İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİNE YÖNELİK BİR SİNAPTİK BAĞLANTI VE DEVRE BENZETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşen BAŞARGAN

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

OCAK 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİNE YÖNELİK BİR SİNAPTİK BAĞLANTI VE DEVRE BENZETİMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşen BAŞARGAN

504101202

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Serdar ÖZOĞUZ

OCAK 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **504101202** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ayşen BAŞARGAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİNE YÖNELİK BİR SİNAPTİK BAĞLANTI VE DEVRE BENZETİMİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde basarı ile sunmustur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. İ. Serdar ÖZOĞUZ** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Müştak E. YALÇIN** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Herman SEDEF .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **14 Aralık 2012**
Savunma Tarihi : **25 Ocak 2013**

ÖNSÖZ

Öncelikle tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Serdar ÖZOĞUZ'a, çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen ve doğru şekilde yönlendiren Sayın Araş. Gör. Ahmet Şamil DEMİRKOL'a teşekkür ediyorum. Ayrıca yüksek lisans eğitimim boyunca verdiği burs desteğinden dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ediyorum.

Ocak 2013 Ayşen Başargan

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xix**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. HODGKİN-HUXLEY MODELİ **5**
3. UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİ **11**
3.1. Düzenli Ateşleme Örüntüsü 13
3.2. Uyarlamalı Ateşleme Örüntüsü 13
3.3. Başlangıçta Patlamalı Ateşleme Örüntüsü 14
3.4. Düzenli Patlamalı Ateşleme Örüntüsü 14
3.5. Gecikmeli Ateşleme Örüntüsü 15
3.6. Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme Örüntüsü 16
3.7. Geçici Ateşleme Örüntüsü 17
3.8. Düzensiz Ateşleme Örüntüsü 17
4. UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİNE YÖNELİK SİNAPTİK BAĞLANTI **19**
4.1. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı 21
4.2. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı 24
4.3. Uyarıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı 27
4.4. Uyarıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı 30
5. AdExI&F SİNİR HÜCRESİ MODELİNİN ve KULLANILAN SİNAPS MODELİNİN DEVRE BENZETİMİ **35**
5.1. Düzenli Ateşleme Örneğinin Devre Benzetimi Gerçeklemesi 35
5.2. Düzenli Patlamalı Ateşleme Örneğinin Devre Benzetimi Gerçeklemesi 41
5.3. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi 44
5.4. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi 50
5.5. Uyarıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi 52
5.6. Uyarıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi 56
6. SONUÇLAR **61**
KAYNAKLAR **63**
ÖZGEÇMİŞ **65**

KISALTMALAR

AdExI&F : Adaptive Exponential Integrate and Fire **(**Uyarlamalı Üstel Tut&Ateşle Sinir Hücresi Modeli)
CPG : Central Pattern Generator (Merkezi Örüntü Üreteci)
HR : Hindmarsh Rose
PSP : Postsynaptic Potential (Postsinaptik Gerilim)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Hücrelerdeki tipik iyon yoğunlukları 6
Çizelge 3.1 : Düzenli ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 13
Çizelge 3.2 : Uyarlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 14
Çizelge 3.3 : Başlangıçta patlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 14
Çizelge 3.4 : Düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 15
Çizelge 3.5 : Gecikmeli ateşleme örüntüsü için parametre değerleri..... 16
Çizelge 3.6 : Gecikmeli düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 16
Çizelge 3.7 : Geçici ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 17
Çizelge 3.8 : Düzensiz ateşleme örüntüsü için parametre değerleri 18
Çizelge 4.1 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri 21
Çizelge 4.2 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri..... 24
Çizelge 4.3 : Uyarıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri 28
Çizelge 4.4 : Uyarıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri..... 31
Çizelge 5.1 : Düzenli ateşleme davranışının parametre değerleri..... 35
Çizelge 5.2 : Düzenli patlamalı ateşleme davranışının parametre değerleri..... 41
Çizelge 5.3 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri..... 44
Çizelge 5.4 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri..... 50
Çizelge 5.5 : Uyarıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri 53
Çizelge 5.6 : Uyarıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri..... 56

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Birbirine bağlı iki adet kortikal piramit tipi nöron ve vuru davranışı ... 1
Şekil 2.1 : Tipik bir vuru işareti ... 6
Şekil 2.2(a) : Gerilim kontrollü kararlı-hal etkinleştirme fonksiyonları ... 9
Şekil 2.2(b) : Gerilim kontrollü zaman sabitleri ... 9
Şekil 2.3 : Giriş basamak işaretine karşılık düşen aktivasyon ve deaktivasyon değişkenlerinin davranışı ... 9
Şekil 2.4(a) : Hodgkin-Huxley modelin giriş akımına cevabı, geçici vuru davranışı 10
Şekil 2.4(b) : Hodgkin-Huxley modelin giriş akımına cevabı, periyodik cevap davranışı ... 10
Şekil 3.1(a) : Düzenli Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(b) : Uyarlamalı Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(c) : Başlangıçta Patlamalı Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(d) : Düzenli Patlamalı Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(e) : Gecikmeli Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(f) : Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(g) : Geçici Ateşleme ... 12
Şekil 3.1(h) : Düzensiz Ateşleme ... 12
Şekil 3.2 : Düzenli ateşleme örüntüsü ... 13
Şekil 3.3 : Uyarlamalı ateşleme örüntüsü ... 14
Şekil 3.4 : Başlangıçta patlamalı ateşleme örüntüsü ... 15
Şekil 3.5 : Düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü ... 15
Şekil 3.6 : Gecikmeli ateşleme örüntüsü ... 16
Şekil 3.7 : Gecikmeli düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü ... 17
Şekil 3.8 : Geçici ateşleme örüntüsü ... 18
Şekil 3.9 : Düzensiz ateşleme örüntüsü ... 18
Şekil 4.1 : İki sinir hücresinin sinaptik bağlantı blok diyagramı ... 19
Şekil 4.2 : Sinaptik akımının davranışı ... 21
Şekil 4.3(a) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ilk nöronun ateşleme örneği ... 22
Şekil 4.3(b) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ikinci nöronun ateşleme örneği ... 22
Şekil 4.3(c) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ilk nöronun sinaptik akımı ... 22
Şekil 4.3(d) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ikinci nöronun sinaptik akımı ... 22
Şekil 4.4 : Belli bir zaman sonra kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı ... 22
Şekil 4.5 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının aynı fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu ... 23
Şekil 4.6 : Belli bir zaman sonra kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının aynı fazlı düzenli ateşleme davranışı ... 23
Şekil 4.7 : Zaman sabiti davranışı ... 24

Şekil 4.8 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu 24
Şekil 4.9(a) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli patlamalı davranışı başlangıç durumu, ilk nöronun ateşleme örneği..... 25
Şekil 4.9(b) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli patlamalı davranışı başlangıç durumu, ikinci nöronun ateşleme örneği..... 25
Şekil 4.9(c) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli patlamalı davranışı başlangıç durumu, ilk nöronun sinaptik akımı 25
Şekil 4.9(d) : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli patlamalı davranışı başlangıç durumu, ikinci nöronun sinaptik akımı 25
Şekil 4.10 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının belli bir zaman geçtikten sonra zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı 25
Şekil 4.11 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı başlangıç durumu 26
Şekil 4.12 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının belli bir zaman geçtikten sonra aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı 26
Şekil 4.13 : Zaman sabiti davranışı. 27
Şekil 4.14 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu 27
Şekil 4.15(a): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ilk nöronun ateşleme örneği .. 28
Şekil 4.15(b): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ikinci nöronun ateşleme örneği28
Şekil 4.15(c): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ilk nöronun sinaptik akımı..... 28
Şekil 4.15(d): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu, ikinci nöronun sinaptik akımı 28
Şekil 4.16 : Belli bir zaman sonra başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı 28
Şekil 4.17 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışının başlangıçtaki durumu 29
Şekil 4.18 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışının belli bir süre geçtikten sonraki durumu29
Şekil 4.19 : Zaman sabiti davranışı 30
Şekil 4.20 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu 30
Şekil 4.21(a): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışı, ilk nöronun ateşleme örneği 31
Şekil 4.21(b): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışı, ikinci nöronun ateşleme örneği..... 31
Şekil 4.21(c): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışı, ilk nöronun sinaptik akımı..... 31
Şekil 4.21(d): Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışı, ikinci nöronun sinaptik akımı 31
Şekil 4.22 : Uyarıcı bağlı başlangıç koşulları aynı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışının belli bir zaman geçtikten sonraki durumu 31
Şekil 4.23 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışının başlangıçtaki durumu 32
Şekil 4.24 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışının belli bir süre geçtikten sonraki durumu 32
Şekil 4.25 : Zaman sabiti davranışı. 33

Şekil 4.26 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu....33
Şekil 4.27 : Sayısal analiz ile elde edilen sinaptik akım davranışı....34
Şekil 5.1 : Logaritmik tabanlı integratör V hücresi....37
Şekil 5.2 : Logaritmik tabanlı integratör w hücresi....38
Şekil 5.3 : e^x üstel akım devresinin elde edilmesi için gereken akım modlu çarpıcı devresi....38
Şekil 5.4 : e^x üstel akım devresinin blok diyagramı....39
Şekil 5.5(a) : Akım aynası devresi....40
Şekil 5.5(b) : Aktif diyot bağlı devre....40
Şekil 5.6 : Tek bir nöron hücresinin devre benzetiminin blok diyagramı....40
Şekil 5.7 : Düzenli ateşleme örneğinin devre benzetim sonucu....41
Şekil 5.8 : Düzenli patlamalı ateşleme örneğinin devre benzetim sonucu....44
Şekil 5.9 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu....45
Şekil 5.10 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu blok diyagramı....46
Şekil 5.11 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonunun devre benzetimi gerçeklemesi....47
Şekil 5.12 : I_{DS} ve I_{BS} ifadelerinin blok diyagramı....47
Şekil 5.13 : Sinaptik bağlantı için kullanılan logaritmik tabanlı integratör devresi....48
Şekil 5.14 : Kısıtlayıcı bağlı sinaptik akım blok diyagramı....48
Şekil 5.15 : Benzetimi yapılan devrenin blok diyagramı....49
Şekil 5.16 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının aynı fazlı düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları....49
Şekil 5.17 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları....50
Şekil 5.18 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu....51
Şekil 5.19 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları....51
Şekil 5.20 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu....52
Şekil 5.21 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları....52
Şekil 5.22 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu blok diyagramı....54
Şekil 5.23 : Uyarıcı bağlı sinaptik akım blok diyagramı....55
Şekil 5.24 : Başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları....55
Şekil 5.25 : Başlangıç koşulları farklı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları....56
Şekil 5.26 : Başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu....57

Şekil 5.27 : Başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları 57
Şekil 5.28 : Başlangıç koşulları farklı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu... 58
Şekil 5.29 : Başlangıç koşulları farklı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları 58
Şekil 5.30(a): Hindmarsh-Rose modeli ile elde edilen, uyarıcı bağlı **1)** sayısal analiz ve **2)** devre benzetim sonuçları..... 59
Şekil 5.30(b): Hindmarsh-Rose modeli ile elde edilen, kısıtlayıcı bağlı **1)** sayısal analiz ve **2)** devre benzetim sonuçları 59

SEMBOL LİSTESİ

$\bar{g}_K$: Maksimal iletkenlik
$\bar{g}_{Na}$: Maksimal iletkenlik
Δ_T : Eşik eğim etmeni
b : Vuru uyarlamalı uyum parametresi
C : Kapasite
E_K : Nernst denge gerilimi
E_L : Etkin dinlenme gerilimi
E_{Na} : Nernst denge gerilimi
g : Sinaps çıkış ölçekleme parametresi
g_L : Toplam sızıntı iletkeliği
h : Kanal geçit değişkeni
h_∞ : Kararlı-hal etkisizleştirme fonksiyonu
I : Akım
m : Kanal geçit değişkeni
m_∞ : Kararlı-hal etkinleştirme fonksiyonu
n : Kanal geçit değişkeni
n_∞ : Kararlı-hal etkinleştirme fonksiyonu
S(t) : Temel sinaptik değişkeni
S_∞ : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu
V : Zar gerilimi
V_{post} : Sinaps çıkış gerilimi
V_{pre} : Sinaps giriş gerilimi
V_r : Zar gerilimi resetleme değeri
V_{rev} : Ters yön sinaptik gerilimi
V_{slope} : Sinaptik eğim gerilimi
V_T : Etkin eşik gerilimi
V_{thres} : Sinapsın iletime geçmesini sağlayan eşik gerilimi
w : Uyum akımı
a : Eşik altı adaptasyon parametresi
α(V) : Kanalların açık durumunda geçiş oranı
β(V) : Kanalların kapalı durumunda geçiş oranı
τ_h : Zaman sabiti
τ_m : Zaman sabiti
τ_m : Zar zaman sabiti
τ_n : Zaman sabiti
τ_s : Sinaptik zaman sabiti
τ_w : Uyum akımı zaman sabiti

UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİNE YÖNELİK BİR SİNAPTİK BAĞLANTI VE DEVRE BENZETİMİ

ÖZET

Bu yüksek lisans tezinde, daha önce Hindmarsh-Rose sinir hücresi modeli için kullanılmış olan sinaptik bir bağlantı, uyarlamalı üstel tut&ateşle modeli için uyarıcı ve kısıtlayıcı bağlantı şeklinde uygulanmış, düzenli ve patlamalı ateşleme için aynı fazlı ve zıt fazlı davranışlar görülmüştür. Daha sonra, sinir hücresi ve sinaptik bağlantı modellerinin düşük güçlü ve akım modlu olacak şekilde devre benzetimleri yapılmış ve sayısal analizle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Hodgkin-Huxley sinir hücresi modeli gerçek sinir hücresini en iyi modelleyen, biyolojik olarak anlamlı ve ölçilebilir matematiksel bir sistemdir. Model dört eşitlik ve on parametreden oluşmaktadır. Bu nedenle Hodgkin-Huxley sinir hücresi modeli biyolojik olarak anlamlı olmasına rağmen, ifadesi karmaşık ve uygulaması maliyetlidir. Bu sorunu çözebilmek için literatürde son birkaç yılda hesaplaması basit, anlaşılması ve analizi kolay ayrıca gerçek sinir hücresi davranışlarını oluşturabilen Izhikevich sinir hücresi modeli, uyarlamalı üstel tut ve ateşle sinir hücresi modeli gibi modeller tanımlanmıştır. Uyarlamalı Üstel Tut&Ateşle (AdExI&F,2005) sinir hücresi modelinin parametreleri fizyolojik niceliklerle ilişkilendirilebilmekte, piramit tipi hücrelerin davranışlarını başarıyla kopyalayabilmekte ve piramit tipi hücrelerin biyofiziksel modeline uymaktadır. Bu modelin tercih edilmesinin en önemli nedeni, az parametre ile zengin ateşleme örüntüleri oluşturabilmeleridir.

Canlıların ritmik hareketleri merkezi sinir düğümüne yerleşmiş ya da omuriliğe yerleşmiş merkezi örüntü üreteciyle (CPG) kontrol edilmektedir. CPG'ler ile hücrelerin periyodik davranışları arasında matematiksel bir ilişki tanımlanmıştır. Parmak tıklatma, el çırpma, alkışlama, dört ayak üzerinde hareket CPG'de üretilen örüntülere örnek olarak verilebilir. CPG'ler biyolojik nöronların lineer olmayan dinamik modellerine dayanan elektronik nöronlardan kurgulanabilmektedirler. Elektronik CPG tasarımlarında temel davranışlar olan kısıtlayıcı ve uyarıcı sinapsların her ikiside kullanılmaktadır. Hindmarsh-Rose sinir hücresi modeli için kullanılan sinaps modeli AdExI&F modeli için de kullanılmış, kısıtlayıcı ve uyarıcı bağlantı için düzenli ateşleme ve düzenli patlamalı ateşleme davranışları sayısal olarak analiz edilmiştir. Kısıtlayıcı bağlantı durumunda hem aynı fazlı davranış hem de zıt fazlı davranış elde edilebilmektedir. Bu durum faz farkı için başlangıç koşulları değiştirilerek elde edilmektedir. Uyarıcı bağlantı için ise sadece aynı fazlı eş zamanlı davranış görülmektedir.

Bir sonraki aşamada ise, sinir hücresi modeline ve sinaps modeline karşılık gelen düşük güçlü, akım modlu devre benzetimi yapılmış, elde edilen sonuçların daha önceki model ile elde edilen sonuçlara göre daha başarılı olduğu gözlemlenmiştir.

A SYNAPTIC COUPLING FOR THE ADAPTIVE EXPONENTIAL INTEGRATE AND FIRE (AdExI&F) NEURON MODEL WITH CIRCUIT SIMULATIONS

SUMMARY

In this M.Sc. thesis, by using adaptive exponential integrate and fire model and synaptic connection, which was used with Hindmarsh-Rose neuron model, is observed anti-phase and in-phase locking for excitatory and inhibitory coupling for tonic spiking firing pattern and regular bursting firing pattern. Later, circuit, which is with low power and current mode, simulation of these models is realized and simulation results are identical which are numerically observed.

First of all, a neuron is a nerve cell that is the basic building block of the nervous system. A typical neuron possesses a cell body, often called the soma, dendrites, and an axon. The soma contains a neuron cell and nucleolus. Dendrites are thin structures that arise from the cell body, often extending for hundreds of micrometres and branching multiple times, giving rise to a complex "dendritic tree". The dendrites are responsible for picking up information from neighboring neurons and transmitting this information to the cell body, also known as the soma. An axon also known as a nerve fibre; is a long, slender projection of a nerve cell, or neuron. The axon is the elongated fiber that extends from the cell body to the terminal endings and transmits the neural signal. From the soma, the information is passed on along the axon, another structure in the nerve cell, and the axon in turn transmits signals to the dendrites of neighboring neurons. A small gap at the end of a neuron is called synapse that allows information to pass from one neuron to the next. A neuron is an electrically excitable cell that processes and transmits information through electrical and chemical signals. A typical neuron receives inputs from more than 10.000 other neurons through the contacts on its dendritic tree called synapses. The inputs produce electrical transmembrane currents that change the membrane potential of the neuron. Synaptic currents produce changes, called postsynaptic potentials (PSPs). Small currents produce small PSPs, larger currents produce significant PSPs that can be amplified by the voltage-sensitive channels embedded in the neuronal membrane and lead to the generation of an action potential or spike, an abrupt and transient change of membrane voltage that propagates to other neurons via a long protrusion called an axon. In general, neurons do not fire on their own, they fire as a result of incoming spikes from other neurons. From the neuronal level we can go up to neuronal circuits, to cortical structures, to the whole brain, and finally to the behavior of the organism.

The neurons split up two types. The first one of these neurons is described neurons as integrators with a threshold. Neurons sum incoming PSPs and compare the integrated PSP with a certain voltage value, called the firing threshold. If it is below the threshold, the neuron remains quiescent; when it is above the threshold, the neuron fires an all-or-none spike. Integrators neurons prefer high-frequency input. The higher the frequency of the input, the sooner they fire. The other types are called resonator neurons. Resonators prefer oscillatory input with the same frequency as that of damped oscillations. Increasing the frequency may delay or even terminate

their response. It can be understood from this sample that neurons are mathematical systems. To understand how the brain works, it is needed to combine experimental studies of animal and human nervous systems with numerical simulation of large-scale brain models. As it is developed such large-scale brain models consisting of spiking neurons, it must be found compromises between two seemingly mutually exclusive requirements. The model for a single neuron must be firstly computationally simple, yet capable of producing rich firing patterns exhibited by real biological neurons.

One of the most important models in computational neuroscience is the Hodgkin-Huxley model of the squid giant axon. Using pioneering experimental techniques of that time, Hodgkin and Huxley (1952) determined that the squid axon carries three major currents: voltage-gated persistent K+ current with four activation gates, voltage gated transient Na+ current with three activation gates and one inactivation gate, and Ohmic leak current which is carried mostly by Cl^- ions.

All living cells have an electrical voltage, or potential difference, between their inside and outside. Since the cell's membrane is what separates the inside from the outside, this potential difference is referred to as the membrane potential. The resting potential refers to the potential across the membrane when the cell is at rest. A typical neuron has a resting potential of about -70mV and ions which enter and leave cell make neuron generate an action potential. An inward current corresponds to a positively charged ion, such as Na^+, entering the cell. This raises the membrane potential; that is, it brings the membrane potential closer to zero. In this case, the cell is said to be depolarized. An outward current corresponds to a positively charged ion, such as K^+, leaving the cell or a negatively charged ion, such as Cl^-, entering the cell. In this case, the cell becomes hyperpolarized. There are two types of ion channels in the membrane, gated and non-gated. Non-gated channels are always open, whereas gated channels can open and close and the probability of opening often depends on the membrane potential; these are referred to as voltage-gated channels. Gated channels are typically selective for a single ion. Neurons at rest are permeable to Na^+ and Cl^- in addition to K^+. Because of their concentration differences, Na^+ and Cl^- ions move into the cell and K^+ ions move outward. The influx of Na^+ ions tends to depolarize the cell, whereas the efflux of K^+ and the influx of Cl^- have the opposite effect. The resting potential of the cell is the potential at which there is a balance between these fluxes. It depends on the concentrations of the ions both inside and outside the cell, as well as the permeability of the cell membrane to each of the ions. At rest, many more K^+ and Cl^- channels than Na^+ channels are open; hence, the cell's resting potential is determined primarily by the K^+ and Cl^- Nernst potentials. For a cell to maintain a constant resting potential, the efflux of K^+ ions must balance the influx of Na^+ ions here Cl^- ions are ignored.

The basic mechanisms underlying action potentials are; the following. At rest, most of the Na^+ channels are closed, so the membrane potential is determined primarily by the K^+ Nernst potential. If the cell is depolarized above some threshold, then Na^+ channels open and this further depolarizes the cell. This allows even more Na^+ channels to open, allowing more Na+ ions to enter the cell and forcing the cell toward the Na^+ Nernst potential. This is the upstroke of the action potential. The Na^+ channel is transient, so even when they are depolarized, the Na^+ channels eventually shut down. In the meantime, the depolarization opens K^+ channels and K^+ ions exit the cell. This hyperpolarizes the cell as the membrane potential moves toward the K^+ equilibrium potential. Until the voltage-gated K^+ channels close up again, the

membrane is refractory. During this time, pumps exchange excess Na^+ ions inside the cell with excess K^+ ions outside the cell. Only a very small change in the concentration of Na^+ ions is needed to generate an action potential.

In general, scientists refer to all conductance-based models as being of the Hodgkin–Huxley-type. Such models are important not only because their parameters are biophysically meaningful and measurable, but also because they allow us to investigate questions related to synaptic integration, dendritic cable filtering, effects of dendritic morphology, the interplay between ionic currents, and other issues related to single cell dynamics. The model consists of four equations and tens of parameters, so although the model is biophysically meaningful, it is complicated and is extremely expensive to implement.

In literature over the last few years, neuron models, which are computationally simple, easy to understand and analyze also capable of producing rich firing patterns exhibited by real biological neurons like Izhikevich neuron model and adaptive exponential integrate and fire neuron model, is described. The adaptive exponential integrate-and-fire model's (AdExI&F,2005) parameters can be easily related to physiological quantities, and the model has been successfully fit to a biophysical model of a regular spiking pyramidal cell and to real recordings of pyramidal cells. The most important reason for preferring this model is possible to arise rich firing patterns with least parameters. Tonic spiking, adaptation, initial burst, regular bursting, delayed accelerating, delayed regular bursting, transient spiking and irregular spiking can be given as an example of how the different firing patterns arise with simple adaptive exponential integrate-and-fire model.

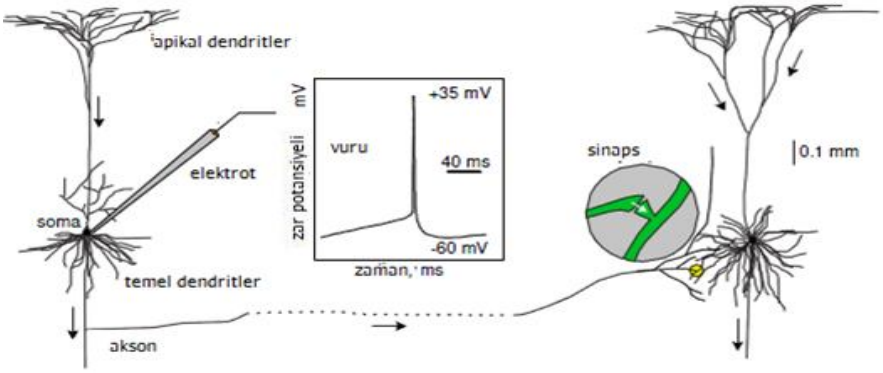
The Adaptive Exponential Integrate-and-Fire model (AdEx) describes the evolution of the membrane potential when a current is injected. It consists of a system of two differential equations and four parameters. When the current drives the potential beyond the threshold voltage, the exponential term actuates a positive feedback which leads to the upswing of the action potential. The exponential is related to the quasi-instantaneous reaction of the activation variable of the sodium channel in a Hodgkin–Huxley-type neuron model. The upswing is stopped at a reset threshold. The downswing of the action potential is replaced by the reset condition.

Rhythmic motions of animals are controlled by central pattern generators (CPGs) resident in central ganglia or the spinal cord. We will consider three examples: finger tapping, hand clapping, and quadrupedal locomotion. CPGs can be constructed from electronic neurons based on non-linear dynamical models of biological neurons. It can be seen to implement an electronic neuron circuit, the Hindmarsh-Rose neuron model is used. For AdExI&F neuron model, the same synapse model is used and for excitatory and inhibitory coupling, tonic spiking firing pattern and regular bursting firing pattern is numerically analyzed. In case of inhibitory coupling, in-phase and anti-phase locking occurs which can be achieved for different initial conditions of the phase difference. When the coupling is excitatory, the in-phase locked state can be seen only.

The next step is that low power current mode circuit is simulated for neuron and synapse model and simulation results is more successful than the other neuron model's simulation results which was analyzed before.

1. GİRİŞ

Nöronlar yani sinir hücreleri merkezi sinir sisteminin temel fonksiyonel birimleridir. Bir nöron, soma, dendrit ve akson olarak adlandırılan üç kısımdan oluşmaktadır. Soma, nöron çekirdeğini ve çekirdekçiğini içeren kısımdır. Dendrit ise soma içerisinden çıkan kısa uzantılara denilmektedir. Dendritlerin görevi diğer nöronlardan gelen uyarıları alıp, nöron gövdesine iletmektir. Nöron gövdesinden çıkan tek bir uzun uzantıya akson adı verilmektedir. Aksonların mesaj iletiminde önemli rolü vardır. Nöronlar arası bağlantı noktalarına ise sinaps denilmektedir. Sinapslar bilgi iletiminden sorumludurlar. Sinir hücreleri, birbirleriyle haberleşmeyi elektriksel sinyallerle gerçekleştirmektedirler. Tipik bir nöron 10.000'den fazla nöronun sinaps bağlantı noktalarından uyarı yani giriş almaktadır. Nörona giriş olarak gelen akım, hücrenin zar gerilimini değiştirmektedir. Hücreye giren sinaptik akımlar postsinaptik gerilim (PSP) olarak adlandırılan gerilimi üretmektedirler. Küçük akımlar küçük PSP üretirken, büyük akımlar nöronal zara gömülü gerilime duyarlı kanallar tarafından güçlendirilen belirgin PSP üretmekte ve bu da diğer nöronlara akson yolu ile yayılan, zar geriliminde ani değişime neden olan vuru (spike, action potential) meydana getirmektedir (Şekil 1.1). Sinir hücreleri genelde kendi başlarına ani sıçrama yapmazken, ancak diğer hücrelerden gelen uyarılar sonucunda vuru oluştururlar. Ayrıca canlıların hareketlerini yöneten, algılamayı sağlayan en küçük birim olan sinir hücrelerinin birleşmesi ile hücre gruplarına sonra kortikal yapılara, bütün beyine ve son olarak da organizmanın davranışına geçilebilmektedir.



Şekil 1.1 : Birbirine bağlı iki adet kortikal piramit tipi nöron ve vuru davranışı [1].

