

PASİF DENDRİT ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BENZETİMİ İÇİN BİR YAZILIM

Yalçın İŞLER*, N. Hakan EKMEKÇİ, Mahmut ÖZER****

*Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elk.-Elt. Müh. Bölümü, 35160-Buca-İzmir

**Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elk.-Elt. Müh. Bölümü, 67100-Zonguldak

Geliş Tarihi : 29.06.2004

ÖZET

Bu çalışmada, kablo teoremine dayalı pasif dentrit elektriksel özelliklerinin benzetimi için geliştirilen bir yazılım tanıtılmaktadır. Üzerinden sinaptik bilgi taşınan dentritler, sinir hücrelerinin yüzey alanı bakımından en büyük bileşenidir. Dentritik nöronlar için kablo teoremi, sürekli pasif dentrit ağaç yapısı içinde akım-gerilim ilişkilerini modellemektedir. Pasif kablo ve dentritlerle ilgili iyi bir yaklaşıklık olan ve uyarılabilir membranlar için önemli bir referans olan kablo teoremi kısaca özetlenmektedir. Önerilen yazılım, kullanıcı tarafından tanımlanan dentrit ağaç yapısını oluşturmak için kullanılabilir. Kullanıcı, yazılımı kullanarak modeli detaylı olarak tanımlayabilmekte, oluşturduğu dentrit ağacını görüntüleyebilmekte ve dentrit ağacının temel elektriksel özelliklerini inceleyebilmektedir.

Anahtar Kelimeler : Kablo teoremi, Dentrit, Membran, Nöron, Benzetim yazılım

A SOFTWARE FOR SIMULATING ELECTRICAL PROPERTIES OF PASSIVE DENDRITES

ABSTRACT

In this study, a software is introduced for simulating the electrical properties of passive dendrite based on the cable theory. Dendrites along which the synaptic information is conveyed are the largest component of a neuron in surface area. The Cable theory for dendritic neurons addresses to current-voltage relations in a continuous passive dendritic tree. It is briefly summarized that the cable theory related to passive cables and dendrites, which is a useful approximation and an important reference for excitable cases. The proposed software can be used to construct user-defined dendritic tree model. The user can define the model in detail, display the constructed dendritic tree, and examine the basic electrical properties of the dendritic tree.

Key Words : Cable theory, Dendrite, Membrane, Neuron, Simulation software

1. GİRİŞ

Sinaptik bilginin iletiildiği dentritler nöronun yüzey alanı bakımından en büyük bileşenini oluşturmaktadır. Tipik bir dentrit ağacı, dentrit yüzeyi üzerinden yaklaşık on bin sinaptik giriş almaktadır (Segev, 1998). Bu girişlerin her biri uyarıldığında post sinaptik membranda yerel

iletkenlik değişimi meydana getirmektedir. Membran potansiyelindeki bu yerel değişim dentrit dalları boyunca yayılmaktadır. Bu nedenle, nöronun giriş-çıkış özelliklerini belirleyebilmek için sinaptik girişlerin zamana ve konuma bağlı olarak değişimlerinin anlaşılması çok önemlidir. Bu bağlamda, kablo teoremi ve ortaya çıkan denklemlerin çözümleri bir elektrik kablosundaki akım akışını tanımlamaktadır.

Dendrit ağaç yapısı içinde elektrik akım akışını ve bu akım sonucu meydana gelen gerilim yayılımını tanımlayan bir matematiksel model türetmek üzere Rall tarafından dendritler için kablo teoremi geliştirilmiştir (Rall, 1957; Rall, 1959; Rall, 1960). Nöronların tek-boyutlu kablo teoremi, akımın akışını kısmi diferansiyel denklemler ile tanımlamaktadır. Bu denklemler eşdeğer bir silindire dönüştürülebilir, ideal hale dönüştürülmüş dendrit ağacına akım girişleri için doğrudan analitik çözümleri vermektedir (Rall and Rinzel, 1973; Rinzel and Rall, 1974; Jack et al., 1983).

