

Creating 3D Geometric models of Cells and Organelles for Bioelectromagnetic Simulations

Sharifi E.¹ *MSc*, Bouchali A.H.¹ *MA*, Saviz M.* *PhD*

*Bioelectric Department, Biomedical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

¹Bioelectric Department, Biomedical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

Aims: Computation of the field distribution and the penetration of electromagnetic fields induced in the body and biological tissues are one of the major issues discussed in the bioelectromagnetic field; with access to the geometry of the cell and its organelles, the contribution of each component to the field's reception and the field distribution as well as the computation of impedance can accurately be estimated. The aim of this study was to create 3D geometric models of cells and organelles for bioelectromagnetic simulations.

Materials & Methods: The present study is a computational research study. In this study a complete electrical model for several cell types of the epidermis layer of human skin with its organelles was created by SAVI 1 software and innovative new algorithms. In this geometric model, organelles such as mitochondria, Golgi body, melanin pigments, ribosome, lysosome, and intracellular nucleus were considered. The microscopic 2D image was used to create organelles.

Findings: The geometric model was created for the organelles and the cellular sample was created for all layers of the epidermis in accordance with reality. The cells of basal cortex were nucleated in cubic form, the cells of spinosum cortex were polygonal and nucleated, the cells of granular cortex were flat and nucleated, and the stratum corneum had complete flat cells without nucleus.

Conclusion: Creating 3D geometric model of cells and organelles within it is possible for bioelectromagnetic simulations. This 3D model can be saved in mat, stl, and vox formats and retrieved in SAVI, CST studio, and MATLAB software.

Keywords

Cell Shape [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68048430>];

Cell Organelles [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68015388>];

Electric Impedance [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68017097>];

Electrical Properties [<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/mesh/68055590>]

*Corresponding Author

Tel: +98 (21) 64545569

Fax: +98 (21) 66468186

Post Address: Bioelectric Department, Biomedical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Hafez Street, Tehran, Iran. Postal Code: 1591634311

msaviz@aut.ac.ir

Received: October 5, 2016

Accepted: May 26, 2017

ePublished: June 21, 2018

ایجاد هندسه سه‌بعدی از سلول و اندامک‌های درون آن برای شبیه‌سازی‌های بیوالکترومغناطیس

الهام شریفی MSc

گروه بیوالکتریک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

امیرحسین بوچالی MA

گروه بیوالکتریک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

مهرداد ساویز PhD*

گروه بیوالکتریک، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

اهداف: محاسبه نحوه توزیع جریان و میزان نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی القاشده در بدن و بافت‌های زیستی از مباحث مطرح در حوزه بیوالکترومغناطیس است که با دسترسی به هندسه سلول و اندامک‌های درون آن می‌توان به‌طور دقیق سهم هر جزء را در دریافت میدان و توزیع جریان و محاسبه امپدانس برآورد نمود. هدف مطالعه حاضر ایجاد هندسه سه‌بعدی از سلول و اندامک‌های درون آن برای شبیه‌سازی بیوالکترومغناطیس بود.

مواد و روش‌ها: مطالعه حاضر پژوهشی از نوع محاسباتی است. در این مطالعه یک مدل الکتریکی کامل از سلول‌های قشرهای مختلف لایه اپیدرم پوست به‌همراه اندامک‌های درونی آن با کمک نرم‌افزار ساوی ۱ (SAVI 1) و الگوریتم‌های جدید ابتکاری ایجاد شد. در این شکل هندسی اندامک‌هایی مانند میتوکندری، جسم گلژی، رنگدانه ملانین، ریبوزوم، لیزوزوم و هسته درون سلول در نظر گرفته شدند. در ایجاد اندامک‌ها از تصویر دو بعدی میکروسکوپی آنها استفاده شد.

یافته‌ها: شکل هندسی برای اندامک‌ها و نمونه سلولی برای تمام قشرهای لایه اپیدرم متناسب با واقعیت ایجاد شد. سلول‌های قشر بازال به صورت سلول‌های مکعبی و دارای هسته، سلول‌های قشر اسپینوزوم چندوجهی و هسته‌دار، سلول‌های قشر گرانولار مسطح و هسته‌دار بودند و قشر شاخی نیز سلول‌های کامل مسطح و فاقد هسته داشت.