Sinir hücreleri iki tipe ayrılmaktadırlar. Bunlardan ilki olan integratör nöronlar, belli bir eşik değerine göre vuru üretmektedirler. Buna ateşleme eşiği denilmektedir. Eğer sinir hücresine gelen PSP değerleri bu eşiğin altında ise nöron pasiftir, bu eşik değerinin üstüne çıktığı zaman ise nöron "ya hep ya hiç" prensibine göre vuru oluşturmaktadır. İntegratör nöronlar yüksek frekanslı girişler tercih etmektedirler. Giriş frekansı arttıkça o kadar vuru üretmeye yakındırlar. Bazı nöronlar ise rezonatördürler. Bu rezonatör hücreler salınım yapan girişleri tercih etmektedirler. Salınım frekansının artması nöronların cevaplarını geciktirebilmekte hatta sönümleyebilmektedir. Bu örnekten de anlaşılacağı gibi nöronlar aslında matematiksel sistemlerdir. Korteks gibi çokça incelenmiş birimlerin geniş-ölçekli benzetimleri ve nöronal dinamiklerin teorik incelemeleri için, nöron modellerinin matematiksel olarak ele alınabilirliği bir avantajdır. Bunun yanında biyolojik olarak benzer ve sayısal olarak hesaplanabilmesinin hızlı olması da gerekmektedir. Büyük ölçekli bir ağın benzetimi için tek bir nöron için model mutlaka sayısal olarak hesaplaması basit olmalı ve mümkünse gerçek biyolojik nöronlar tarafından sergilenen zengin ateşleme örneklerini üretebilmelidir.

İlk olarak gerçek nöron davranışına en yakın matematiksel sistem, mürekkep balığı kocaman aksonunun incelenmesiyle ortaya çıkan Hodgkin-Huxley modelidir. Bu model dört eşitlikten ve on tane parametreden oluşmaktadır. Bunlar, zar gerilimini Na ve K akımlarının etkinleşmesini ve Na akımının etkisizleşmesini ifade etmektedirler. Bu model biyolojik olarak anlamlı ve ölçülebilirdir, ancak matematiksel ifadesi karmaşık ve uygulaması oldukça pahalıdır. Bu yüzden, Tut ve Ateşle (integrate and fire, I&F) gibi basit nöron modelleri sayısal olarak hesaplanan sinir bilimi topluluğunda çokça tercih edilmektedir. Bu modellerin analizi ve anlaması kolay, verimli bir şekilde benzetimleri yapılabilmektedir. Uyarlamalı Üstel Tut&Ateşle (AdExI&F) modelinin bu çalışmada tercih edilmesinin sebepleri; modelin parametrelerinin fizyolojik niteliklerle ilişkili olması ve modelin biyofiziksel modele başarıyla uymasıdır. AdExI&F sinir hücresi modeli az parametreye sahip olmasına rağmen, zengin ateşleme örnekleri sağlayabilmektedir. AdExI&F modeli Hodgkin-Huxley tip nöronlara aynı zamanda korkital nöronlardan gelen kayıtlara başarıyla uymaktadır. Son zamanlarda ise bu model nöromorfik yani beynin sinyal ağının davranışlarının benzetimini yapabilen donanım sistemlerine uygulanabilmektedir.

Beyinde bulunan sinir hücrelerin birbiriyle uyumlu ritmik davranışına eş zamanlı davranış denilmektedir. Bu sinir hücrelerin oluşturduğu vurunun eş zamanlı davranışı idrakla ilgili, algılama, dikkat ve hafıza gibi fonksiyonlarla ilişkilidir. İki vuru davranışı aynı faz ile ya da sabit bir faz farkı ile oluşabilmektedir. Vurunun aynı faz ile oluşması durumuna aynı-fazlı senkronizasyon, zıt fazlı oluşması durumuna ise zıt fazlı senkronizasyon denilmektedir. Nöronlar arası sinaptik bağlantı ise darbeli bağlantı, zayıfça bağlantı ve yavaş bağlantı olarak adlandırılan üç farklı şekilde olmaktadır. Matematiksel sistemler genelde zayıfça bağlıdır. Bu çalışmada incelenen AdExI&F modeli için bağlantı da zayıfça bağlantıdır. Zayıfça bağlantı osilatörlerin eş zamanlı davranışı için gerekli olan koşul birbirine bağlı nöronların neredeyse eşit frekansa sahip olmalarıdır. Ayrıca zayıfça bağlantı koşulunda birbirine bağlı nöronların bağlantı olmadan da vuru oluşturmaları gerekmektedir.

2. HODGKİN-HUXLEY MODELİ

Hesaplamalı sinirbiliminde en önemli modellerden biri mürekkep balığı kocaman aksonunun fizyolojik incelenmesiyle ortaya çıkan Hodgkin-Huxley modelidir. Hodgkin ve Huxley (1952) mürekkep balığı sinir hücresinin, dört etkinleştirme kapısı ile birlikte (Hodgkin-Huxley eşitliğinde n^4 ile belirlenen, n ise K^+ için etkinleştirme katsayıdır) gerilim kontrollü sürekli K^+ akımı; gerilim kontrollü süreksiz Na^+ akımı, üç etkinleştirme kapısı ve bir tane etkisizleştirme kapısı ile birlikte (Hodgkin-Huxley eşitliğinde m^3h terimi), ve daha çok Cl^- iyonları ile taşınan sızıntı akımı I_L olan üç tane önemli akım taşıdığına karar vermişlerdir [1].

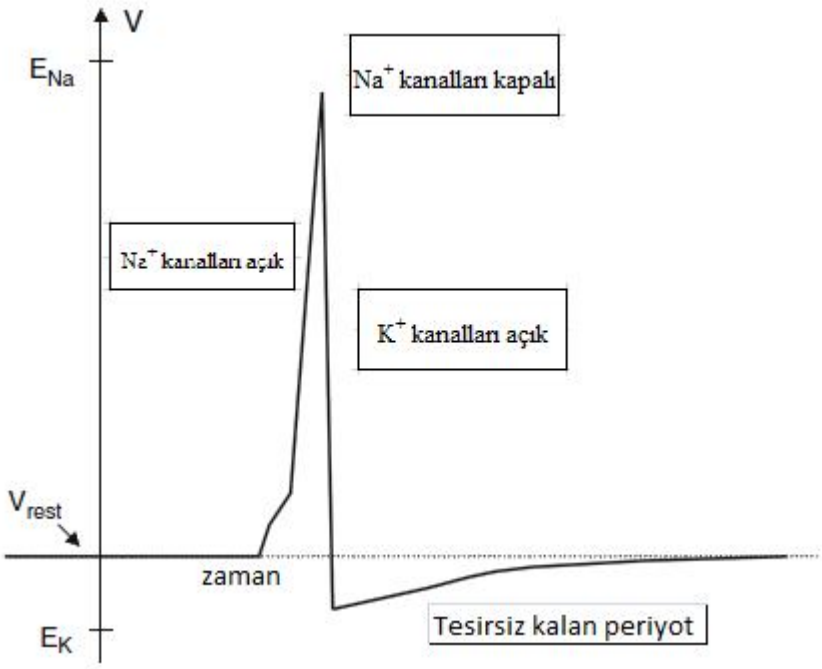
Sinir hücreleri, zar içi ve dışı arasında elektriksel gerilime ya da gerilim farkına sahiptirler. Bu gerilim farkına ise zar gerilimi (membrane potential) denilmektedir. Hücre dinlenir durumda iken zar boyunca sabit olan gerilime ise dinlenme gerilimi (resting potential) denilmektedir. Hücre zarından içe doğru akan akım, bu durum Na^+ iyonlarının zar içerisine girmesi anlamına gelmektedir, zar gerilimini arttırmakta, zar geriliminin sıfıra yakın olmasına neden olmaktadır. Bu durumda hücre depolarize olmuş denilmektedir. Hücre zarından dışa doğru akan akım, K^+ iyonlarının zardan dışarı çıkması anlamına gelmektedir, ya da hücreye giren iyonlar, Cl^- iyonlarının zar içerisine girmesi anlamına gelmektedir, olmasıyla hücre hiperpolarize durumuna geçmektedir. Hücreye giren ve çıkan bu iyonlar hücrenin genelde -70mV civarında olan zar gerilimini değiştirmekte ve vuru oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 2.2). Hücre zarında iyonların zara giriş çıkışlarını kontrol eden geçitli ve geçitsiz olmak üzere iki tip iyon kanalı vardır. Geçitsiz kanallar hep açıktır. Geçitli kanallar ise açılıp kapanabilmektedir ve açılma olasılığı genelde zar gerilimine bağlıdır; bunlar gerilim kontrollü kanallar (voltage-gated channels) olarak adlandırılmaktadır. Na^+ , Cl^- iyonları hücre içerisine girmek isterken K^+ iyonları hücre dışına çıkmak istemektedir. Nöron dinlenme durumundayken bu iyonlara geçirgendir. Dinlenme durumunda, K^+, Cl^- kanalları Na^+ kanallarından daha çok açıktır; bu yüzden hücrenin dinlenme gerilimi öncelikle K^+ ve Cl^- Nernst gerilimleri ile belirlenmektedir. Hücrenin sabit dinlenme geriliminde kalması için hücreden çıkan K^+ iyonlarını,

hücreye giren Na^+ iyonları dengelemelidir (burada Cl^- iyonları ihmal edilmektedir). İncelenmiş bazı hücrelerdeki tipik iyon yoğunlukları Çizelge 2.1'de görülmektedir.

Çizelge 2.1 : Hücrelerdeki tipik iyon yoğunlukları [2].

Ion	Inside (mM)	Outside (mM)	Equilibrium potential (mV), $E_i = \frac{RT}{zF} \ln \frac{[C]_{out}}{[C]_{in}}$
Frog muscle			$T = 20°C$
K^+	124	2.25	$58 \log \frac{2.25}{124} = -101$
Na^+	10.4	109	$58 \log \frac{109}{10.4} = +59$
Cl^-	1.5	77.5	$-58 \log \frac{77.5}{1.5} = -99$
Ca^{2+}	10^{-4}	2.1	$29 \log \frac{2.1}{10^{-4}} = +125$
Squid axon			$T = 20°C$
K^+	400	20	$58 \log \frac{20}{400} = -75$
Na^+	50	440	$58 \log \frac{440}{50} = +55$
Cl^-	40–150	560	$-58 \log \frac{560}{40-150} = -66$ to -33
Ca^{2+}	10^{-4}	10	$29 \log \frac{10}{10^{-4}} = +145$
Mammalian cell			$T = 37°C$
K^+	140	5	$62 \log \frac{5}{140} = -89.7$
Na^+	5–15	145	$62 \log \frac{145}{5-15} = +90 - (+61)$
Cl^-	4	110	$-62 \log \frac{110}{4} = -89$
Ca^{2+}	10^{-4}	2.5–5	$31 \log \frac{2.5-5}{10^{-4}} = +136 - (+145)$

Vuru oluşumunun altında yatan basit mekanizma ise Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1 : Tipik bir vuru işareti [2].

Belli bir eşik değerinin üstünde hücre depolarize olduğunda, Na^+ kanalları açılmakta ve bu hücrenin daha fazla depolarize olmasına neden olmaktadır. Bu ise daha fazla Na^+ kanallarının açılmasına, daha fazla Na^+ iyonlarının hücreye girmesine izin

vermekte ve hücreyi Na^+ Nerst gerilimine geçmeye zorlamaktadır. Bu durum ise hücrenin vuru oluşturmasına neden olmaktadır. Na^+ kanalları geçici olduğundan dolayı, hücre depolarize olmasına rağmen, Na^+ kanalları nihayetinde kapanmaktadır. Bu süre içerisinde, depolarizasyon durumu K^+ kanallarını açmaktadır bu nedenle K^+ iyonları hücreyi terk etmektedir. Zar gerilimi K^+ denge gerilimine (equilibrium potential) ilerledikçe hücreyi hiperpolarize durumuna sokmaktadır. Gerilim kontrollü K^+ kanalları tekrar kapanana kadar, zar cevap vermemektedir. Bu zaman süresince, aşırı gelen Na^+ iyonları hücrenin içine pompalanarak ve aşırı gelen K^+ iyonları hücreden dışarı pompalanarak yer değiştirme yapılmaktadır. Na^+ iyon yoğunluğundaki ufak bir değişim hücrenin vuru oluşturmasına neden olmaktadır.

Hodgkin-Huxley modeli dört diferansiyel eşitlikten oluşan matematiksel bir sistemdir. Bir eşitlik zar gerilimi için, üç eşitlik ise kanal geçit değişkenleri için tanımlıdır. Hodgkin-Huxley eşitlikleri aşağıda verilmektedir [1].

$$C\dot{V} = I - \overbrace{\bar{g}_K n^4 (V - E_K)}^{I_K} - \overbrace{\bar{g}_{Na} m^3 h (V - E_{Na})}^{I_{Na}} - \overbrace{g_L (V - E_L)}^{I_L} \quad \textbf{(2.1)}$$

$$\dot{n} = \alpha_n(V)(1 - n) - \beta_n(V)n \quad \textbf{(2.2)}$$

$$\dot{m} = \alpha_m(V)(1 - m) - \beta_m(V)m \quad \textbf{(2.3)}$$

$$\dot{h} = \alpha_h(V)(1 - h) - \beta_h(V)h \quad \textbf{(2.4)}$$

Burada,

$$\alpha_n(V) = 0.01 \frac{10 - V}{\exp\left(\frac{10 - V}{10}\right) - 1} \quad \textbf{(2.5)}$$

$$\beta_n(V) = 0.125 \exp\left(\frac{-V}{80}\right) \quad \textbf{(2.6)}$$

$$\alpha_m(V) = 0.1 \frac{25 - V}{\exp\left(\frac{25 - V}{10}\right) - 1} \quad \textbf{(2.7)}$$

$$\beta_m(V) = 4 \exp\left(\frac{-V}{18}\right) \quad \textbf{(2.8)}$$

$$\alpha_h(V) = 0.07 \exp\left(\frac{-V}{20}\right) \quad \textbf{(2.9)}$$

$$\beta_h(V) = \frac{1}{\exp\left(\frac{30 - V}{10}\right) + 1} \quad \textbf{(2.10)}$$

Bu parametreler orijinal Hodgkin-Huxley makalesinden alınmıştır ve zar geriliminin yaklaşık olarak 65mV olarak ötelenmiş haline denk gelmektedir, bu durumda

dinlenme gerilimi yaklaşık olarak V≈0'a denk olmaktadır. Ötelenmiş Nernst denge gerilimleri şu şekildedir:

$$E_K = -12\text{mV},\ E_{Na} = 120\text{mV},\ E_L = 10.6\text{mV}\,. \qquad \textbf{(2.11)}$$

Maksimal iletkenliklerin tipik değerleri ise şu şekildedir:

$$\bar{g}_K = 36\,{}^{\text{mS}}/_{\text{cm}^2}\ ,\ \bar{g}_{Na} = 120\,{}^{\text{mS}}/_{\text{cm}^2}\ ,\ g_L = 0.3\ {}^{\text{mS}}/_{\text{cm}^2}\ . \qquad \textbf{(2.12)}$$

C = 1 μF/cm^2 zar kapasitesi, I = 0 μF/cm^2 ise uygulanan akımdır. α(V) ve β(V) kanalların açık ve kapalı durumları arasında geçiş oranlarını belirtmektedir. Kanal geçit değişkenlerinin gösterim biçiminin yukarda belirtilen biçimde verilme nedeni Hodgkin-Huxley makalesinde tanımlanan ifadeleri aynen göstermektir. Günümüzde ise kullanılan standart biçimleri şu şekildedir [1].

$$\dot{n} = (n_\infty(V) - n)/\tau_n(V) \qquad \textbf{(2.13)}$$

$$\dot{m} = (m_\infty(V) - m)/\tau_m(V) \qquad \textbf{(2.14)}$$

$$\dot{h} = (h_\infty(V) - h)/\tau_h(V) \qquad \textbf{(2.15)}$$

Burada kararlı hal fonksiyonları ve zaman sabitleri,

$$n_\infty = \alpha_n/(\alpha_n+\beta_n) \qquad \tau_n = 1/(\alpha_n+\beta_n) \qquad \textbf{(2.16)}$$

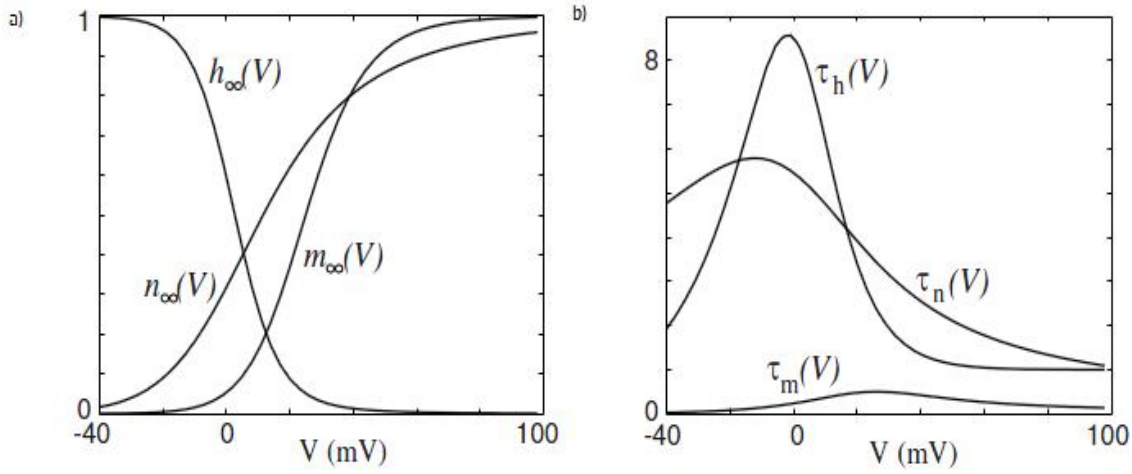
$$m_\infty = \alpha_m/(\alpha_m+\beta_m) \qquad \tau_m = 1/(\alpha_m+\beta_m) \qquad \textbf{(2.17)}$$

$$h_\infty = \alpha_h/(\alpha_h+\beta_h) \qquad \tau_h = 1/(\alpha_h+\beta_h) \qquad \textbf{(2.18)}$$

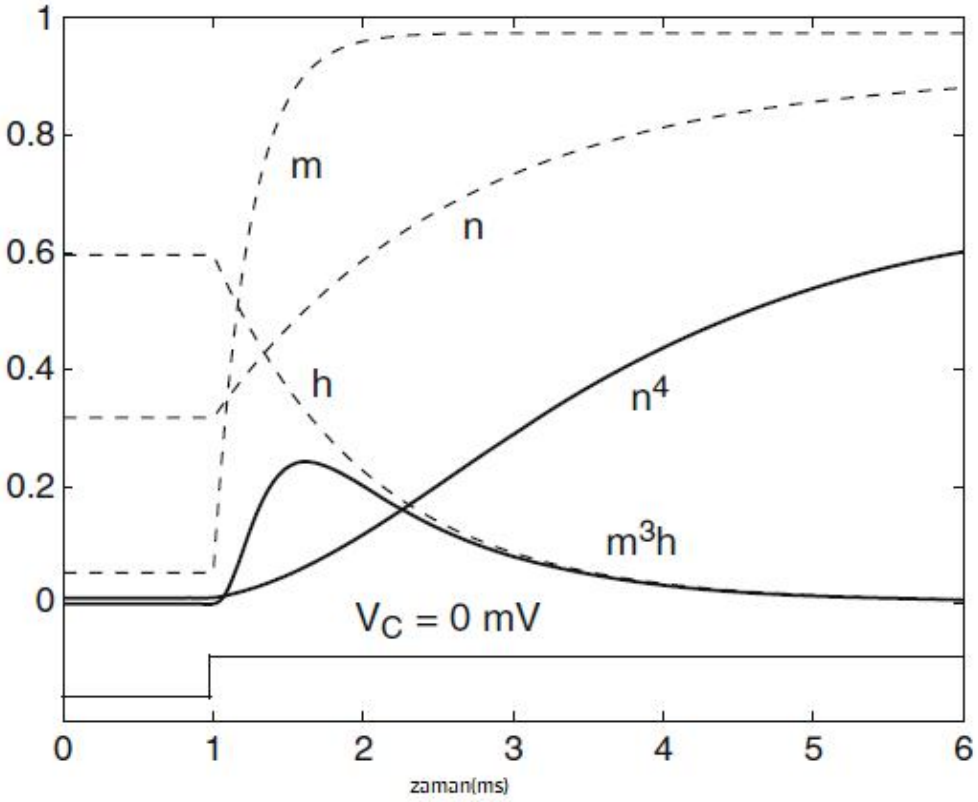
şeklindedir.

Bu fonksiyonların yaklaşımı Boltzmann ve Gaussian fonksiyonları kullanılarak yapılmaktadır. Şekil 2.2'de etkinleştirme eğrileri n_∞(V), m_∞(V) ve h_∞(V); τ_n(V), τ_m(V) ve τ_h(V) zaman sabiti eğrileri görülmektedir. n_∞ ve m_∞ artan fonksiyonlardır, hiperpolarize durumuna sokan akımlar için 0'a yaklaşmakta ve depolarize duruma sokan akımlar için ise 1'e yaklaşmaktadır. Bu yüzden, n ve m, zar depolarize durumundayken etkinleştirilmektedir. Diğer taraftan, h_∞(V) azalan fonksiyondur, böylece zar depolarize durumdayken Na^+ kanalları etkisiz duruma gelmektedir. Ayrıca τ_m(V), τ_n ve τ_h'den oldukça küçüktür. Bu yüzden, Na^+ kanalları etkin duruma, etkisiz duruma geçmesinden daha hızlı gelmekte ya da K^+ kanalları açılmaktadır. Şekil 2.3'te ise m, h ve n'nin giriş basamak işaretine cevabı görülmektedir. Şekil 2.4'te ise Hodgkin-Huxley eşitliklerinin farklı seviyelerdeki giriş akımlarına cevabı

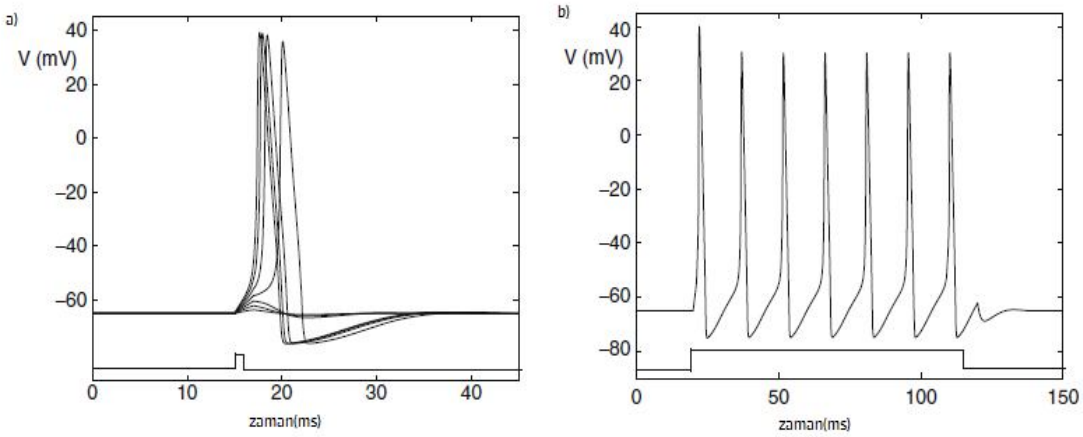
görülmektedir. İncelenen sinir hücreleri "ya hep ya hiç" prensibine göre çalışmaktadır. Uygulanan akım eşiğin altında ise zar gerilimi çabucak dinlenme durumuna dönmekte ama eşiğin üstünde ise vuru davranışı görülmektedir. Uygulanan akım yeteri kadar büyük ve uzun süre uygulanırsa model periyodik cevap üretmektedir.



Şekil 2.2 : **a)** Gerilim kontrollü kararlı-hal etkinleştirme fonksiyonları ve **b)** gerilim kontrollü zaman sabitleri [1].



Şekil 2.3 : Giriş basamak işaretine karşılık düşen aktivasyon ve deaktivasyon değişkenlerinin davranışı [2].



Şekil 2.4 : Hodgkin-Huxley modelin giriş akımına cevabı **a)** geçici vuru davranışı **b)** periyodik davranışı [2].

3. UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİ

Uyarlamalı Üstel Tut&Ateşle (AdExI&F) sinir hücresi modeli, Izhikevich modeli gibi basit olmasına rağmen çok sayıda ateşleme örüntüleri üretebilmektedir. Modelin giriş parametresi olan akım, çıkışta hücrenin zar gerilimini değiştirmektedir. Bu durum ise hücrenin vuru oluşturmasına neden olmaktadır.

AdExI&F modelinin parametreleri fizyolojik niceliklerle ilişkilendirilebilmekte, piramit tipi hücrelerin davranışlarını başarıyla kopyalayabilmekte ve biyofiziksel modeline uymaktadır [4]. Bu modelin tercih edilmesinin en önemli nedeni, az parametre ile zengin ateşleme örnekleri gösterebilmeleridir.

AdExI&F modeli iki diferansiyel eşitlikten oluşan matematiksel bir sistemdir.

$$C\frac{dV}{dt} = -g_L(V - E_L) + g_L\Delta_T \exp\left(\frac{V - V_T}{\Delta_T}\right) + I - w, \quad \textbf{(3.1)}$$

$$\tau_w \frac{dw}{dt} = a(V - E_L) - w. \quad \textbf{(3.2)}$$

Giriş akımı (I), zar geriliminin (V) eşik gerilimini (V_T) aşmasını sağladığında, üstel terim vuru davranışının oluşmasına neden olacak pozitif geri beslemeye neden olmaktadır. Burada üstel terim, Hodgkin-Huxley-tip nöron modelinde vuru oluşumuna neden olan sodyum kanalına denk olmaktadır. Pozitif geri besleme yani üstel terim, zar geriliminin sonsuza gitmesine neden olmaktadır. Bunu engellemek için zar gerilimi 0 mV olarak belirlenen sonlu bir değere ulaştığında, **(3.3)**'teki resetleme koşulları uygulanmaktadır.

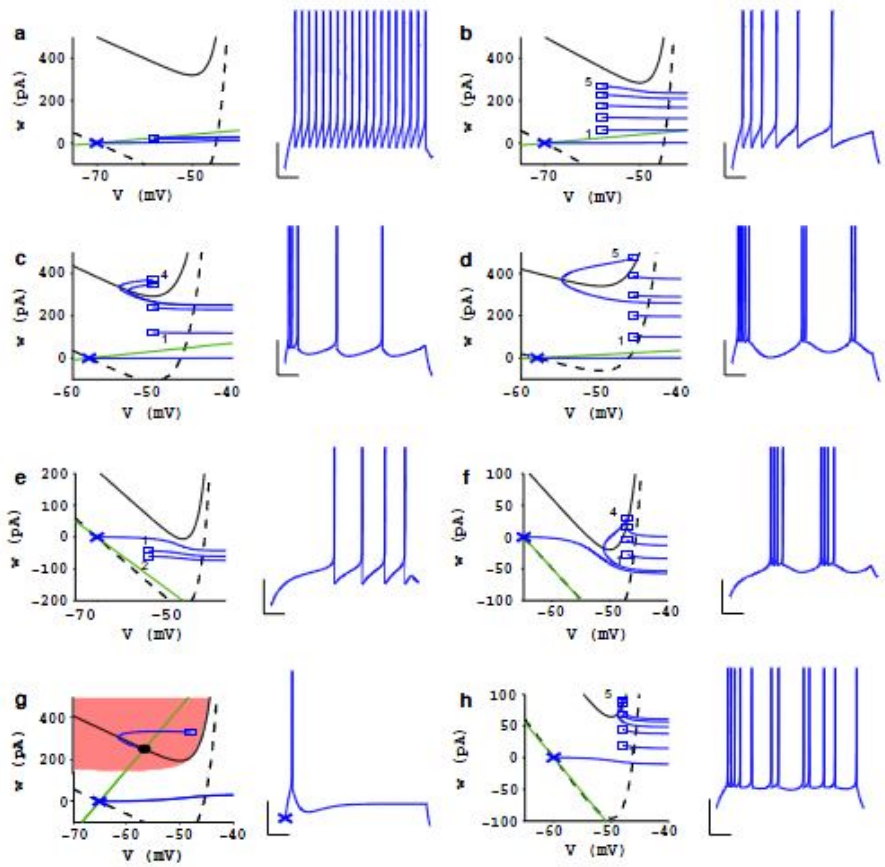
Eğer V > 0mV ise $\begin{cases} V \to V_r \\ w \to w_r = w + b \end{cases}$ **(3.3)**

V resetleme değeri V_r'ye eşitlenmekte, w reset değeri ise sabit b değeri ile belirlenmektedir.