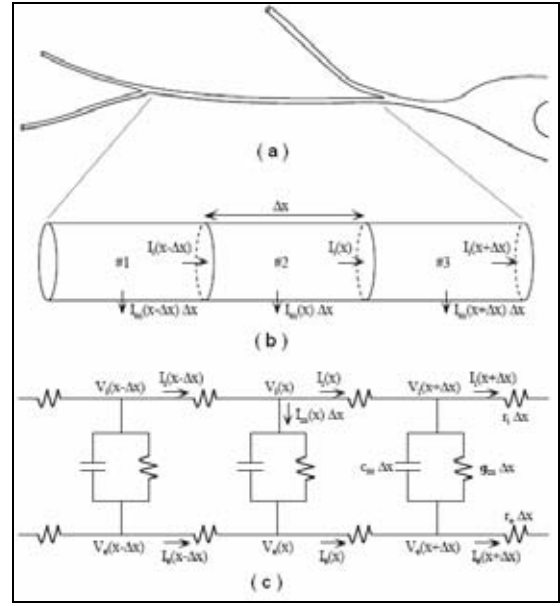
Bu teorem, nörofizyolojik olayların tam niceliksel formülasyonunu olanaklı hale getirmesine rağmen, gelişigüzel dallanan pasif yapılar için çözümler oldukça karmaşık olmaktadır. Bununla birlikte, bu gibi durumlarda uygulanan akıma tepki olarak gerilimin izlediği yol özyinelemeli olarak hesaplanabilmektedir (Butz and Cowan, 1974; Koch and Poggio, 1985; Steinberg, 1996). Membran aktif iyon kanalları içerdiğinde, lineer kablo teoremini kullanarak yapılan analitik yaklaşım artık geçerli olmamaktadır (Segev and Burke, 1999). Son zamanlarda, dallanan sinir ağacındaki aktif iyon kanallarına sahip membranın gerilim değişimini modellemek için düzgün-olmayan eşdeğer kablo modeli önerilmiştir (Ohme and Schierwagen, 1998). Fakat, membran özellikleri gerilime bağlı olduğundan analitik modeller yerine bölmeli modelleme yaklaşımı kullanılmalıdır. Bölmeli modelleme yaklaşımı kablo teoreminin uzantısı olup, sinir hücresinin dendrit dallarının yeteri kadar küçük bölmelere ayrılması ilkesine dayanmaktadır.

Bu çalışmada, kablo teoremine dayalı olarak pasif dendrit elektriksel özelliklerinin benzetimi için daha önce geliştirilmiş olan CableTeo isimli yazılım (Özer ve ark., 2004) tanıtılmakta, ve yapılan yeni değişiklikler gösterilmektedir. Kullanıcı yazılımı kullanarak dendrit ağaç modelini detaylı olarak tanımlayabilmekte, oluşturduğu ağaç yapısını görebilmekte ve ağacın temel elektriksel özelliklerini inceleyebilmektedir.

2. KABLO DENKLEMİ

Sinir hücresinin dendrit ve aksonu şekil 1(a)'da görüldüğü gibi membranların ince tüpünden oluştuğu için, kablo teoreminde şekil 1(b)'de gösterildiği gibi silindirler şeklinde ideal hale getirilmiştir. Hücre içi sitoplazmik öz ve hücre dışı akışkan, elektrik akımını ileten iyonik ortamlar olduğundan, bu ortamlar öz iletkenler olarak da isimlendirilmektedir (Rall and Rinzel, 1973; Rinzel and Rall, 1974; Jack et al., 1983).

Yapıda silindirin, uzunluğu boyunca düzgün yarıçapa sahip olduğu varsayılmaktadır. Membran üzerinden akan elektrik akımına gösterilen direnç, iç öz veya dış öz boyunca gösterilen dirençten çok daha büyük olduğundan, akımın önemli bir bölümü silindir eksenine paralel olarak oldukça uzak mesafeye akma eğilimi göstermektedir. Bu nedenle, kablo teoremi sadece tek boyutlu uzaya odaklanmıştır. Silindir Şekil 1(b)'deki gibi eşit Δx uzunluğundaki küçük parçalara bölündüğünde, silindirin elektriksel kablo modeli Şekil 1(c)'deki gibi gösterilmektedir.