نتیجه‌گیری: ایجاد هندسه سه‌بعدی از سلول و اندامک‌های درون آن برای شبیه‌سازی بیوالکترومغناطیس امکان‌پذیر است. این مدل سه‌بعدی قابلیت ذخیره‌سازی به سه فرمت stl، mat، vox و بازایی در نرم‌افزارهای CST، SAVI studio و MATLAB را دارد.

کلیدواژه‌ها: شکل سلولی، اندامک‌های سلولی، امپدانس الکتریکی، خواص الکتریکی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۰۵

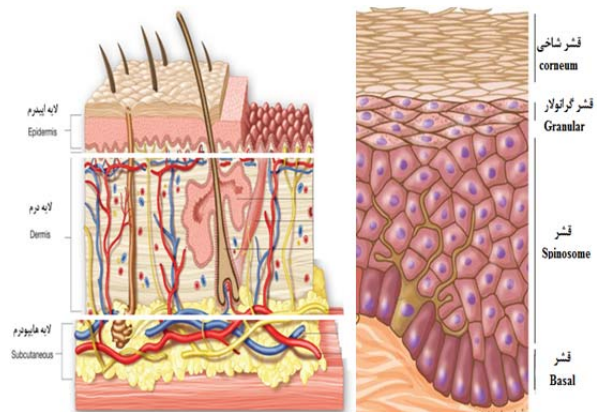
*نویسنده مسئول: msaviz@aut.ac.ir

مقدمه

یکی از راه‌های تشخیص سرطان پوست استفاده از اندازه‌گیری امپدانس است^[1]. در سال‌های اخیر مشخص شده است که شکل و محتوی سلول روی امپدانس اندازه‌گیری شده موثر است. پژوهش‌های متعددی روی مدل‌سازی پوست به‌منظور محاسبه امپدانس و خواص الکتریکی آن انجام شده است. در مدل‌های مورد استفاده، لایه‌های پوست یا به صورت یک لایه همگن در نظر گرفته شده‌اند و یا سلول‌های لایه حداکثر به همراه هسته‌شان مدل می‌شوند^[2]. از آنجا که شکل هندسی و خواص الکتریکی اجزا در محاسبات توزیع جریان درون بافت اهمیت می‌یابد، در مطالعه حاضر سعی شده است انواع سلول‌های لایه اپیدرم پوست به همراه اندامک‌های درونی آنها ساخته و در ادامه کار تحقیقاتی، برای مدل‌کردن پوست و محاسبه امپدانس آن از این مدل‌ها استفاده شود. مدل‌کردن در مقیاس زیرسلولی این امکان را می‌دهد تا بتوان اثر تغییر در ماهیت و یا ساختار اندامک‌های سلول بر امپدانس

نهایی را محاسبه کرد.

بافت پوست از سه لایه اصلی تشکیل شده است که به‌ترتیب از سطح اپیدرم، درم و هایپودرم نام دارند^[3]. در مطالعه حاضر سعی شد انواع سلول‌های لایه اپیدرم مدل شوند. لایه اپیدرم از چند قشر تشکیل شده است که به‌ترتیب از عمق به طرف سطح قشر بازال (SB)، قشر اسپینوزوم (SS)، قشر گرانولوزوم (SG) و قشر کورنئوم (SC) یا لایه شاخی هستند (شکل ۱). قشر اسپینوزوم به دو قسمت تقسیم شده و با اسم‌های SS L، SS H نام‌گذاری می‌شود. این تفکیک به علت متفاوت بودن هندسه و محتوی سلول‌های این دو لایه در قسمت بالا و پایین این قشر است. مطالعه حاضر با هدف ایجاد هندسه سه‌بعدی از سلول و اندامک‌های درون آن برای شبیه‌سازی بیوالکترومغناطیس انجام شد.