Zar gerilimi (V) ve uyum akımını (w) tanımlamak için toplam dokuz parametre gereklidir. Ancak bu dokuz parametre genlik öteleme ve ölçeklemelerden dolayı dört parametreye indirgenebilmektedir. Toplam kapasite (C), toplam sızıntı iletkenliği

(g_L), etkin dinlenme gerilimi (E_L), eşik eğim etmeni (Δ_T), etkin eşik gerilimi (V_T) kullanılan beş tane ölçekleme parametreleridir. C ve g_L'nin, $\tau_m=C/g_L$ zaman ölçeklemesiyle, Δ_T ve V_T'nin kullanılarak zar geriliminin ötelenmesiyle, daha sonra I ve w'nin yeniden uygun ölçeklenerek, eşitlik **(3.1) ve (3.2)** boyutsuz değişkenlere sahip ve sadece dört parametreden oluşan sisteme indirgenmiş olmaktadır. Sonuç olarak elde edilen dört parametre, eşik altı uyum a, zaman sabiti τ_w, vuru uyarlamalı uyum b, ve resetleme gerilimi V_r ile orantılıdır. a, uyum akımının gerilime olan hassaslığını vuru davranışı olmadığı durumda dahi kontrol etmektedir.

Yukarıda tanımlanan parametrelerin değiştirilmesi sistemin davranışında nitelikli değişikliklerin olmasına neden olmaktadır, bu da değişik vuru örüntülerinin oluşmasını mümkün kılmaktadır. AdExI&F ile elde edilebilen ateşleme örüntülerini araştırmak için, hücreye giren giriş akımının zar geriliminde neden olduğu değişikliğin benzetimi yapılmaktadır. Şekil 3.1'de karakteristik ateşleme örnekleri görülmektedir.



Şekil 3.1 : a) Düzenli Ateşleme **b)** Uyarlamalı Ateşleme **c)** Başlangıçta Patlamalı Ateşleme **d)** Düzenli Patlamalı Ateşleme **e)** Gecikmeli Ateşleme **f)** Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme **g)** Geçici Ateşleme **h)** Düzensiz Ateşleme [1].

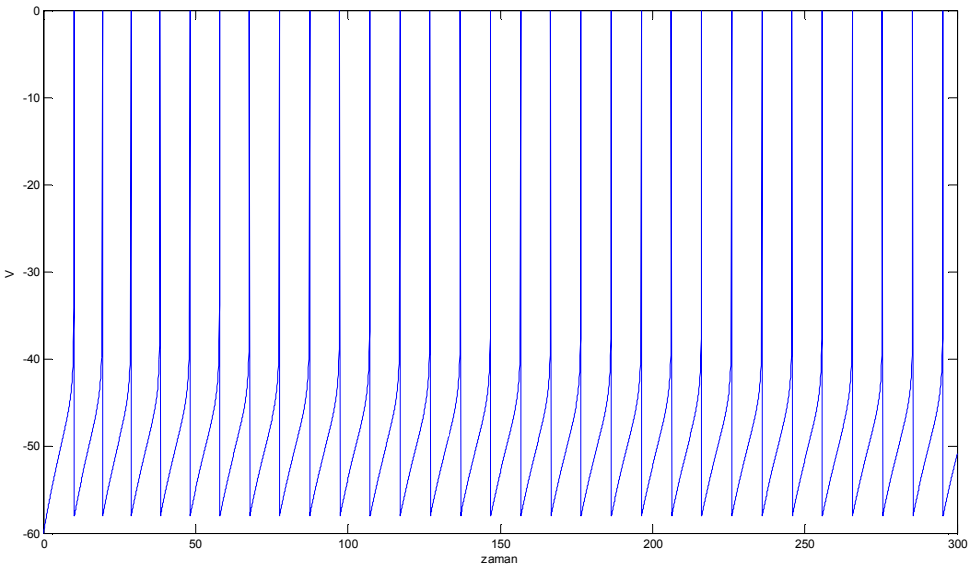
Her bir ateşleme örüntülerinin elde edilmesi için gereken AdExI&F modelinin parametrelerinin değerleri, ateşleme örüntülerinin tanımları ve elde edilen sonuçlar aşağıda görülmektedir. AdExI&F diferansiyel denklemlerinin çözümünde Euler yöntemi, benzetim ortamı için ise MATLAB programı kullanılmıştır.

3.1. Düzenli Ateşleme Örüntüsü

Sinir hücresi vuru cevabının art arda çizilmesiyle elde edilen ateşleme örüntüsüdür. Parametre değerleri ve düzenli ateşleme örneği aşağıda görülmektedir. Zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir ve frekans ise 100Hz olmaktadır.

Çizelge 3.1 : Düzenli ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.2	200	10	-70	-50	2	2	0	30	-58	500



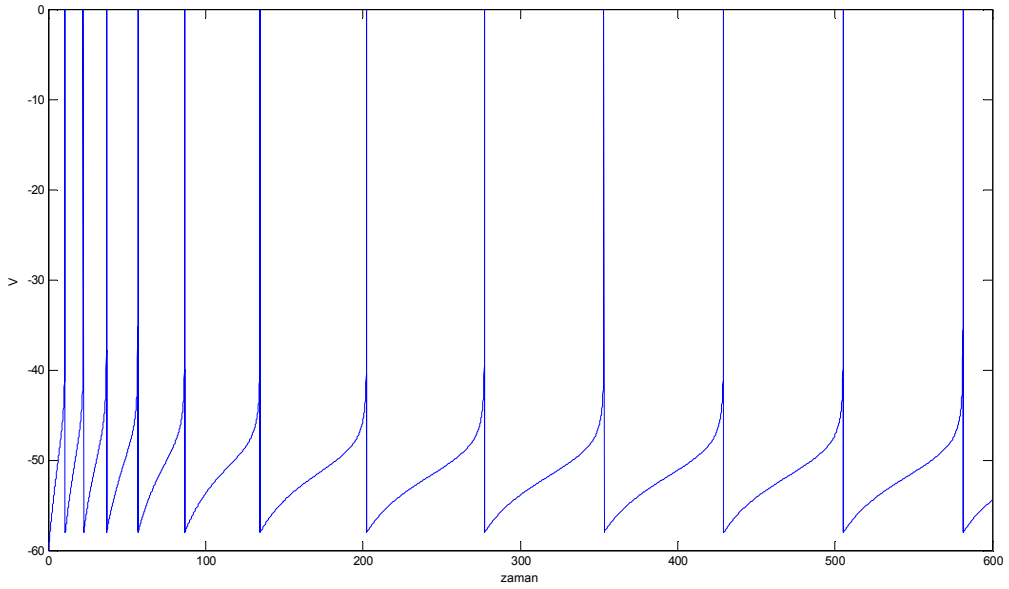
Şekil 3.2 : Düzenli ateşleme örüntüsü.

3.2. Uyarlamalı Ateşleme Örüntüsü

Sinir hücresinin vuru cevabı düzenli ateşleme gibi olmakla beraber, zamanla frekansı azalacak şekilde olmaktadır. Frekans, uyarının başında fazladır daha sonra ise adapte olmaktadır. Zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir ve frekans ise yaklaşık olarak 15Hz olmaktadır.

Çizelge 3.2 : Uyarlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.3	200	12	-70	-50	2	2	60	300	-58	500



Şekil 3.3 : Uyarlamalı ateşleme örüntüsü.

3.3. Başlangıçta Patlamalı Ateşleme Örüntüsü

Başlangıçta patlamalı, bir grup vuru davranışın uyarının başındaki frekansın, kararlı haldeki frekansa nazaran oldukça yüksek olmasını belirten ateşleme örüntüsüdür. Zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir ve frekans ise patlama sırasında 250Hz, daha sonra yaklaşık olarak 15Hz olmaktadır (Şekil 3.4).

Çizelge 3.3 : Başlangıçta patlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.4	130	18	-58	-50	2	4	120	150	-50	400

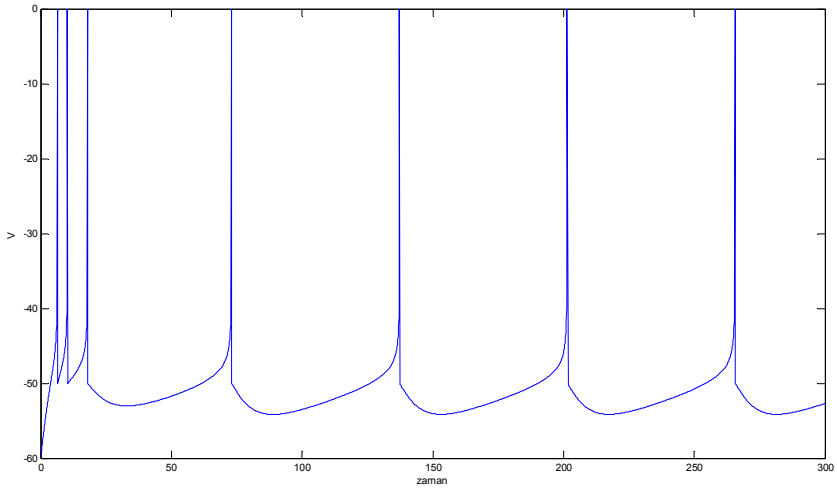
3.4. Düzenli Patlamalı Ateşleme Örüntüsü

Bazı nöronlar uyarıldığında periyodik patlamalı davranış gösterirler. Patlamalı ateşleme örüntüsü için hızlı ve yavaş olmak üzere iki davranış gözlenmektedir. Yavaş davranışta hücre dinlenme durumunda iken, hızlı davranışta ise hücre vuru yapmaktadır. Zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir ve frekans ise hızlı

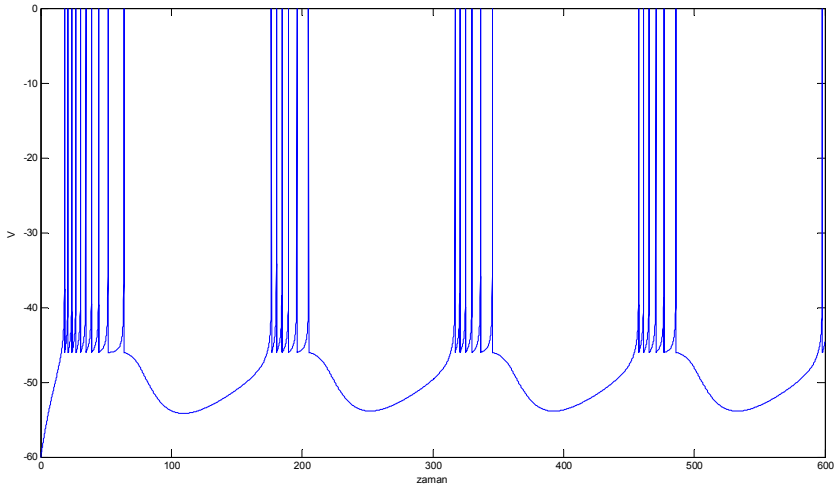
davranışlarda yaklaşık olarak 300Hz, yavaş davranışlarda ise yaklaşık olarak 7Hz olmaktadır (Şekil 3.5).

Çizelge 3.4 : Düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.5	200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210



Şekil 3.4 : Başlangıçta patlamalı ateşleme örüntüsü.



Şekil 3.5 : Düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü.

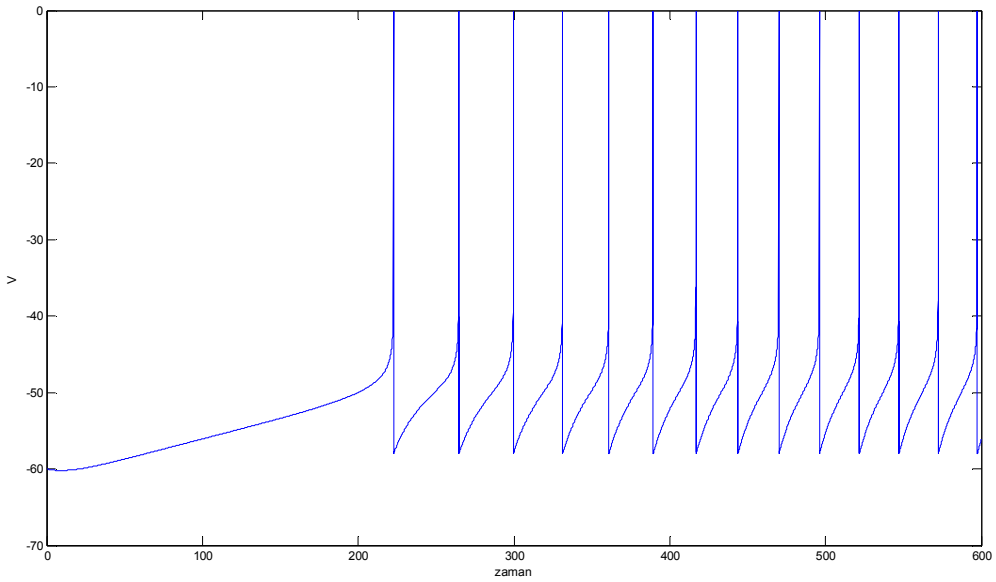
3.5. Gecikmeli Ateşleme Örüntüsü

Negatif a değeri, pozitif geri besleme olarak davranış göstermekte; bu da gecikmeli başlangıca neden olmaktadır. a < 0 olmasından dolayı kutuplanmış uyum akımı

(hiperpolarize olmayı sağlayan) w, depolarize olmuş V durumunda yavaşça azalmakta, uyum yeteri kadar azaldığında ise nöronun neticede vuru yapmasına izin vermektedir. Burada zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir. Frekans ise zamanla artmaktadır.

Çizelge 3.5 : Gecikmeli ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.6	200	12	-70	-50	2	-10	0	120	-58	110



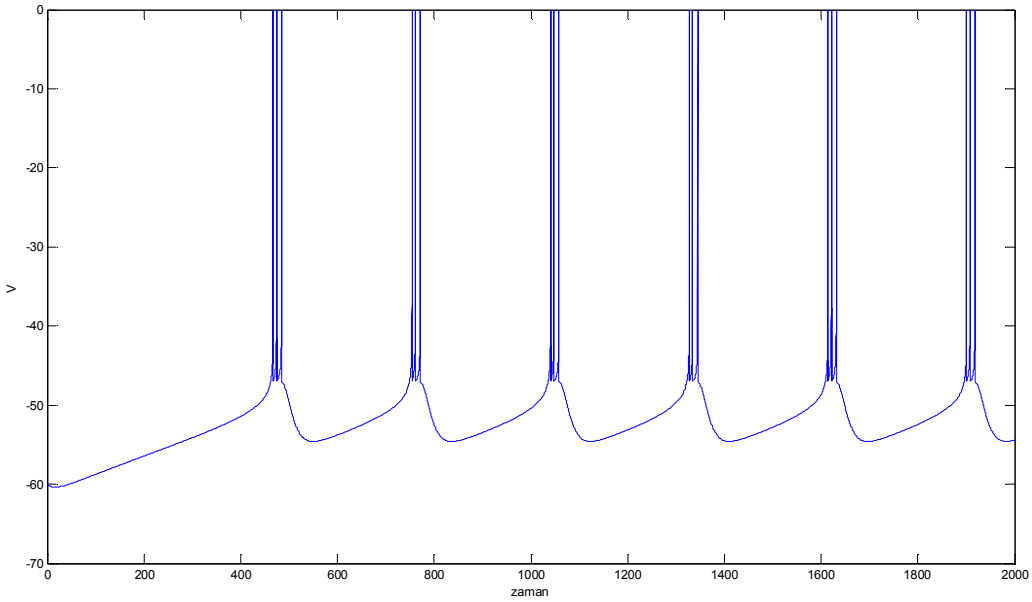
Şekil 3.6 : Gecikmeli ateşleme örüntüsü.

3.6. Gecikmeli Düzenli Patlamalı Ateşleme Örüntüsü

Gecikmeli özelliğinde vurunun başlamasına neden olan vuru uyarlamalı uyum parametresi b azdır. Ancak vurunun başlamasına neden olan vuru uyarlamalı uyum parametresi b'nin daha büyük değerleri için gecikmeli düzenli patlamalı davranışı görülmektedir. Zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir ve frekans ise hızlı davranışlarda yaklaşık olarak 170Hz, yavaş davranışlarda ise yaklaşık olarak 4Hz olmaktadır.

Çizelge 3.6 : Gecikmeli düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.7	200	12	-70	-50	2	-10	30	300	-47	110



Şekil 3.7 : Gecikmeli düzenli patlamalı ateşleme örüntüsü.

3.7. Geçici Ateşleme Örüntüsü

Darbe şeklinde uygulanan giriş akımına bazı nöronlar bir ya da birkaç defa vuru yapmaktalar, daha sonra dinlenme durumuna ulaşmaktadırlar. Bu durumda akımda ani artma olmasına karşın kararlı sabit nokta aynen kalmaktadır. Bu durumda vuru yine de üretilmektedir çünkü uyum akımı, giriş akımındaki keskin değişimi karşılamak için çok yavaş olmaktadır. Uygulanan akım yavaş yavaş aynı giriş değerine arttırılsa bile, nöron vuru yapmaz çünkü uyum göstermesi zaman almaktadır. Burada zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir (Şekil 3.8).

Çizelge 3.7 : Geçici ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.8	100	10	-65	-50	2	10	30	90	-47	172

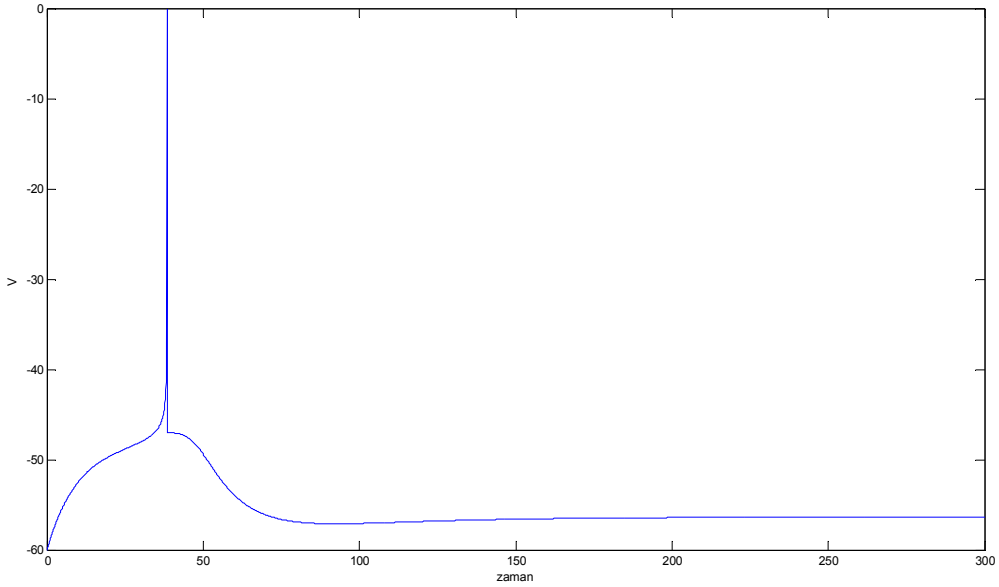
3.8. Düzensiz Ateşleme Örüntüsü

AdExI&F modelinde deterministik eşitliklere rağmen düzensiz vuru davranışı gözlenebilmektedir. Düzensiz ateşleme örüntüsü vurular arası aralıkların periyodik bir şekilde olmadan değişmesi ile ortaya çıkmaktadır. Düzensiz ani yükseliş kısıtlı parametreler yüzünden meydana gelmektedir ve düzensiz vuru davranışı oluştuğunda

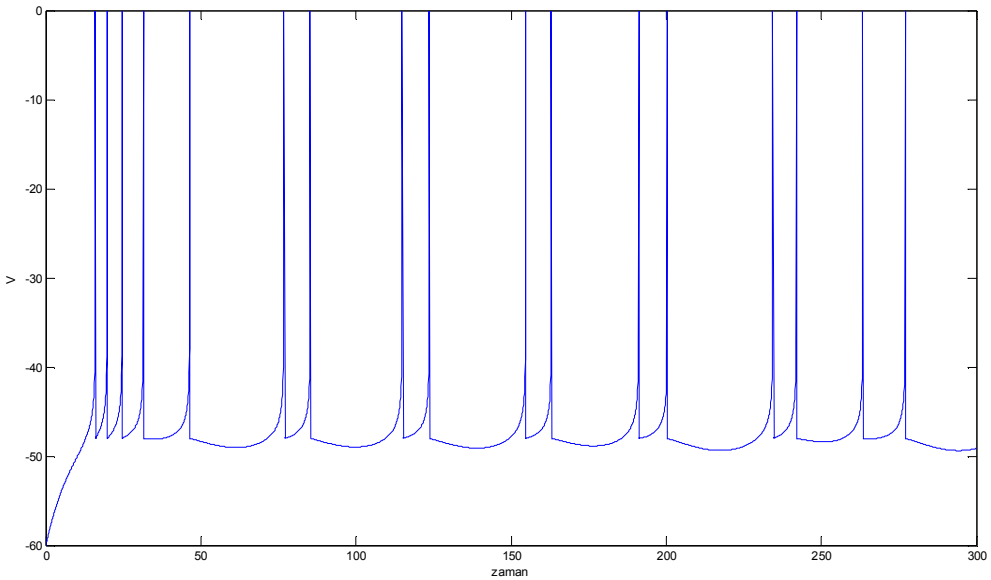
parametre uzayı düzensizdir. Burada zar gerilimi V [-60,0] mV arasında değişmektedir. Frekans ise görüldüğü üzere değişkendir (Şekil 3.9).

Çizelge 3.8 : Düzensiz ateşleme örüntüsü için parametre değerleri.

Örnekler	C(pF)	g_L(nS)	E_L(mV)	V_T(mV)	Δ_T(mV)	a(nS)	b(pA)	τ_w(ms)	V_r(mV)	I(pA)
Şekil 3.9	100	12	-60	-50	2	-11	30	130	-48	160



Şekil 3.8 : Geçici ateşleme örüntüsü.

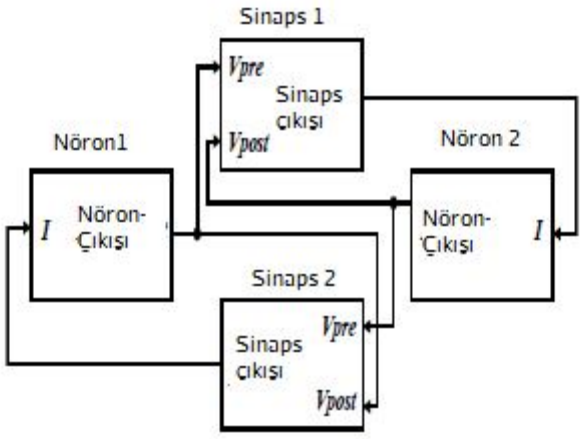


Şekil 3.9 : Düzensiz ateşleme örüntüsü.

4. UYARLAMALI ÜSTEL TUT&ATEŞLE (AdExI&F) SİNİR HÜCRESİ MODELİNE YÖNELİK SİNAPTİK BAĞLANTI

Etrafımızdaki canlıların davranışları merkezi sinir düğümüne yerleşmiş ya da omuriliğe yerleşmiş merkezi örüntü üreteciyle (CPG) kontrol edilmektedir. CPG, canlıların ritmik hareketlerini kontrol eden sinir hücreleri ağlarından meydana gelmektedir. Parmak tıklatma, el çırpma, alkışlama, dört ayak üzerinde hareket CPG'ye örnek olarak verilebilir. Geçmişten bugüne sinir hücreleri ağları ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Sonuç olarak CPG'ler ile hücrelerin periyodik davranışları arasında matematiksel bir ilişki tanımlanmıştır. CPG'ler biyolojik nöronların lineer olmayan dinamik modellerine dayanan elektronik nöronlardan kurgulanabilmektedir. Bilinen başka bir sinir hücresi modeli için böyle bir uygulama görülmektedir [5].

AdExI&F sinir hücresi modeli için de [5]'te kullanılan sinaps modeli kullanılmıştır. Buna göre iki sinir hücresi arasında tanımlanan bağlantının blok diyagramı aşağıda görülmektedir.



Şekil 4.1 : İki sinir hücresinin sinaptik bağlantı blok diyagramı [5].

AdExI&F modeli, daha önceden de bahsedildiği gibi iki diferansiyel eşitlikten oluşan sistemden meydana gelmektedir.

$$C\frac{dV}{dt} = -g_L(V - E_L) + g_L\Delta_T \exp\left(\frac{V-V_T}{\Delta_T}\right) + I - w \qquad \textbf{(4.1)}$$

$$\tau_w \frac{dw}{dt} = a(V - E_L) - w \quad \textbf{(4.2)}$$

Eğer V>0mV ise $\begin{cases} V \rightarrow V_r \\ w \rightarrow w_r = w + b \end{cases}$ **(4.3)**

[5]'te tanımlanan biyolojik-kimyasal sinaptik bağlantı ise aşağıdaki gibi modellenmektedir.

$$I = gS(t)(V_{rev} - V_{post}) \quad \textbf{(4.4)}$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{S_\infty - S(t)}{\tau_s(1 - S_\infty)} \quad \textbf{(4.5)}$$

$V_{pre}>V_{thres}$ için,

$$S_\infty = \tanh\left(\frac{V_{pre} - V_{thres}}{V_{slope}}\right) \quad \textbf{(4.6)}$$

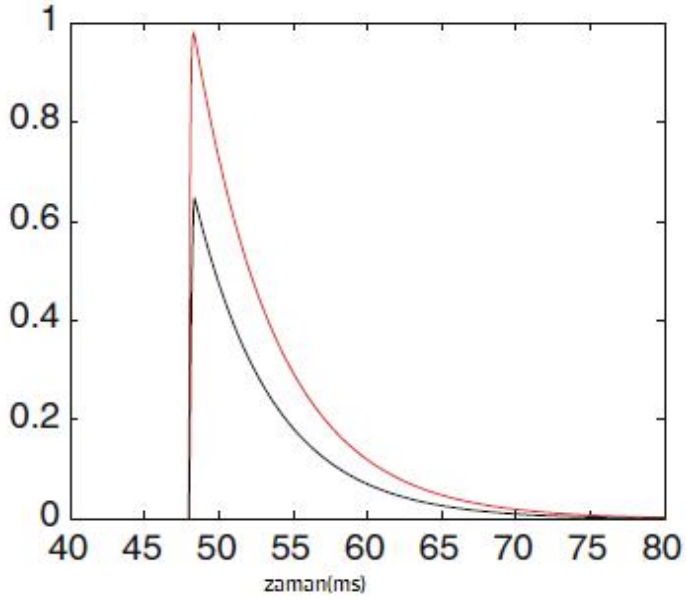
diğer durumlarda, $S_\infty=0$ olmaktadır.

Burada g sinaps çıkışı ölçekleme parametresi (maximal synaptic conductance), S(t) temel sinaptik değişkeni (instantaneous synaptic activation), S_∞ kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu (steady-state synaptic activation), V_{rev} ters yön sinaptik gerilimi (synaptic reversal potential), V_{pre} ve V_{post} sırasıyla sinaps giriş ve sinaps çıkış gerilimleri (presynaptic and postsynaptic voltages, respectively), V_{thres} sinapsın iletişime geçmesini sağlayan eşik gerilimi (synaptic threshold for transmitter release), V_{slope} sinaptik eğim gerilimi (synaptic slope voltage), τ_s sinaptik zaman sabiti (synaptic time constant) olarak ifade edilmektedir.

Elektronik CPG tasarımlarında temel davranışlar olan kısıtlayıcı ve uyarıcı sinapsların her ikiside kullanılmaktadır. Kısıtlayıcı ve uyarıcı sinaptik bağlantılarda akımın yönü V_{rev} gerilimi ile değiştirilmektedir. V_{rev} gerilimi uyarıcı sinapslar için pozitif değerdir ve kısıtlayıcı sinapslar için negatif bir değerdir. Bu durum sinaptik akımın uyarıcı sinaptik bağlantı için pozitif değerlerde olmasına, kısıtlayıcı sinaptik bağlantı için ise negatif değerlerde olmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada kullanılan sinaps modelinde sinaptik akımının davranışı Şekil 4.2'de gösterildiği gibi olmaktadır ve bu davranış biyolojik sinaps çıkışına uygundur.

Nöronlar birbirine zayıfça bağlı (weakly coupled) olduğundan nörona sinaptik bağlantıdan gelen akımın yanında ek olarak dc giriş akımı da verilmelidir. Bunun nedeni zayıfça bağlantıda nöronlar birbirlerine bağlı olmadığında dahi vuru

üretebilmelilerdir; bu da AdExI&F modeli için sabit bir giriş akımı vermeyi gerektirmektedir.



Şekil 4.2 : Sinaptik akımının davranışı [2].

Bu çalışmada kısıtlayıcı ve uyarıcı (inhibitory ve excitatory) kuplajlara göre analiz yapılmıştır. Düzenli ateşleme ve düzenli patlamalı ateşleme örnekleri için hem kısıtlayıcı bağlantı hem de uyarıcı bağlantı sonuçları aşağıda görülmektedir.