Şekil 1. Dendrit ve aksonların (a) grafik gösterimi, (b) geometrik gösterimi ve (c) elektriksel kablo modeli ile şematik gösterimi

Her bir alt-silindirin membranı, membran kapasitansı $c_m \Delta x$ ve bu kapasitansa paralel şekilde gösterilmiş olan iyonik admitanslardan $g_m \Delta x$ oluşmaktadır. İyonik akım I_{ion} , karmaşık ve membran geriliminin doğrusal olmayan fonksiyonu olmasına rağmen, pasif kablo teoreminde membranın pasif olduğu varsayılmaktadır, yani iyonik admitansının sabit olduğu kabul edilmektedir. Membran parçasından geçen toplam akım $I_m(x) \Delta x$ 'dir. $I_i(x)$ silindirin içinden geçen toplam akımı, ve $I_e(x)$ hücre dışı uzayda silindire paralel akan toplam akımı göstermektedir. $V_i(x)$ ve $V_e(x)$ sırasıyla hücre içi ve hücre dışı gerilimlerini göstermektedir. Membran gerilimi $V = V_i(x) - V_e(x)$ şeklinde ifade edilmektedir (Butz and Cowan, 1974; Koch and Poggio, 1985; Steinberg, 1996).

Hücre içi uzayda akan akım Ohm kanununa göre,

$$V_i(x) - V_i(x + \Delta x) = I_i(x)r_i\Delta x \quad (1)$$

ifade edilmektedir. (1) denklemini yeniden düzenlenir ve Δx sıfıra giderken limit alınır,

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{V_i(x + \Delta x) - V_i(x)}{\Delta x} = \frac{\partial V_i}{\partial x} = -r_i I_i(x) \quad (2)$$

elde edilmektedir. Benzer şekilde hücre dışı uzay için,

$$\frac{\partial V_e}{\partial x} = -r_e I_e(x) \quad (3)$$

elde edilir. Hücre içi ve hücre dışı düğümlerinde akımın korunumu yasasının kullanılması ile,

$$\frac{\partial I_i}{\partial x} = -I_m(x) \quad \text{ve} \quad \frac{\partial I_e}{\partial x} = I_m(x) \quad (4)$$

denklemini elde edilir. Şekil 1'deki membran akımı, iyonik akım ile kapasite akımının toplamına eşittir:

$$I_m(x)\Delta x = g_m\Delta xV + c_m\Delta x\frac{\partial V}{\partial t} \quad (5)$$

$V = V_i(x) - V_e(x)$ ilişkisini kullanarak ve (2-4) denklemleri yardımıyla aşağıdaki ilişki elde edilmektedir:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 (V_i - V_e)}{\partial x^2} \\ &= -r_i \frac{\partial I_i}{\partial x} + r_e \frac{\partial I_e}{\partial x} \\ &= (r_i + r_e)I_m \end{aligned} \quad (6)$$

(5) denklemini (6) denkleminde yerine konulursa, doğrusal olmayan kablo denklemi aşağıdaki gibi elde edilmektedir:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (r_i + r_e) \cdot \left(g_m V + c_m \frac{\partial V}{\partial t} \right) \quad (7a)$$

$$\frac{1}{r_i + r_e} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = g_m V + c_m \frac{\partial V}{\partial t} \quad (7b)$$

Membran admitansı g_m yerine membran direnci

$$r_m = \frac{1}{g_m} \quad \text{ifadesi kullanılarak (7b) denklemini}$$

$$\lambda^2 \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \tau_m \frac{\partial V}{\partial t} + V \quad (8)$$

olarak elde edilmektedir. Burada,

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_i + r_e}} \quad \text{ve} \quad \tau_m = r_m c_m \quad (9)$$

λ ve τ_m sırasıyla uzunluk sabitini ve membran zaman sabitini temsil etmektedir. Son olarak, (8) denklemini boyutsuz değişkenler cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = \frac{\partial V}{\partial T} + V \quad (10)$$

Burada;

$$X = x / \lambda \quad \text{ve} \quad T = t / \tau_m \quad (11)$$

3. KABLO DENKLEMİNİN SÜREKLİ-DURUM ÇÖZÜMÜ

Kablo denkleminin sürekli-durum çözümü geçici tepkinin analiz edilmesi için önemli bir referanstır. Özellikle uzun süreli akım darbelerinin ve gerilim-kenetleme deneylerinin analizleri kısmen sürekli-durum analizine dayanmaktadır. Sürekli-akım veya gerilim uygulandığında analiz, denklem (10)'dan aşağıdaki gibi elde edilen adi diferansiyel denklemin matematiksel çözümüne dayalı olarak elde edilmektedir:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial X^2} - V = 0 \quad (12)$$

(12) denkleminin genel çözümü, aşağıdaki gibi çeşitli ancak eşdeğer biçimlerde ifade edilebilir (Rall and Agmon-Snir, 1999):

