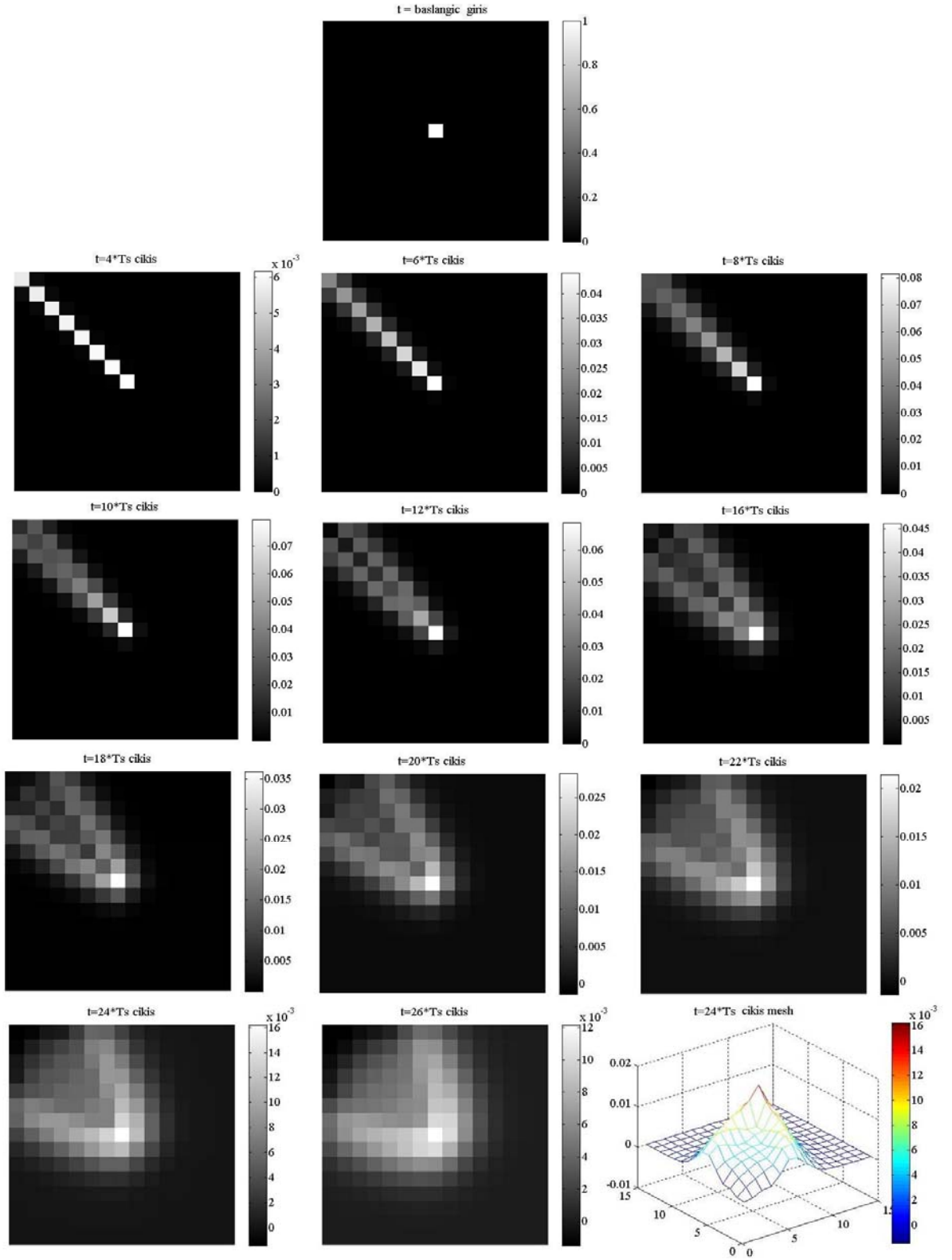


Şekil 6.5 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı.

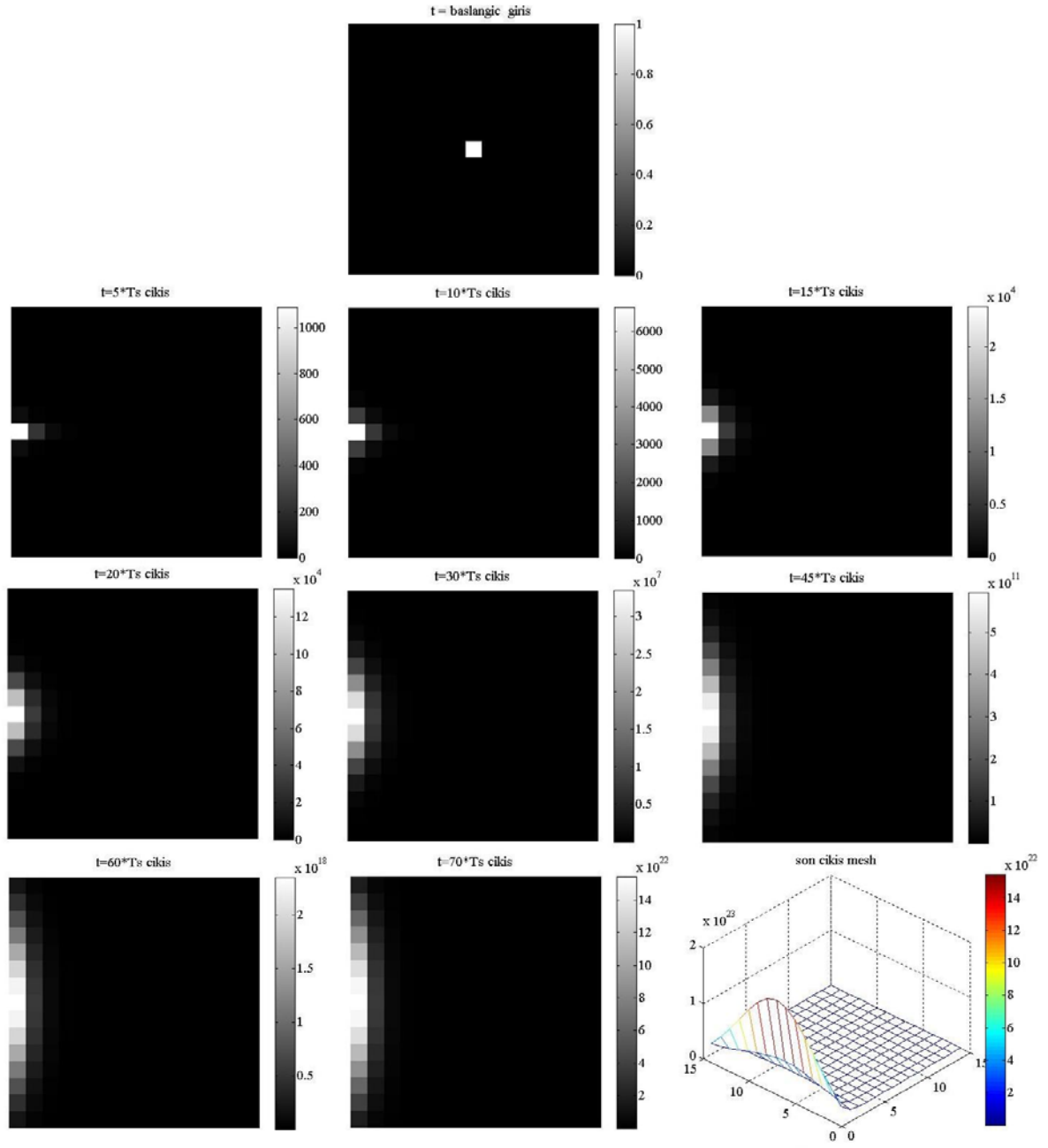
Türevli geri besleme katsayısı düşük olduğundan türevli bağlantının çıkışa bir etkisi olmamaktadır.



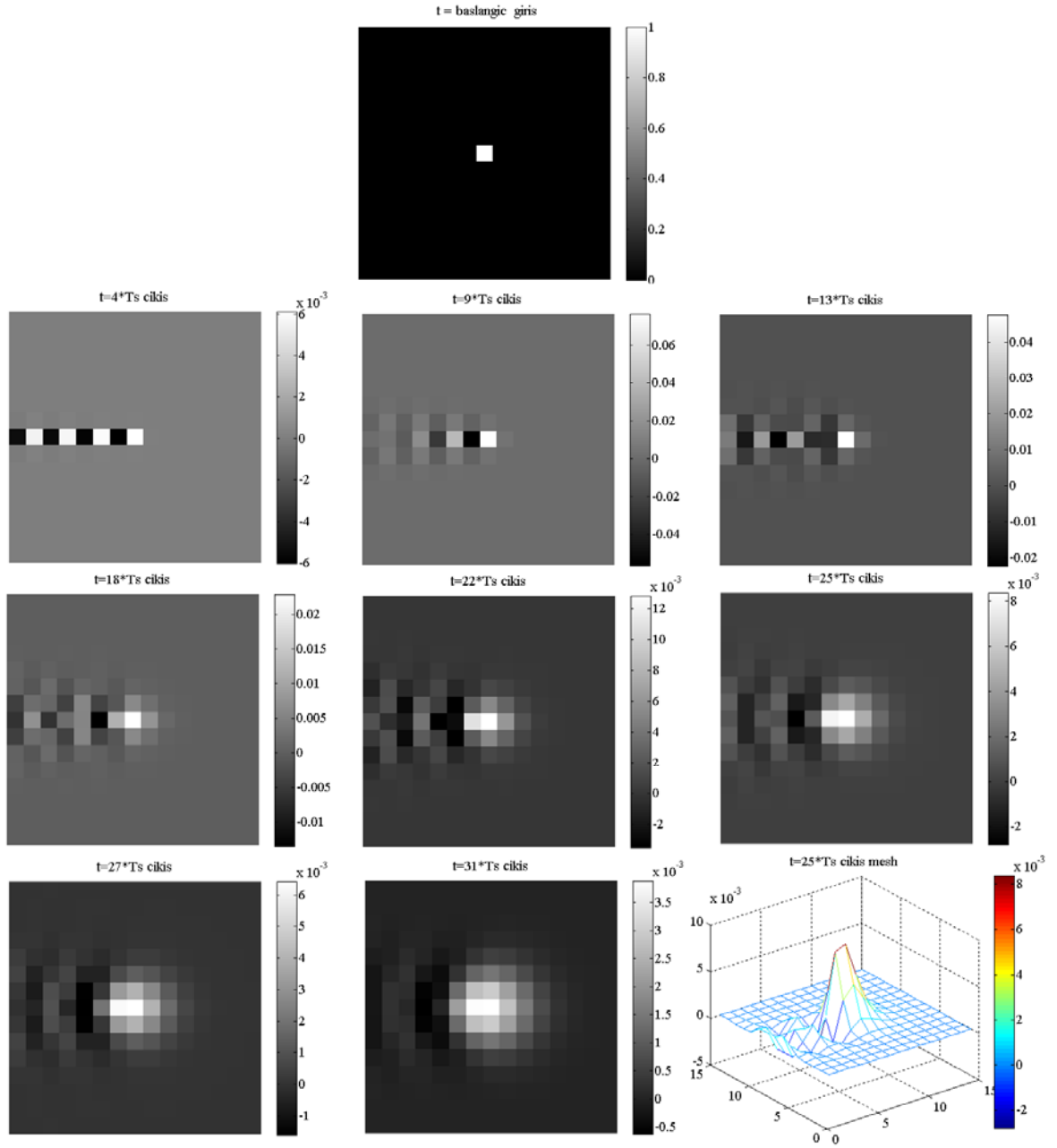
Şekil 6.6 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı



Şekil 6.7 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı



Şekil 6.8 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı



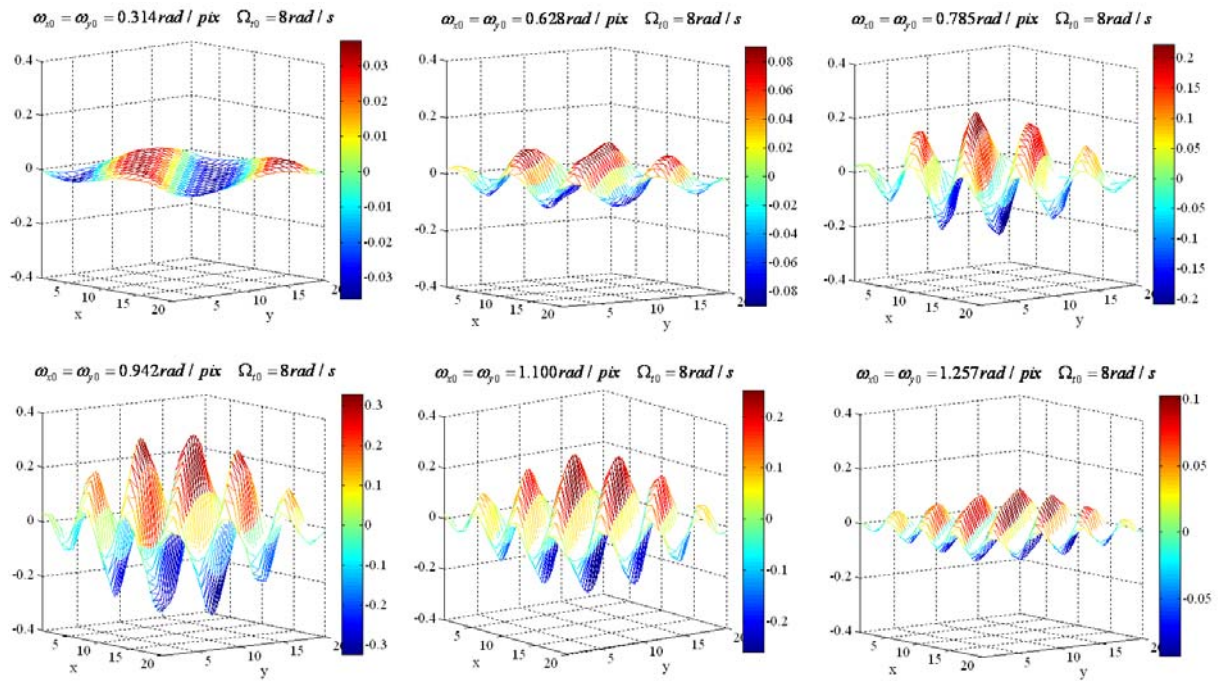
Şekil 6.9 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için SIMULINK impuls yanıtı

Daha sonra yukarıda verilen ZTHSA bant geçiren filtrenin uzay-zamansal sinüzoidal girişler için simülasyonu yapılmıştır. Şekil 6.2'deki ZTHSA devresinin transfer fonksiyonundan filtrenin merkez frekansının $\omega_{x0} \cong 1 \text{radyan} / \text{piksel}$, $\omega_{y0} \cong 1 \text{radyan} / \text{piksel}$ ve $\Omega_{t0} \cong 8 \text{radyan} / \text{saniye}$ civarında olduğu görülür. Dolayısıyla yalnız bu merkez frekansı civarındaki frekansa sahip girişler filtre çıkışında kuvvetlendirilmelidir. SIMULINK