4.1. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı

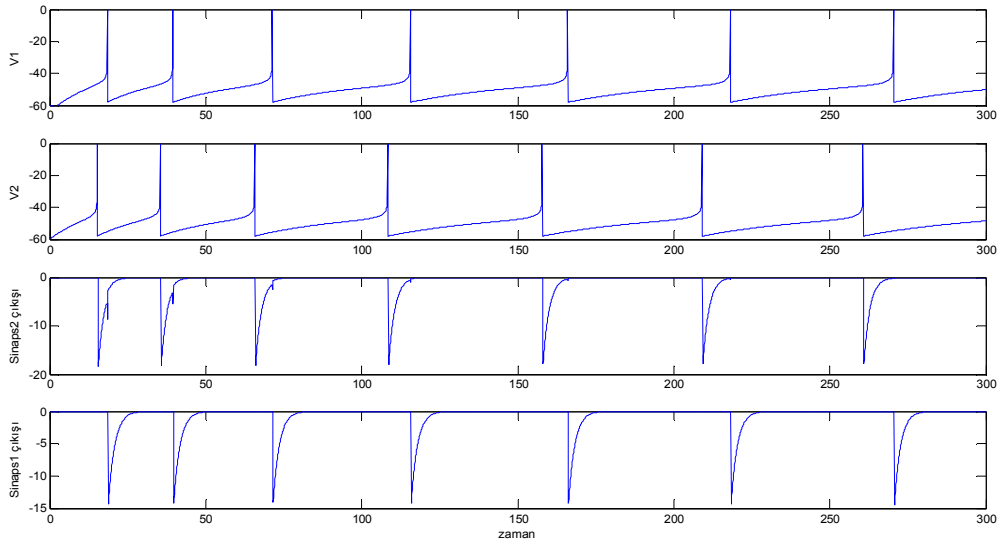
Kısıtlayıcı bağlı durumunda hem aynı fazlı davranış hem de zıt fazlı davranış elde edilebilmektedir [6]. Bu durum faz farkı için başlangıç koşulları değiştirilerek elde edilmektedir. Kısıtlayıcı bağlı durumda sinaptik akımı negatif olmaktadır.

AdExI&F modeli ve sinaptik bağlantı eşitlikleri için tanımlanan parametrelerin değerleri Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

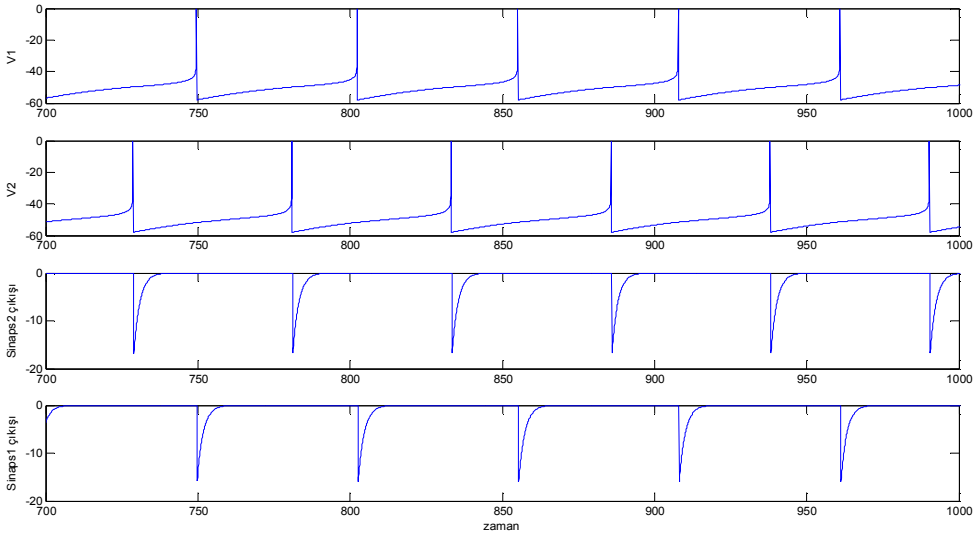
C (pF)	g_L (nS)	E_L (mV)	V_T (mV)	Δ_T (mV)	a (nS)	b (pA)	τ_w (ms)	V_r (mV)	Idc (pA)	g (nS)	Vrev (mV)	Vthres (mV)	Vslope (mV)	τs (ms)
200	10	-70	-50	2	10	0	30	-58	400	1	-85	-30	20	2

İlk olarak başlangıç koşulları farklı durumda zıt fazlı nöronların başlangıç durumundaki cevabı aşağıda görüldüğü gibidir.



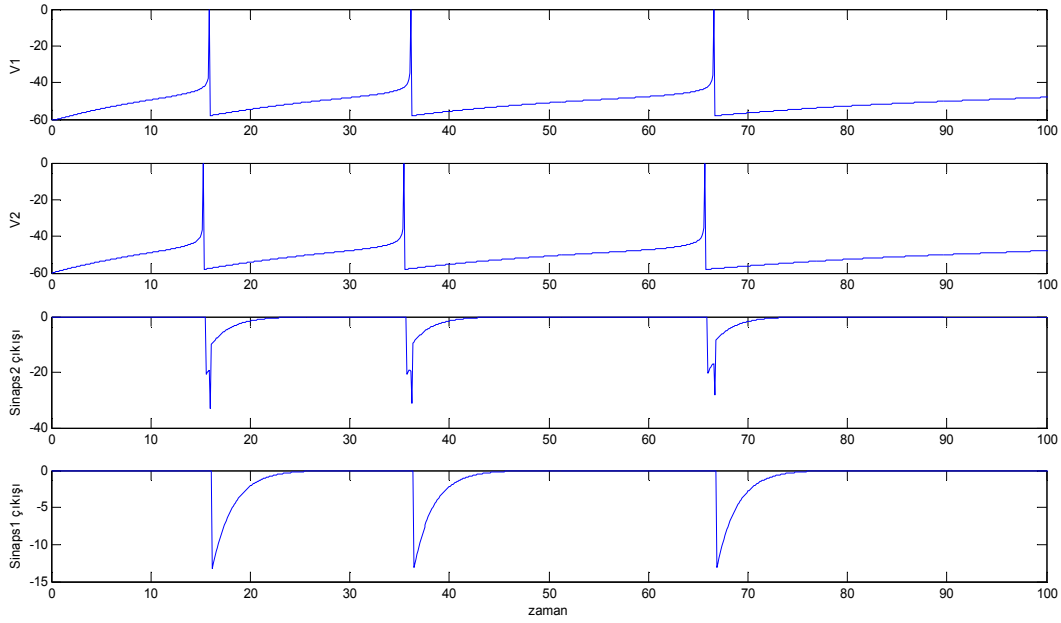
Şekil 4.3 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu **a)** İlk nöronun ateşleme örneği **b)** İkinci nöronun ateşleme örneği **c)** İlk nöronun sinaptik akımı **d)** İkinci nöronun sinaptik akımı.

Sinaptik bağlantılarda başlangıç durumunun etkisinin geçip nöron davranışının tam olarak gözlenmesi için benzetimin daha uzun koşturulması gerekir**.** Belli bir zaman geçtikten sonra gözlemlenen cevap ise Şekil 4.4'te görülmektedir.

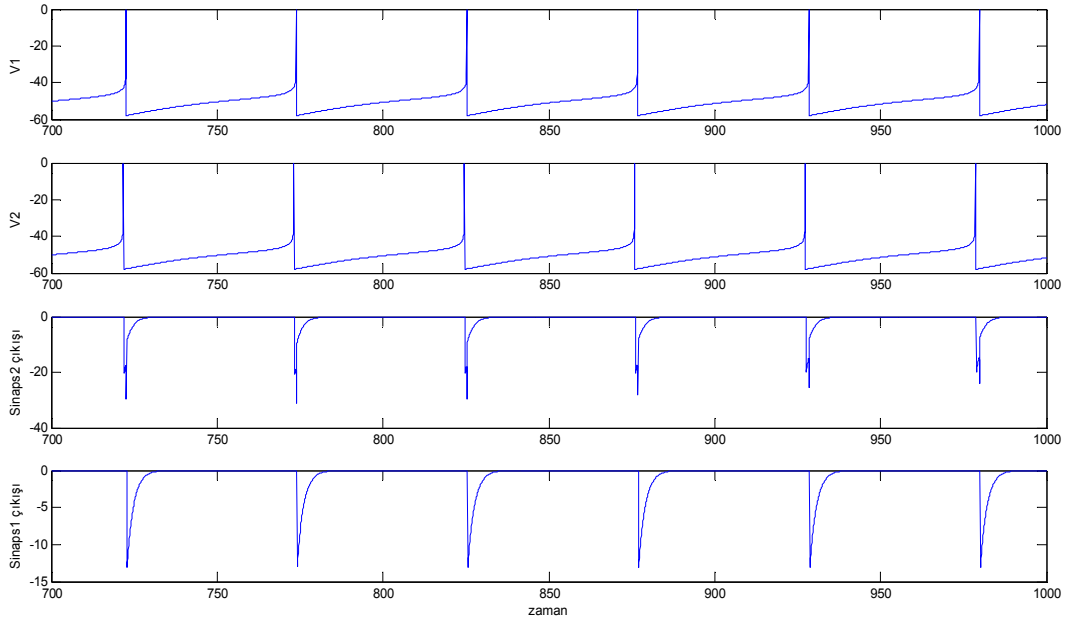


Şekil 4.4 : Belli bir zaman sonra kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı.

Başlangıç durumları eşit olduğu durumda elde edilen aynı faz davranışı aşağıda görülmektedir:

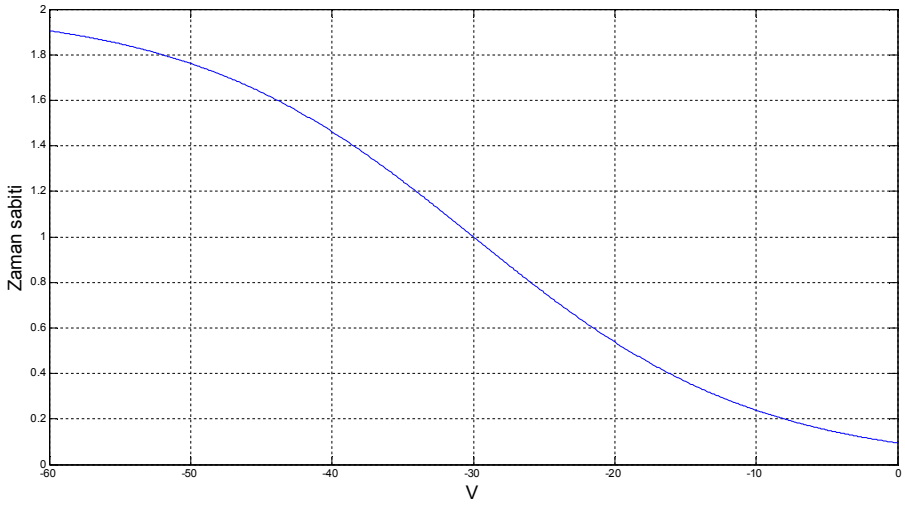


Şekil 4.5 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının aynı fazlı düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu.

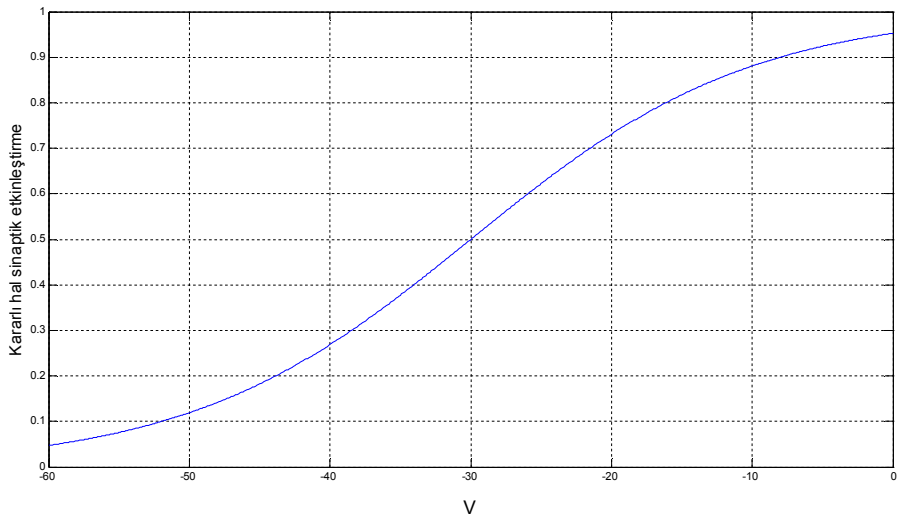


Şekil 4.6 : Belli bir zaman sonra kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının aynı fazlı düzenli ateşleme davranışı.

Ayrıca nöronun kararlı hal sinaptik davranışı ve zaman sabiti grafikleri de aşağıda görüldüğü gibidir. Kararlı hal sinaptik fonksiyonun davranışı ve zaman sabiti davranışı gerilime bağlı olarak değişmekte sigmoidal davranış göstermektedir.



Şekil 4.7 : Zaman sabiti davranışı.



Şekil 4.8 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu.

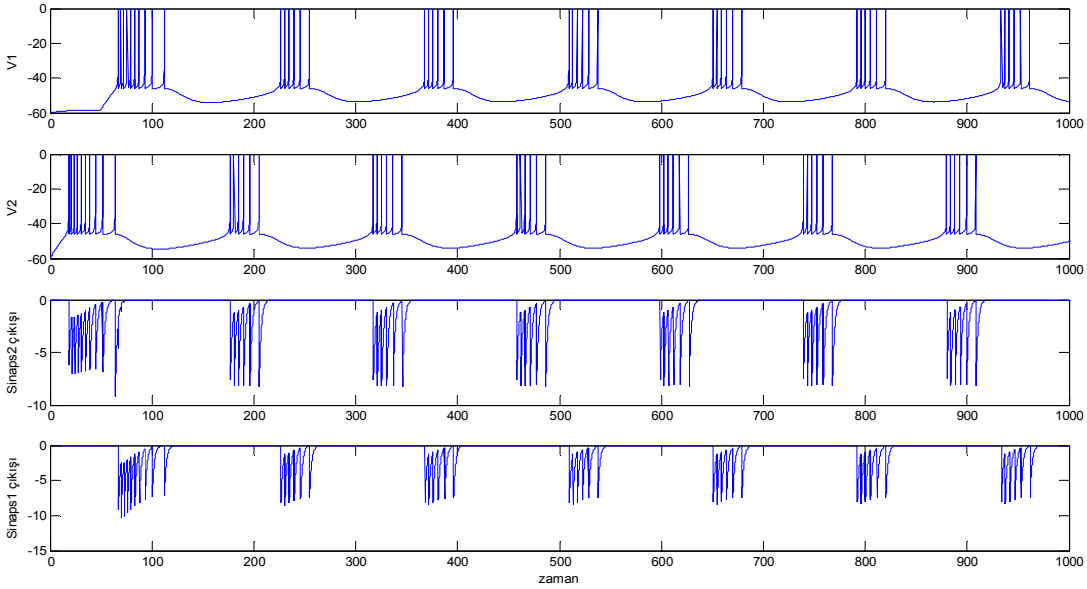
4.2. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı

AdExI&F modeli ve sinaptik bağlantı eşitlikleri için tanımlanan parametrelerin değerleri Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

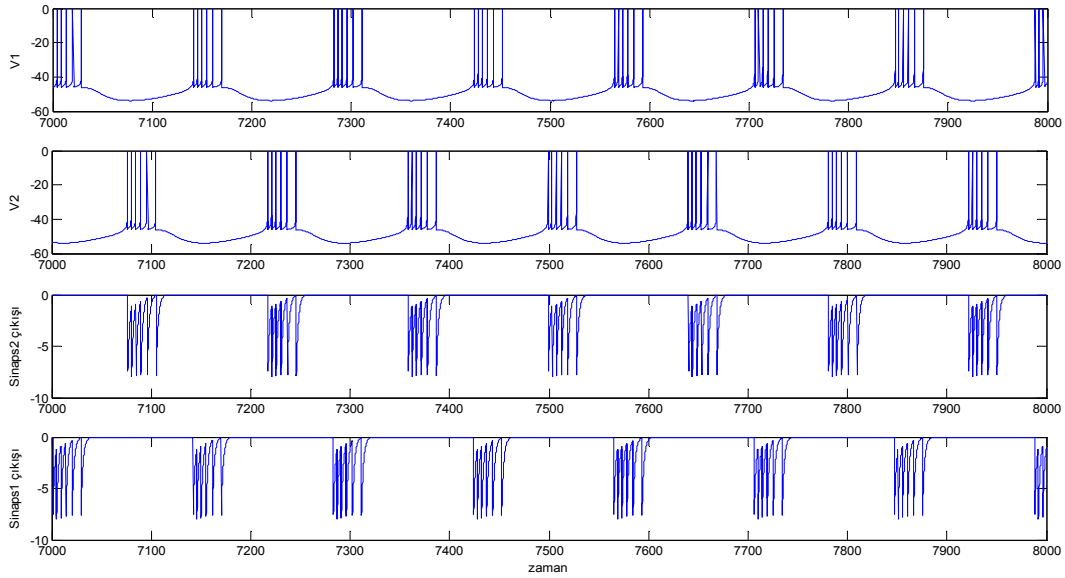
C (pF)	g_L (nS)	E_L (mV)	V_T (mV)	Δ_T (mV)	a (nS)	b (pA)	τ_w (ms)	V_r (mV)	Idc (pA)	g (nS)	Vrev (mV)	Vthres (mV)	Vslope (mV)	τs (ms)
200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210	0.5	-85	-30	20	2

Başlangıç koşulları farklı olduğunda elde edilen zıt fazlı davranışı Şekil 4.9'da görülmektedir.



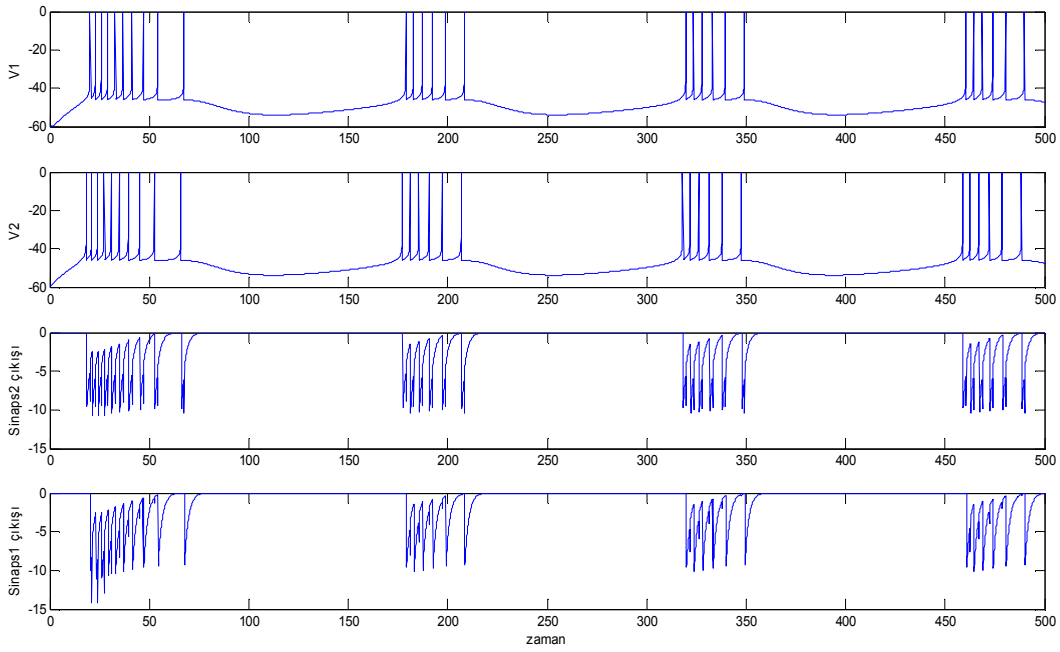
Şekil 4.9 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının zıt fazlı düzenli patlamalı davranışı başlangıç durumu **a)** İlk nöronun ateşleme örneği **b)** İkinci nöronun ateşleme örneği **c)** İlk nöronun sinaptik akımı **d)** İkinci nöronun sinaptik akımı.

Belli bir zaman geçtikten sonra gözlemlenen durum ise Şekil 4.10'da görülmektedir.

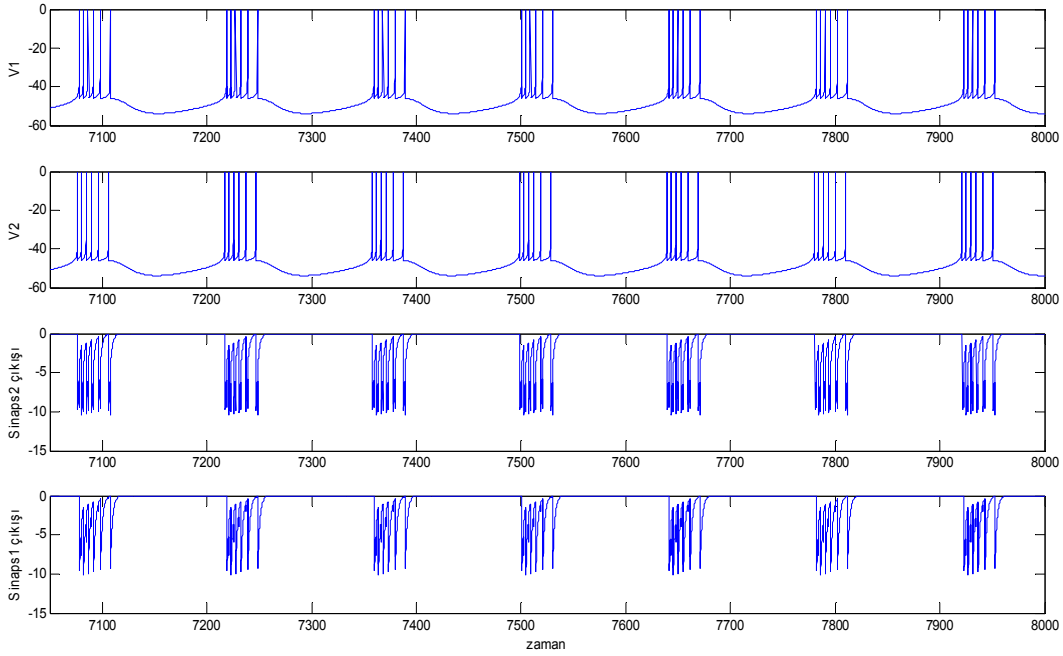


Şekil 4.10 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının belli bir zaman geçtikten sonra zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı.

Başlangıç koşulları aynı olduğunda elde edilen aynı faz davranışı ise aşağıda görülmektedir.

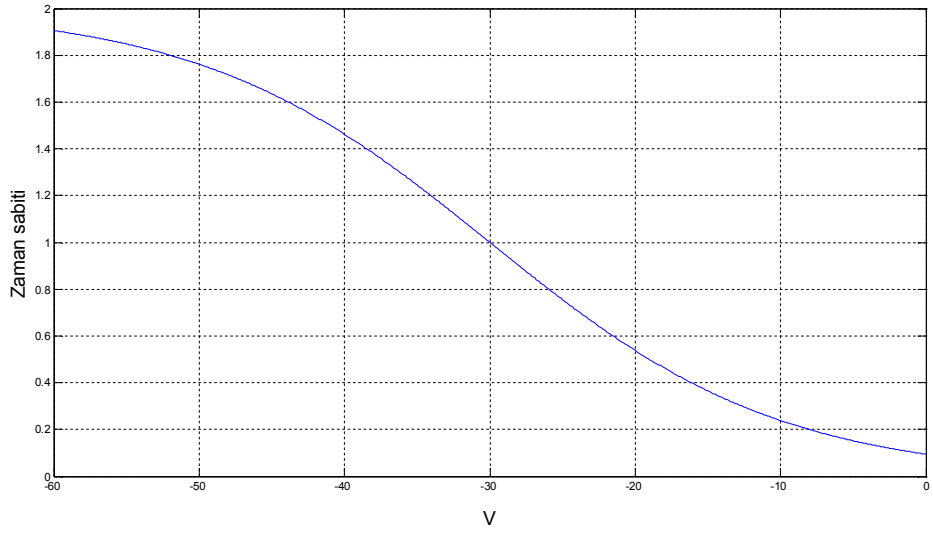


Şekil 4.11 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı başlangıç durumu.

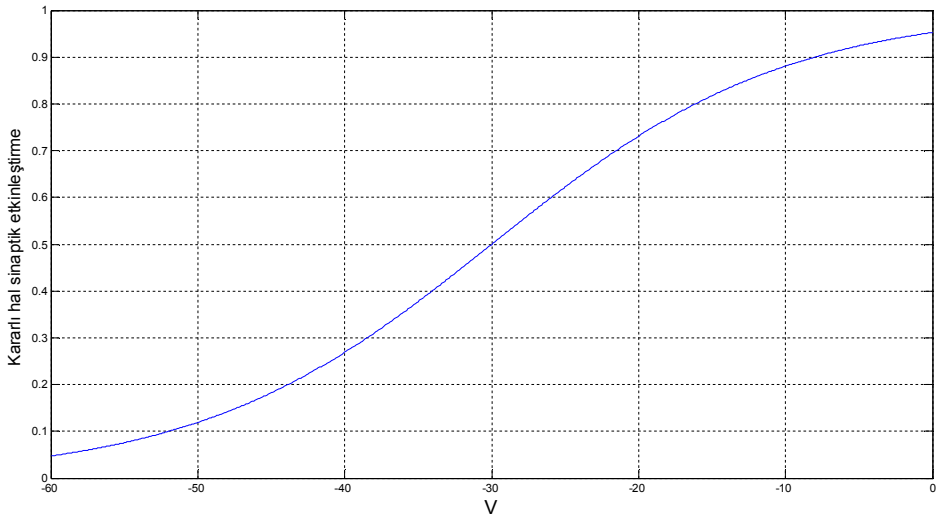


Şekil 4.12 : Kısıtlayıcı bağlı AdExI&F nöronlarının belli bir zaman geçtikten sonra aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı.

Ayrıca nöronun kararlı hal sinaptik davranışı ve zaman sabiti grafikleri de aşağıda görüldüğü gibidir.



Şekil 4.13 : Zaman sabiti davranışı.



Şekil 4.14 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu.

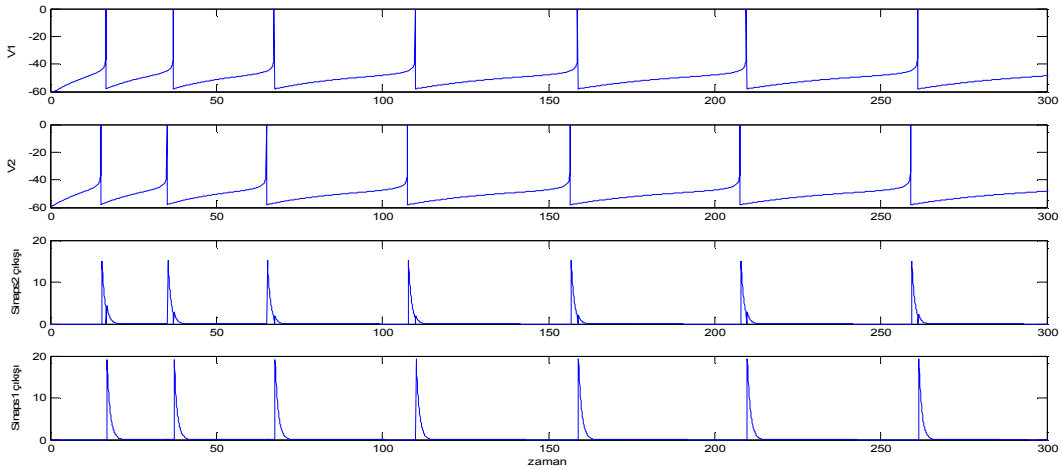
4.3. Uyarıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı

Uyarıcı bağlantı için sadece aynı fazda, eş zamanlı davranış görülmektedir [6]. Uyarıcı bağlı sinaptik bağlantıda sinaptik akımı pozitiftir. Başlangıç değerleri değiştirildiğinde dahi aynı faz davranışı gözlemlenmektedir. AdExI&F modeli ve sinaptik bağlantı eşitlikleri için tanımlanan parametrelerin değerleri Çizelge 4.3'te görülmektedir.