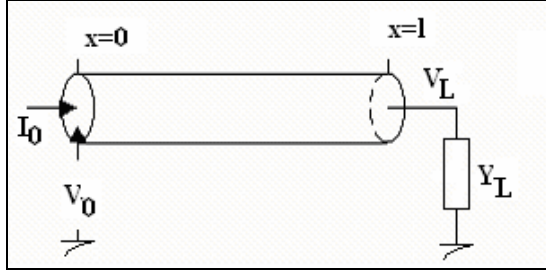
$$V(X) = A_1 e^X + A_2 e^{-X} \quad (13a)$$

$$V(X) = B_1 \cosh(X) + B_2 \sinh(X) \quad (13b)$$

$$V(X) = C_1 \cosh(L - X) + C_2 \sinh(L - X) \quad (13c)$$

Burada; $L = l / \lambda$. L elektriksel uzunluğu ve l kablunun gerçek uzunluğunu göstermektedir.

Şekil 2'de kablunun sağ ucundan Y_L admitansı ile yüklendiği kabul edilmiştir. Bu durumda giriş admitansı aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Rall and Agmon-Snir, 1999):



Şekil 2. Bir admitans ile sonlandırılmış sonlu kablo

$$Y_{in} = \frac{I_0}{V_0} = G_{\infty} \frac{\tanh(L) + k}{1 + k \tanh(L)} \quad (14)$$

Burada; $k = Y_L / G_{\infty}$ olup G_{∞} karakteristik admitanstır ve Şekil 2’de gösterilen kablunun yarısonsuz olması durumundaki iletkenliğe karşılık gelmekte olup aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Rall and Agmon-Snir, 1999):

$$G_{\infty} = \frac{1}{r_i \lambda} = \frac{\pi d^{3/2}}{2\sqrt{R_A R_M}} \quad (15)$$

burada R_A hücre dışı iyonik ortamın dirençliğidir ve $\pi d^2 r_i / 4$ formülü ile ifade edilmektedir. R_M membranın birim alanının direncidir ve $\pi d r_m$ formülü ile hesaplanmaktadır. Ayrıca, d silindirik şeklindeki membranın çapıdır ve $r_e=0$ olarak kabul edilmektedir. (14) denkleminin $Y_L = 0$ ve $Y_L = \infty$ gibi diğer sınır koşullarının çözümlerini içeren genelleştirilmiş iletkenlik ifadesidir. (14) denklemi ile bir dendrit ağacındaki herhangi bir noktanın giriş admitansı hesaplanabilmektedir.

4. TRANSFER EMPEDANSI YAKLAŞIMI

Geliştirilen yazılımda, kullanıcı tarafından oluşturulan ağaç yapısının farklı noktalarındaki işaretler arasındaki ilişkiyi belirlemek için çeşitli kurallar kullanılmaktadır. Ağaç yapısının değişik noktalarındaki işaretlerin arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi üç kuralın uygulanması ile mümkün olmaktadır. Sadece lineer problemler için etkin olan bu kurallar aşağıda tanımlanmaktadır (Rall and Agmon-Snir, 1999):

4. 1. Kural 1: Gerilim Transfer Oranı

Bu kural ağaç yapısındaki gerilimin dağılımını tanımlamaktadır. Şekil 2’de verilen durumda gerilim kazancı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$A_{0L} = \frac{V_L}{V_0} = \frac{1}{\cosh L + \frac{Y_L}{G_{\infty}} \sinh L} \quad (16)$$

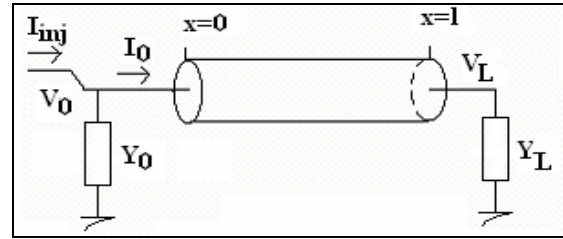
4. 2. Kural 2: Giriş Admitansı

Bu kural kullanılarak dendrit ağacındaki herhangi bir noktanın giriş admitansı hesaplanmaktadır. Giriş admitansı Şekil 2’de verilen durum için aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$Y_{in} = \frac{I_0}{V_0} = G_{\infty} \frac{\tanh L + Y_L / G_{\infty}}{1 + Y_L / G_{\infty} \tanh L} \quad (17)$$

4. 3. Kural 3: Transfer Empedansı

Bu kural kullanılarak, dendrit ağacı üzerinde bir noktadan akım enjekte edildiğinde başka bir noktadaki gerilim hesaplanabilmektedir. Bu durum Şekil 3’de gösterilmiştir.