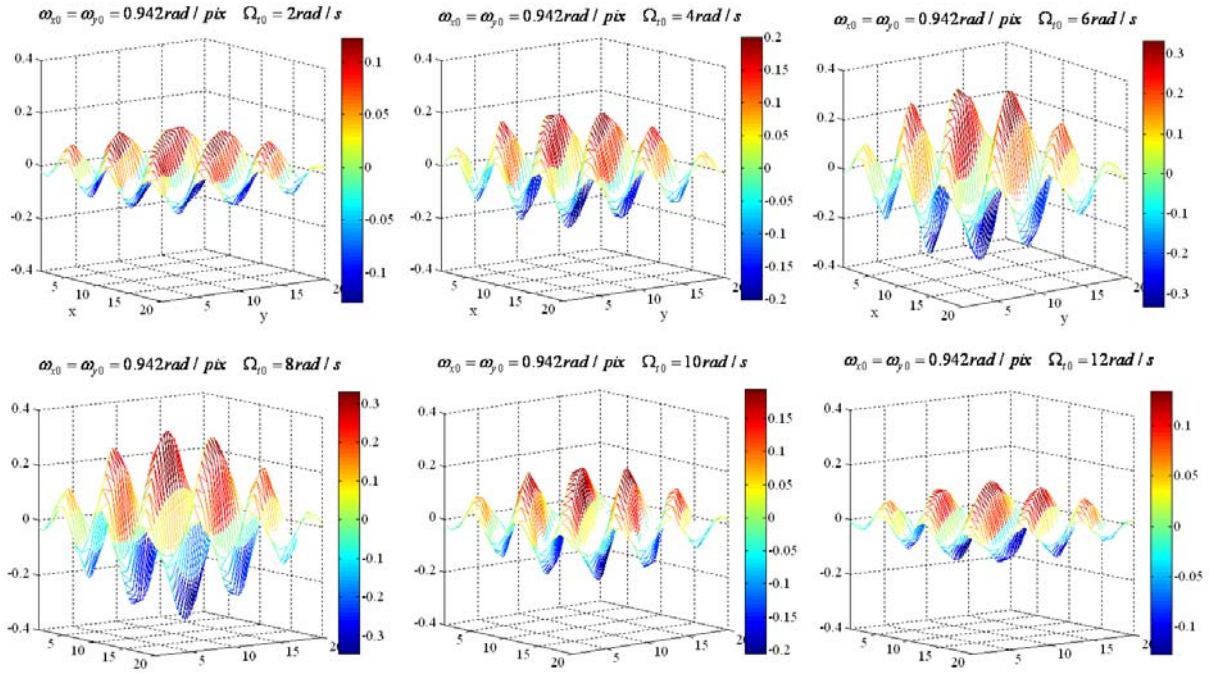
devresinde her hücrenin sinüzoidal kaynak frekansı Ω_t 'dir ve uzaysal frekansların giriş etkisi zamanda (hücrenin bulunduğu uzaysal konuma ait) bir faz farkı olarak görülmektedir. Yani m, n konumundaki hücrenin zamansal giriş işareti aşağıdaki gibidir.

$$Giris(m, n, t) = \sin(\Omega_t t + \omega_m \cdot (m-1) + \omega_n \cdot (n-1)) \quad (6.31)$$

20x20 boyutlu devrenin $a_0 = 3.9$, $G_{XC} = G_{YC} = -1$, $G_{XS} = G_{YS} = 1.5$, $A_R = 5$, $B_R = 10$ değerleri için farklı frekanstaki sinüzoidal giriş işaretlerine karşı çıkışları Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de verilmiştir. Farklı frekanstaki giriş değerlerine karşı elde edilen çıkışlar karşılaştırıldığında filtrenin geçirme bandının Şekil 6.2'deki frekans yanıtı ile uyumlu olduğu görülür.



Şekil 6.10 $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad/s}$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki bant geçiren filtre SIMULINK simülasyon sonuçları. $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad/pix}$ ve $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad/s}$ frekanslı giriş çıkışta en büyük değere ulaşmış, diğer frekanslar için çıkış genliği düşmüştür.



Şekil 6.11 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad} / \text{pix}$ için çeşitli zamansal frekanslardaki bant geçiren filtre SIMULINK simülasyon sonuçları. $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad} / \text{pix}$ ve $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad} / \text{s}$ frekanslı giriş çıkışta en büyük değere ulaşmış, diğer frekanslar için çıkış genliği düşmüştür.

6.3 ZTHSA İle İlgili Özgün Çalışmalar

Bölüm 6.2’de ayrıntılarıyla verilen ZTHSA’nın literatürde var olan tek simülasyon yöntemi çok karmaşık ve uzun zaman gerektiren SIMULINK simülasyonudur. Bu çalışmada ZTHSA simülasyonunu çok daha kısa sürede zahmetsizce yapan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemin geliştirilmesi çalışmaları sırasında kapasitif çevre içeren bir RLC devresinin durum denklemlerinin elde edilmesi ve bu basit yapıdaki ve az sayıdaki durum denkleminin MATLAB ile çözülmesi çok önemli bir katkı sağlamıştır. Aşağıda çeşitli simülasyon aşamaları sırasıyla açıklanmaktadır.

6.3.1 ZTHSA Denkleminin MATLAB “Ode” Fonksiyonu İle Simülasyonu

ZTHSA durum denkleminin simülasyonu önce MATLAB içinde var olan ve “ode” olarak adlandırılan adi diferansiyel denklem çözücü fonksiyonlar kullanılarak yapılmıştır. Bunun için $M \times N$ boyutlu bir devrenin her bir (i,j) hücresine ait 1. dereceden $M \times N$ tane durum denklemleri bölüm 2.1.6’deki gibi vektör-matris olarak ifade edilir. Daha sonra vektör-matris formunda yazılmış bu denklemin çözümü yapılır. Bu şekilde yapılan simülasyon sonunda zamanla değişen giriş işaretinin devreye nasıl uygulanması gerektiği açıklık kazanmıştır.

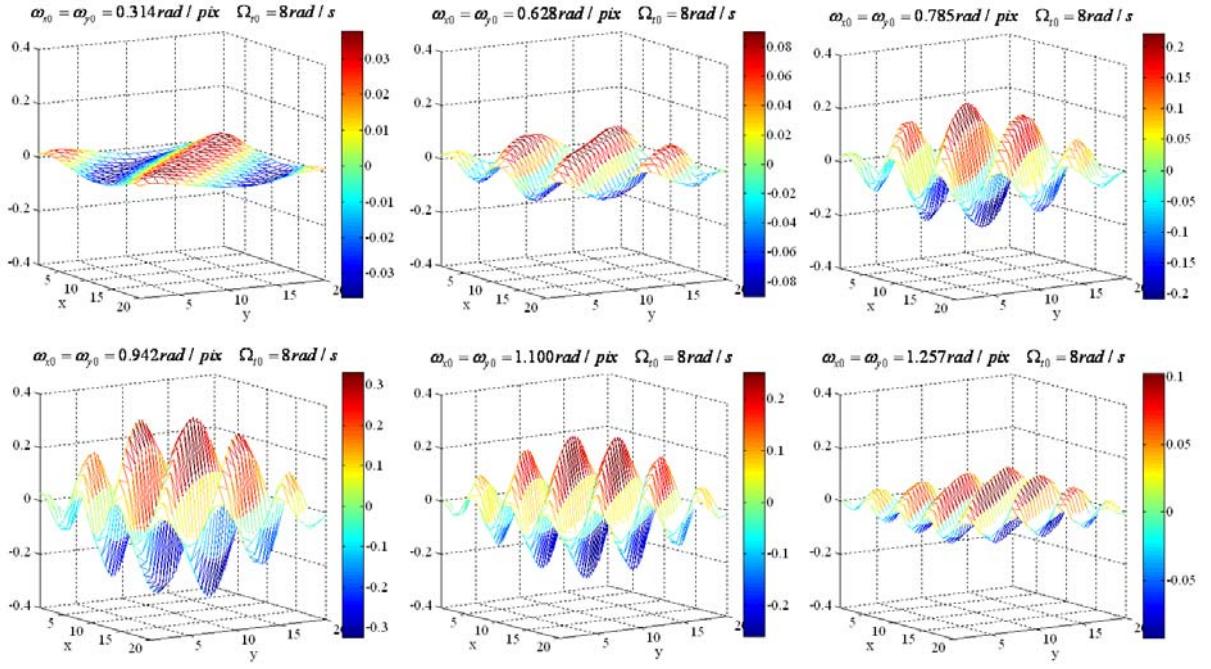
ZTHSA'nın her bir (i,j) hücresi için yazılan (6.10) denklemi, satır satır paketleme yöntemi kullanılarak vektör-matris formunda yazılarak

$$\hat{\mathbf{A}}_1 \frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \hat{\mathbf{A}}.\mathbf{v}(t) + \hat{\mathbf{B}}.\mathbf{u}(t) \quad (6.32)$$

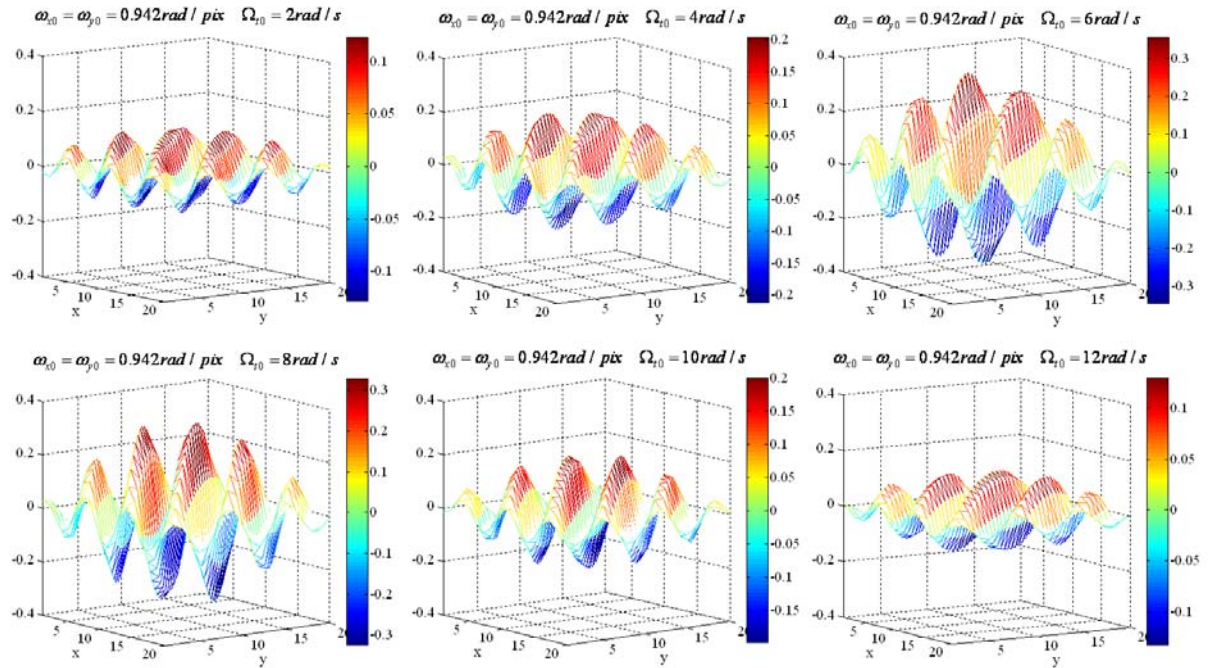
elde edilir. $M \times N$ boyutlu bir giriş görüntüsü için (6.32) denkleminde elde edilen $\hat{\mathbf{A}}_1$, $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrisleri $(M \times N) \times (M \times N)$ boyutundadır. $\mathbf{v}$ ve $\mathbf{u}$ vektörleri de $(M \times N) \times 1$ boyutundadır ve sırasıyla tüm hücrelerin durum ve giriş değerlerini içermektedir. Denklemin her iki tarafı $\hat{\mathbf{A}}_1$ matrisinin tersi ile çarpılarak

$$\frac{d\mathbf{v}(t)}{dt} = \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \hat{\mathbf{A}}.\mathbf{v}(t) + \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \hat{\mathbf{B}}.\mathbf{u}(t) \quad (6.33)$$

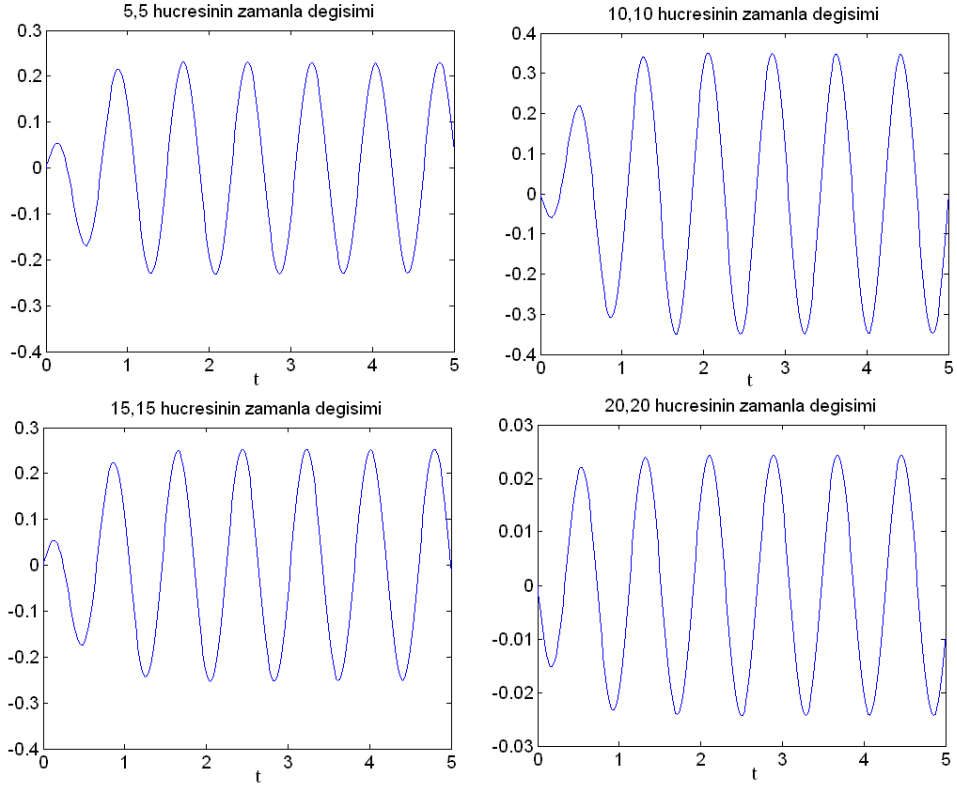
elde edilir. (6.33) denklemi MATLAB içinde var olan ve “ode” olarak adlandırılan diferansiyel denklem çözücü programlar kullanılarak çözdürülmüştür. Bu simülasyonun gerçekleştirilmesinde giriş işareti $\mathbf{u}(t)$ 'nin zamanla değişmesi işlemi karmaşıktır. Ode çözücüsü nümerik integrasyon adım aralığını otomatik olarak belirlemektedir. Bu zaman aralığına T_{ode} diyelim. Ode çözücüsüne elimizdeki belli t anlarındaki $\mathbf{u}(t)$ değerlerinden kendi her bir T_{ode} adımı için gerekli olacak $\mathbf{u}(t)$ değerlerini hesaplatmak için de yine MATLAB'de var olan interpolasyon fonksiyonu kullanılmıştır. 20×20 boyutlu giriş görüntüsü için ZTHSA bant geçiren filtre denkleminin ode çözücüsü ile elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'de verilmiştir. Şekillerdeki farklı giriş frekansları için elde edilen çıkışlar SIMULINK simülasyonu ile uyumludur.



Şekil 6.12 $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad/s}$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki ode45 simülasyonu çıktıları. $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad/pix}$ ve $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad/s}$ frekanslı giriş çıkışta en büyük değere ulaşmış, diğer frekanslar için çıkış genliği düşmüştür.



Şekil 6.13 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad/pix}$ için çeşitli zamansal frekanslardaki ode45 simülasyonu çıktıları



Şekil 6.14 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad} / \text{pix}$, $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad} / \text{s}$ için çeşitli hücrelerin zamanla değişimi. 20,20 hücresi sınır koşullarından etkilendiğinden bulanıklaşmaktadır.

Bu yöntemin sakıncası $\hat{\mathbf{A}}_1$, $\hat{\mathbf{A}}$ ve $\hat{\mathbf{B}}$ matrislerinin boyutlarının görüntü boyutları ile karesel olarak artmasıdır. Ayrıca (6.33) denkleminin elde edilmesi için $\hat{\mathbf{A}}_1$ matrisinin tersinin alınmasının gerekmesi bu simülasyonu yavaşlatan önemli bir nedendir.

6.3.2 ZTHSA Vektör-Matris Denkleminin Runge Kutta Yaklaşıklığı İle Simülasyonu

“ode” çözümünden sonra “ode” fonksiyonunun yaptığı iterasyona benzer bir iterasyonun yazılan bir programla yapılması yoluna gidilmiştir. Bir önceki aşamada kullanılan ode45 çözücüsü 4. dereceden Runge Kutta (RK4) iterasyonu kullandığı için vektör-matris diferansiyel denkleminin 4. dereceden Runge Kutta yaklaşıklığı uygulanmıştır.