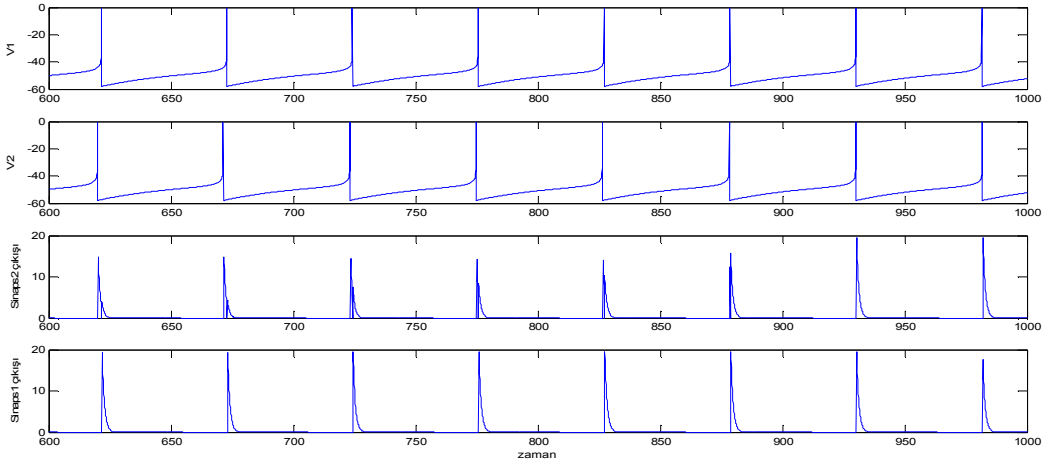
Çizelge 4.3 : Uyarıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

C (pF)	g_L (nS)	E_L (mV)	V_T (mV)	Δ_T (mV)	a (nS)	b (pA)	τ_w (ms)	V_r (mV)	Idc (pA)	g (nS)	Vrev (mV)	Vthres (mV)	Vslope (mV)	τs (ms)
200	10	-70	-50	2	10	0	30	-58	400	0.25	0	-25	15	1

Başlangıç koşulları eşit seçilerek elde edilen sonuçlar şu şekildedir.



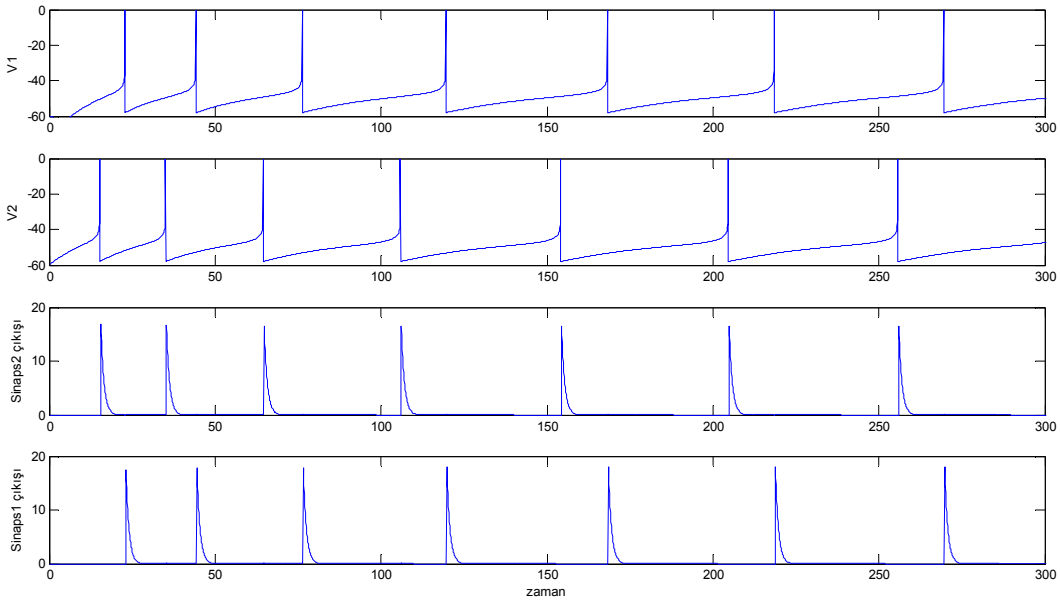
Şekil 4.15 : Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı başlangıç durumu **a)**İlk nöronun ateşleme örneği **b)**İkinci nöronun ateşleme örneği **c)**İlk nöronun sinaptik akımı **d)**İkinci nöronun sinaptik akımı.



Şekil 4.16 : Belli bir zaman sonra başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışı.

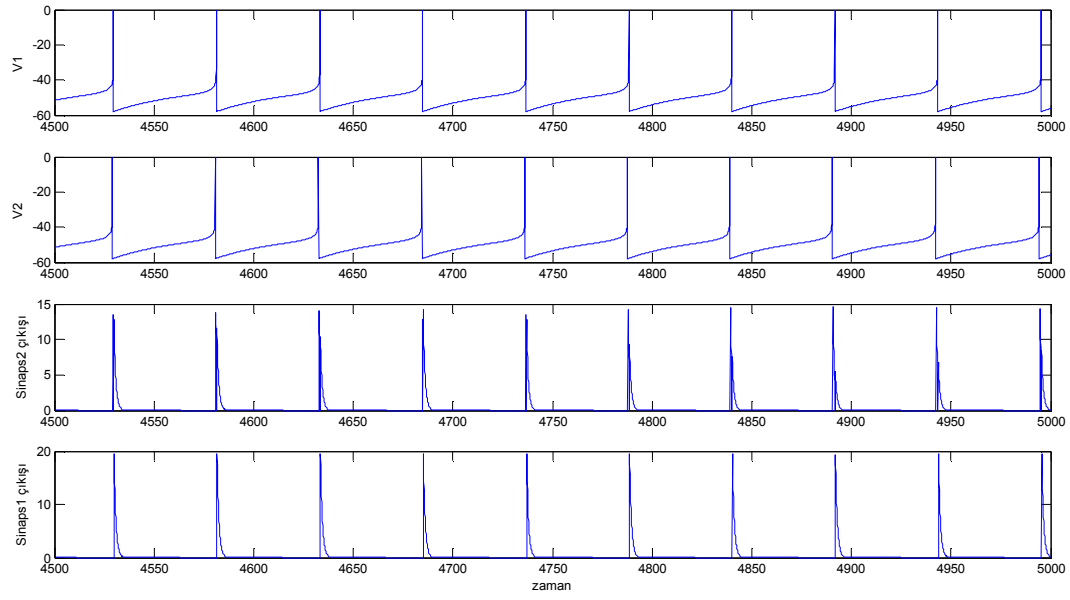
Sinaptik bağlantılarda başlangıç durumunun etkisinin geçip nöron davranışının tam olarak gözlenmesi için benzetimin daha uzun koşturulması gerekir**.** Buna göre sonuçlar Şekil 4.16'da görülmektedir.

Başlangıç durumları farklı olduğunda uyarıcı bağlantıda sonuçların değişmediği aşağıda görülmektedir.



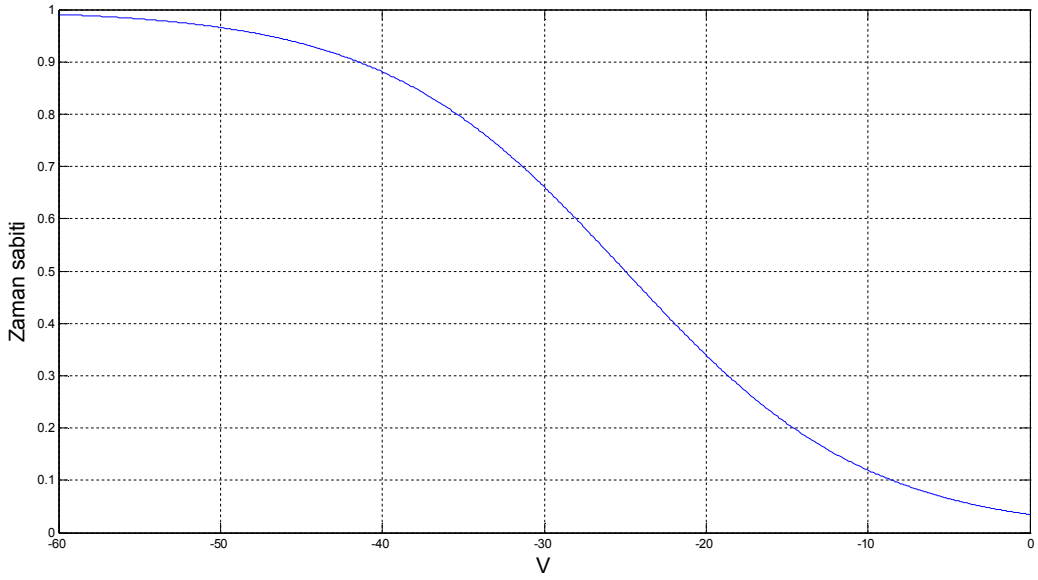
Şekil 4.17 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışının başlangıçtaki durumu.

Belli bir süre geçtikten sonra elde edilen davranışlar ise aşağıda görülmektedir.

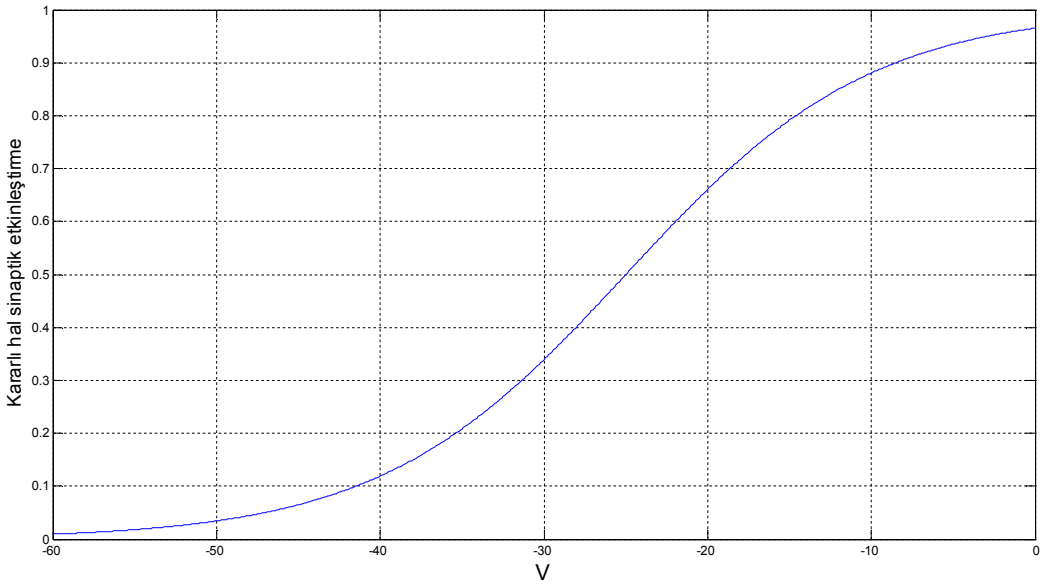


Şekil 4.18 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli ateşleme davranışının belli bir süre geçtikten sonraki durumu.

Ayrıca nöronun kararlı hal sinaptik davranışı ve zaman sabiti grafikleri de aşağıda görüldüğü gibidir.



Şekil 4.19 : Zaman sabiti davranışı.



Şekil 4.20 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu.

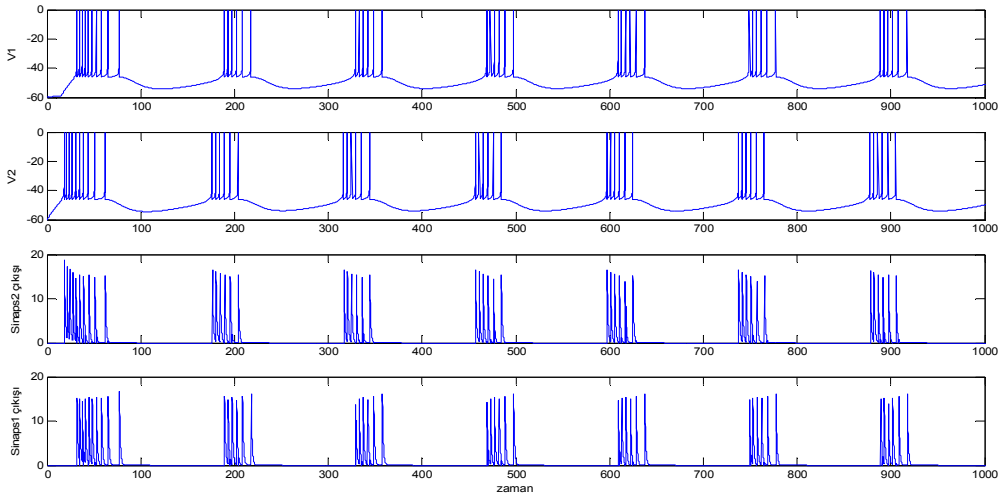
4.4. Uyarıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı

AdExI&F modeli ve sinaptik bağlantı eşitlikleri için tanımlanan parametrelerin değerleri Çizelge 4.4'te görülmektedir.

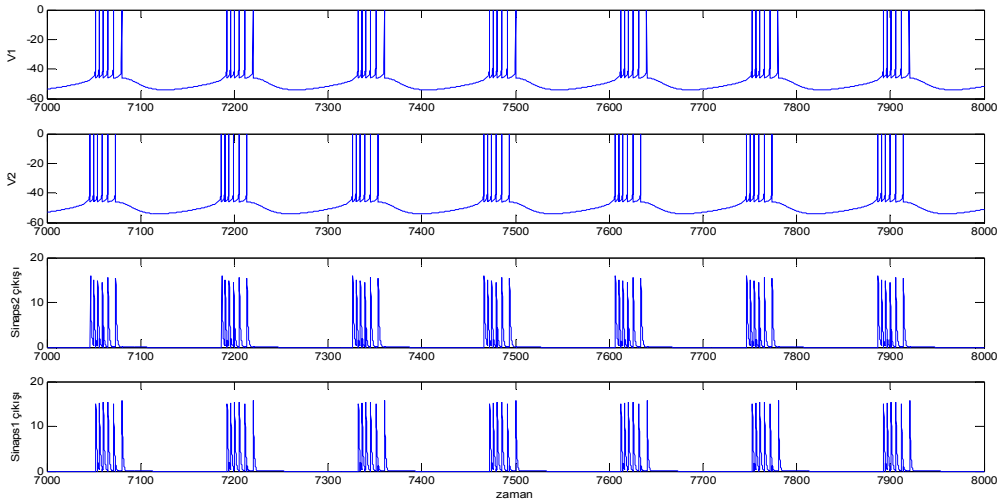
Çizelge 4.4 : Uyarıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

C (pF)	g_L (nS)	E_L (mV)	V_T (mV)	Δ_T (mV)	a (nS)	b (pA)	τ_w (ms)	V_r (mV)	Idc (pA)	g (nS)	Vrev (mV)	Vthres (mV)	Vslope (mV)	τs (ms)
200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210	0.25	0	-25	15	1

Başlangıç koşulları eşit seçilerek elde edilen sonuçlar Şekil 4.21'de görülmektedir.

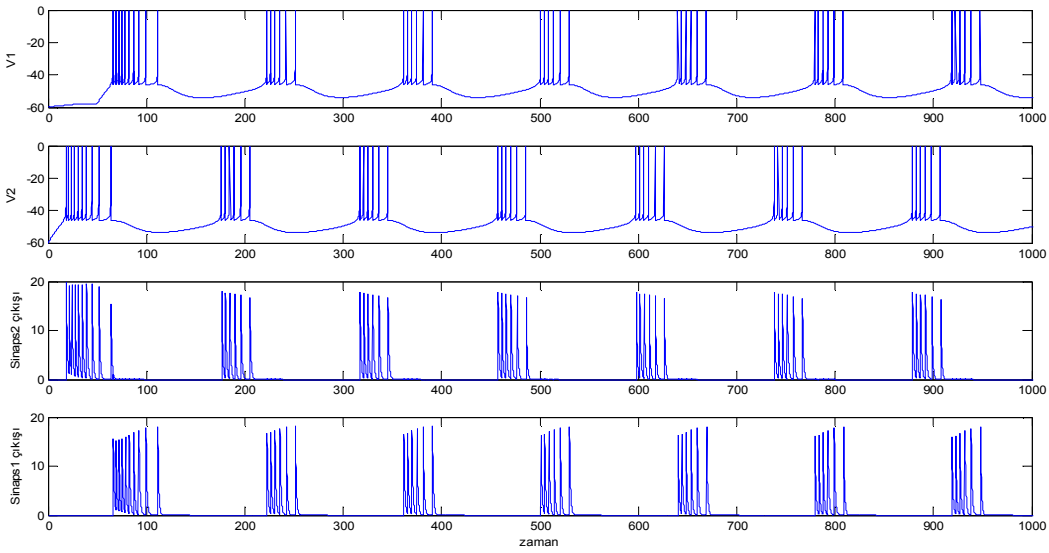


Şekil 4.21 : Başlangıç durumları aynı uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışı **a)** İlk nöronun ateşleme örneği **b)** İkinci nöronun ateşleme örneği **c)** İlk nöronun sinaptik akımı **d)** İkinci nöronun sinaptik akımı.



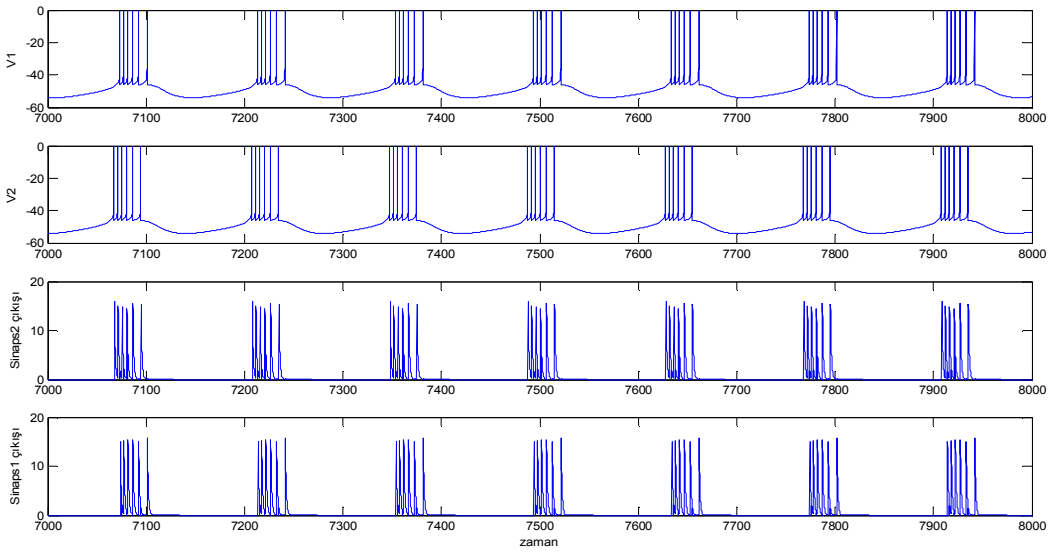
Şekil 4.22 : Uyarıcı bağlı başlangıç koşulları aynı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışının belli bir zaman geçtikten sonraki durumu.

Başlangıç koşulları farklı olduğunda elde edilen davranışlar ise aşağıda görülmektedir.



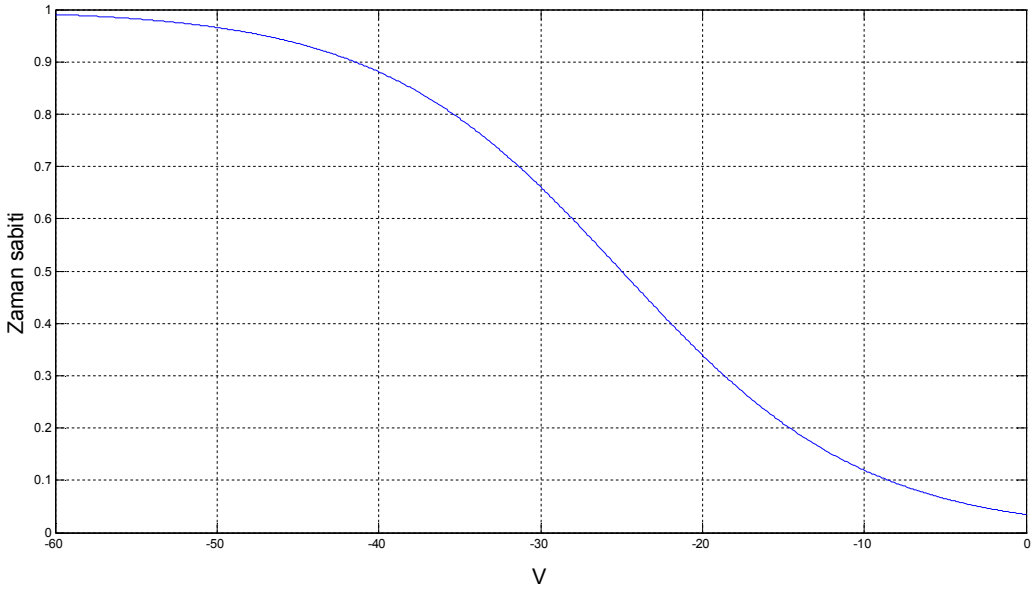
Şekil 4.23 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışının başlangıçtaki durumu.

Başlangıç durumunun düzgün olmadığı görülmektedir, ancak ilerleyen zamanlarda davranış düzelmekte ve eş zamanlı olmaktadır (Şekil 4.24).

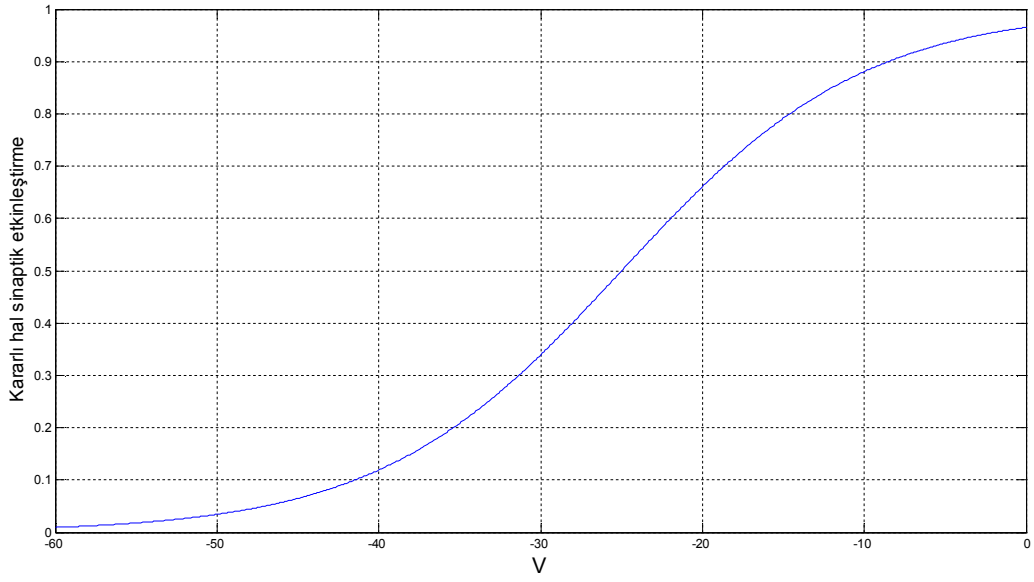


Şekil 4.24 : Başlangıç durumları farklı olan uyarıcı bağlı AdExI&F nöronlarının düzenli patlamalı ateşleme davranışının belli bir süre geçtikten sonraki durumu.

Ayrıca nöronun kararlı hal sinaptik davranışı ve zaman sabiti grafikleri de aşağıda görüldüğü gibidir.



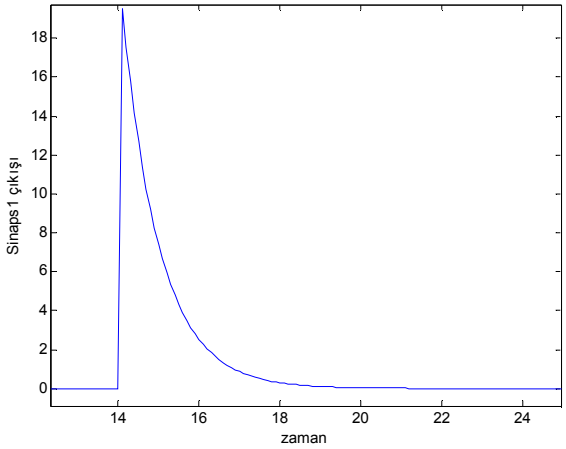
Şekil 4.25 : Zaman sabiti davranışı.



Şekil 4.26 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu.

Yukarıda görüldüğü gibi uyarıcı bağlı ve kısıtlayıcı bağlı aynı fazlı ya da zıt fazlı eş zamanlı davranışlar AdExI&F modeline yönelik kullanılan sinaptik bağlantı modeli ile elde edilebilmiştir. Ayrıca kararlı hal sinaptik etkinleştirme ve zaman sabiti davranışları Hodgkin-Huxley modelinde elde edilen davranışlar ile örtüşmektedir. Bu

da AdExI&F modeli ile elde edilen sonuçların gerçek sinir hücresi davranışlarına yakın olduğunu göstermektedir. Ayrıca sinaptik akımın davranışının da biyolojik sinaps çıkışına benzer olduğu görülmektedir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 : Sayısal analiz ile elde edilen sinaptik akım davranışı.

5. AdExI&F SİNİR HÜCRESİ MODELİNİN ve KULLANILAN SİNAPS MODELİNİN DEVRE BENZETİMİ

AdExI&F sinir hücresi modeli ve bu modele yönelik kullanılan sinaps modelinin devre benzetimi için düşük güçlü akım modlu devreler kullanılmıştır. AdExI&F modeli için tanımlı olan V zar gerilimi ve w uyum akımı hücreleri ve sinaps modeli için tanımlı olan S temel sinaptik hücresi benzetimi için birinci dereceden logaritmik tabanlı filtre kullanılmaktadır. Akım modlu çalışılmasının nedeni düşük güçte düşük akım seviyelerinde ve geniş zaman sabiti aralığında çalışabilmektir. Sinir hücresi bu sayede eşik-altı bölgede, biyolojik zaman ölçeklemesinde çalışabilmektedir.

Bu çalışmada nümerik olarak incelenen sinaptik bağlantı, uyarlamalı üstel tut&ateşle modeli için uyarıcı ve kısıtlayıcı bağlantı şeklinde uygulanmış, düzenli ve patlamalı ateşleme için aynı fazlı ve zıt fazlı davranışlar görülmüştür.

5.1. Düzenli Ateşleme Örneğinin Devre Benzetimi Gerçeklemesi

Devre benzetimi için pozitif değerlerde çalışılması gerekmektedir. Bunu sağlamak uygun ölçekleme ve ötelemelerin yapılması gerekmektedir. Öteleme ve ölçekleme işlemleri için gerekli olan parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 5.1 : Düzenli ateşleme davranışının parametre değerleri.

Düzenli Ateşleme	C(F)	g_L(S)	E_L(V)	V_T(V)	Δ_T(V)	a(S)	b(A)	τ_w(s)	V_r(V)	I(A)
	200	10	-70	-50	2	2	0	30	-58	500

Çizelge 5.1'deki değerlere göre elde edilen AdExI&F eşitlikleri şu şekildedir:

$$200\frac{dV}{dt} = -10(V+70) + 10 * 2 * \exp\left(\frac{V+50}{2}\right) + 500 - w \qquad \textbf{(5.1)}$$

$$30\frac{dw}{dt} = 2(V+70) - w\ . \qquad \textbf{(5.2)}$$

Burada *V* zar gerilimi (-60,0) arasında değişmektedir. Pozitif değerlerde çalışabilmek için V=V-60 ötelemesi yapılmaktadır. Buna göre;

$$200\frac{dV}{dt} = -10(V+10) + 10.2.\exp\left(\frac{V-10}{2}\right) + 500 - w \quad \textbf{(5.3)}$$

$$30\frac{dw}{dt} = 2(V+10) - w \quad \textbf{(5.4)}$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Gerçek nöron davranışına benzetmek için zaman ölçeklemesi yapılarak ms'ler mertebesine eşitlikler ölçeklendiğinde;

$$200 * 10^{-3}\frac{dV}{dt} = -10(V+10) + 10.2.\exp\left(\frac{V-10}{2}\right) + 500 - w \quad \textbf{(5.5)}$$

$$30 * 10^{-3}\frac{dw}{dt} = 2(V+10) - w \quad \textbf{(5.6)}$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Son olarak nA mertebelerinde çalışabilmek için V=V*10^{-10}, w=w*10^{-10}, I=I*10^{-10} genlik ölçeklemesi yapıldığında;

$$20p\frac{dV}{dt} = -1n(V) + 0.1n * (2n * \exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right) + 38 - w) \quad \textbf{(5.7)}$$

$$3p\frac{dw}{dt} = 0.2n(V) - 0.1n(w) \quad \textbf{(5.8)}$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Bu denklemde zaman sabiti değişkeni ve boyutsuz değişkenler hariç hepsi akımdır. Ölçeklemeler sonucunda (0,60) arasında değişen V parametresi artık (0,6) nA aralığında değişmektedir.