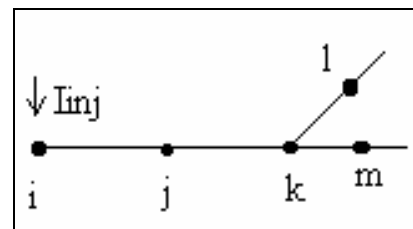


Şekil 3. Bir ucundan akım enjekte edilen sonlu kablo

Bu durumda, transfer empedansı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$K_{0L} = \frac{V_L}{I_{inj}} = \frac{1}{(Y_0 + Y_L) \cosh L + (G_{\infty} + Y_0 Y_L / G_{\infty}) \sinh L} \quad (18)$$

Bu üç kuralın uygulanması, Şekil 4’e dayalı olarak kısaca anlatılacaktır. Transfer empedansı ve gerilim transfer oranı kuralları, ağaç üzerindeki bir dallanma noktasından diğerine ardışık olarak uygulanmalıdır. Şekil 4’de gösterilen durumda akım i noktasından uygulanırsa, j, k, l ve m noktalarındaki gerilim aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:



Şekil 4. Bir dendrit ağaç örneği

$$\begin{aligned} V_j &= K_{ij} I_{inj}; V_k = K_{ij} A_{jk} I_{inj} \\ V_l &= K_{ij} A_{jk} A_{kl} I_{inj}; V_m = K_{ij} A_{jk} A_{km} I_{inj} \end{aligned} \quad (19)$$

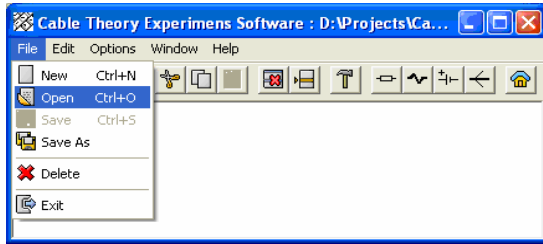
Bu ilişkilerde, Kural 1 ve Kural 3 açık bir şekilde kullanılmaktadır. Kural 2 ise, Kural 1 ve Kural 3'ün uygulanması için gerekli yük admitansını hesaplamak için gerekmektedir.

5. PROGRAMIN TANITIMI

Yazılım, Delphi 7.0 ortamında geliştirilmiş olup Windows İşletim Sistemi altında çalışmaktadır. Programın kaynak kodu 4832 satırdan oluşmaktadır. Program tarafından gereksinim duyulan disk alanı 919 KB'dır. Program çalıştırıldığında File, Edit, Options, Windows ve Help menülerinden oluşan ana sayfa görüntülenmektedir.

5. 1. File Menüsü

Ana sayfadaki File menüsü Şekil 5(a)'da gösterildiği gibi dosyalarla ilgili işlemleri gerçekleştiren komutları içermektedir. New komutu yeni bir dosya açmakta, Open komutu ise disk üzerinde kayıtlı CTF uzantılı dosyaları açmaktadır. Save komutu ile dosya disk üzerine kaydedilmektedir. Oluşturulmuş olan dendrit ağacının parametreleri ve yapısı Save As komutu ile farklı bir isim altında diske kayıt edilebilmektedir. Önceden oluşturulmuş bir dosyanın diskten kalıcı olarak silinmesi için ise Delete komutu kullanılmaktadır. Son olarak, Exit komutu ile kullanıcı programı kapatabilmektedir.



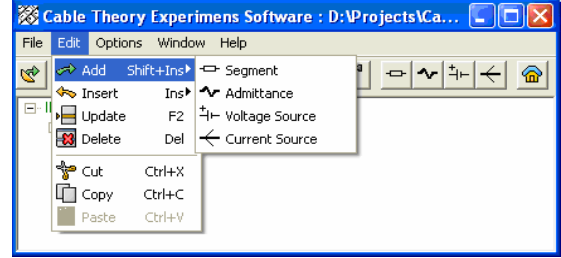
(a)

Şekil 5. Yazılımın (a) File menüsü

5. 2. Edit Menüsü

Ana sayfadaki Edit menüsü Şekil 5(b)'de gösterildiği gibi model parametrelerini ve oluşturulan dendrit ağacının yapısını düzenlemek için gerekli komutları içermektedir. Add komutu ile dendrit ağaç yapısında istenilen her hangi bir noktaya admitans, voltaj kaynağı ve akım kaynağı eklenebilmektedir. Silindirik dendrit segmenti yapıya Insert komutu ile eklenebilir. Yapıdaki her bir elemanın parametreleri Update komutu ile güncellenebilmektedir. Yapıdan seçilen herhangi bir

eleman Delete komutu ile silinebilmekte, elemanlar sırasıyla Copy, Cut ve Paste komutları ile kopyalanmakta, kesilmekte ve yapıştırılmaktadır. Bu işlemler standart Windows kullanıcılarının aşına oldukları komutlarla birebir aynıdır.