$\dot{x} = f(x, t)$ şeklindeki bir diferansiyel denklem ve başlangıç koşulu t_n anında x_n olarak verilsin. İntegrasyon adımı h olmak üzere 4. derece Runge Kutta yaklaşıklığı

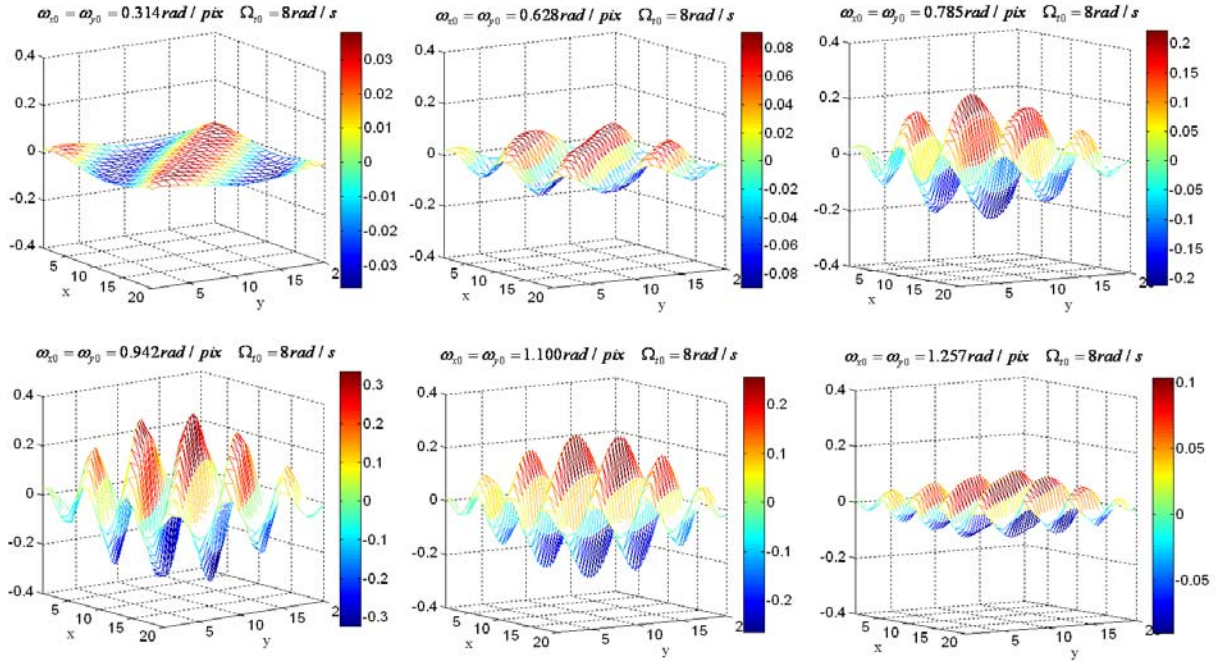
$$\begin{aligned}
k_1 &= f(x_n, t_n) \\
k_2 &= f(x_n + 0.5hk_1, t_n + 0.5h) \\
k_3 &= f(x_n + 0.5hk_2, t_n + 0.5h) \\
k_4 &= f(x_n + hk_3, t_n + h) \\
x_{n+1} &= x_n + \frac{1}{6}h(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)
\end{aligned} \tag{6.34}$$

şeklinde elde edilir. (6.33) vektör-matris durum denkleminde Runge Kutta yaklaşıklığı uygulanırsa,

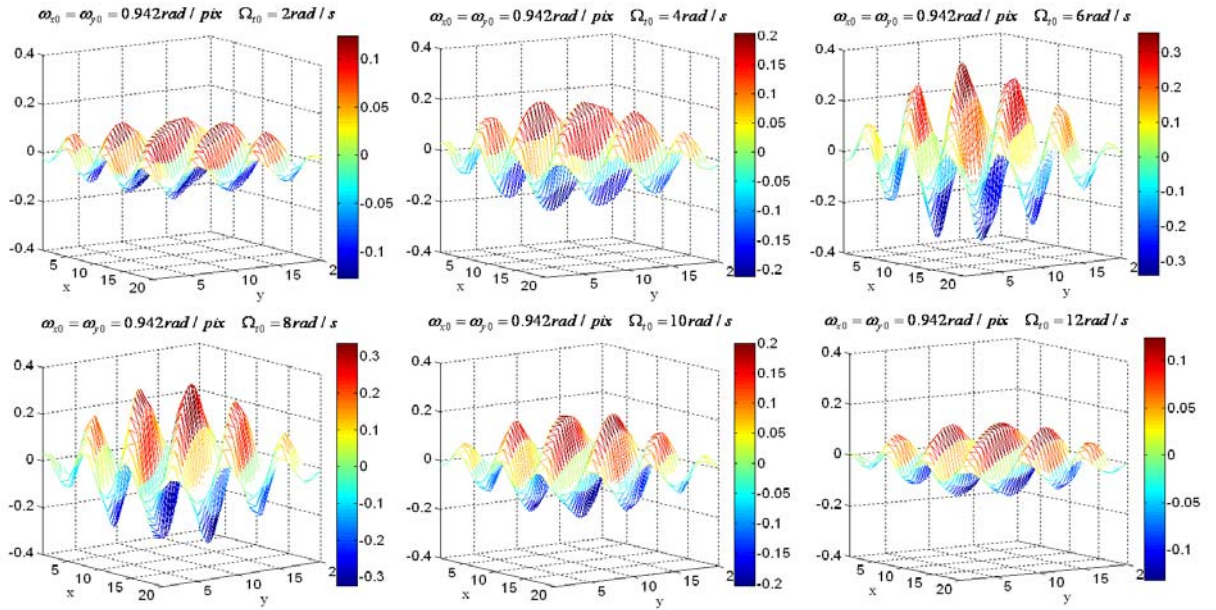
$$\begin{aligned}
\mathbf{k}_1 &= \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \hat{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{v}_0 + \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \cdot \mathbf{u}(t_0) \\
\mathbf{k}_2 &= \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \hat{\mathbf{A}} \cdot (\mathbf{v}_0 + 0.5h\mathbf{k}_1) + \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \cdot \mathbf{u}(t_0 + 0.5h) \\
\mathbf{k}_3 &= \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \hat{\mathbf{A}} \cdot (\mathbf{v}_0 + 0.5h\mathbf{k}_2) + \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \cdot \mathbf{u}(t_0 + 0.5h) \\
\mathbf{k}_4 &= \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \hat{\mathbf{A}} \cdot (\mathbf{v}_0 + h\mathbf{k}_3) + \hat{\mathbf{A}}_1^{-1} \cdot \mathbf{u}(t_0 + h) \\
\mathbf{v}(1) &= \mathbf{v}_0 + \frac{h}{6}(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4) \\
\mathbf{v}(n+1) &= \mathbf{v}(n) + \frac{h}{6}(\mathbf{k}_1 + 2\mathbf{k}_2 + 2\mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4)
\end{aligned} \tag{6.35}$$

elde edilir. Bu iterasyonun yapılabilmesi için her bir $0.5h$ anında giriş işaretinin değerinin bilinmesi gerekmektedir. Gereken $\mathbf{u}(t)$ değerlerinin hesabı önce ode çözümünde olduğu gibi interpolasyon fonksiyonu kullanarak yapılmıştır. Ancak interpolasyon fonksiyonu kullanımı simülasyon süresini uzatmaktadır. Dolayısıyla aradaki $\mathbf{u}(t)$ değerlerine interpolasyon yapmadan, her bir T_F anındaki giriş bir sonraki giriş gelene kadar sabit tutularak ikinci bir RK4 iterasyonu daha yapılmıştır. İnterpolasyonsuz iterasyon da aynı sonuçlara ulaşmaktadır.

RK4 iterasyonu sonuçları Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da verilmektedir. Şekil 6.12 ile Şekil 6.15 ve Şekil 6.13 ile Şekil 6.16 karşılaştırıldığında RK4 iterasyonunun ode45 çözümleri ile aynı sonuçları elde ettiği görülmektedir.



Şekil 6.15 $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad} / s$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki interpolasyonlu RK4 iterasyonu çıktıları



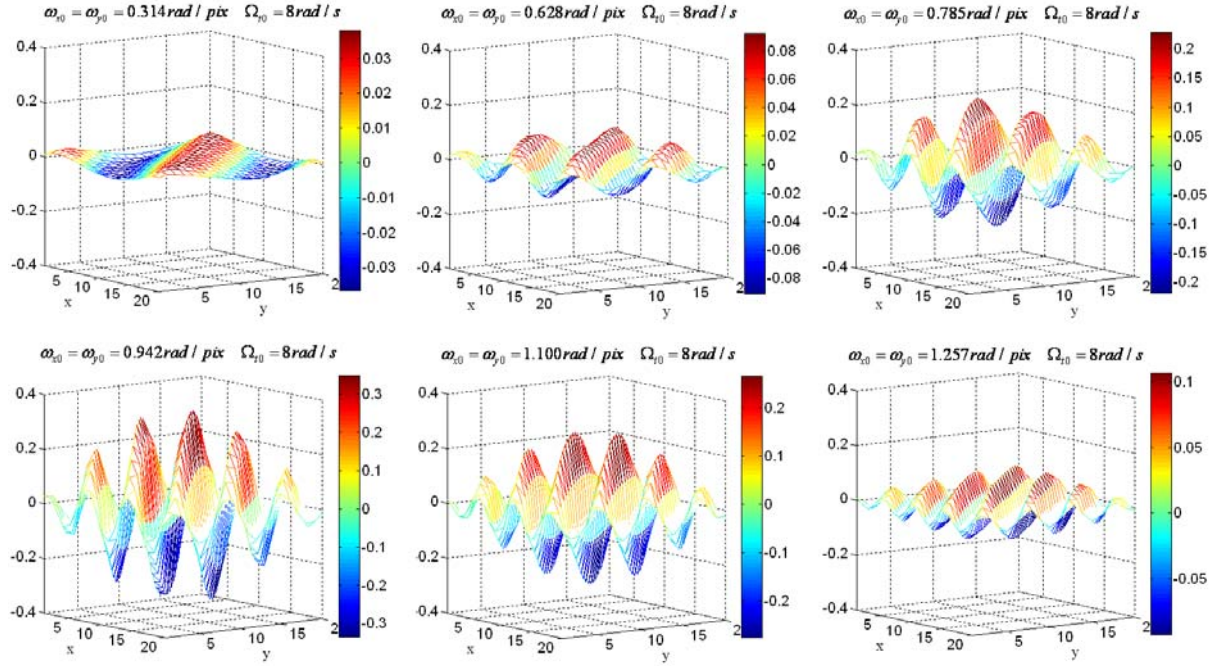
Şekil 6.16 $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad} / \text{pix}$ için çeşitli zamansal frekanslardaki interpolasyonlu RK4 iterasyonu çıktıları

6.3.3 ZTHSA Vektör-Matris Denkleminin Euler Yaklaşıklığı İle Simülasyonu

(6.33) vektör-matris durum denkleminin Euler yaklaşıklığı da uygulanabilir. RK iterasyonu için hesaplamalar bir kez yapıldığında buradan Euler iterasyonuna geçmek çok kolaydır.

Euler iterasyonu RK iterasyonunda $\mathbf{v}(n+1) = \mathbf{v}(n) + h\mathbf{k}_1$ yapılarak elde edilebilir.

Euler iterasyonu sonuçları Şekil 6.17’de verilmektedir. Şekil 6.15 ile Şekil 6.17 karşılaştırılırsa Euler iterasyonunun RK4 iterasyonu ile aynı sonuçlara ulaştığı görülür.



Şekil 6.17 $\Omega_{t_0} = 8 \text{ rad/s}$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki interpolasyonlu Euler iterasyonu çıktıları

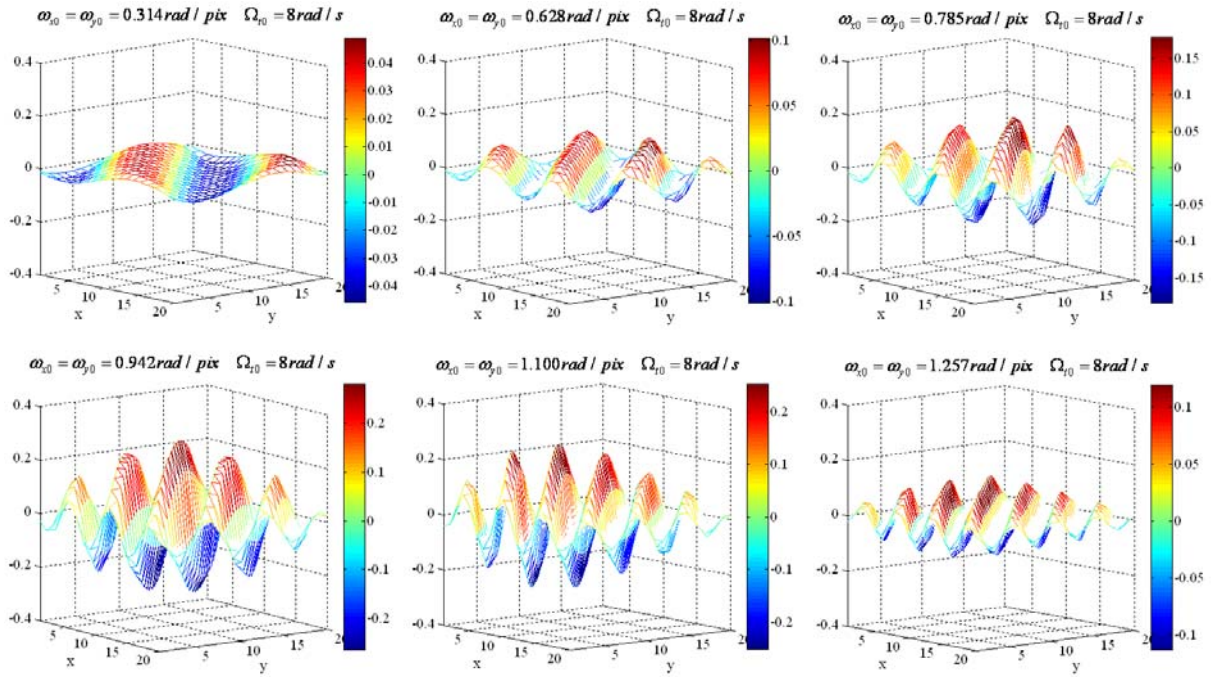
6.3.4 ZTHSA Simülasyonu İçin Tasarlanan Yeni Yöntem

(6.23) denkleminin her iki tarafında da türevli ifadeler yer aldığından bu denklemin nümerik simülasyonunun lineer HSA’daki gibi yapılamayacağı bölüm 6.1’de belirtilmişti. Bu çalışmada bu simülasyon için yeni bir yöntem tasarlanmıştır. Bu yöntemde (6.23) denkleminin sol tarafındaki (i,j) hücresinin türevi için Euler ileri, denklemin sağ tarafındaki komşu hücrelerin türevleri için ise Euler geri yaklaşıklığı kullanılmaktadır. Böylece