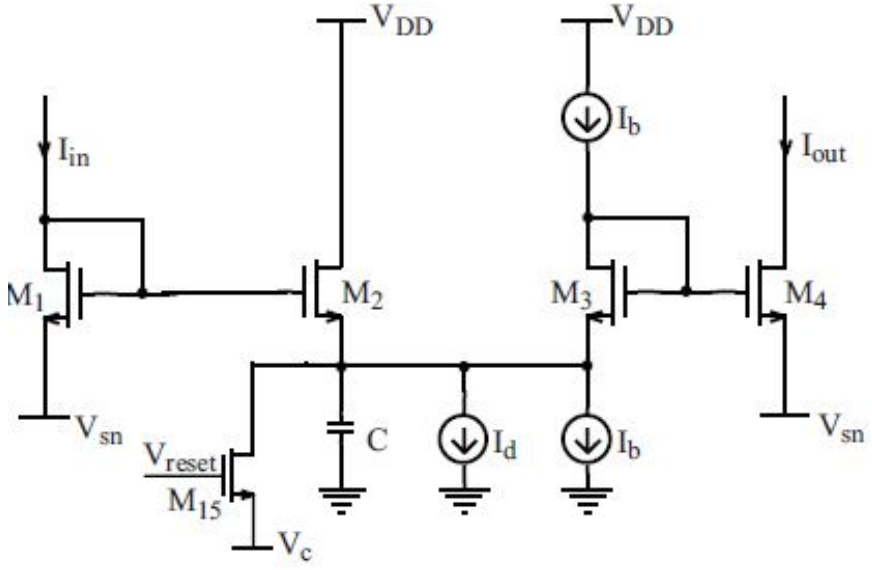
Son olarak elde edilen denklemlerin benzetimi için birinci dereceden logaritmik tabanlı devre kullanılmaktadır. Logaritmik tabanlı ya da geçit-kaynak gerilimleri çevirimi filtreler alçak geçiren filtre tasarımı için önemli alternatiflerdir. Önerilen devre oldukça fazla düşük gürültü düzeyi sağlamaktadır. Bu devrede bütün transistörler eşik altı bölgesinde çalışmaktadır. Bu bölgenin dışına çıkılırsa transitör karakteristikleri üstelden karesel eşitliğe dönüşmektedir. Eşik altı transistorün I-V karakteristiği şu şekilde ifade edilmektedir:

$$I_{DS} = I_S\frac{w}{l}\exp\left(\alpha V_{GS}\right) \quad \textbf{(5.9)}$$

α parametresinin burada yaklaşık değeri 40 olarak alınmıştır. Üstel olarak ifade edilen I-V karakteristiğinin açılımı ile logaritmik tabanlı filtrenin eşitliği şu şekilde ifade edilmektedir:

$$C\dot{I_{out}} = -I_{out}(\alpha I_D) + -I_{in}(\alpha I_B)\ . \qquad \textbf{(5.10)}$$

Burada logaritmik tabanlı integratör V hücresi Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1 : Logaritmik tabanlı integratör V hücresi [9].

(5.7) ve **(5.10)** eşitlikleri kullanarak I_{BV} ve I_{DV} akımları ve C kapasitesinin değerleri elde edilebilmektedir. İki denklemin eşitliğinden C=20pF olmaktadır. 1n=αI_{DV} eşitliğinden ve α=40 olduğundan, I_{DV}=25pA olarak bulunmaktadır. Ayrıca 0.1n=αI_{BV} eşitliğinden I_{BV}=2.5pA olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda bu eşitliklere bakılarak I_{in} girişinin I_{dc} sabit akımı, I_{exp} üstel akımı ve I_w akımı olacağı görülmektedir.

V_c değeri ise;

$$I_V = I_{BV}\, e^{\alpha(V_c - V_{sn})} \qquad \textbf{(5.11)}$$

kullanılarak hesaplanır.

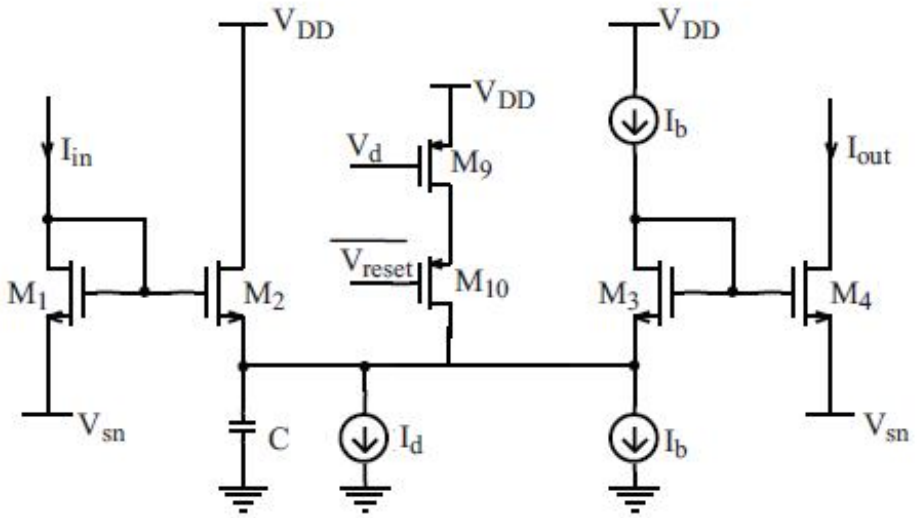
$$\frac{I_{peak} - I_{V_r}}{10^{10}} = I_{BV} e^{\alpha(V_r - V_{sn})} \qquad \textbf{(5.12)}$$

Burada V_{sn}= 400mV devrenin eşik-altı bölgesinde daha düzgün çalışabilmesi için yapılan gerilim ötelemesidir. I_{peak}=6nA akım modlu devrede zar geriliminin maksimum değerinin karşılığı, I_{Vr}=4.6nA akım modlu devrede reset geriliminin karşılığı olmaktadır. Bu değerler yerine yazıldığında,

$$\frac{60-46}{10^{10}} = 2.5pA e^{\alpha(V_c - 0.4)} \qquad \textbf{(5.13)}$$

eşitliği sonucunda yaklaşık olarak V_c≈500mV olarak elde edilir.

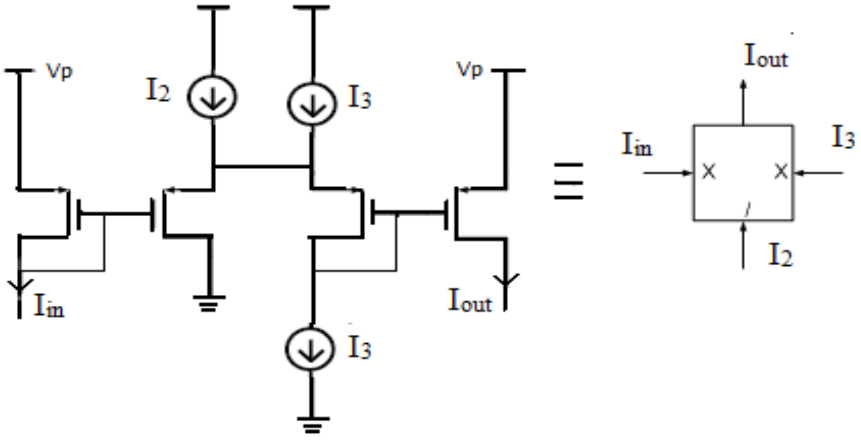
Logaritmik tabanlı integratör w hücresi ise Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Logaritmik tabanlı integratör w hücresi [9].

(5.8) ve **(5.10)** eşitlikleri kullanarak I_{BV} ve I_{DV} akımları ve C kapasitesinin değerleri elde edilebilmektedir. İki denklemin eşitliğinden C=3pF olmaktadır. $0.1n=\alpha I_{DV}$ eşitliğinden ve α=40 olduğundan, I_{DV}=2.5pA olarak bulunmaktadır. Ayrıca $0.2n=\alpha I_{BV}$ eşitliğinden I_{BV}=5pA olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda bu eşitliklere bakılarak I_{in} girişinin I_V akımı olacağı görülmektedir. V_d değeri ise b=0 olduğundan 1.65V olarak alınmaktadır.

e^x üstel akım devresi için kullanılan hücre ise Şekil 5.3'te görülmektedir.



Şekil 5.3 : e^x üstel akım devresinin elde edilmesi için gereken akım modlu çarpıcı devresi.

Burada $2n * \exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right)$ denklemi devre uygulamasına uygun hale getirmek için,

$$e^x \cong \left(1 + \frac{24x}{12+(x-6)^2}\right)^2 \quad \textbf{(5.14)}$$

dönüşümü gerçekleştirilir. Bu dönüşüm gerçekleştirilerek e^x üstel devre hatası %10 kadar olmaktadır.

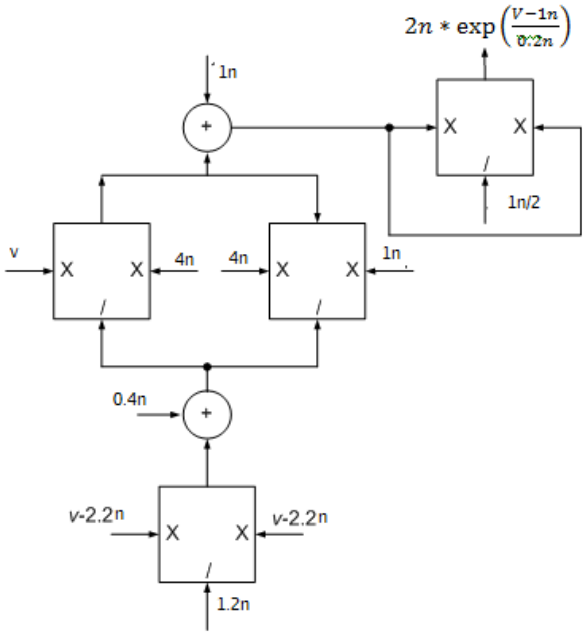
x yerine $\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right)$ eşitliği yerine konulursa;

$$\exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right) \cong \left(1n + \frac{4n(V-1n)}{0.4n+\frac{(V-2.2n)^2}{1.2n}}\right)^2 \quad \textbf{(5.15)}$$

olarak elde edilir. $2n * \exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right)$ denklemi ise

$$500p*\left(1n + \frac{4n(V-1n)}{0.4n+\frac{(V-2.2n)^2}{1.2n}}\right)^2 \quad \textbf{(5.16)}$$

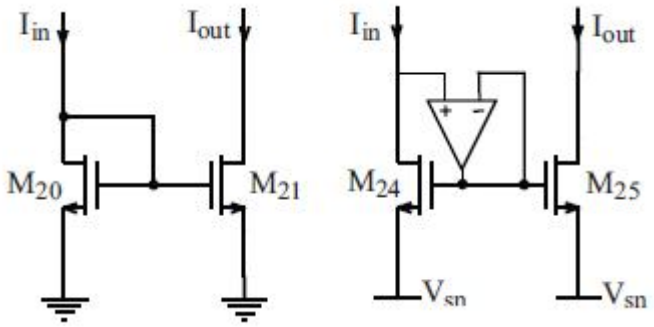
olarak elde edilmektedir. Bu eşitliğin blok diyagramı aşağıdaki gibi olmaktadır.



Şekil 5.4 : e^x üstel akım devresinin blok diyagramı.

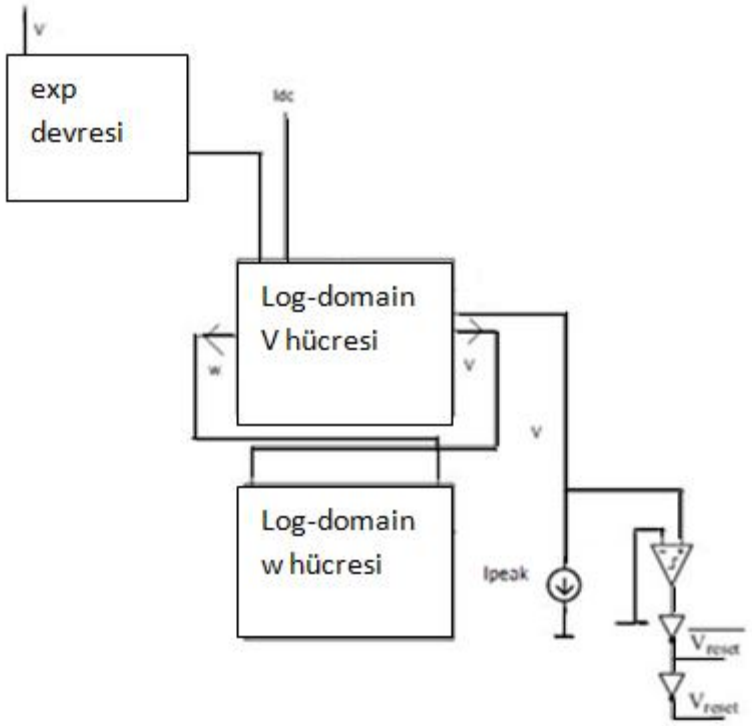
Oluşturulan devreler akım modlu olduğu için zar geriliminin maksimum seviyesi I_{peak} olarak belirlenen akım olmakta ve bu değere göre yapılan karşılaştırmanın bulunduğu devrede ise aktif diyot bağlantısı kullanılmaktadır. Akımları

aynalayabilmek için ise akım aynaları kullanılmış, devrelerde akımların ve gerilimlerin daha iyi yansıtılabilmesi kaskot yapı kullanılmıştır (Şekil 5.5).



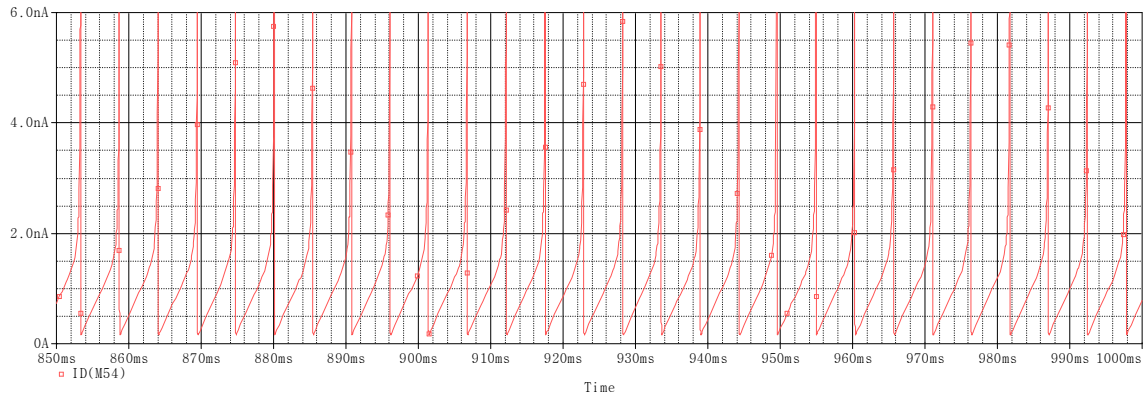
Şekil 5.5 : a) Akım aynası devresi **b)** Aktif diyot bağlı devre [9].

Devre benzetiminde 0.35µ teknolojisi kullanılmıştır. V_{dd}=1.65V olarak alınmış, $\frac{w}{L}$ oranı ise 1 olarak kabul edilerek her ikisi de 1µm olarak alınmıştır. Devrenin blok diyagramı Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6 : Tek bir nöron hücresinin devre benzetiminin blok diyagramı.

Böylece bir nöron için gerekli ölçeklemeler, ötelemeler yapılmasıyla, e^x ifadesinin %10 gibi bir hatayla devresinin gerçekleştirilmesi için dönüşümün yapılmasıyla ve bu devrelerin gerçekleştirilmesi için bahsedilen yapıların birleştirilmesiyle elde edilen benzetim sonucu Şekil 5.7'de görülmektedir.



Şekil 5.7 : Düzenli ateşleme örneğinin devre benzetim sonucu.

Düzenli ateşleme örneğinin elde edilen devre benzetim cevabının, sayısal analizle elde edilen vuru dizisi cevabıyla uyumlu olduğu görülmektedir. Frekans ise yaklaşık olarak 160Hz'dir.

5.2. Düzenli Patlamalı Ateşleme Örneğinin Devre Benzetimi Gerçeklemesi

Devre benzetimi için pozitif değerlerde çalışılması gerektiğinden bahsedilmişti. Bu nedenle uygun ölçekleme ve ötelemelerin yapılması gerekmektedir. Bunun için gerekli olan parametre değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 5.2 : Düzenli patlamalı ateşleme davranışının parametre değerleri.

Düzenli Patlamalı	C(F)	g_L(S)	E_L(V)	V_T(V)	Δ_T(V)	a(S)	b(A)	τ_w(s)	V_r(V)	I(A)
	200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210

Çizelge 5.2'deki değerlere göre elde edilen AdExI&F eşitlikleri şu şekildedir:

$$200\frac{dV}{dt} = -10(V+58) + 10 * 2 * \exp\left(\frac{V+50}{2}\right) + 210 - w \qquad \textbf{(5.17)}$$

$$120\frac{dw}{dt} = 2(V+58) - w\,. \qquad \textbf{(5.18)}$$

Burada V zar gerilimi (-60,0) arasında değişmektedir. Pozitif değerlerde çalışabilmek için V=V-60 ötelemesi yapılmaktadır. Buna göre;

$$200\frac{dV}{dt} = -10(V-2) + 10.2.\exp\left(\frac{V-10}{2}\right) + 210 - w \qquad \textbf{(5.19)}$$

$$120\frac{dw}{dt} = 2(V-2) - w \qquad \textbf{(5.20)}$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Gerçek sinir hücresi davranışına benzetmek için zaman ölçeklemesi yapılarak ms'ler mertebesine eşitlikler ölçeklendiğinde;

$$200 * 10^{-3} \frac{dV}{dt} = -10(V-2) + 10.2.\exp\left(\frac{V-10}{2}\right) + 210 - w \quad \textbf{(5.21)}$$

$$120 * 10^{-3} \frac{dw}{dt} = 2(V-2) - w \quad \textbf{(5.22)}$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Son olarak nA mertebelerinde çalışabilmek için $V=V*10^{-10}$, $w=w*10^{-10}$, $I=I*10^{-10}$ genlik ölçeklemesi yapıldığında;

$$20p \frac{dV}{dt} = -1n(V) + 1n * (2n * \exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right) + 23.4 - w) \quad \textbf{(5.23)}$$

$$12p \frac{dw}{dt} = 0.2n(V) - 0.1n(w) \quad \textbf{(5.24)}$$

eşitlikleri elde edilmektedir.

Bu denklemde zaman sabit değişkeni ve boyutsuz değişkenler hariç hepsi akımdır. Ölçeklemeler sonucunda (0,60) arasında değişen V parametresi artık (0,6) nA aralığında değişmektedir.

(5.23) ve **(5.10)** eşitlikleri kullanarak I_{BV} ve I_{DV} akımları ve C kapasitesinin değerleri elde edilebilmektedir. İki denklemin eşitliğinden C=20pF olmaktadır. $1n=\alpha I_{DV}$ eşitliğinden ve $\alpha=40$ olduğundan, I_{DV}=25pA olarak bulunmaktadır. Ayrıca $0.1n=\alpha I_{BV}$ eşitliğinden I_{BV}=2.5pA olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda bu eşitliklere bakılarak I_{in} girişinin I_{dc} sabit akımı, I_{exp} üstel akımı ve I_w akımı olacağı görülmektedir.

V_c değeri ise;

$$I_V = I_{BV}\, e^{\alpha(V_c - V_{sn})} \quad \textbf{(5.25)}$$

kullanılarak hesaplanır.

$$\frac{I_{peak} - I_{Vr}}{10^{10}} = I_{BV} e^{\alpha(V_r - V_{sn})} \quad \textbf{(5.26)}$$

Burada V_{sn}= 400mV devrenin eşik-altı bölgesinde daha düzgün çalışabilmesi için yapılan gerilim ötelemesidir. I_{peak}=6nA akım modlu devrede zar geriliminin maksimum değerinin karşılığı, I_{Vr}=4.6nA akım modlu devrede reset geriliminin karşılığı olmaktadır. Bu değerler yerine yazıldığında,

$$\frac{60-46}{10^{10}} = 2.5pA e^{\alpha(V_c - 0.4)} \quad \textbf{(5.27)}$$

eşitliği sonucunda V_c=558mV olarak elde edilir.

(5.24) ve **(5.10)** eşitlikleri kullanarak I_{BV} ve I_{DV} akımları ve C kapasitesinin değerleri elde edilebilmektedir. İki denklemin eşitliğinden C=12pF olmaktadır. 0.1n=αI_{DV} eşitliğinden ve α=40 olduğundan, I_{DV}=2.5pA olarak bulunmaktadır. Ayrıca 0.2n=αI_{BV} eşitliğinden I_{BV}=5pA olarak bulunmaktadır. Aynı zamanda bu eşitliklere bakılarak I_{in} girişinin I_V akımı olacağı görülmektedir. V_d değeri ise b=30 olduğundan 978mV alınması yeterlidir.

Burada $2n * \exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right)$ denklemi devre uygulamasına uygun hale getirmek için,

$$e^x \cong \left(1 + \frac{24x}{12+(x-6)^2}\right)^2 \quad \textbf{(5.28)}$$

dönüşümü gerçekleştirilir.

x yerine $\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right)$ eşitliği yerine konulursa;

$$\exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right) \cong \left(1n + \frac{4n(V-1n)}{0.4n+\frac{(V-2.2n)^2}{1.2n}}\right)^2 \quad \textbf{(5.29)}$$

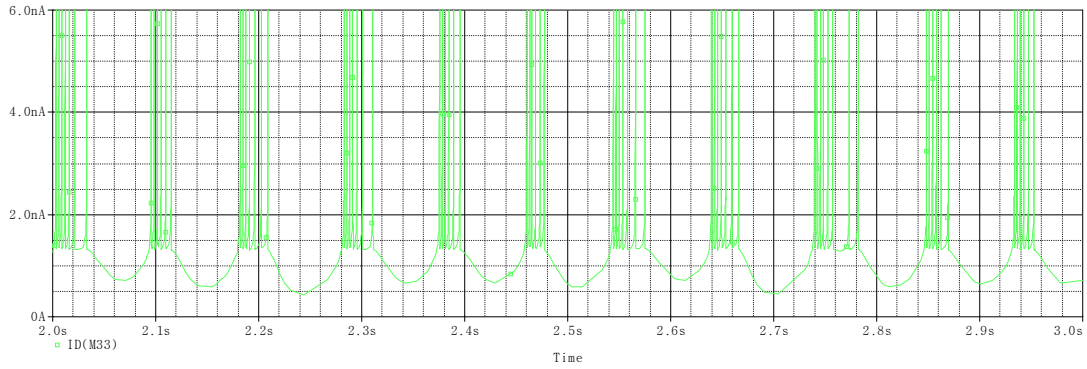
olarak elde edilir. $2n * \exp\left(\frac{V-1n}{0.2n}\right)$ denklemi ise

$$500p*\left(1n + \frac{4n(V-1n)}{0.4n+\frac{(V-2.2n)^2}{1.2n}}\right)^2 \quad \textbf{(5.30)}$$

olarak elde edilmektedir. Bu eşitliğin blok diyagramı Şekil 5.4'de görüldüğü gibidir.

Kullanılan logaritmik tabanlı integratör V hücresi, w hücresi ve eksponansiyel devresi ve blok diyagramı Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te verildiği gibidir. Ayrıca devrenin blok diyagramı da Şekil 5.6'da verilen blok diyagramla aynıdır. Karşılaştırma devresinde kullanılan devreler Şekil 5.5'te gösterilen devrelerle aynıdır. Devre benzetiminde 0.35µ teknolojisi kullanılmıştır. V_{dd}=1.65V olarak alınmış, $\frac{w}{L}$ oranı ise 1 olarak kabul edilerek her ikisi de 1µm olarak alınmıştır.

Böylece bir nöron için gerekli ölçeklemeler, ötelemeler yapılmasıyla, e^x ifadesinin %10 gibi bir hatayla devresinin gerçekleştirilmesi için dönüşümün yapılmasıyla ve bu devrelerin gerçekleştirilmesi için bahsedilen yapıların birleştirilmesiyle elde edilen benzetim sonucu aşağıda görülmektedir.



Şekil 5.8 : Düzenli patlamalı ateşleme örneğinin devre benzetim sonucu.

Düzenli ateşleme örneğinin elde edilen devre benzetim cevabının, sayısal analizle elde edilen vuru dizisi cevabıyla uyumlu olduğu görülmektedir.

5.3. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi

Çizelge 5.3'te kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri görülmektedir. Bu değerler önceden eşitlikleri verilen AdExI&F modeli ve sinaps modelinde yerlerine konularak ve gerekli öteleme ve ölçekleme işlemlerinden sonra devre benzetimi yapılacaktır.

Çizelge 5.3 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

C (F)	g_L (S)	E_L (V)	V_T (V)	Δ_T (V)	a (S)	b (A)	τ_w (s)	V_r (V)	Idc (A)	g (S)	Vrev (V)	Vthres (V)	Vslope (V)	τs (s)
200	10	-70	-50	2	10	0	30	-58	400	1	-85	-30	20	2

Sinaptik bağlantıda bulunan nöron hücrelerinin devresi, tek bir nöron devre benzetimi başlığı altında bahsettiğimiz gibi gerçeklenecektir. Ancak burada girişe verilen dc akımı ötelemelerle birlikte yaklaşık olarak I_{dc}≈20nA olarak kabul edilecektir. Bu devrelere ek olarak ise sinaps modelinin devresi gelecektir.

Biyolojik kimyasal sinaps bağlantı ise aşağıdaki gibi modellendiği daha önceden bahsedilmiştir.

$$I = gS(t)(V_{rev} - V_{post}) \quad \textbf{(5.31)}$$

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{S_\infty - S(t)}{\tau_s(1-S_\infty)} \quad \textbf{(5.32)}$$

V_{pre}>V_{thres} için,

$$S_\infty = \tanh\left(\frac{V_{pre}-V_{thres}}{V_{slope}}\right) \quad \textbf{(5.33)}$$

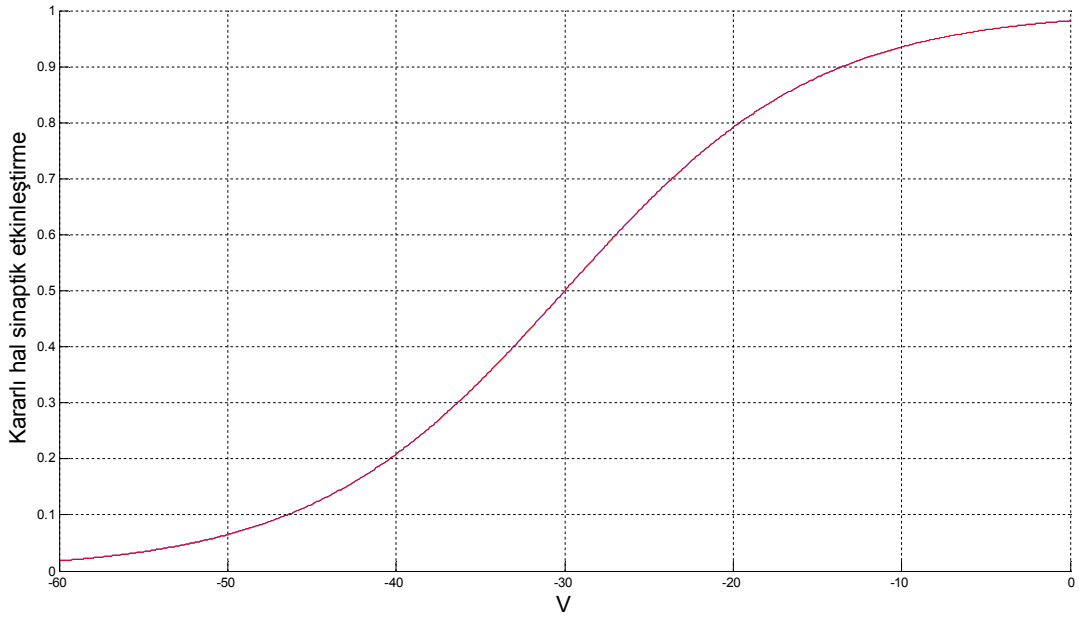
diğer durumlarda, S_∞=0 olmaktadır. Buna göre kararlı hal sinaptik etkinleştirme hiperbolik tanjant fonksiyonu 0 ile 1 arasında değişmektedir.