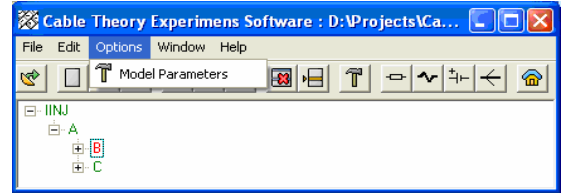


(b)

Şekil 5. Yazılımın (b) Edit menüsü

5. 3. Options Menüsü

Ana sayfadaki Options menü komutu ile Şekil 5(c)'da gösterildiği gibi, modele ait genel parametrelerin girilebilmesi için bir ara birim ekranı görüntülenmektedir.

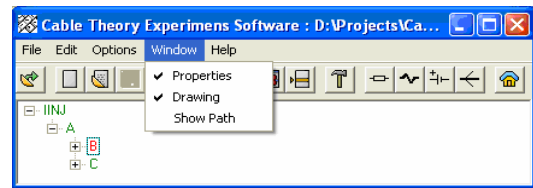


(c)

Şekil 5. Yazılımın (c) Options menüsü

5. 4. Window Menüsü

Ana sayfadaki Window menüsü ile Şekil 5(d)'de gösterildiği gibi, ekranda görüntülenecek pencerelerin seçimi için kullanıcıya üç seçenek sunulmaktadır: Properties, Drawing ve Show Path. Yapının üzerinde herhangi bir eleman için Properties komutu seçildiğinde, ağaç üzerinde bulunduğu yere bağlı olarak hesaplanmış olan parametreleri ayrı bir pencere halinde görüntülenir. Benzer şekilde, Drawing komutu yapıdaki herhangi bir eleman için seçildiğinde, bütün elemanları içeren yapıda seçilen eleman farklı bir renkte görüntülenir. Bu komut seçilen elemanın bulunduğu yerin bilgisini verir. Son olarak Show Path komutu seçilen elemanın yol bilgisini vermektedir.



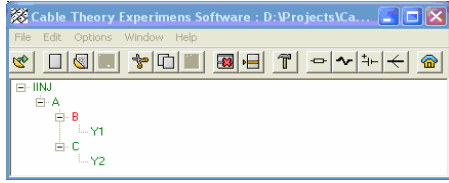
(d)

Şekil 5. Yazılımın (d) Window menüsü komutları

6. ÖRNEK BİR UYGULAMA

Bu kısımda, programın çalışmasını açıklamak için basit bir benzetim örneği verilmektedir. Oluşturulan ağaç yapısı bir dallanma noktası ile A, B ve C ile gösterilen üç adet silindirik segmentten oluşmaktadır. İlk silindirik parça ana dentriti oluşturmakta, diğer iki segment birer admitans ile sonlandırılmaktadır. Ana dentritin sol ucundan bir akım injekte edilmektedir.

Yapının parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir: $I_{inj} = 5 \text{ nA}$, $d_A = d_B = 2 \text{ } \mu\text{m}$, $d_C = 3 \text{ } \mu\text{m}$, $l_A = l_C = 20 \text{ } \mu\text{m}$, $l_B = 10 \text{ } \mu\text{m}$, $Y_B = 5 \text{ } \mu\text{S}$, $Y_C = 10 \text{ } \mu\text{S}$, $R_M = 4000 \text{ } \Omega\text{cm}^2$, $R_A = 100 \text{ } \Omega\text{cm}$. Şekil 6'daki gibi bir yapıya sahip bu modeli elde edebilmek için Şekil 7'deki gibi model parametreleri girildikten sonra Şekil 8'deki gibi modele ait elemanlar modele eleman ekleme ara birimleri kullanılarak tanımlanmalıdır.