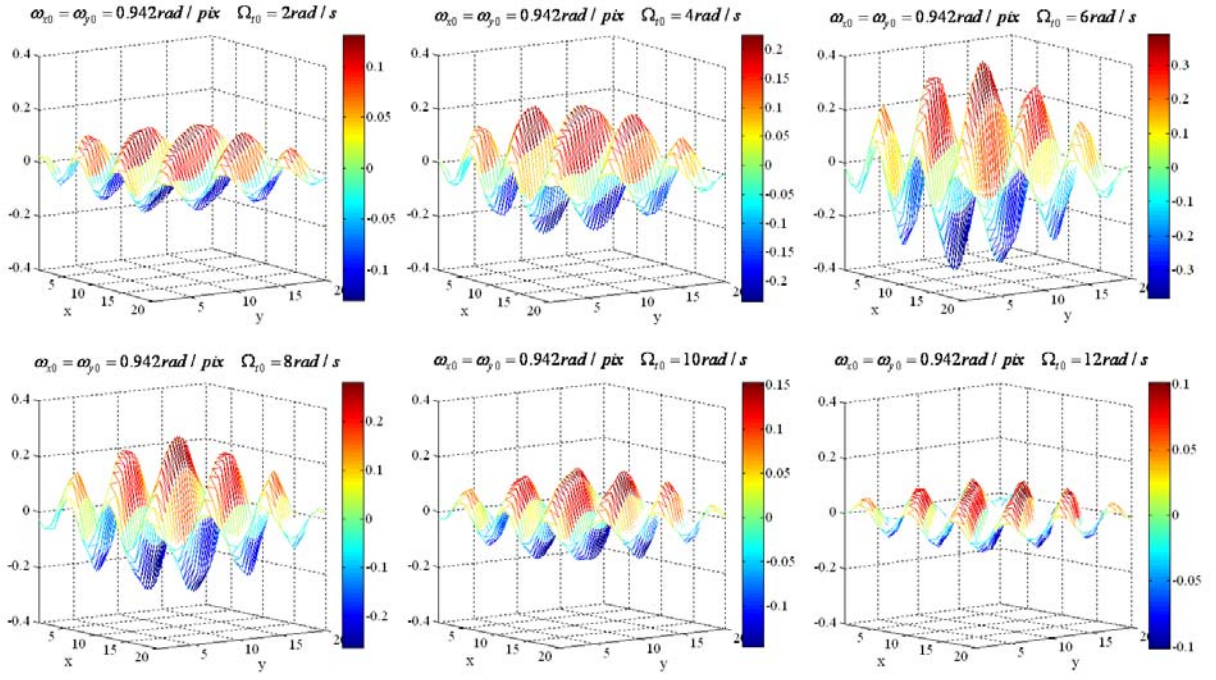
$$A_1(0,0) \frac{v_{i,j,k+1} - v_{i,j,k}}{T_s} = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,k} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,k} - \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) \frac{v_{i,j,k} - v_{i,j,k-1}}{T_s} \quad (6.36)$$

$$v_{i,j,k+1} = v_{i,j,k} + \frac{T_s}{A_1(0,0)} \left(\sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r A(m,n) v_{i+m,j+n,k} + \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r B(m,n) u_{i+m,j+n,k} - \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r \tilde{A}_1(m,n) \frac{v_{i+m,j+n,k} - v_{i+m,j+n,k-1}}{T_s} \right) \quad (6.37)$$

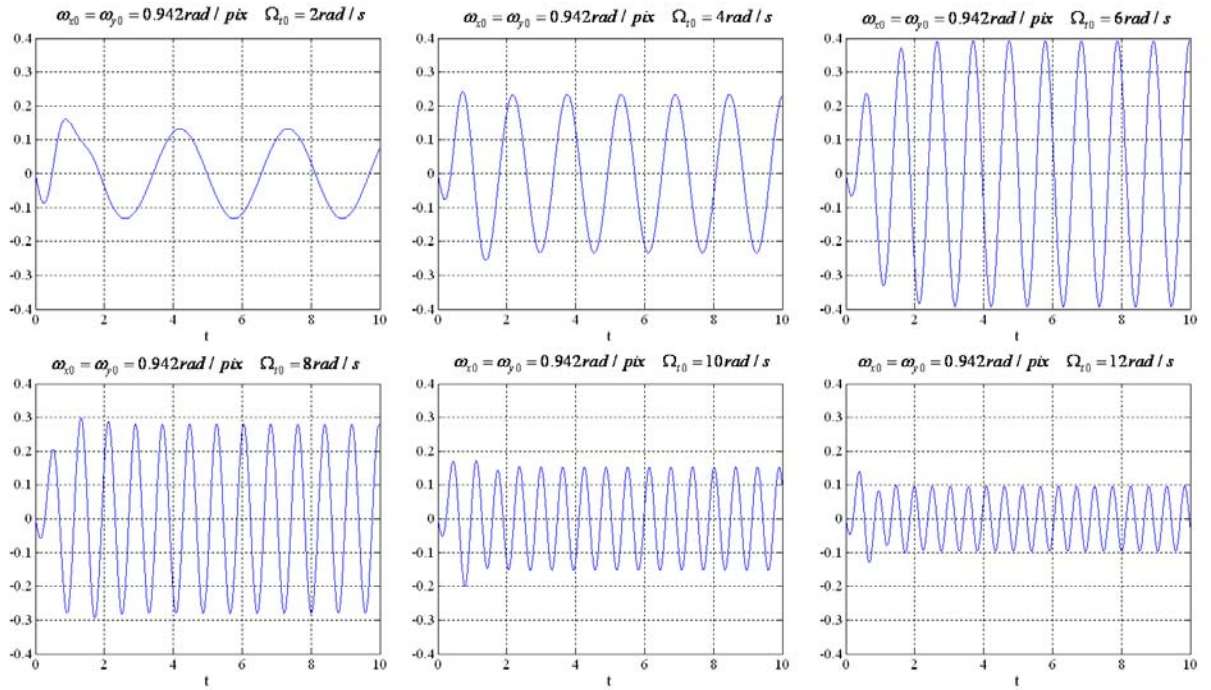
elde edilir. Burada (i,j) hücresinin $k+1$ anındaki durumu, kendisinin ve komşularının k ve $k-1$ anlarındaki değerleri kullanılarak hesaplanabilir hale gelir. İterasyonda soldaki türev bir adım ilerde, sağdaki türev ise bir adım geride hesaplanmış olur ancak T_s integrasyon adımı küçük seçildiği sürece bu iki farklı andaki türev değeri birbirine çok yakın olacaktır. Simülasyonlarda $T_s = 0.02s$ yeterli olmaktadır. Simülasyon sonuçları yukarıdaki diğer yöntemlerin sonuçları ile uyumludur. MATLAB kodu ile simülasyon beklendiği gibi SIMULINK simülasyonuna göre çok daha hızlı çalışmaktadır. Sinüzoidal girişler için iterasyon sonuçları Şekil 6.18, Şekil 6.19 ve Şekil 6.20’de verilmektedir (Tural Polat ve Tavşanoğlu, 2009).



Şekil 6.18 Tasarlanan yöntemin $\Omega_{t0} = 8 \text{ rad/s}$ için çeşitli uzaysal frekanslardaki çıkışları



Şekil 6.19 Tasarlanan yöntemin $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad / pix}$ için çeşitli zamansal frekanslardaki çıkışları



Şekil 6.20 Tasarlanan yöntemin $\omega_{x0} = \omega_{y0} = 0.942 \text{ rad / pix}$ ve çeşitli zamansal frekanslarda 10,10 hücresinin piksel değerlerinin zamanla değişimi

Önerilen simülasyon için bir hata kriteri oluşturmak amacıyla ZTHSA bant geçiren filtrenin yukarıdaki tüm yöntemler ile yapılan simülasyon sonuçları karşılaştırılmıştır. 20x20 boyutlu

sinüzoidal girişler için çıkış işaretlerinin maksimum ve minimum genlikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Ode45 çözümü SIMULINK simülasyonu ile aynı işlemi yaptığından neredeyse aynı sonuçlara ulaşmaktadır. Vektör-Matris ZTHSA denkleminin RK4 iterasyonunda girişin iterasyonun ara adımlarındaki değerleri için interpolasyon yapıldığında ortalama hata oranı %1.3’e düşmekte, yapılmadığında %1.7 hata ile sonuca ulaşılmaktadır. Vektör-Matris ZTHSA denkleminin interpolasyonlu ve interpolasyonsuz Euler iterasyonunda elde edilen ortalama hata oranları sırasıyla %3.3 ve %3.6 olmaktadır.

Tasarlanan yöntem sinüzoidal girişler için çıkış genliklerini ortalama %15 hata ile hesaplamaktadır. Bu hata yüksek bir değer olarak göze çarpmaktadır ancak çıkış değerleri normalize edilirse önerilen yöntemin filtrenin geçirme bandını yüksek doğrulukla yakaladığı görülmektedir.

Çizelge 6.1 ZTHSA bant geçiren filtrenin yukarıda incelenen yöntemlerle yapılan simülasyon sonuçları ($\Omega_c = 8rad / s$)

$\omega_x = \omega_y [rad / pix]$	1	2	2.5	3	3.5	4
SIMULINK	-0.0360 0.0372	-0.0902 0.0905	-0.2079 0.2221	-0.3237 0.3288	-0.2601 0.2517	-0.0931 0.1029
Ode45	-0.0366 0.0378	-0.0902 0.0905	-0.2079 0.2220	-0.3236 0.3287	-0.2599 0.2516	-0.0930 0.1029
Matrisel RK4 interpolasyonlu	-0.0364 0.0379	-0.0897 0.0911	-0.2118 0.2226	-0.3232 0.3362	-0.2647 0.2564	-0.0902 0.1039
Matrisel RK4 interpolasyonsuz	-0.0366 0.0378	-0.0891 0.0911	-0.2139 0.2222	-0.3217 0.3404	-0.2673 0.2592	-0.0919 0.1043
Matrisel Euler interpolasyonlu	-0.0367 0.0382	-0.0908 0.0924	-0.2186 0.2286	-0.3342 0.3494	-0.2746 0.2655	-0.0921 0.1065
Matrisel Euler interpolasyonsuz	-0.0369 0.0381	-0.0902 0.0924	-0.2204 0.2280	-0.3327 0.3529	-0.2766 0.2678	-0.0941 0.1068
Yeni yöntem	-0.0457 0.0492	-0.1009 0.1021	-0.1843 0.1781	-0.2638 0.2800	-0.2506 0.2528	-0.1132 0.1196

Çizelge 6.2 ZTHSA bant geçiren filtrenin normalize edilmiş simülasyon sonuçları
($\Omega_t = 8rad / s$)

$\omega_x = \omega_y [rad / pix]$	1	2	2.5	3	3.5	4
SIMULINK	-0.1095 0.1131	-0.2743 0.2752	-0.6323 0.6755	-0.9845 1	-0.7911 0.7655	-0.2832 0.3130
Ode45	-0.1113 0.1115	-0.2744 0.2753	-0.6325 0.6754	-0.9845 1	-0.7907 0.7654	-0.2829 0.3131
Matrisel RK4 interpolasyonlu	-0.1083 0.1127	-0.2668 0.2710	-0.6300 0.6621	-0.9613 1	-0.7873 0.7626	-0.2683 0.3090
Matrisel RK4 interpolasyonsuz	-0.1075 0.1110	-0.2618 0.2676	-0.6284 0.6528	-0.9451 1	-0.7853 0.7615	-0.2700 0.3064
Matrisel Euler interpolasyonlu	-0.1050 0.1093	-0.2599 0.2645	-0.6256 0.6543	-0.9565 1	-0.7859 0.7599	-0.2636 0.3048
Matrisel Euler interpolasyonsuz	-0.1046 0.1080	-0.2556 0.2618	-0.6245 0.6461	-0.9428 1	-0.7838 0.7589	-0.2666 0.3026
Yeni yöntem	-0.1632 0.1757	-0.3604 0.3646	-0.6582 0.6361	-0.9421 1	-0.8950 0.9029	-0.4043 0.4271

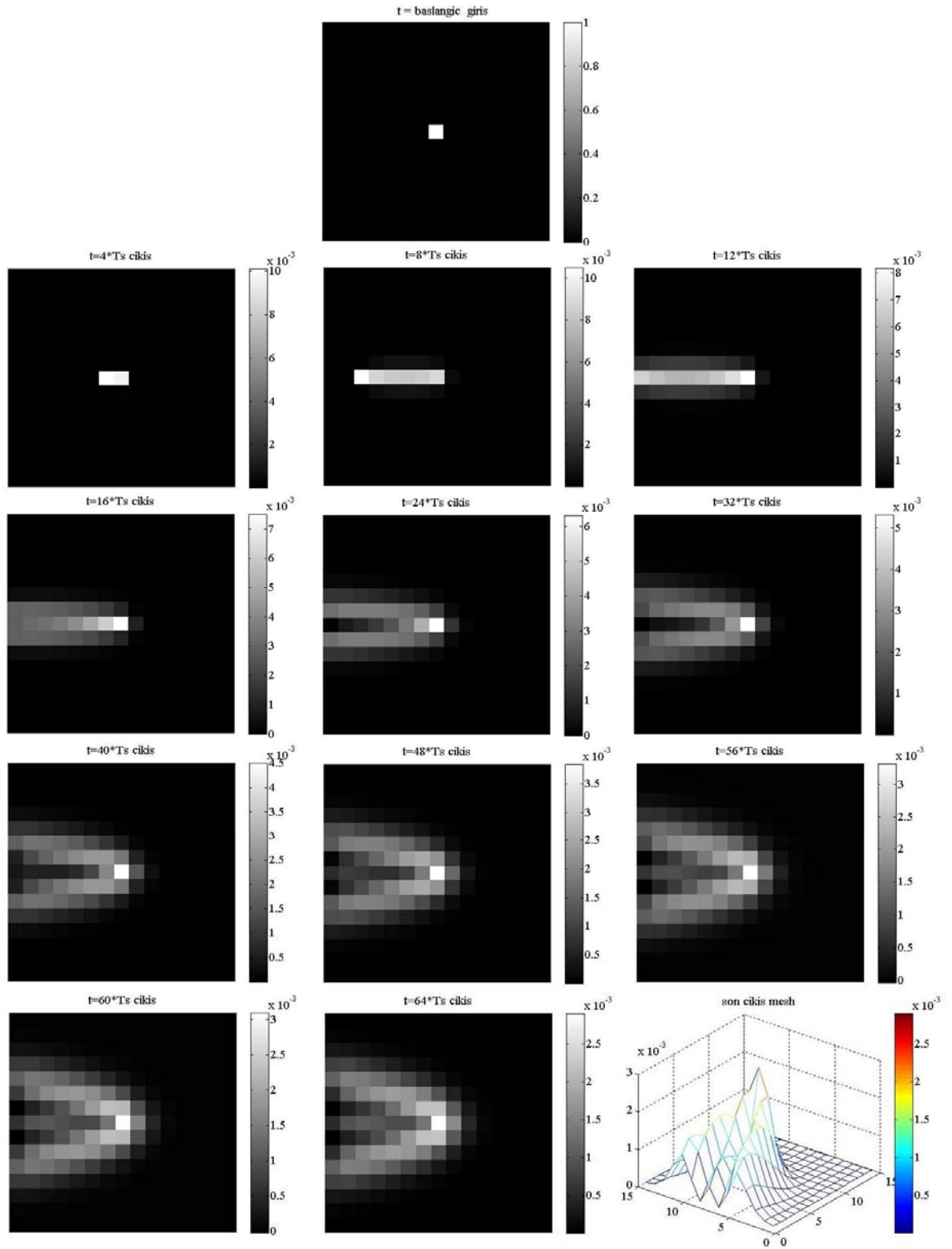
Yeni iterasyon yöntemi SIMULINK devresinin simülasyonunda kullanılan çeşitli 3x3 komşuluklu şablon katsayıları ve impuls girişler için de tekrarlanmıştır. Sonuçlar aşağıdaki sayfalarda verilmektedir. İmpuls simülasyonlarının hata oranı sinüzoidal girişlerle simülasyondan çok daha küçük çıkmıştır.