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^x} \quad \textbf{(5.30)}$$

eşitliği uyarınca,

$$\tanh(x) = \frac{e^{2x}}{e^{2x}+1} - \frac{1}{e^{2x}+1} \quad \textbf{(5.34)}$$

olmaktadır. $S_\infty = \frac{1}{e^{-2x}+1}$ eşitliği fonksiyonun istenilen aralıkta olmasını sağlamaktadır. Kararlı hal etkinleştirme fonksiyonun üstel ifadeyle verilen eşitliğin sigmoidal davranışı Şekil 5.9'da görülmektedir. Buna göre elde edilen fonksiyon cevabı gerçek sinir hücresi davranışına birebir uymaktadır.



Şekil 5.9 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu.

$S_\infty = \frac{1}{e^{-2x}+1}$ eşitliği uyarınca ve $x = \frac{V_{pre}-V_{thres}}{V_{slope}}$ ifadesi yerine yazılarak,

$$S_\infty = \frac{1}{e^{-2\left(\frac{V_{pre}-V_{thres}}{V_{slope}}\right)}+1} \quad \textbf{(5.35)}$$

olarak elde edilir.

Çizelge 5.3'teki değerler dikkate alınarak,

$$S_{\infty}=\frac{1}{e^{-2(\frac{V+30}{20})}+1} \tag{5.36}$$

olarak elde edilir. Öteleme ve ölçekleme sonucunda elde edilen son eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$S_{\infty}=\frac{1n}{1n*e^{(\frac{-V-3n}{1n})}+1n} \quad . \tag{5.37}$$

Burada 1n*exp $\left(\frac{-V-3n}{1n}\right)$ denklemi devre uygulamasına uygun hale getirmek için,

$$e^{x} \cong \left(1+\frac{24x}{12+(x-6)^2}\right)^2 \tag{5.38}$$

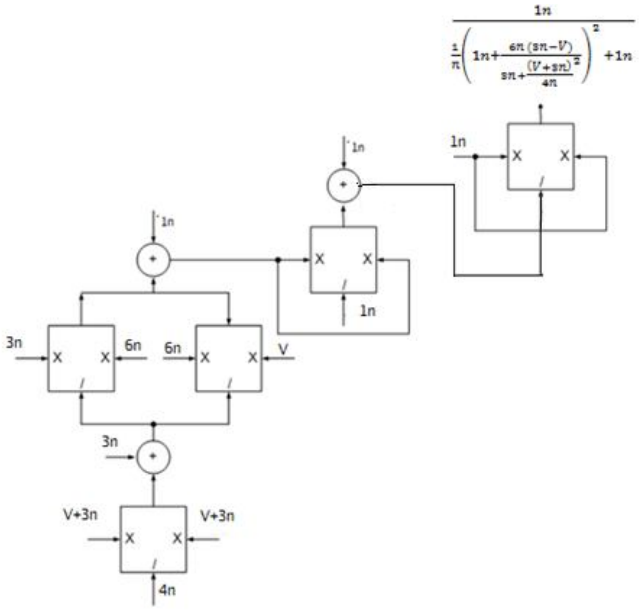
dönüşümü gerçekleştirilir. x yerine $\left(\frac{-V-3n}{1n}\right)$ ifadesi yerine konulursa;

$$1\mathrm{n} * \exp\left(\frac{-V-3n}{1n}\right) \cong \frac{1}{n}\left(1n+\frac{6n(3n-V)}{3n+\frac{(V+3n)^2}{4n}}\right)^2 \tag{5.39}$$

olarak elde edilir. S_{∞} ise ölçekleme ve e^{x} dönüşümü ile

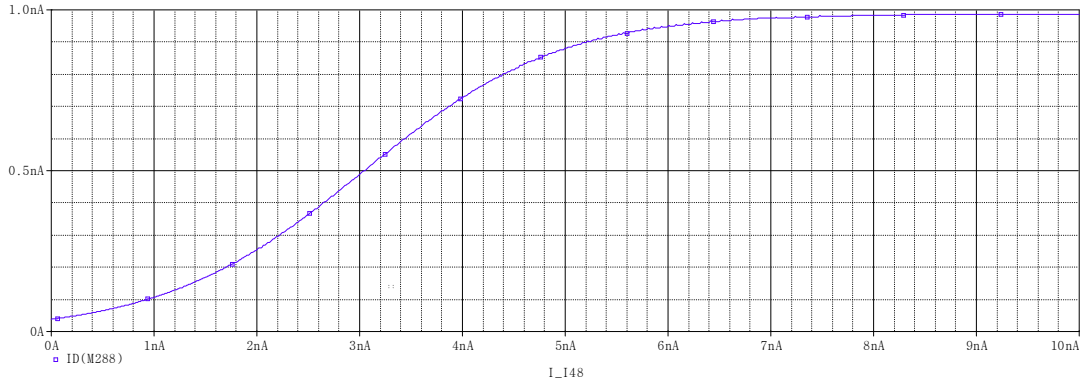
$$S_{\infty}=\frac{1n}{\frac{1}{n}\left(1n+\frac{6n(3n-V)}{3n+\frac{(V+3n)^2}{4n}}\right)^2+1n} \tag{5.40}$$

olarak elde edilir. Bu eşitliğin devre benzetimi için Şekil 5.3'te kullanılan akım modlu çarpıcı kullanılmaktadır. Devrenin blok diyagramı ise Şekil 5.10'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.10 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu blok diyagramı.

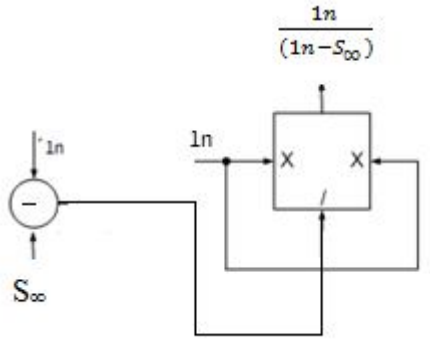
I_V [0-10nA] arasında taratılarak devrenin benzetimi yapıldığında elde edilen sonucun, sayısal analiz sonucuyla birebir örtüşen sigmoidal davranışı Şekil 5.11'de görülmektedir.



Şekil 5.11 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonunun devre benzetimi gerçeklemesi.

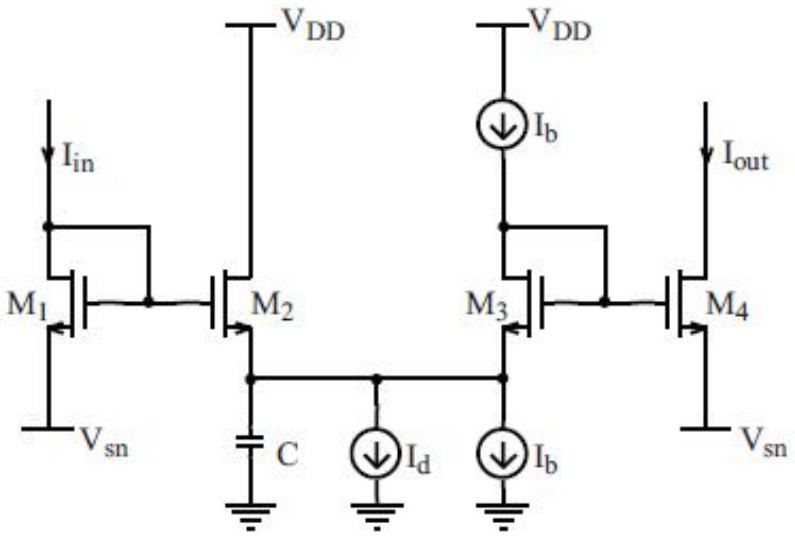
S_∞ fonksiyonu elde edildikten sonra $\frac{dS(t)}{dt} = \frac{S_\infty - S(t)}{\tau_S(1-S_\infty)}$ temel sinaptik değişkeni benzetimi için birinci dereceden logaritmik tabanlı integratör devresi kullanılmaktadır. **(5.10)** eşitliği uyarınca kapasite $C=\tau_s$ değerine, $I_{DS}=\frac{1}{(1-S_\infty)}$ değerine ve son olarak $I_{BS}=\frac{1}{(1-S_\infty)}$ değerine eşit olmaktadır. I_{in} giriş akımı ise S_∞'a eşit olmaktadır.

Ölçeklemeler sonucu elde edilen $\frac{1n}{(1n-S_\infty)}$ ifadesinin S_∞ elde edildikten sonra rahatlıkla devresinin benzetimi yapılabilmektedir. Bu ifadenin blok diyagramı Şekil 5.12'de görülmektedir.



Şekil 5.12 : I_{DS} ve I_{BS} ifadelerinin blok diyagramı.

S(t) temel sinaptik değişkeni devre benzetiminde kullanılan birinci dereceden logaritmik tabanlı integratör devresi Şekil 5.13'de görüldüğü gibidir.



Şekil 5.13 : Sinaptik bağlantı için kullanılan logaritmik tabanlı integratör devresi [9].

V_{sn} değeri 400mVa eşit ve transistörlerin boyutu ise w/L=1µm/1µm olarak alınmıştır.

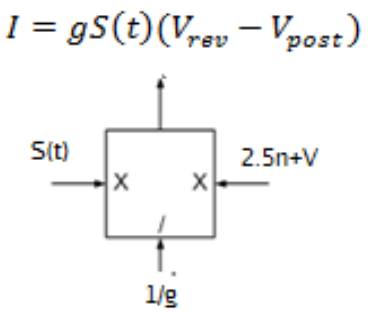
Son olarak sinaptik akımın elde edilmesi için **(5.31)** formülü uyarınca ve Çizelge 5.3'teki değerlere bakılarak,

$$I = 1S(t)(-85 - V) \tag{5.41}$$

olmaktadır. Ötelemeler ve ölçeklemeler yapıldığında elde edilen eşitlik,

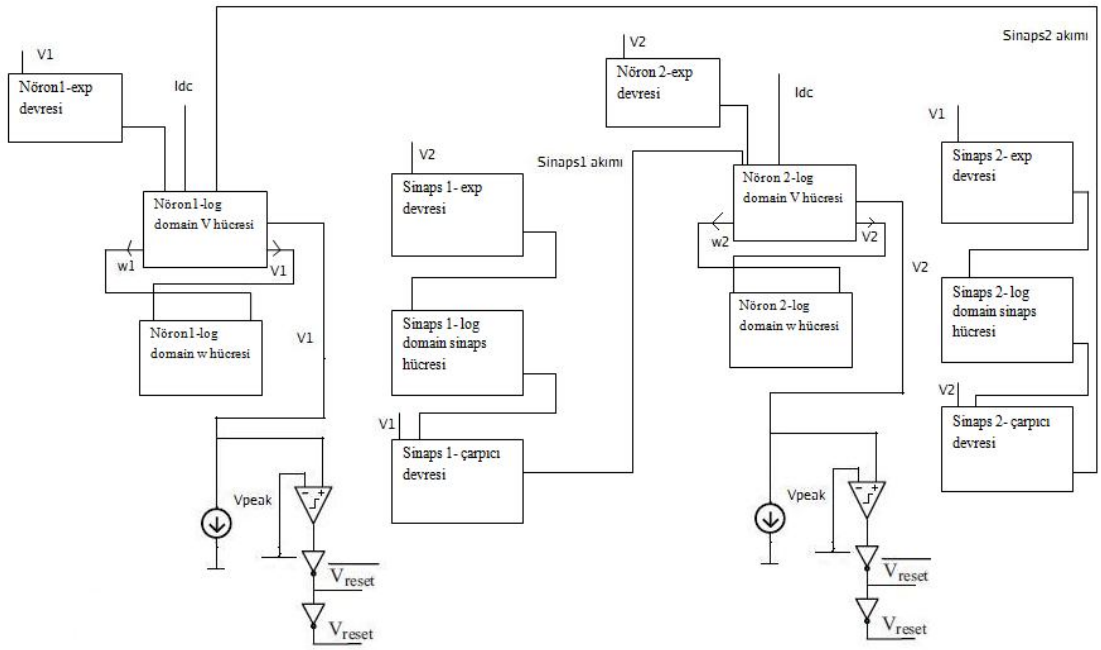
$$I = 1nS(t)(-2.5n - V) \tag{5.42}$$

olmaktadır. Bu devrenin gerçeklemesi için Şekil 5.3'te gösterilen akım modlu çarpıcı kullanılmaktadır. Blok diyagramı ise Şekil 5.14'te görüldüğü gibi olmaktadır.



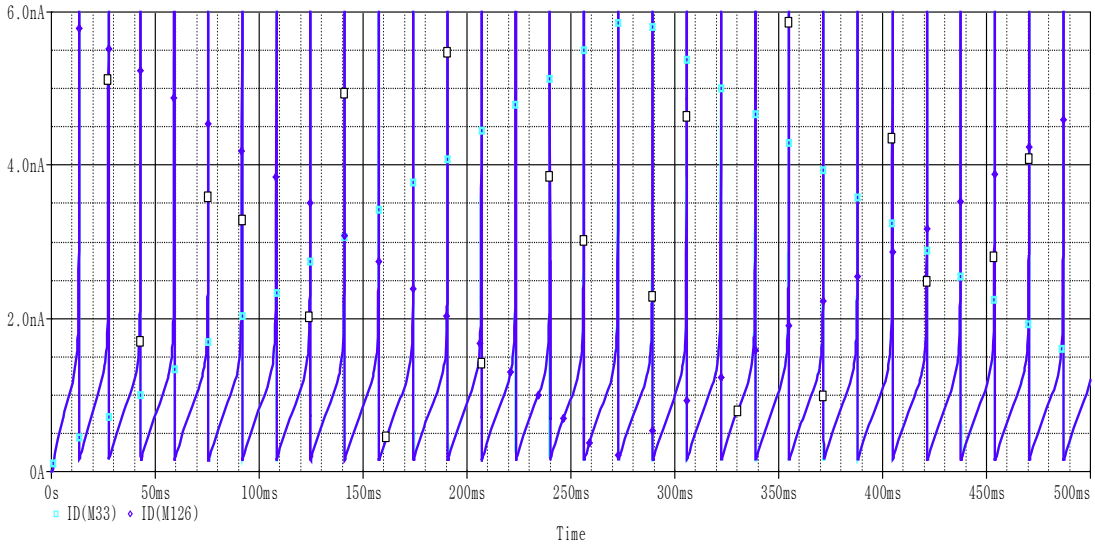
Şekil 5.14 : Kısıtlayıcı bağlı sinaptik akım blok diyagramı.

Nöron modeli ve sinaptik bağlantı devrelerinin birleştirilmiş blok diyagramı Şekil 5.15'te görülmektedir.

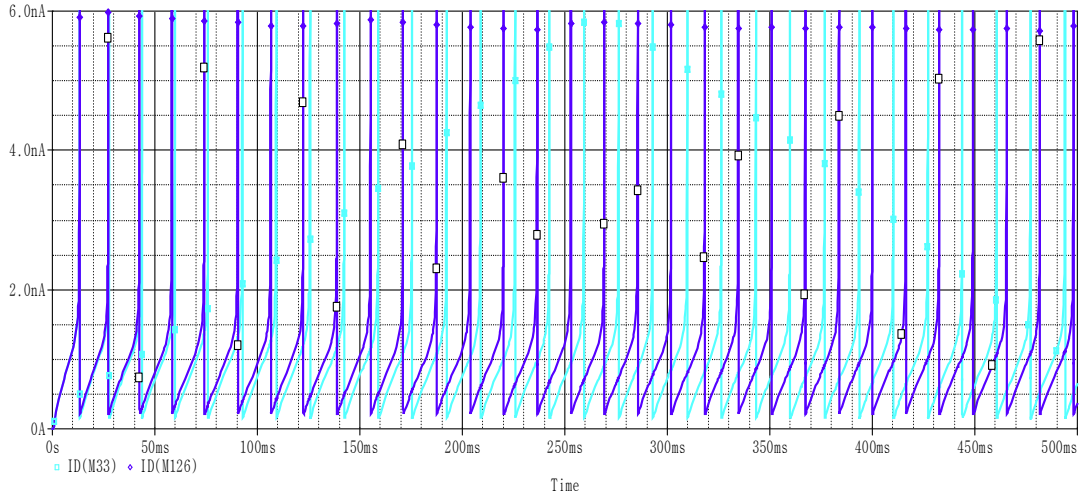


Şekil 5.15 : Benzetimi yapılan devrenin blok diyagramı.

Bu yapılar kullanılarak gerçekleştirilen devrenin benzetim sonuçları aşağıdaki gibi olmaktadır. Devre benzetiminde 0.35µ teknolojisi kullanılmıştır. $\frac{w}{L}$ oranı ise 1 olarak kabul edilerek her ikisi de 1µm olarak alınmıştır. Kısıtlayıcı bağlantı için sayısal analizde de belirtildiği gibi başlangıç koşullarının değiştirilmesi ile elde edilen aynı fazlı ve zıt fazlı düzenli ateşleme örneği davranışları aşağıda görülmektedir.



Şekil 5.16 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının aynı fazlı düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.



Şekil 5.17 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının zıt fazlı düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.

5.4. Kısıtlayıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi

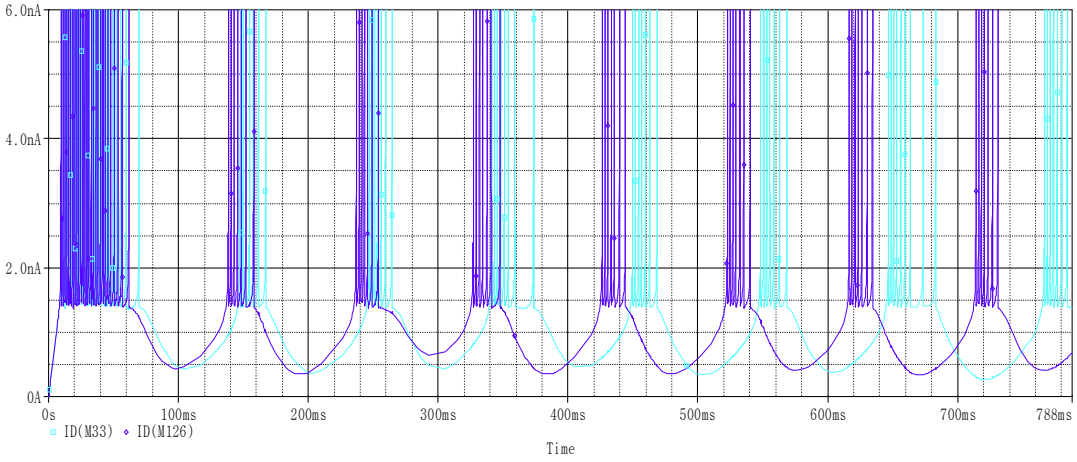
Çizelge 5.4'te kısıtlayıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri görülmektedir. Bu değerler önceden eşitlikleri verilen AdExI&F modeli ve sinaps modelinde yerlerine konularak ve gerekli öteleme ve ölçekleme işlemlerinden sonra devre benzetimi yapılacaktır.

Çizelge 5.4 : Kısıtlayıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

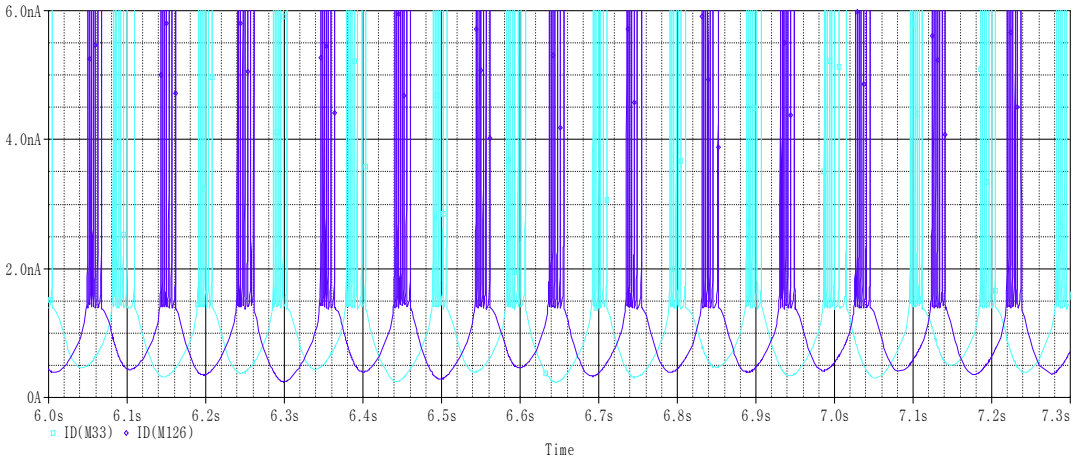
C (F)	g_L (S)	E_L (V)	V_T (V)	Δ_T (V)	a (S)	b (A)	τ_w (s)	V_r (V)	Idc (A)	g (S)	Vrev (V)	Vthres (V)	Vslope (V)	τs (s)
200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210	0.5	-85	-30	20	2

Sinaptik bağlantıda bulunan nöron hücrelerinin devresi, tek bir nöron devre benzetimi başlığı altında bahsettiğimiz gibi gerçeklenecektir. Ancak burada girişe verilen dc akımı ötelemelerle birlikte yaklaşık olarak $I_{dc}\approx25nA$ olarak kabul edilecektir. Bu devrelere ek olarak ise sinaps modelinin devresi gelecektir. Sinaps modelinin devresi ise kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren hücrelerin devre benzetimi başlığı altında gösterildiği gibidir. Verilen parametre değerleri aynı olduğu için devreler birebir benzerdir. Tek farklılık burada sinaps çıkış ölçekleme parametre değerinin 0.5nA'e eşit olmasıdır.

Bu yapılar kullanılarak benzetimi gerçekleştirilen devre ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Devre benzetiminde 0.35µ teknolojisi kullanılmıştır. $\frac{w}{L}$ oranı ise 1 olarak kabul edilerek her ikisi de 1µm olarak alınmıştır. Kısıtlayıcı bağlantı için sayısal analizde de belirtildiği gibi başlangıç koşullarının değiştirilmesi ile elde edilen aynı fazlı ve zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme örneği davranışları aşağıda görülmektedir.



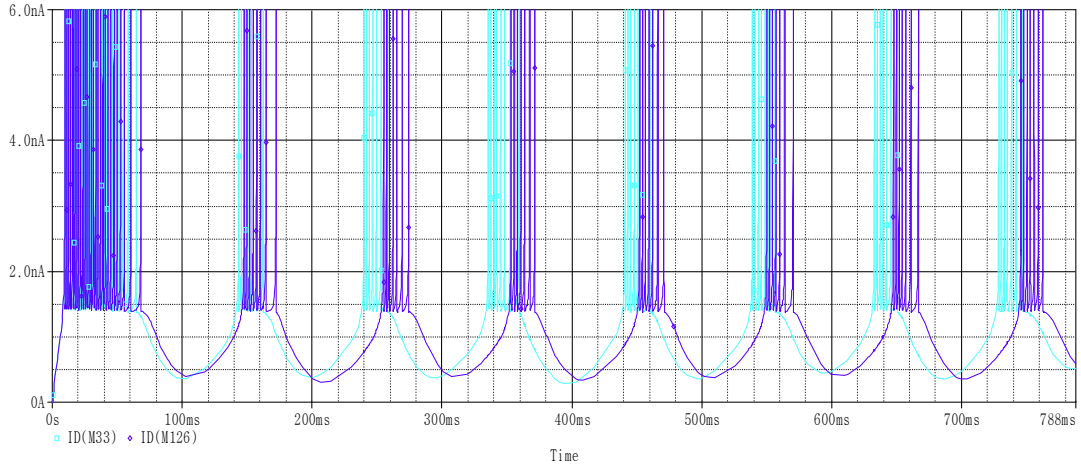
Şekil 5.18 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu.



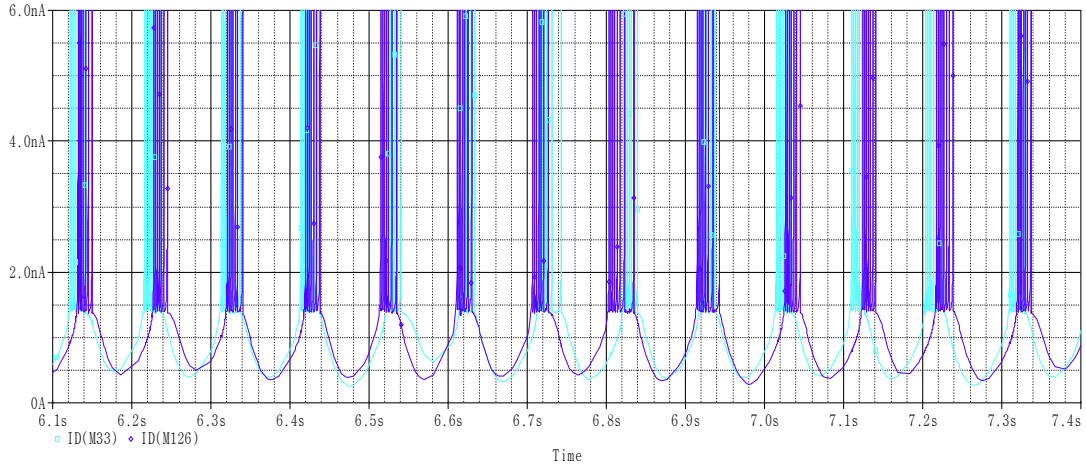
Şekil 5.19: Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra zıt fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.

Başlangıçta faz farkıyla başlatılan kısıtlayıcı bağlantı için düzenli patlamalı ateşleme davranışın zaman içerisinde tam olarak zıt faza oturduğu (Şekil 5.18 ve Şekil 5.19), başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlantı için düzenli

patlamalı ateşleme davranışın zaman içerisinde tam olarak aynı faza oturduğu görülmektedir (Şekil 5.20 ve Şekil 5.21). Sonuçların sayısal analiz ile elde edilen sonuçlar ile örtüştüğü görülmektedir.



Şekil 5.20 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu.



Şekil 5.21 : Gerçekleştirilen kısıtlayıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.

5.5. Uyarıcı Bağlı Düzenli Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi

Çizelge 5.5'te uyarıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri gösterilmektedir. Bu değerler önceden eşitlikleri verilen AdExI&F modeli ve sinaps modelinde yerlerine konularak ve gerekli öteleme ve ölçekleme işlemlerinden sonra devre benzetimi yapılacaktır.

Çizelge 5.5 : Uyarıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

C (F)	g_L (S)	E_L (V)	V_T (V)	Δ_T (V)	a (S)	b (A)	τ_w (s)	V_r (V)	Idc (A)	g (S)	Vrev (V)	Vthres (V)	Vslope (V)	τs (s)
200	10	-70	-50	2	10	0	30	-58	400	0.25	0	-25	15	1

Sinaptik bağlantıda bulunan nöron hücrelerinin devresi, tek bir nöron devre benzetimi başlığı altında bahsettiğimiz gibi gerçeklenecektir. Ancak burada girişe verilen dc akımı ötelemelerle birlikte yaklaşık olarak Idc≈20nA olarak kabul edilecektir. Bu devrelere ek olarak ise sinaps modelinin devresi gelecektir.

$S_\infty=\frac{1}{e^{-2x}+1}$ eşitliği uyarınca ve $x=\frac{V_{pre}-V_{thres}}{V_{slope}}$ olduğu için yerine yazılarak,

$$S_\infty=\frac{1}{e^{-2(\frac{V_{pre}-V_{thres}}{V_{slope}})}+1} \quad \textbf{(5.43)}$$

olarak elde edilir. Sinaps modelin parametreleri ise Çizelge 5.5'teki görüldüğü gibidir.