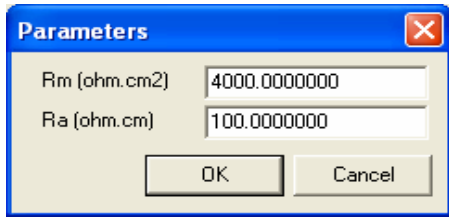


(a)

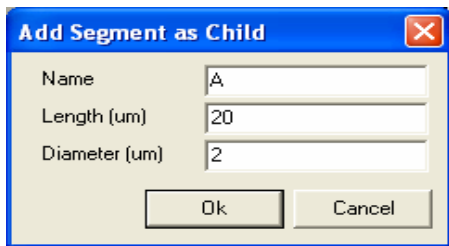


(b)

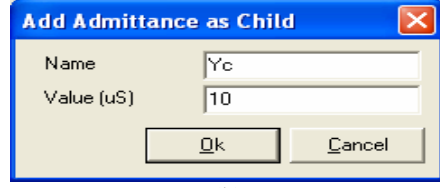
Şekil 6. Oluşturulmuş dentrit modeli. (a) ağaç yapısının görünümü ve (b) grafik olarak görünümü



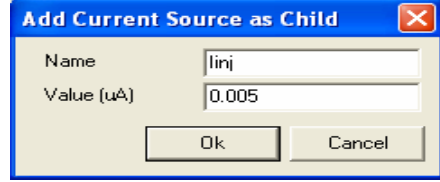
Şekil 7. Oluşturulacak modele ait hücre içi sitoplazmik öz ve hücre dışı akışkan iyonik ortam direnirliği parametrelerinin düzenlemesi arabirimi



(a)



(b)

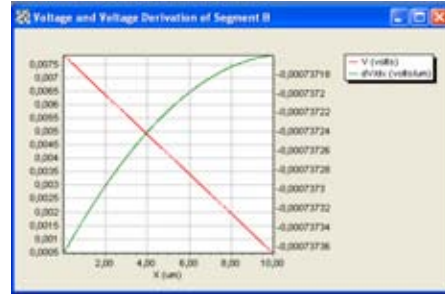


(c)

Şekil 8. Oluşturulacak modele (a) segment, (b) admitans ve (c) akım kaynağı ekleme arabirimi.

Şekil 7 ve Şekil 8 içinde girilen parametrelerde birim çelişmesi var gibi görünmesine rağmen, bu parametreler için literatürde sıkça karşılaşılan değerler kullanılmıştır. Bu değerlere uygun olarak arabirimler düzenlenmiş ve yazılımın içerisinde bu birim farklılıkları dikkate alınarak hesaplamalar yeniden düzenlenmiştir.

Şekil 6'daki B segmenti seçili iken B segmenti boyunca gerilimin ve gerilim değişiminin konuma (x) göre çizimi Şekil 9'daki gibi bir pencerede ve bu eleman için hesaplanan parametre değerleri ise Şekil 10'daki gibi ayrı bir pencerede görüntülenir.

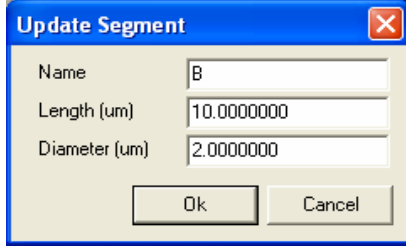


Şekil 9. Dentrit gerilimin kendisinin ve konuma bağlı değişiminin gösterimi

Property	Value	Unit
Name	B	
Length	10.0000000	um
Diameter	2.0000000	um
Lambda	447.2135955	
Electronic Length	0.0223607	um
Initial G	0.0070248	uS
Yin	0.2996426	uS
Yleft	0.3419409	uS
Yright	5.0000000	uS
MaxDepth	0.0591119	
MaxDepth	92726.9251879	ohm
Vleft	0.0079285	V
Vright	0.0004832	V

Şekil 10. Properties komutu ile B segmenti için hesaplanan değerler

Oluşturulan modelde bulunan herhangi bir elemana ait değerlerin değiştirilmesi için Edit menüsünden Update komutunun verilmesi gerekmektedir. Ağaç yapısında B segmenti seçili iken Update komutu çalıştırıldığında Şekil 11'deki gibi bir ara birim ile karşılaşılacaktır.