Yukarıdaki tüm yöntemlerin simülasyon süreleri farklı boyutta sinüzoidal (5x5 komşuluklu HSA) ve impuls (3x3 komşuluklu HSA) girişler için Pentium P4 Core 2 Duo işlemci ve 4GB RAM'e sahip PC'de ölçülmüş ve Çizelge 6.3'de verilmiştir. Matrisel yöntemlerin simülasyon süreleri komşuluk boyutundan bağımsızdır, zamanla değişen girişin iterasyonun ara adımlarındaki değerlerine interpolasyon yapılması durumunda simülasyonlar biraz daha uzun sürmektedir. Önerilen simülasyon beklendiği gibi tüm diğer simülasyon yöntemlerinden daha hızlı çalışmaktadır. Özellikle SIMULINK simülasyonu ile arasındaki hız farkı devre boyutları büyüdükçe katlanarak artmaktadır. Ayrıca önerilen yöntemde sonuçlar tek adımda ekrana

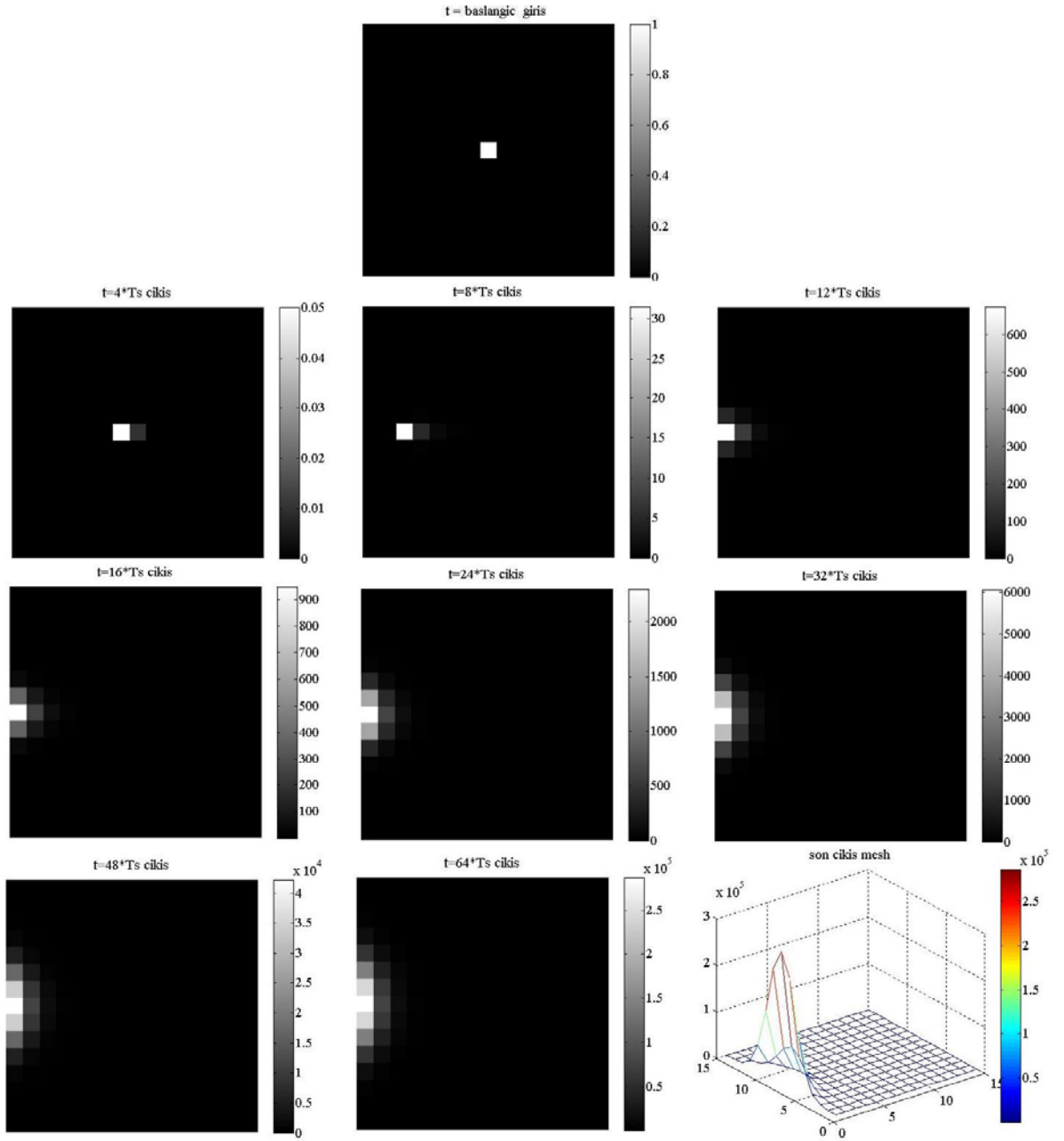
yansırken SIMULINK simülasyonu için yukarıda maddelenen simülasyon adımlarının tek tek elle yapılması gerekmektedir.

Çizelge 6.3 ZTHSA Simülasyon süreleri

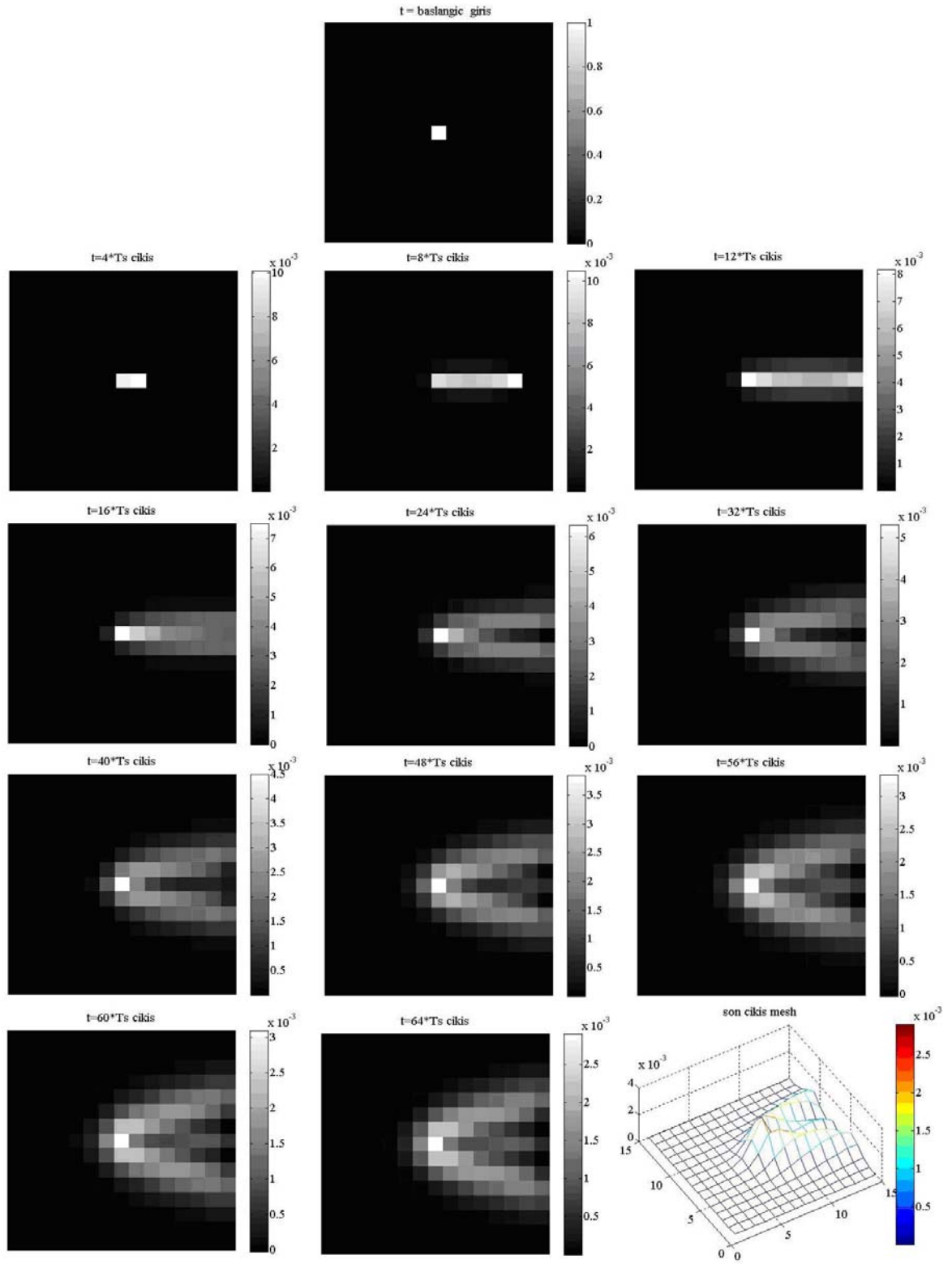
Giriş işareti ve devre boyutu	10x10 impuls	10x10 sinüs	20x20 impuls	20x20 sinüs	30x30 impuls	30x30 sinüs
SIMULINK	31.964s	110.11s	1561.63s	2671.43s	~16500s	~30000s
Ode45	0.705s	3.317s	9.539s	33.774s	87.618s	291.687s
Matrisel RK4 interpolasyonlu	2.09s	2.107s	8.169s	8.199s	32.695s	32.956s
Matrisel RK4 interpolasyonsuz	0.982s	0.995s	5.042s	5.073s	25.791s	25.923s
Matrisel Euler interpolasyonlu	1.322s	1.33s	5.755s	5.778s	17.199s	17.372s
Matrisel Euler interpolasyonsuz	0.942s	0.949s	4.378s	4.409s	14.691s	14.784s
Yeni yöntem	0.014s	0.0374s	0.0249s	0.0819s	0.0465s	0.159s



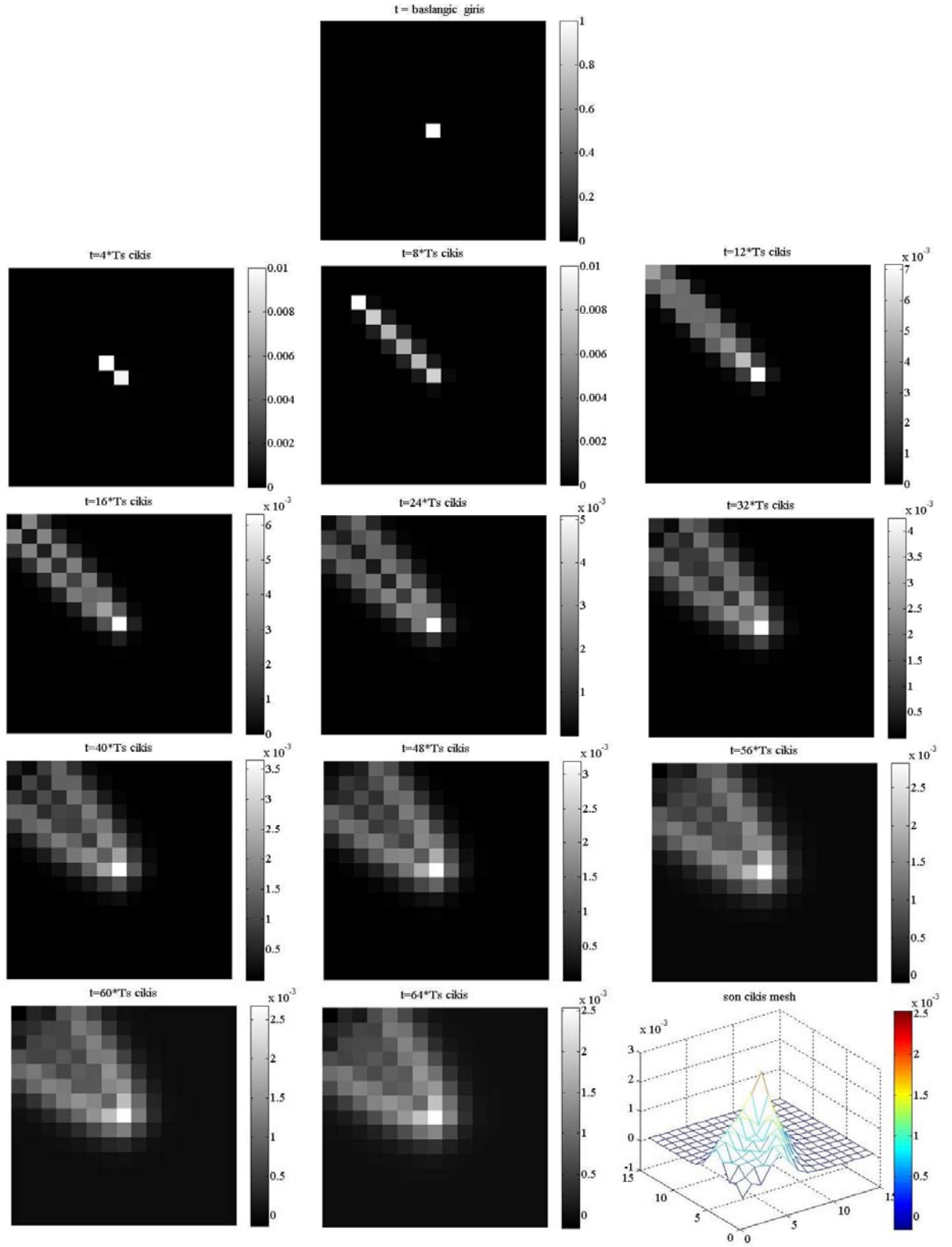
Şekil 6.21 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı



Şekil 6.22 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı



Şekil 6.23 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı



Şekil 6.24 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ için yeni yöntemin impuls yanıtı

6.4 Sonuçlar

Bu bölümde ZTHSA devresinin simülasyonları üzerinde durulmuştur. ZTHSA yapısı genel hatlarıyla verildikten sonra ZTHSA'nın literatürde var olan SIMULINK simülasyonunun dezavantajları ayrıntılı olarak belirtilmiştir. Ardından yeni bir ZTHSA simülasyon yöntemi geliştirilmiştir.

Bu bölümün özgün katkısı ZTHSA bant geçiren filtrenin şablon katsayıları için önerilen düzeltme ve ZTHSA için geliştirilen simülasyon yöntemidir. ZTHSA ile gerçekleştirilen uzay-zamansal bant geçiren filtrenin simülasyonu önce literatürde var olan SIMULINK devresi ile yapılmıştır. Ardından ZTHSA durum denklemi vektör-matris formunda düzenlenerek bu vektör-matrisel denklemin çeşitli yöntemlerle simülasyonu yapılmış ve buradan türevli durum denkleminin HSA iterasyonu ile nasıl simüle edilebileceğine dair ipuçları elde edilmiştir. Daha sonra ZTHSA simülasyonu için yeni bir yöntem tasarlanmıştır. Bu yöntem basit yapısı ve büyük hız avantajı sayesinde özellikle büyük boyutlu devrelerin simülasyonu için çok elverişlidir.

7. SONUÇLAR

Gerçek zamanlı görüntü işleme uygulamalarında çok kısa sürede çok fazla miktarda verinin işlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla bu tip uygulamalar için biyolojik yapıları taklit eden basit modeller geliştirilmiştir. HSA yapısı hem biyolojik sistemlerle birebir örtüşmesi, hem de analog VLSI gerçekleştirmeye uygun olması bakımından görme makinelerinin gerçekleştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Dominguez-Castro vd 1997, Torralba ve Herault, 1999a-1999b, Gruev ve Etienne-Cummings 2002, Galan vd 2003, Cembrano vd 2004, Laiho vd 2004, Stocker 2004, Higgins vd 2005).

Bu tez çalışmasında bilgisayarda görme uygulamalarında özellik çıkarma adımıyla kullanılan çeşitli uzay-zamansal filtre yapılarının HSA ile gerçekleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu yapıların HSA ile gerçekleştirilmesinin en önemli avantajı HSA devresinin çok hızlı çalışması nedeniyle gerçek zamanlı video görüntüsünün işlenmesine olanak sağlamasıdır.

Tez çalışması kapsamında HSA ile gerçekleştirilen uzay-zamansal filtre yapıları detaylı olarak incelenmiştir. HSA ile gerçekleştirilen filtre yapılarına geçmeden önce ikinci dereceden genel analog filtre yapılarından esinlenerek oluşturulan iki boyutlu sürekli-uzay ve sürekli-uzay-zaman filtrelerinin transfer fonksiyonları ve diferansiyel denklemleri elde edilmiştir.

Sürekli-uzay ve sürekli-uzay-zaman filtreleri uzayda ayrıklaştırılarak HSA gibi ızgara şeklindeki yapılarla gerçekleştirilebilirler. Bölüm 4’de, Bölüm3’de incelenen sürekli-uzay filtrelerinin ayrıklaştırılmasıyla çeşitli uzaysal HSA filtreleri elde edilmiştir. Filtrelerin çeşitli parametre değerleri için elde edilen impuls ve genlik frekans yanıtları verilmiştir.

Bölüm 5’de ise sürekli-uzay-zaman filtrelerinin uzayda ayrıklaştırılmasıyla elde edilen uzay-zamansal HSA filtreleri incelenmiş ve simülasyonları yapılmıştır. Kaynaklarda genellikle rastlanmayan HSA şablon katsayılarının hesabı ayrıntılı olarak yapılmıştır.

İncelenen uzay-zamansal filtre yapılarından Gabor tipi filtreler uzay-zamansal frekans ayarlı filtrelerdir ve uzay-zamansal yönleri seçmekte kullanılabilirler. Ancak bu filtreler frekans düzleminde yalnızca ilgili hıza ait olan düzlemi değil bazı başka düzlemleri de seçerler. Ayrıca Gabor tipi filtre şablonları karmaşık sayı olduğundan durum değişkeni de karmaşık sayıdır. Bu filtrenin HSA ile gerçekleştirilmesinde durum değişkeninin gerçel ve sanal kısmı için ayrı birer HSA kullanılmaktadır. Böylece bu filtreler iki katmanlı HSA ile gerçekleştirilebilmektedir.