Çizelge 5.5'teki değerler dikkate alınarak

$$S_\infty=\frac{1}{e^{-2(\frac{V+25}{15})}+1} \quad \textbf{(5.45)}$$

olarak elde edilir. Öteleme ve ölçekleme sonucunda elde edilen son eşitlik aşağıdaki gibidir.

$$S_\infty=\frac{1n}{1n*e^{(\frac{-V+3.5n}{0.75n})}+1n} \quad . \quad \textbf{(5.46)}$$

Burada $1n*\exp\left(\frac{-V+3.5n}{0.75n}\right)$ denklemi devre uygulamasına uygun hale getirmek için,

$$e^x \cong \left(1+\frac{24x}{12+(x-6)^2}\right)^2 \quad \textbf{(5.47)}$$

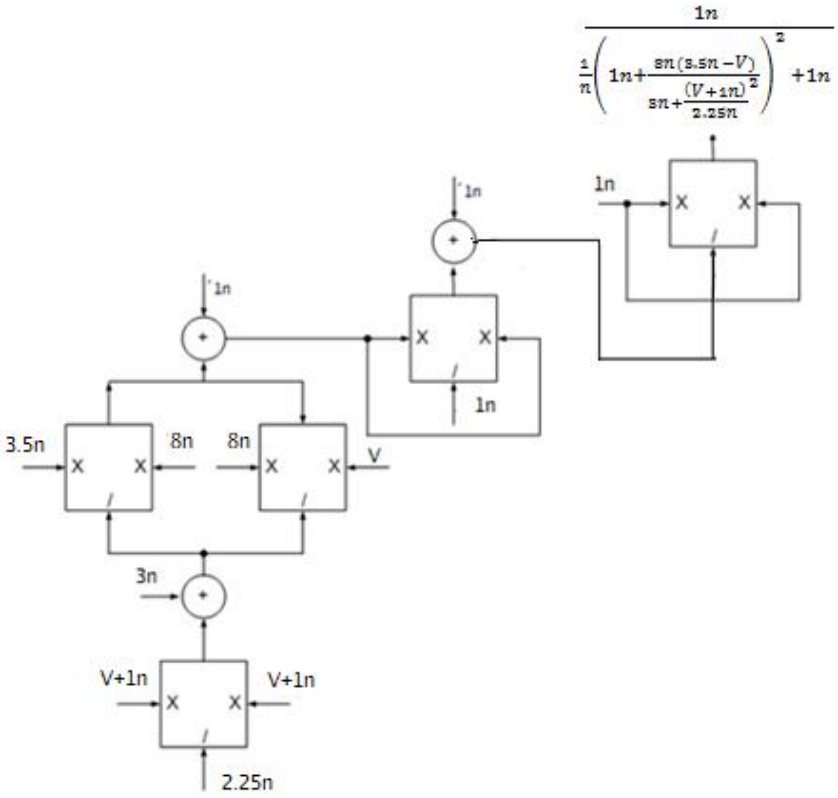
dönüşümü gerçekleştirilir. x yerine $\left(\frac{-V+3.5n}{0.75n}\right)$ eşitliği yerine konulursa;

$$1n*\exp\left(\frac{-V+3.5n}{0.75n}\right) \cong \frac{1}{n}\left(1n+\frac{8n(3.5n-V)}{3n+\frac{(V+1n)^2}{2.25n}}\right)^2 \quad \textbf{(5.48)}$$

olarak elde edilir. S_∞ ise ölçekleme ve e^x dönüşümü ile,

$$S_{\infty}=\frac{1n}{\frac{1}{n}\left(1n+\frac{8n(3.5n-V)}{3n+\frac{(V+1n)^2}{2.25n}}\right)^2+1n} \quad \textbf{(5.49)}$$

olarak elde edilir. Bu eşitliğin devre benzetimi için Şekil 5.3'te kullanılan akım modlu çarpıcı kullanılır. Devrenin blok diyagramı ise Şekil 5.22'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.22 : Kararlı hal sinaptik etkinleştirme fonksiyonu blok diyagramı.

S_{∞} fonksiyonu elde edildikten sonra $\frac{dS(t)}{dt}=\frac{S_{\infty}-S(t)}{\tau_S(1-S_{\infty})}$ temel sinaptik değişkeni gerçeklemesi kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı devre benzetimi başlığı altında anlatıldığı gibidir.

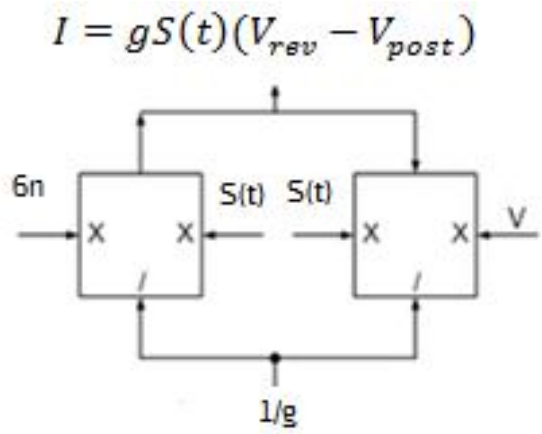
Son olarak sinaptik akımın elde edilmesi için **(5.31)** formülü uyarınca ve Çizelge 5.5'teki değerlere bakılarak,

$$I = 0.25S(t)(0-V) \quad \textbf{(5.48)}$$

olmaktadır. Ötelemeler ve ölçeklemeler yapıldığında elde edilen eşitlik,

$$I = 0.25nS(t)(-V+6n) \quad \textbf{(5.49)}$$

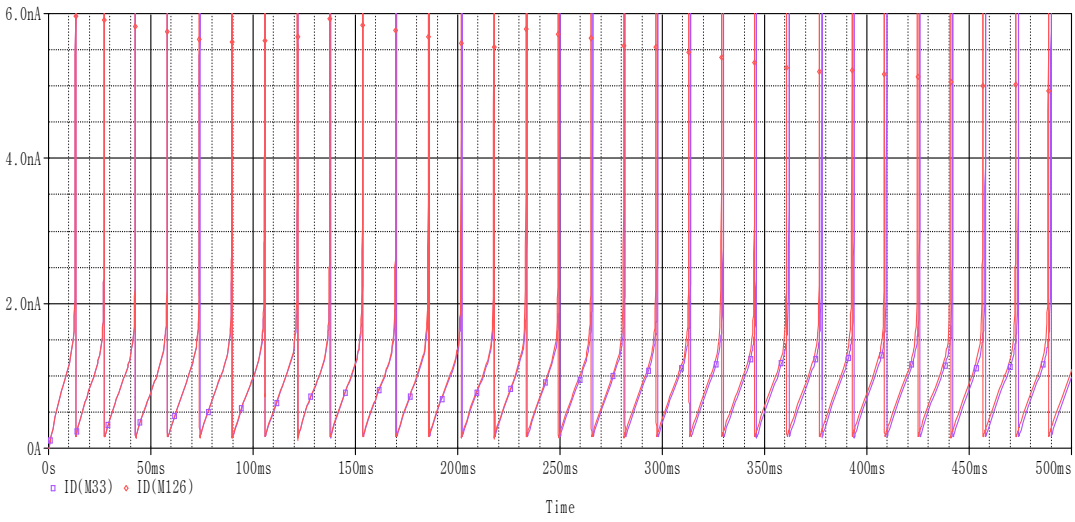
olmaktadır. Bu devrenin gerçeklemesi için Şekil 5.3'te gösterilen akım modlu çarpıcı kullanılmaktadır. Blok diyagramı ise Şekil 5.23'te görüldüğü gibi olmaktadır.



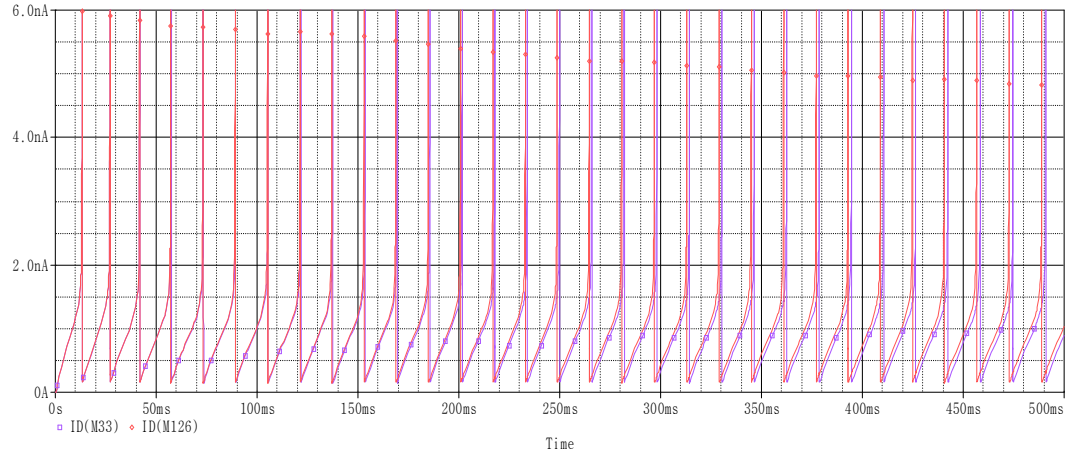
Şekil 5.23 : Uyarıcı bağlı sinaptik akım blok diyagramı.

Nöronlar ve sinaps bağlantılarını içeren birleştirilmiş benzetimi yapılacak devrenin blok diyagramı Şekil 5.15'te verildiği gibi olmaktadır.

Bu yapılar kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilen devre ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Devre benzetiminde 0.35µ teknolojisi kullanılmıştır. $\frac{w}{L}$ oranı ise 1 olarak kabul edilerek ikisi de 1µm olarak alınmıştır. Uyarıcı bağlantı için sayısal analizde de belirtildiği gibi başlangıç koşulları değiştirilse dahi elde edilen sadece aynı fazlı düzenli ateşleme örneği davranışı Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'te görülmektedir.



Şekil 5.24 : Başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.



Şekil 5.25 : Başlangıç koşulları farklı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.

5.6. Uyarıcı Bağlı Düzenli Patlamalı Ateşleme Davranışı Devre Benzetimi

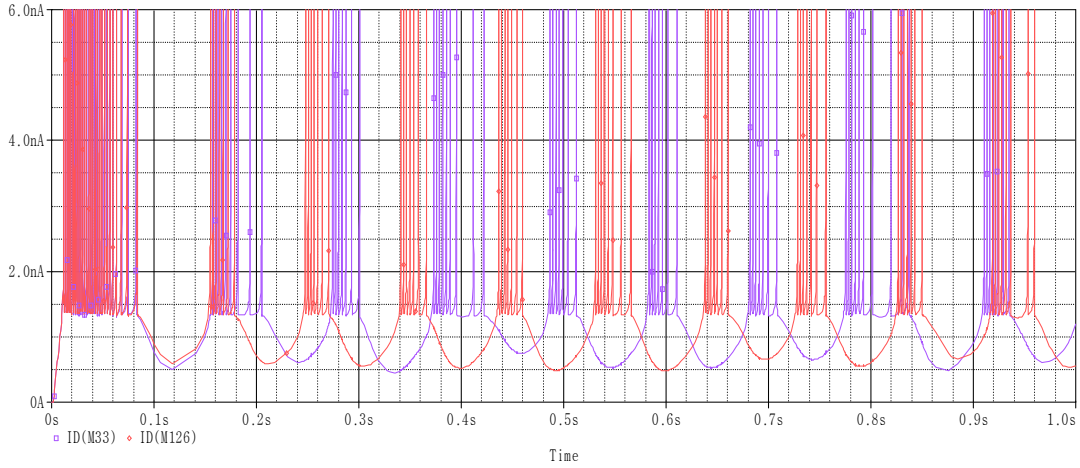
Çizelge 5.6'da uyarıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri görülmektedir. Bu değerler önceden eşitlikleri verilen AdExI&F modeli ve sinaps modelinde yerlerine konularak ve gerekli öteleme ve ölçekleme işlemlerinden sonra devre benzetimi yapılacaktır.

Çizelge 5.6 : Uyarıcı bağlı düzenli patlamalı ateşleme davranışı gösteren nöronların parametre değerleri.

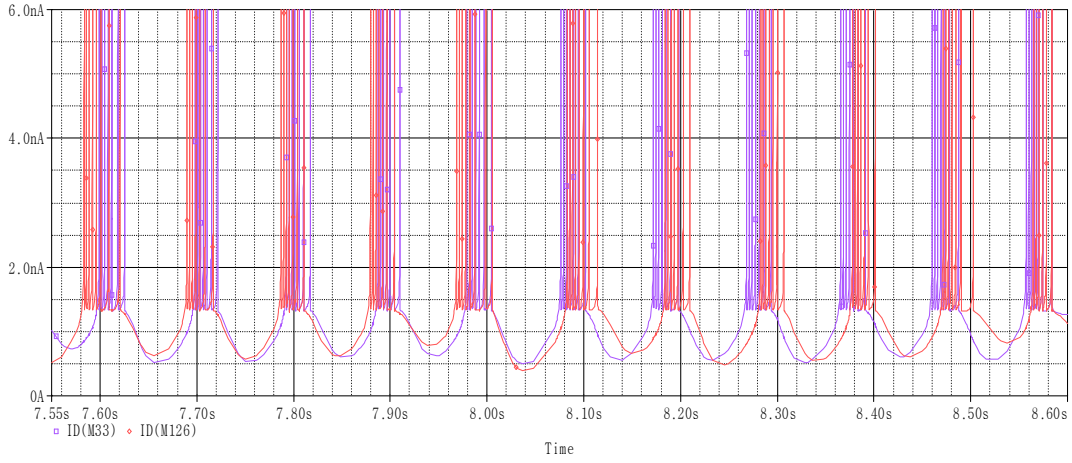
C (F)	g_L (S)	E_L (V)	V_T (V)	Δ_T (V)	a (S)	b (A)	τ_w (s)	V_r (V)	Idc (A)	g (S)	Vrev (V)	Vthres (V)	Vslope (V)	τs (s)
200	10	-58	-50	2	2	30	120	-46	210	0.25	0	-25	15	1

Sinaptik bağlantıda bulunan nöron hücrelerinin devresi, tek bir nöron devre benzetimi başlığı altında bahsettiğimiz gibi gerçeklenecektir. Ancak burada girişe verilen dc akımı ötelemelerle birlikte yaklaşık olarak $I_{dc}\approx25nA$ olarak kabul edilecektir. Bu devrelere ek olarak ise sinaps modelinin devresi gelecektir. Sinaps modelinin devresi ise uyarıcı bağlı düzenli ateşleme davranışı gösteren hücrelerin devre benzetimi başlığı altında gösterildiği gibidir. Verilen parametre değerleri aynı olduğu için devreler birebir benzerdir. Bu yapılar kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilen devre ile elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir. Devre benzetiminde 0.35µ teknolojisi kullanılmıştır. $\frac{w}{L}$ oranı ise 1 olarak kabul edilerek ikisi de 1µm

olarak alınmıştır. Uyarıcı bağlantı için sayısal analizde de belirtildiği gibi başlangıç koşulları değiştirilse dahi elde edilen aynı fazlı düzenli patlamalı ateşleme örneği davranışı aşağıda görülmektedir.



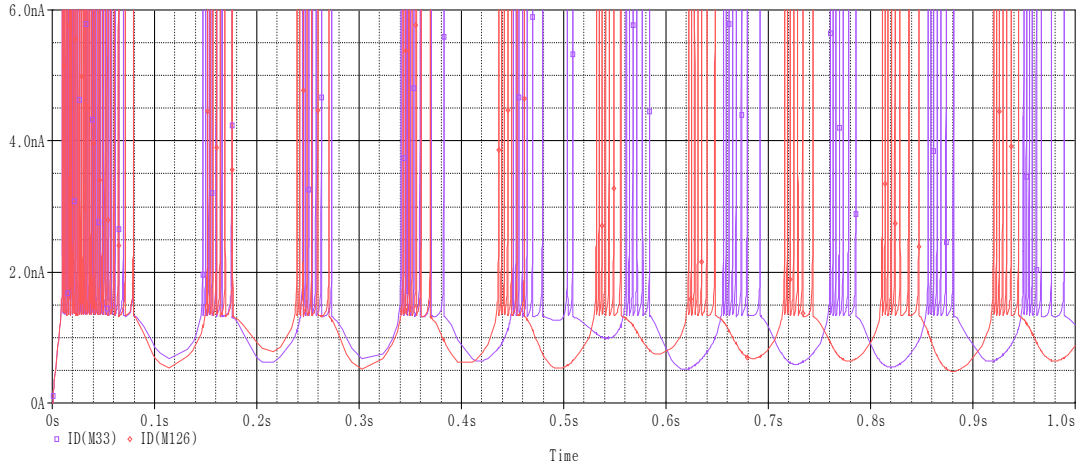
Şekil 5.26 : Başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu.



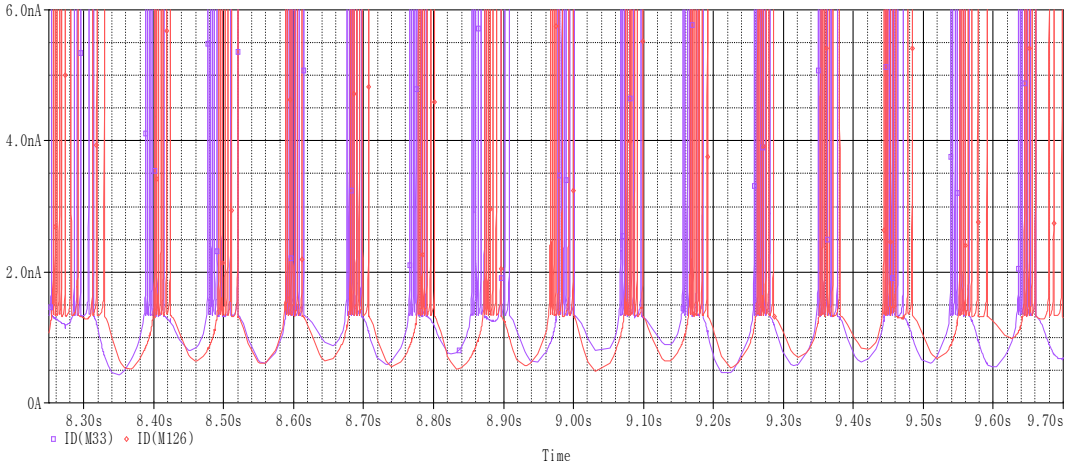
Şekil 5.27 : Başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.

Başlangıçta faz farkıyla başlatılan uyarıcı bağlantı için düzenli patlamalı ateşleme davranışın zaman içerisinde tam olarak aynı faza oturduğu (Şekil 5.28 ve Şekil 5.29), başlangıç koşulları aynı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlantı için düzenli patlamalı ateşleme davranışın zaman içerisinde tam olarak aynı faza oturduğu görülmektedir

(Şekil 5.26 ve Şekil 5.27). Sonuçların sayısal analiz ile elde edilen sonuçlar ile örtüştüğü görülmektedir.

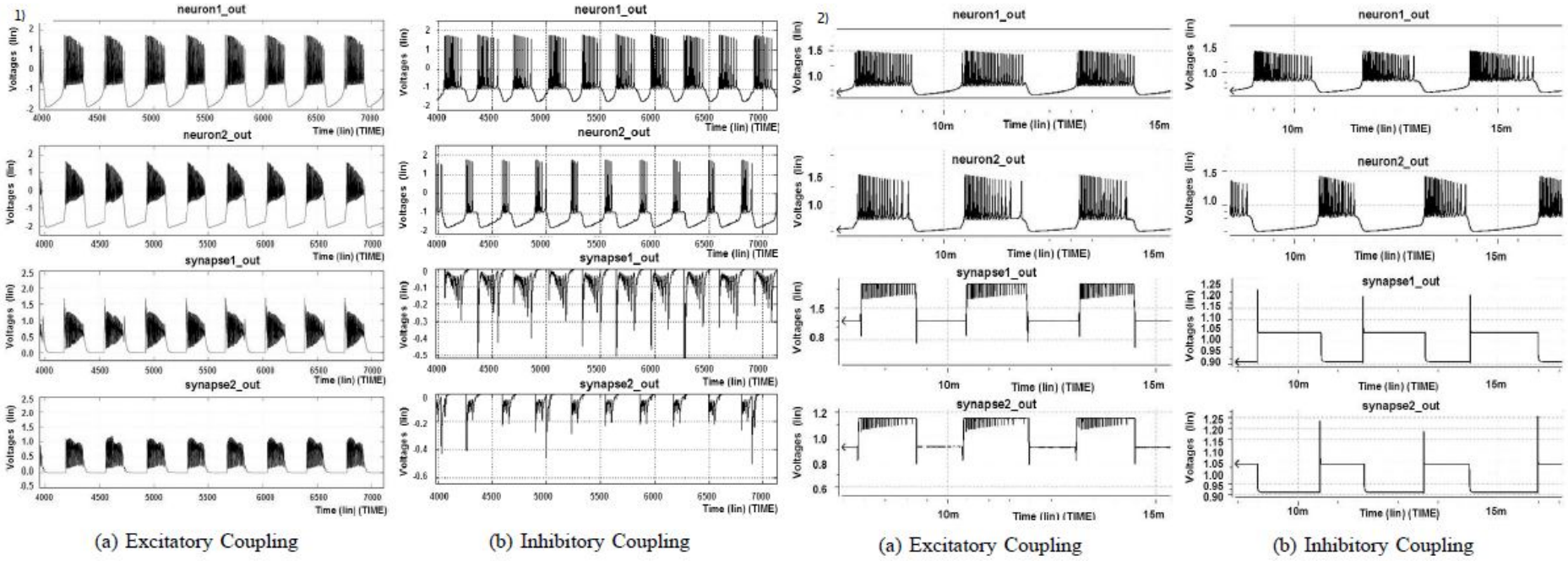


Şekil 5.28 : Başlangıç koşulları farklı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçlarının başlangıç durumu.



Şekil 5.29 : Başlangıç koşulları farklı olarak gerçekleştirilen uyarıcı bağlı AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının belli bir zaman geçtikten sonra düzenli patlamalı ateşleme davranışı devre benzetim sonuçları.

AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantının daha önceden başka bir sinir hücresi modeli kullanılarak gerçekleştirildiğinden bahsedilmişti. Bu modelde sayısal analiz sonuçları ile devre benzetim sonuçları birebir örtüşmediği halde, AdExI&F modeline yönelik sinaptik bağlantılarda sayısal analiz sonuçlarına benzediği görülmektedir, burada AdExI&F sinir hücresi modeli ile elde edilen başarım dikkat çekmektedir (Şekil 5.30).



Şekil 5.30 : Hindmarsh-Rose modeli ile elde edilen **a)** uyarıcı bağlı **b)** kısıtlayıcı bağlı **1)** sayısal analiz ve **2)** devre benzetim sonuçları [5].

6. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, basit ve anlaşılması kolay AdExI&F sinir hücresi modeli incelenmiş ve Hindmarsh-Rose sinir hücresi modeli ile birlikte kullanılan sinaps modeli, AdExI&F hücre modeli ile birikte kullanılarak kısıtlayıcı ve uyarıcı bağlantı için düzenli ateşleme ve düzenli patlamalı ateşleme örüntülerinin zıt fazlı ve aynı fazlı davranışları önce sayısal olarak analiz edilmiş daha sonra devre benzetimi gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak gerçek sinir hücresi davranışına en yakın matematiksel bir sistem olan Hodgkin-Huxley modeli incelenmiştir. Bu model dört eşitlikten ve on tane parametreden oluşmaktadır. Bu model biyolojik olarak anlamlı ve ölçülebilirdir, ancak matematiksel ifadesi karmaşık ve uygulaması oldukça pahalıdır. Bu yüzden AdExI&F sinir hücresi modeli tercih edilmiştir.

Nöronların eş zamanlı salınım davranışıyla beynin algılama, hafıza gibi idrakla ilgili fonksiyonlarının incelenebilmekte, aynı zamanda şizofreni, epilepsi, Parkinson hastalığı gibi patolojik durumların incelenebilmesi nedeniyle eş zamanlı mekanizmanın anlaşılmasına önem verilmiştir. Daha önceden Hindmarsh-Rose sinir hücresi modeli için kullanılan eş zamanlı davranışları inceleyen merkezi örüntü üreticinin elektronik tasarımı, bu çalışmada AdExI&F modeli için kullanılmıştır.

AdExI&F sinir hücresi modelinin diğer modellere göre üstünlüğü ve başarısı aşağıdaki gibi sıralanabilmektedir.

- AdExI&F modeli gerçek sinir hücrelerinde görülen birçok elektrofizyolojik davranışları üretebilmekte, Hodgkin-Huxley modelinin çok sayıdaki eşitlik ve parametrelerine nazaran, iki eşitlik ve dört tane az sayıda parametreden oluşan matematiksel bir sistemdir.
- AdExI&F modeli az parametreden oluşmasına rağmen zengin ateşleme örüntüleri üretebilmektedir.
- Hindmarsh-Rose sinir hücresi modeli ile birlikte kullanılan sinaps modeli ile elde edilen hem uyarıcı hem kısıtlayıcı bağlantı için aynı fazlı ve zıt fazlı

davranışlar incelendiğinde sayısal analiz ile devre benzetimi sonuçları birbirleriyle uyumlu değildir. Ancak AdExI&F sinir hücresi modeli ile birlikte kullanılan sinaps modeli ile elde edilen hem uyarıcı hem kısıtlayıcı bağlı düzenli ateşleme ve patlamalı ateşleme davranışları için aynı fazlı ve zıt fazlı davranışlar incelendiğinde sayısal analiz ile devre benzetimi sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir.

- Devre benzetimi için düşük güçlü, akım modlu devreler kullanılmıştır. Devrenin gücü, tipik bir davranış olan düzenli patlamalı ateşleme örüntüsünde, dinlenme durumunda 80.85 nW, çalışır durumda ise 432.3 nW olarak elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Izhikevich E.M.**, (2007). *Dynamical Systems in Neuroscience:The Geometry of Excitability and Bursting*, The MIT press, Cambridge, Massachusetts London, England .

[2] **Ermentrout B.G. ve Terman D. H.,** (2010). *Mathematical Foundations of Neuroscience,* Springer, New York Dordrecht Heidelberg London.

[3] **Naud R., Marcille N., Clopath C. and Gerstner W.,** (2008). Firing patterns in the adaptive exponential integrate-and-fire model, *Biological Cybernetics* (2008), Springer, s. 335–347.

[4] **Touboul J. ve Brette R.,** (2008). Dynamics and bifurcations of the adaptive exponential integrate-and-fire model, *Biological Cybernetics* (2008), Springer, s. 319–334.

[5] **Lee Y. J., Lee J., Kim K. K., Kim Y. ve Ayers J.,** Low Power CMOS Electronic Central Pattern Generator Design for a Biomimetic Underwater Robot, Electrical and Computer Engineering Department, Department of Biology, Northeastern University, Boston, MA, USA.

[6] **Ladenbauer J., Augustin M., Shiau L. ve Obermayer K.,** (2012). Impact of Adaptation Currents on Synchronization of Coupled Exponential Integrate-and-Fire Neurons, *PLoS Computational Biology,* volume 8, issue 4, e1002478.

[7] **Izhikevich,E.M.,** (2003). Simple Model of Spiking Neurons, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14:1569- 1572.

[8] **Izhikevich E.M.,** (2004). Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons?, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 15:1063-1070.

[9] **Demirkol, S. A. ve Özoğuz, S.** (2011). Low Power VLSI Implementation of the Izhikevich Neuron Model, *IEEE New Circuits and Systems Conference (NEWCAS),* s. 169-172.

[10] **Frey D. R.,** (1993). Log-domain filtering : an approach to current-mode filtering, *IEE Proceedings-g*, vol. 140, no. 6.

[11] **Punzenberger M. ve Enz C.,** (1996). A new 1.2v BICMOS Log-domain Integrator for Compandıng Current-mode filters, IEEE, Lausanne, Switzerland.

[12] **Punzenberger M. ve Enz C.,** (1997). A 1.2-V Low-Power BiCMOS Class AB Log-Domain Filter, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 32, no. 12.

[13] **Python D., Punzenberger M. ve Enz C.,** (1999). A 1-V CMOS Log- domain Integrator, IEEE, Lausanne, Switzerland, Newport Beach, CA, USA.

[14] **Pinto R. D., Volkovskii A.R., Szücs A., Abarbanel H.D.I. ve Rabinovich M.I.,** (2008). Synchronous Behavior of Two Coupled Electronic Neurons, San Diego, La Jolla, USA, Madrid, SPAIN.

[15] **Wijekoon J. H. B. Ve Dudek P.,** (2007). Spiking and Bursting Firing Patterns of a Compact VLSI Cortical Neuron Circuit, IEEE, Proceedings of International Joint Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, USA.

[15] **Rangan V., Ghosh A., Aparin V. ve Cauwenberghs G.,** (2010), A Subthreshold aVLSI Implementation of the Izhikevich Simple Neuron Model, *32nd Annual International Conference of the IEEE EMBS* Buenos Aires, Argentina.

[16] **Schwemmer M. A. ve Lewis T. J.,** The Theory of Weakly Coupled Oscillators, Department of Mathematics, One Shields Ave, University of California.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Ayşen BAŞARGAN

Doğum yeri ve Tarihi : İstanbul, 10.06.1989

Lisans Üniversite : Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Haziran 2010.

Yayın Listesi:

- Vural, R.A. , Yildirim, T. , Kadioglu, T. , **Basargan, A.** , "Performance Evaluation of Evolutionary Algorithms for Optimal Filter Design", Evolutionary Computation, IEEE Transactions on Feb. 2012, Volume: 16, Issue: 1 Page(s): 135 - 147.