Şekil 11. Oluşturulan modeldeki herhangi bir elemanı değiştirme arabirimi

Oluşturulan modeldeki birden fazla segmentin birlikte oluşturdukları eşdeğer yapıya ait parametrelerin gözlemlenebilmesi için, ağaç yapısında bir segment seçili iken araştırılan yapının son elemanı grafik gösteriminden klavyede Shift tuşu basılı tutulup fare ile sol tıklanır. Araştırılan yapının sonuçlarının görüntülenmesi ile ilgili bir örnek Şekil 12'de görüntülenmektedir. Bu örnekte, A segmenti seçili olduğu halde klavyeden Shift tuşu basılı tutularak fare ile C segmenti modelin grafik gösteriminden seçilmiştir.

Property	Value	Unit
Path	A - C	
Vin	0.0396375	V
Vout	0.0002674	V
Iin	0.0000000	A
Iout	0.0004195	A
Aoverall	0.0067465	
Koverall	2928026.4415968	ohm

Şekil 12. Seçilen yol boyunca toplamda hesaplanan değerlerin gösterimi

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada, kablo teoremine dayalı pasif dendrit elektriksel özelliklerinin benzetimi için bir yazılım tanıtılmıştır. Geliştirilen yazılım, kullanıcının kendi dendrit ağaç yapısını oluşturmasına olanak vermektedir. Kullanıcı her bir bölmeyle detaylı olarak tanımlayabilmekte, oluşturduğu yapıyı görüntüleyebilmekte ve dendrit ağacının temel elektriksel özelliklerini gözlemleyebilmektedir. Program oldukça esnek olup pasif kablonun doğru

akım analizindeki tüm parametre değerlerini hesaplamakta ve kullanıcı dostu bir arabirim aracılığı ile kullanıcıya sunmaktadır. Program aynı zamanda eğitim amaçlı olarak da kullanılabilir.

8. KAYNAKLAR

Butz, E. G. and Cowan, J. D. 1974. Transient Potentials in Dendritic Systems of Arbitrary Geometry. *J. Biophys.* vol. 14, 661-689.

Jack, J. J. B., Noble, D. and Tsien, R. W. 1983. *Electric Current Flow in Excitable Cells* Clarendon Press.

Koch, C. and Poggio, T. 1985. A Simple Algorithm for Solving the Cable Equation in Dendritic Trees of Arbitrary Geometry. *J. Neurosci. Method.* vol. 12, 303-315.

Ohme, M. and Schierwagen, A. 1998. An Equivalent Cable Model for Neuronal Trees with Active Membrane. *Biol. Cybern.*, vol. 78, 227-243.

Özer, M., İşler, Y. ve Ekmekçi, N. H. 2004. "A Computer Software For Simulating Passive Dendrite Properties Based On The Cable Theory" **2nd Int. Symp. on Electrical, Electronic and Computer Eng. (NEU-CEE 2004)**, 11-13 March 2004. Nicosia, North Cyprus, 291-296.

Rall, W. 1957. Membrane Time Constant of Motoneurons. *Science* vol. 126, 454.

Rall, W. 1959. Branching Dendritic Trees and Motoneurons Membrane Resistivity. *Exp. Neurol.* Vol. 1, 491-527.

Rall, W. 1960. Membrane Potential Transients and Membrane Time Constant of Motoneurons. *Exp. Neurol.* Vol. 2, 503-532.

Rall, W. and Rinzel, J. 1973. Branch Input Resistance and Steady Attenuation for Input to One Branch of a Dendritic Neuron Model. *J. Biophys.* Vol. 13, 648-688.

Rall, W. and Agmon-Snir, H. 1999. *Cable Theory for Dendritic Neurons, In: Methods in Neuronal Modeling, From Ions to Networks*, Second Edition, Ed. Koch, C. and Segev, I., The MIT Press.

Rinzel, J. and Rall, W. 1974. Transient Response in a Dendritic Neuronal Model for Current Injected at one Branch. *J. Biophys.* Vol. 14, 759-790.

Segev, I. 1998. Cable and Compartmental Models of Dendritic Trees, In: The Book of Genesis, Second Edition, 51-77, Springer-Verlag, Eds. Bower, J. M. and Beeman, D., New York.

Segev, I. and Burke, R. E. 1999. Compartmental Models of Complex Neurons, In: Methods in

Neuronal Modeling, From Ions to Networks, Second Edition, Ed. Koch, C. and Segev, I., The MIT Press.

Steinberg, I. Z. 1996. On the Analytic Solution of Electrotonic Spread in Branched Passive Trees. *J. Comput. Neurosci.*, Vol. 3, 301-311.