Hız ayarlı filtreler Gabor tipi filtrelerin iki katmanlı ağından daha basit bir yapıyla gerçekleştirilirler. Ayrıca bu filtreler yalnızca ilgili hıza ait düzlemi seçerler. Ancak bu filtrenin farklı hızlar için çizdirilen frekans yanıtlarından da görülebileceği gibi HAF'ler alçak geçiren filtredir ve bant geçiren hale getirmek için Gabor filtreleri gibi iki katmanlı ağ kullanılmalıdır.

Zaman türevli HSA ise hem gerçel değerlidir hem de uzay-zamansal bant geçiren yapıdadır ancak bu devrenin de geri besleme ve 1. türevli geri besleme şablon katsayıları 5x5 boyutundadır. Bu da devre gerçekleştirmesinde bağlantı yoğunluğunu oldukça arttırmaktadır.

Dördüncü ve beşinci bölümde yapılan özgün çalışmalar kaynaklarda ayrıntısı bulunmayan şablon katsayılarının detaylı hesabıdır. Altıncı bölümde de zaman türevli HSA için kaynaklarda verilen şablon değerleri üzerinde bir düzeltme yapılmıştır.

Beşinci bölümde uzay-zamansal filtrelerin hareketli girişler için simülasyonları yapılmıştır. Bu simülasyonların gerçekleştirilmesini sağlayan en önemli aşama hareketli görüntü için devrenin zaman sabitinin nasıl seçilmesi gerektiğinin anlaşılması olmuştur. Klasik durgun görüntü işleme uygulamalarından farklı olarak, hareketli görüntüler için devrenin zaman sabiti τ 'nın çok küçük olmaması, dolayısıyla giriş işaretinin art arda gelen çerçevelerinin kapasite elemanının üzerindeki gerilim değişimi sürerken düğüme uygulanması gerekmektedir. Ayrıca görüntünün bir çerçevesi girişe uygulandıktan sonra diğer bir çerçeve gelene kadar 3-4 iterasyonun yapılmış olması gerekmektedir. Bu simülasyon zamanlamasına dikkat ederek uzay-zamansal filtrelerin HSA ile simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölümde zaman türevli HSA yapısı üzerinde durulmuştur. ZTHSA'lar lineer HSA devresinde komşu düğümler arasına türevli bağlantıların eklenmesiyle elde edilmektedir. Lineer HSA ile modellenemeyen çeşitli filtre yapıları ZTHSA'lar ile gerçekleştirilebilmektedir. ZTHSA'nın literatürde var olan SIMULINK simülasyonu çok zahmetli, hataya açık ve çok uzun zaman alan bir yöntemdir. 30x30 boyutlu devrenin sinüzoidal girişler için simülasyonu P4 3GHz Core 2 Duo işlemcili ve 4GB RAM'e sahip bir bilgisayarda yaklaşık 8.5 saat sürmektedir. Bu çalışmada önce bu simülasyonun ayrıntıları verilerek zorlukları vurgulanmış, ardından ZTHSA simülasyonu için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yeni geliştirilen simülasyon bant geçiren filtre örneğinde devre boyutlarından bağımsız olarak birkaç 100ms'de sonuca ulaşmakta ve ortalama %15 hata ile çıkış değerlerini elde etmektedir. İmpuls simülasyonunda ise hata oranı daha da küçüktür.

ZTHSA devresi için yapılan bu simülasyonların ZTHSA'nın FPGA ile gerçekleştirilmesine

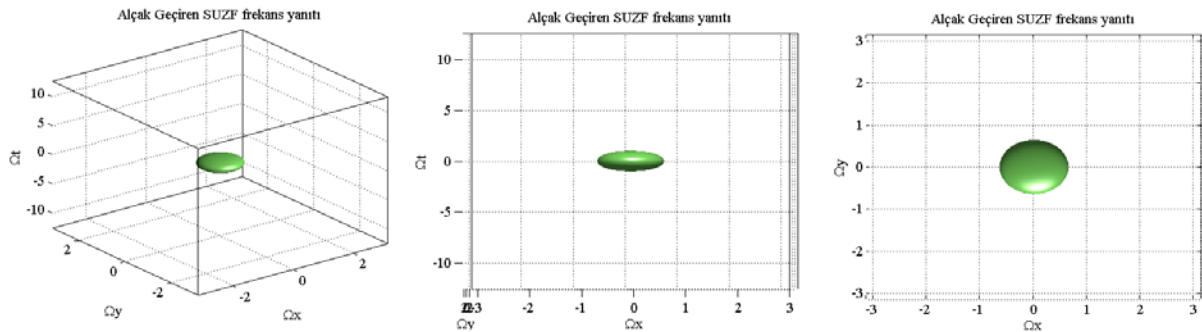
ıřık tutacaęı dūřūnūlmektedir.

Ek 1. MATLAB “isosurface” komutu ile eşyüzey eğrisi çizimi

“isosurface” komutu, üç boyutlu bir fonksiyonun belli bir sabit değere eşit olduğu yüzeyi çizdirmek için kullanılır. Bu komut kontur eğrilerinde aynı yüksekliğe sahip noktaların birleştirilmesine benzer şekilde üç boyutlu fonksiyonun belli bir sabit değere eşit olduğu noktaları birleştirerek bir eşyüzey eğrisi çizmektedir. Fonksiyonu MATLAB’de çağırmak için `isosurface( x, y, z, f, sbt)`

sentaksı kullanılır. Böylece $f(x,y,z) = sbt$ yüzeyi çizdirilir. x, y, z değişkenleri f ’in koordinatlarını, sbt ise bir sabit sayıyı gösterir.

“isosurface” komutu ile üç boyutlu bir filtrenin genlik frekans yanıtı çizdirilirken sbt değeri maksimum genliğin 0.707’si olarak alınırsa şekilde oluşan kapalı yüzeyin içinde kalan frekans bölgesi filtrenin geçirme bandını, dışında kalan frekans bölgesi filtrenin söndürme bandını ve yüzeydeki frekans değerleri de filtrenin kesim frekanslarını göstermektedir (Şekil Ek 1.1). Sonuç olarak bu grafikte genlik frekans yanıtının belli bir sayısal değere (kesim frekansındaki değere) eşit olduğu frekans bölgesini görmekteyiz.

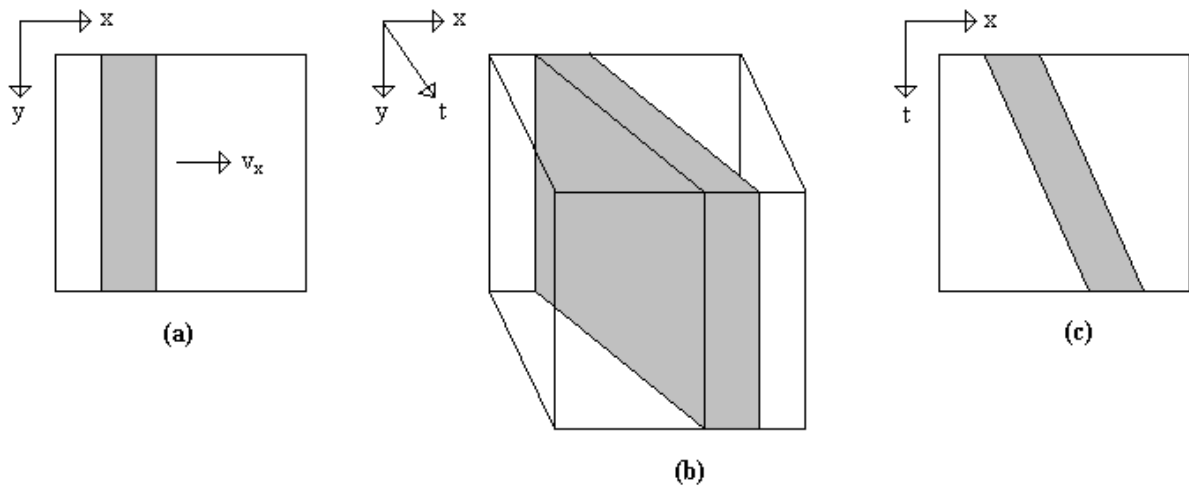


Şekil Ek 1.1 $\gamma = 1, \tau = 1$ için $H(j\Omega_x, j\Omega_y, j\Omega_t) = \frac{1}{1 + \gamma^2(\Omega_x^2 + \Omega_y^2) + j\tau\Omega_t}$ genlik frekans

yanıtı. En solda üç boyutlu çizim, ortada Ω_x, Ω_t kesiti ve sağda Ω_x, Ω_y kesiti görülmektedir. Elipsoitin içinde kalan frekans bölgesi filtrenin geçirme bandını, dışındaki frekans bölgesi de söndürme bandını göstermektedir.

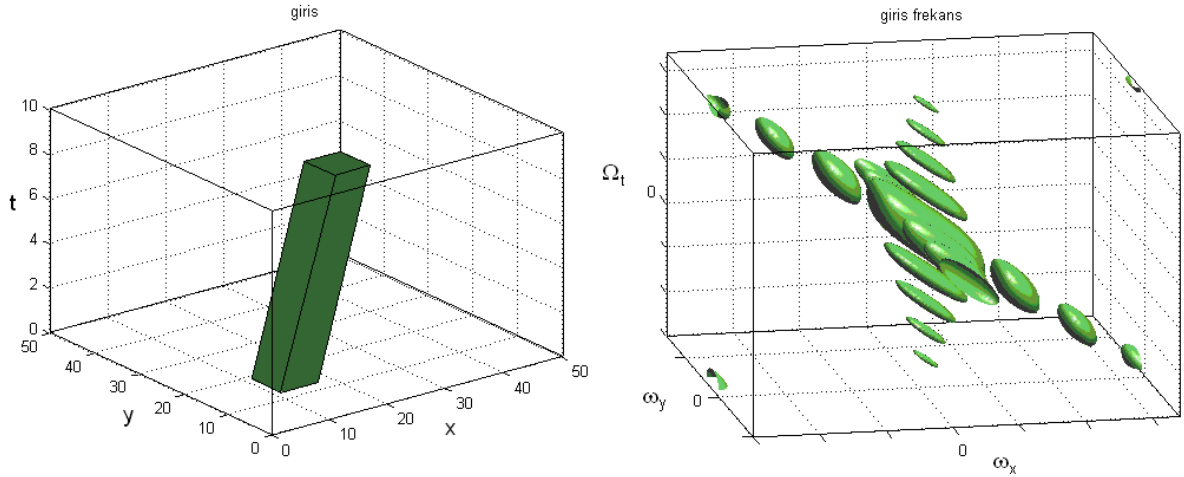
Ek 2. Sabit Hızla Hareket Modeli

Uzay-zamansal görüntü işleme uygulamalarında genellikle görüntüdeki hareket eden nesnelerin piksel parlaklık değerlerinin değişmediği ve hızının sabit olduğu kabul edilir. Sabit hızla hareket eden bir işaretin hızı ise uzay-zaman düzleminde bir yöne karşı düşmektedir (Adelson ve Bergen, 1985, Watson ve Ahumada, 1983). Uzay-zaman düzlemi, görüntünün art arda gelen çerçevelerinin 3 boyutlu uzayda üst üste dizilmesiyle elde edilir. Örneğin x - y düzleminde $+x$ yönünde hareket eden bir kutu düşünelim (Şekil Ek 2.1.a). Her t anındaki x - y görüntüsü arka arkaya dizilirse x - y - t boyutunda hareket Şekil Ek 2.1.b'deki gibidir. Bu hareketin x - t kesitinden de (Şekil Ek 2.1.c) görüleceği gibi x yönündeki hareket uzay-zaman düzleminde bir yöne karşı düşmektedir. Şekil Ek 2.1.c'deki doğrunun eğimi kutunun x yönündeki hızını verir. Dolayısıyla hızı algılamak için uzay-zaman düzleminde yön seçici filtreler kullanılabilir.



Şekil Ek 2.1 Sabit hızla hareket (Adelson ve Bergen, 1985)

Bu şekildeki bir hareketin Fourier dönüşümü alındığında hareketin enerjisinin de frekans düzleminde yönlü olduğu görülür. Dolayısıyla hareket algılama frekans düzleminde de bir yön seçme işlemine karşı düşmektedir (Şekil Ek 2.2).



Şekil Ek 2.2 Sabit hızla hareket eden işaretin uzay-zaman düzlemi ve uzay-zamansal Fourier dönüşümü. İşaretin uzay-zaman düzlemindeki hareketinin bıraktığı iz dörtgensel olduğundan bunun Fourier dönüşümü de üç boyutlu Sinc fonksiyonudur.

Tek boyutlu ve sabit v hızıyla hareket eden işaretin parlaklığı $u(x, t)$ olsun. $t=0$ için $u(x, 0)$ yazılabilir, herhangi bir t için de $u(x, t)$ olur. Öte yandan hız ve görüntü sabit olduğunda

$$u(x, t) = u(x - vt, 0) \quad (\text{E2.1})$$

olur. Burada u görüntü parlaklığını, x uzaysal değişkeni ve t de zaman değişkenini ifade eder. (E2.1) denkleminin uzaysal ve zamansal Fourier dönüşümü alınır

$$U(j\Omega_x, j\Omega_t) = \iint u(x, t) e^{-j\Omega_x x} e^{-j\Omega_t t} dx dt \quad (\text{E2.2})$$

$$U(j\Omega_x, j\Omega_t) = \iint u(x - vt, 0) e^{-j\Omega_x x} e^{-j\Omega_t t} dx dt \quad (\text{E2.3})$$

olur. $x - vt = m$ dönüşümü ile

$$U(j\Omega_x, j\Omega_t) = \iint u(m, 0) e^{-j\Omega_x m} dm e^{-j\Omega_x vt} e^{-j\Omega_t t} dt \quad (\text{E2.4})$$

bulunur. $t = 0$ anındaki görüntünün Fourier dönüşümü $\int u(m, 0) e^{-j\Omega_x m} dm = U(j\Omega_x)$ olduğundan

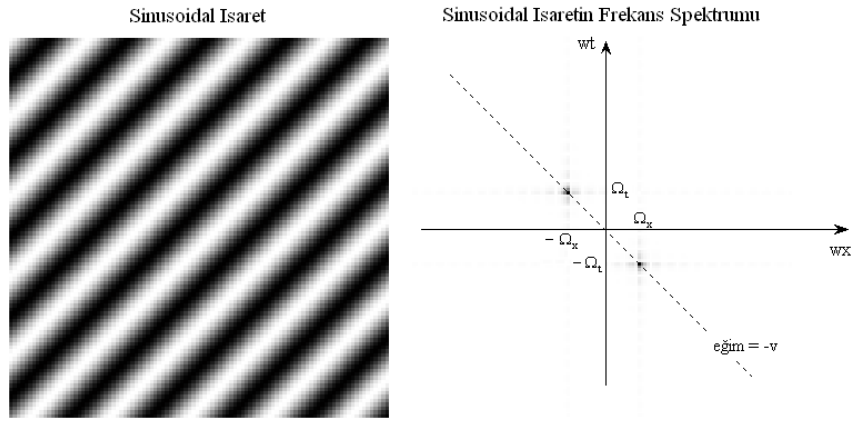
$$U(j\Omega_x, j\Omega_t) = U(j\Omega_x) \int e^{-j(\Omega_t + v\Omega_x)t} dt \quad (\text{E2.5})$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-j\Omega t} dt = 2\pi\delta(\Omega) \text{ olarak}$$

$$U(j\Omega_x, j\Omega_t) = U(j\Omega_x) 2\pi\delta(\Omega_t + v\Omega_x) \quad (\text{E2.6})$$

elde edilir. (E2.6) denkleminde de görüleceği gibi tek boyutlu ve sabit hızla hareket eden bir işaretin enerjisi $\Omega_t + v\Omega_x = 0$ düzleminde yer alır. İki boyutlu hareketli işaretin enerjisi de v_x ve v_y x ve y boyutundaki hızlar olmak üzere $\Omega_t + v_x\Omega_x + v_y\Omega_y = 0$ düzleminde yer alır.

Sabit hızla hareket eden işaret için yapılan bu kabul sinüzoidal giriş işaretleri için de geçerlidir (Şekil Ek 2.3). Bir boyutlu, v hızında hareket eden sinüzoidal bir işareti göz önüne alalım. Bu işaretin x konumundaki ve t anındaki parlaklık değeri $u(x, t)$ ile gösterilsin.



Şekil Ek 2.3 İki boyutlu bir sinüzoidal işaret ve frekans spektrumu

$$u(x, t) = \sin[\Omega_x(x - vt)] = \sin[\Omega_x x - \Omega_x vt] \quad (\text{E2.7})$$

yazalım. Burada $\Omega_t = -v\Omega_x$ tanımını yaparsak

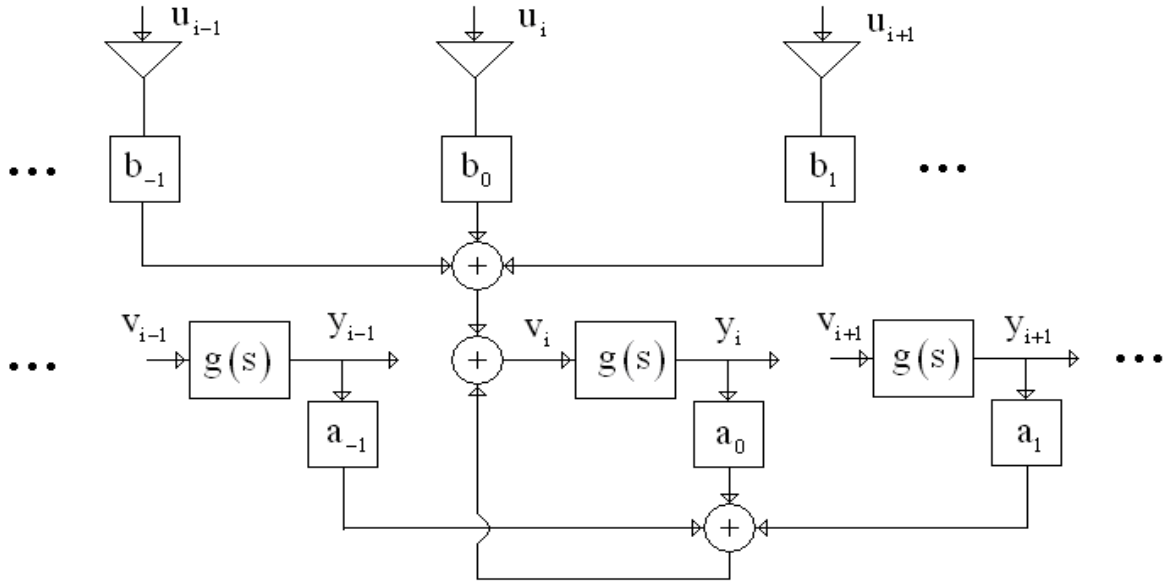
$$u(x, t) = \sin[\Omega_x x + \Omega_t t] \quad (\text{E2.8})$$

bulunur.

Sonuç olarak, sabit hızla hareket, uzay-zaman düzleminde bir yön olarak kendisini göstermektedir. Dolayısıyla hareket ve hız algılama işlemleri uzay-zaman düzleminde ilgili yönleri seçme işlemine karşı düşmektedir.

Ek 3. HSA Filtre Dizisi

HSA yapısı düzlemsel olarak dizilmiş ve yalnızca en yakın komşuları ile bağlı olan hücrelerden oluşmaktadır. HSA filtre dizisinin genel HSA'dan farkı çıkışın lineer olmasıdır. HSA filtre dizisinde her bir hücre lineer sürekli zamanlı bir zamansal filtre olarak düşünülmektedir. Bu zamansal filtrenin giriş/çıkış karakteristiği filtre transfer fonksiyonu $g(s)$ ile verilmektedir. $n_0 \times n_1$ boyutlu zamanda sürekli giriş görüntüsü için tasarlanan HSA filtre dizisi de $n_0 \times n_1$ tane düzlemsel dizilmiş hücreden oluşmakta, her bir hücre bir piksele karşı düşmektedir. Aşağıdaki şekilde bir boyutlu, $r = 1$ komşuluklu bir HSA filtre dizisinin i . hücresi görülmektedir.



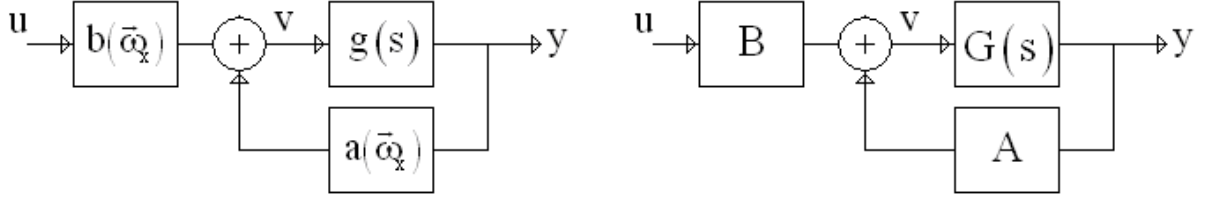
Şekil Ek 3.1 Bir boyutlu HSA filtre dizisi i . hücresi

i . filtrenin t anındaki girişi $v_i(t)$, çıkışı $y_i(t)$ ve r komşuluk yarıçapı olmak üzere

$$v_i(t) = \sum_{k=-r}^r a_k y_{i+k} + \sum_{k=-r}^r b_k u_{i+k} \quad (\text{E3.1})$$

şeklindedir. Burada filtre transfer fonksiyonu $g(s)$, geri besleme şablonu katsayıları $A = \{a_k\}$ ve ileri besleme şablonu katsayıları $B = \{b_k\}$ filtre dizisini tamamen belirlemektedir. Filtre dizisini sonsuz uzunlukta kabul edelim. A ve B şablonlarının uzaydan (konumdan) bağımsız olması nedeniyle her bir hücredeki A ve B şablonlarıyla yapılan ağırlıklı toplam işlemleri sırasıyla çıkışın (1 veya 2 boyutlu görüntünün tümünün) ve girişin A ve B

şablonlarıyla ayrık korelasyonu şeklinde de yazılabilir. Korelasyon işleminin uzaysal Fourier dönüşümü, korelasyon elemanlarının birisinin Fourier dönüşümü ile diğerinin Fourier dönüşümünün eşleniğinin çarpımıdır. Dolayısıyla sistem Şekil Ek 3.2’de verilen blok diyagram olarak da düşünülebilir.



Şekil Ek 3.2 Bir boyutlu HSA filtre dizisinin blok diyagramı

$$a(e^{j\omega_x}) = \sum_{k=-r}^r a_k e^{j\omega_x k}, \quad b(e^{j\omega_x}) = \sum_{k=-r}^r b_k e^{j\omega_x k} \quad (\text{E3.2})$$

$$v(e^{j\omega_x}, s) = a(e^{j\omega_x}) \cdot y(e^{j\omega_x}, s) + b(e^{j\omega_x}) \cdot u(e^{j\omega_x}, s) \quad (\text{E3.3})$$

$$y(e^{j\omega_x}, s) = g(s) v(e^{j\omega_x}, s) \quad (\text{E3.4})$$

Denklem (E3.3) ve (E3.4)’den sistemin uzay-zamansal transfer fonksiyonu

$$H(e^{j\omega_x}, s) = \frac{Y(e^{j\omega_x}, s)}{U(e^{j\omega_x}, s)} = \frac{b(e^{j\omega_x})g(s)}{1 - a(e^{j\omega_x})g(s)} \quad (\text{E3.5})$$

olarak bulunur. $s = j\Omega_t$ yazılarak sistemin uzay-zamansal frekans yanıtı

$$H(e^{j\omega_x}, j\Omega_t) = \frac{b(e^{j\omega_x})g(j\Omega_t)}{1 - a(e^{j\omega_x})g(j\Omega_t)} \quad (\text{E3.6})$$

elde edilir. Filtre girişine $u(x, t) = \sin(\omega_x \cdot x + \Omega_t t)$ girişi uygulandığında çıkış işareti

$$y(x, t) = |H(e^{j\omega_x}, j\Omega_t)| \sin(\omega_x \cdot x + \Omega_t t + \varphi_h(e^{j\omega_x}, j\Omega_t)) \quad (\text{E3.7})$$

olur. Burada filtrenin genlik ve faz bileşenleri $H(e^{j\omega_x}, j\Omega_t) = |H(e^{j\omega_x}, j\Omega_t)| e^{j\varphi_h(e^{j\omega_x}, j\Omega_t)}$ olarak gösterilmiştir.

HSA filtre dizisi temelde birbirinden ayrık, her biri giriş işaretinin belli bir uzaysal frekansını

işleyen zamansal filtrelerden oluşmaktadır. Giriş işaretinin her bir t anındaki uzaysal Fourier dönüşümü alınır, zamanla değişen bir dizi Fourier katsayıları elde edilir. Giriş işaretinin ω_x frekansındaki Fourier katsayısının zamanla değişimi, zamanın karmaşık değerli skaler bir fonksiyonu ile belirlenmektedir. HSA filtre dizisi bu skaler fonksiyonu, transfer fonksiyonu (E3.5) ile verilen zamansal filtre ile filtrelemektedir. Bu nedenle (E3.5) denklemi **uzaysal frekansa bağlı SISO zamansal transfer fonksiyonu** olarak da düşünülebilir. Benzer bir analiz Crounse ve Chua'da (1995) da verilmektedir.

n hücreli bir boyutlu HSA filtre dizisinin zamansal transfer fonksiyonu $g(s) = \frac{1}{s}$ olduğunu kabul edelim. Filtre frekans yanıtı

$$H(e^{j\omega_x}, j\Omega_t) = \frac{\sum_{k=-r}^r b_k e^{j\omega_x k}}{j\Omega_t - \sum_{k=-r}^r a_k e^{j\omega_x k}} \quad (E1.8)$$

olur. Filtrenin gerçel ve sanal kısımlar ayrılıp düzenlenirse

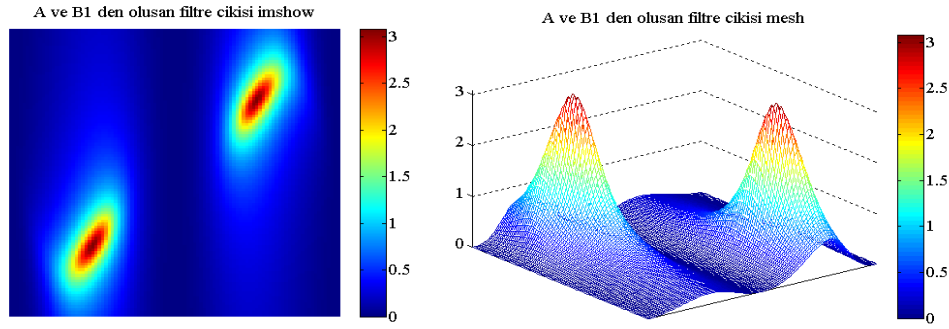
$$H(e^{j\omega_x}, j\Omega_t) = \frac{\left\{ b_0 + \sum_{k=1}^r [b_k + b_{-k}] \cos(\omega_x k) \right\} + j \left\{ \sum_{k=1}^r [b_k - b_{-k}] \sin(\omega_x k) \right\}}{-\left\{ a_0 + \sum_{k=1}^r [a_k + a_{-k}] \cos(\omega_x k) \right\} + j \left\{ \Omega_t - \sum_{k=1}^r [a_k - a_{-k}] \sin(\omega_x k) \right\}} \quad (E1.9)$$

Filtre tasarımında izlenen yol payın ve paydanın gerçel ve sanal kısımlarını ayrı ayrı tasarlamaktadır. Payın/paydanın gerçel kısmı B/A şablonunun simetrik elemanlarının toplamı, payın/paydanın sanal kısmı B/A şablonunun simetrik elemanlarının farkı ile belirlenmektedir. Dolayısıyla bu toplam ve fark değerlerini ayrı ayrı tayin etmek şablon eleman değerlerini bulmak demektir. Payın ve paydanın gerçel ve sanal kısımlarının hız ayarını sağlayacak şekilde seçiminde giriş işaretlerinin sadece sinüzoidal değiştiği varsayılmıştır. Örnek olarak $v_x = +1$ piksel/çerçeve hızına ayarlı $r = 3$ komşuluklu bir boyutlu bir filtre dizisinin şablon değerleri:

$$\begin{aligned} A &= [0 \quad -0,637 \quad 0,606 \quad -0,96 \quad -1,194 \quad 0 \quad -0,2] \\ B_1 &= [0 \quad -0,25 \quad 0 \quad 0,5 \quad 0 \quad -0,25 \quad 0] \\ B_2 &= [0,132 \quad 0 \quad -0,368 \quad 0 \quad 0,368 \quad 0 \quad -0,132] \end{aligned} \quad (E1.10)$$

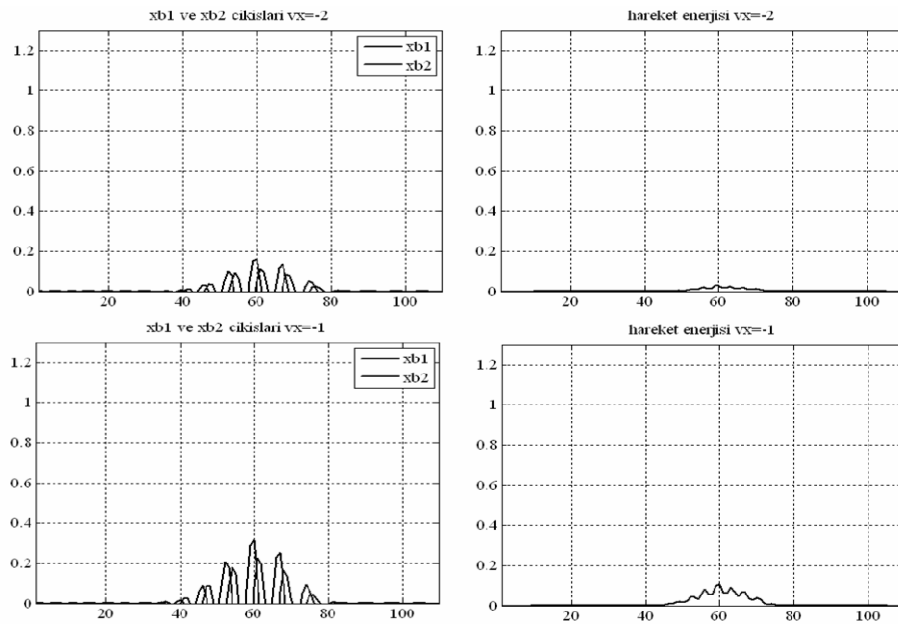
olarak bulunmuştur.

Giriş işareti, birincisi A ve B_1 'den, ikincisi de A ve B_2 'den oluşan iki farklı HSA'ya uygulanıp iki çıkış işaretinin karelerinin toplamı alınmakta ve hareket enerjisi olarak adlandırılmaktadır. Şekil Ek 3.3'de A ve B_1 'den oluşan filtrenin genlik frekans spektrumu görülmektedir. A ve B_2 'den oluşan filtrenin genlik frekans spektrumu da Şekil Ek 3.3'ün aynısıdır, fazı 90 derece ötelenmiştir.

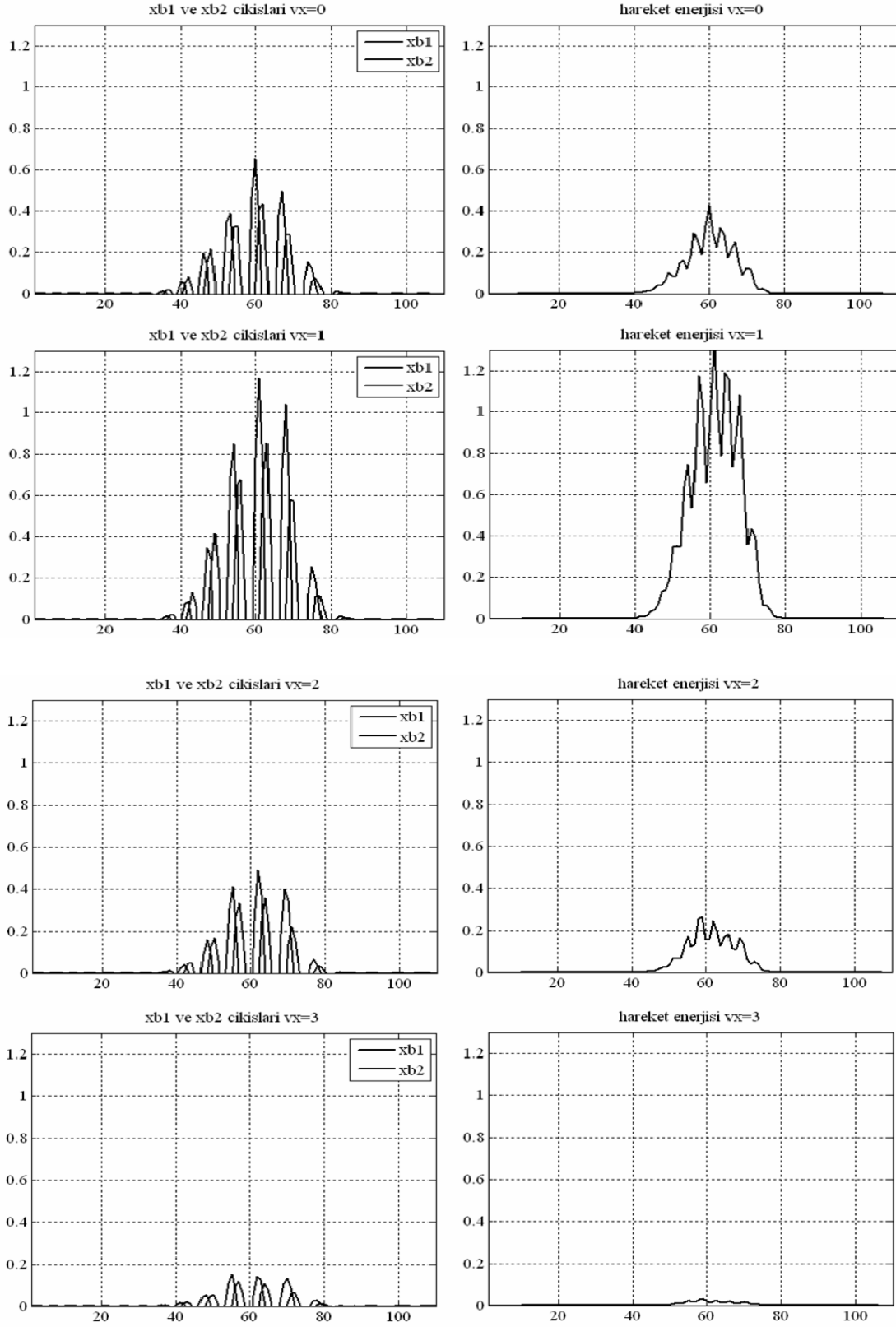


Şekil Ek 3.3 A ve B1'den oluşan filtrenin genlik frekans spektrumu

Yukarıda şablon değerleri verilen HSA filtre dizisi 50 uzunluklu bir dizide 10 piksel genişlikli kutuların çeşitli hızlarda hareketi ile ve 4. dereceden Runge Kutta yaklaşıklığı kullanılarak simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları Şekil Ek 3.4'de verilmiştir. Aşağıdaki sonuçlardan görüleceği üzere filtre sadece $v_x = +1$ piksel/çerçeve hızındaki girişi kuvvetlendirmektedir.



Şekil Ek 3.4 Farklı hızdaki girişler için HSA filtre dizisi çıkışları ve hareket enerjileri. x_{b1} çıkışı A ve B_1 'den oluşan HSA çıkışını, x_{b2} çıkışı da A ve B_2 'den oluşan HSA çıkışını göstermektedir.



Şekil Ek 3.4 Devamı

Herhangi bir v hızına ayarlı filtre için de aynı A ve B şablonları kullanılabilir, burada

$g(s) = \frac{1}{|v|s}$ alınmalıdır. Negatif hızları seçmek için de A şablon katsayıları karşılıklı yer değiştirmelidir. Şablon değerlerinin ayrıntılı hesabı Shi'de (1993) bulunabilir.

KAYNAKLAR

- Adelson, E. H. ve Bergen, J. R., (1985), "Spatiotemporal Energy Models For The Perception Of Motion", J. Opt. Soc. Am. A, 2(2):284-299.
- Andreou, A. G., Strohbehn, K. ve Jenkins R. E., (1991a), "Silicon Retina For Motion Computation". Proc. IEEE International symposium on circuits and systems, June 1991, Singapore.
- Andreou, A. G., Boahen, K. A., Pouliquen, P. O., Pavasovic, A., Jenkins, R. E. ve Strohbehn, K., (1991b), "Current-mode subthreshold MOS circuits for analog VLSI neural systems" IEEE Transactions on Neural Networks, 2(2):205-213.
- Andreou, A. G., Meitzler, R. C., Strohbehn, K. ve Boahen K. A., (1995), "Analog VLSI neuromorphic image acquisition and pre-processing systems", Neural Networks, 8(7):1323-1347.
- Atick, J. ve Redlich, A., (1992), "What Does The Retina Know About Natural Scenes?", Neural Computation, 4:196-210.
- Boahen, K., (1996), "A Retinomorphic Vision System", IEEE Micro, 16(5):30-39.
- Boahen, K., (1999), "Retinomorphic Chips That See Quadruple Images" Seventh International Conference On Microelectronics For Neural, Fuzzy, And Bio-Inspired Systems, April 1999 12-20, Granada, Spain.
- Cembrano, G. L., Rodriguez-Vazquez, A., Galan, R. C., Jimenez-Garrido, F., Espejo, S. ve Dominguez-Castro, R., (2004), "A 1000 fps at 128x128 vision processor with 8-bit digitized i/o," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 39, no. 7, pp. 1044–1055.
- Chamorro-Martinez, J., Fdez-Valdivia, J., Garcia, J.A. ve Martinez-Baena, J., (2003), "A frequency-domain approach for the extraction of motion patterns", IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '03), 6-10 April 2003,
- Higgins, M., Pant, V. ve Deutschmann, R., (2005), "Analog VLSI Implementation of Spatio-Temporal Frequency Tuned Visual Motion Algorithms" IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 52(3):489-502.
- Choi, T. Y. W., Shi, B. E., Boahen, K., (2004), "An ON-OFF Orientation Selective Address Event Representation Image Transceiver Chip" IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers 2004; 51(2):342 –353.
- Chua, L. O. ve Yang, L., (1988a), "Cellular Neural Networks: Theory", IEEE Transactions on Circuits and Systems, 35:1257-1272.
- Chua, L. O. ve Yang, L., (1988b), "Cellular Neural Networks: Applications", IEEE Transactions on Circuits and Systems, 35:1273-1290.
- Chua, L. O. ve Roska, T., (1993), "The CNN paradigm" IEEE Transactions on Circuits and Systems-I, 40(3):147-156.
- Chua, L. O. ve Roska, T., (2002), Cellular Neural Networks and Visual Computing Foundations and Applications, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Crounse, K. ve Chua, L. O., (1995), "Methods for image processing and pattern formation in cellular neural networks: a tutorial", IEEE Transactions on Circuits and Systems-I,

42(10):583-601.

Delbrück T., (1993), "Silicon retina with correlation-based, velocity-tuned pixels", IEEE Trans. Neural Networks, 4:529-541.

Dominguez-Castro, R., Espejo, S., Rodriguez-Vazquez, A., Carmona, R. A., Foldes, P., Zarandy, A., Szolgay, P., Sziranyi, T. ve Roska, T., (1997), "A 0.8- μ m CMOS two-dimensional programmable mixed-signal focal-plane array processor with on-chip binary imaging and instructions storage," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 32, no. 7, pp. 1013–1026.

Galan, R. C., Jimenez-Garrido, F., Dominguez-Castro, R., Espejo, S., Roska, T., Rekeczky, C. Petras, I. ve Rodriguez-Vasquez, A., (2003), "A bio-inspired two-layer mixed-signal flexible programmable chip for early vision," IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 14, no. 5, pp. 1313–1336.

Granlund, G. H. ve Knutsson, H., (1995), Signal Processing For Computer Vision, Kluwer Academic Publications.

Gruev, V. ve Etienne-Cummings, R., (2002), "Implementation of steerable spatiotemporal image filters on the focal plane", IEEE Transactions on Circuits and Systems - II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 49, no. 4, pp. 233–244.

Horn, B. K. P. ve Schunck, B. G., (1981), "Determining Optical Flow", Artificial Intelligence, 17:185-203.

Heeger, D., (1987), "Model for the extraction of image flow" , Journal of the Optical Society of America A., 4(8):1455-1571.

Higgins, C. M., Pant, V. ve Dutschmann, R., (2005), "Analog VLSI implementation of spatiotemporal frequency tuned visual motion algorithms," IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers, vol. 52, no. 3, pp. 489–502.

Hui, K. H. ve Shi, B. E., (1996), "Robustness of CNN implementations for Gabor-type filtering" Proc. Asia-Pacific Conference On Circuits And Systems, November, 1996, Seoul, Korea.

Ip, H. M. D., (2007), "Bioinspired Analog Networks for Spatial and Spatiotemporal Filtering: Theory and Realisations", PhD Thesis, Department of Bioengineering, Imperial College London.

Ip, H. M. D., Drakakis, E. M., ve Bharath, A. A., (2005), "Analog Networks For Mixed Domain Spatiotemporal Filtering," Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2005 (ISCAS'05), May 2005, Kobe, Japan.

Ip, H. M. D., Drakakis, E. M., ve Bharath, A. A., (2006a), "Towards Analog VLSI Arrays For Nonseparable 3d Spatiotemporal Filtering," Proceedings of the 10th IEEE International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications, 2006, İstanbul, Turkey.

Ip, H. M. D., Drakakis, E. M., ve Bharath, A. A., (2006b), "A Bioinspired Recursive Analog VLSI Network for 3D Spatiotemporal Receptive Fields," Proc. IEEE BIOCAS' 2006, London, UK.

Ip, H. M. D., Drakakis, E. M., ve Bharath, A. A., (2008a), "On Analog Networks and Mixed-Domain Spatio-Temporal Frequency Response", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 55(1): 284-297.

- Ip, H. M. D., Drakakis, E. M., ve Bharath, A. A., (2008b), "Synthesis of Non-separable 3D Spatiotemporal Bandpass Filters on Analog Networks", IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 55(1): 298-310.
- Ip, H. M. D., Drakakis, E. M., ve Bharath, A. A., (2008c), "A Nonseparable 3D Spatiotemporal Bandpass Filter With Analog Networks", ISCAS 2008, 18-21 May 2008, Seattle, WA.
- Jahne, B., HauBecker, H. ve P. G. (Eds.), (1999), Handbook of Computer Vision and Applications, Volume 2: Signal Processing and Pattern Recognition, Academic Press.
- Koch, C., Luo, J. ve Mead, C., (1988), "Computing Motion Using Analog Binary Resistive Networks", Computer, 52-63.
- Laiho, M., Paasio, A., Kananen, A. ve Halonen, K. A. I., (2004), "A mixed-mode polynomial cellular array processor hardware realization," IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers, vol. 51, no. 2, pp. 286-297.
- Lim, J., (1989), Two-dimensional Signal and Image Processing, Prentice Hall.
- Mahowald, M. A., (1992) "VLSI Analogs Of Neuronal Visual Processing: A Synthesis Of Form And Function", Ph.D. Thesis, Computation and neural systems, California Institute of Technology.
- Mahowald, M. A. ve Mead, C., (1991), "The Silicon Retina", Scientific American, 264(5):76-82.
- Mead, C., (1989), Analog VLSI and Neural Systems, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Mead, C. A. ve Mahowald, M. A., (1988), "A Silicon Model Of Early Visual Processing", Neural Networks, 1:91-97.
- Meitzler, R. C., Andreou, A. G., Strohbehn, K. ve Jenkins, R. E., (1993), "A Sampled-Data Motion Chip", 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 16-18 Aug 1993, Detroit, MI.
- Mhani, A., Sicard, G. ve Bouvier, G., (1997), "Analog Vision Chip For Sensing Edges Contrasts And Motion", Proc. ISCAS, 1997, Hong Kong.
- Mitiche, A. ve Bouthemy, P., (1996), "Computation And Analysis Of Image Motion: A Synopsis Of Current Problems And Methods", International Journal Of Computer Vision, 19(1):29-55.
- Moini, A., (1997), "Vision Chips Or Seeing Silicon", Technical report, Department Of Electronics Engineering, University of Adelaide, Australia.
- Ra, L., (1995), "Resistive Network Implementing Maps Of Gabor Functions Of Any Phase", Electronics letters, 31(22):1913-1914.
- Ra, L., Sabatini, S. P., Bo, G. M. ve Bisio, G. M., (1998), "Analog VLSI Circuits As Physical Structures For Perception In Early Visual Tasks", IEEE Transactions on Neural Networks, 9(6).
- Roska, T., Boros, T., Thiran, P. ve Chua, L. O., (1992), "Detecting Simple Motion Using Cellular Neural Networks", Int. J. of Circuit Theory and Applications, 20(5):613-628.
- Saatci, E. ve Tavşanoğlu, V., (2002), "On The Optimal Choice Of Integration Time-Step For

- Raster Simulation Of A CNN For Gray Level Image Processing”, Proc. 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS’02), 26-29 May 2002, Phoenix, Arizona, USA.
- Sarpeshkar, R., Kramer, J., Indiveri, G. ve Koch, C., (1996), “Analog VLSI Architectures For Motion Processing: From Fundamentals Limits To System Applications” Proc. IEEE, 84(7):969-987.
- Shi, B. E., (1998), “Gabor-Type Filtering In Space And Time With Cellular Neural Networks”, IEEE Trans. On Circuits and Systems-I, 45(2):121-132.
- Shi, B. E., (2006), “An eight layer cellular neural network for spatio-temporal image filtering”, Int. J. Circuit Theory Appl. 34, 1:141-164.
- Shi, B. E. ve Chua, L. O., (1992), “Resistive Grid Image Filtering: An Input/Output Analysis Via The CNN Framework”, IEEE Trans. On Circuits And Systems-I, 39(7):531-548.
- Shi, B. E., Roska T. ve Chua, L. O., (1993), “Design Of Linear Cellular Neural Networks For Motion Sensitive Filtering”, IEEE Trans. on Circuits and Systems-II, 40(5):320-331.
- Shi, B. E., Tsang E. K. C. ve Au, P. S. P., (2004), “An ON-OFF temporal filter circuit for visual motion analysis” Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2004, Vancouver, BC.
- Stocker, A. A., (2004), “Analog VLSI focal-plane array with dynamic connections for the estimation of piecewise-smooth optical flow,” IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers, vol. 51, no. 5, pp. 963–973.
- Torralba, A. B., (1999), “Analogue Architectures for Vision: Cellular Neural Networks and Neuromorphic Circuits”, PhD Thesis, December 1999.
- Torralba, A. B. ve Herault, J., (1999a), “An Efficient Neuromorphic Analog Network For Motion Estimation”, IEEE Trans. on circuits and systems-I: special issue on bio-inspired processors and CNNs for vision, 46(2) pp.269-280.
- Torralba, A. B. ve Herault, J., (1999b), “Asymmetrical Filters For Vision Chips: A Basis For The Design Of Large Sets Of Spatial And Spatiotemporal Filters”, Seventh International Conference on Microelectronics for Neural, Fuzzy, and Bio-Inspired Systems, April 1999, Granada, Spain.
- Tural Polat, N., ve Tavsanoğlu, V., (2009) “A New Simulation Method For Time-Derivative CNNs”, 17th European Signal Processing Conference (EUSIPCO’09), Glasgow, Scotland, pp. 288-292.
- Watson, A. B. ve Ahumada A. J., (1983) , “A Look At Motion In The Frequency Domain”, In J. K. Tsotsos, editor, Motion: perception and representation, New York.
- Young, I. A. ve Van Vliet, L. J., (1995), “Recursive implementation of the Gaussian filter” Signal processing, 44:139-151.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 20.03.1978

Doğum yeri Ankara

Lise 1991-1994 Yeşilköy 50. Yıl Lisesi

Lisans 1994-1998 Yıldız Üniversitesi Elektrik Elektronik Fak.
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2002 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı,
Elektronik Programı

Doktora 2002-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik ve Haberleşme Anabilim Dalı,
Elektronik Programı

Çalıştığı kurum(lar)

1998-Devam ediyor YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Araştırma Görevlisi