شکل ۱) قشرهای لایه اپیدرم پوست^[3]

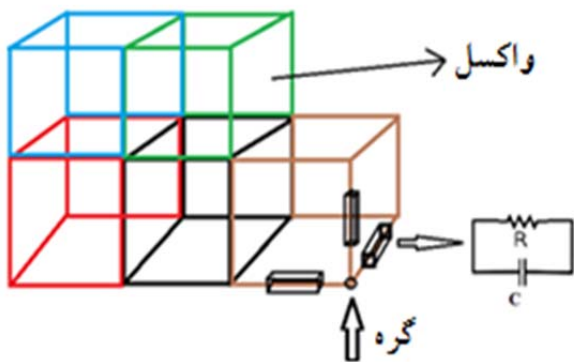
مواد و روش‌ها

مطالعه حاضر پژوهشی از نوع محاسباتی است. در این مطالعه با استفاده از تصاویر میکروسکوپی متعدد، اندازه و شکل سلول‌های هر کدام از قشرهای اپیدرم تخمین و توسط نرم‌افزار تولید اشکال هندسی SAVI 1 (ساوی ۱)^[4] ایجاد شدند. نرم‌افزار مذکور یک ابزار ایجاد اشکال هندسی واقع‌گرایانه زیستی است. الگوریتم‌ها و روش‌های استفاده‌شده در مطالعه حاضر شامل موارد زیر بود:

ایجاد اشکال هندسی با روش دوران و با استفاده از تصویر دوبعدی: برای ایجاد مدل هندسی سه‌بعدی از یک اندامک با فرض وجود تقارن در آن می‌توان مرزهای اندامک در تصویر میکروسکوپی دوبعدی آن را به صورت دستی یا اتوماتیک (با روش‌های پردازش تصویر نظیر snake) مشخص کرد، سپس یک محور دوران تعیین نمود تا شکل با دوران حول این محور ایجاد شود، مدل میتوکندری و جسم گلژی نیز با این روش ایجاد شده است (شکل ۲- الف).

ایجاد اشکال هندسی با کمک فرمول سوپرفرمولا (SF): سوپرفرمولا (SF) یک معادله هندسی ساده است که با کمک آن می‌توان اشکال هندسی متنوعی ایجاد کرد. روابط یک تا هفت، معادلات SF را بیان می‌کند که با تنظیم ۶ پارامتر a, b, m, n_1, n_2, n_3 می‌توان اشکال مختلفی مانند گلول قرمز، سلول جعبه‌ای، اشکال چندوجهی و در موارد ساده بیضی و کره ایجاد کرد. این فرمول برای ایجاد مکعب مستطیل با گوشه‌های انحادار به‌عنوان بدنه سلول به کار رفت و پارامترها به صورت $a, b, m, n_1, n_2, n_3 = 1, 4, 5, 4, 4, 4$ تنظیم شدند^[5] روابط یک تا هفت شامل موارد زیر هستند:

مکعب یک واکسل نامیده می‌شود. در خروجی واکسل یک ماتریس سه بعدی وجود دارد که درایه متناظر با حضور هر ماده با یک عدد مشخص تعیین شده است. در این روش می‌توان به هر ضلع مکعب در سه جهت یک امیدانس اختصاص داد (شکل ۳). بنابراین این امکان وجود دارد که به‌طور مثال در بررسی روش الکتروپوریشن در محل غشا از امیدانس غیرخطی استفاده نمود. نرم‌افزار ساوی می‌تواند هر شکل هندسی دلخواه را به مدل واکسل تبدیل و امکان استفاده از روش شبکه انتقالی و شبیه‌سازی‌های مداری را فراهم کند. مقادیر مقاومت و خازن معادل یک ماده در امیدانس مورد استفاده با توجه به خواص الکتریکی آن با روابط $R = (\sigma_a^A)^{-1}$ و $C = \epsilon \epsilon_0 \frac{A}{d}$ قابل محاسبه است.



شکل ۳) نمایش واکسل و نحوه اختصاص امیدانس در روش شبکه انتقالی

ذخیره به فرمت STL: فایل‌های STL تنها هندسه سطح یک جسم سه بعدی را بدون هیچ گونه نمایندگی از رنگ، بافت و یا دیگر ویژگی‌های مدل توصیف می‌کنند. در این فرمت که یک زبان استاندارد مثلث بندی است، سطح مدل سه بعدی مثلث بندی شده و اطلاعات این مثلث‌ها ذخیره می‌شود تا در نرم‌افزار دیگری بازگشایی شود (شکل ۲- الف).

شمارش و استخراج تعداد اندامک‌ها: اندامک‌های درونی مانند هسته، میتوکندری، لیزوزوم، جسم گلژی و رنگدانه ملانین نیز با روش‌های پردازش تصویر و مدل‌سازی هندسی در ساوی ایجاد شدند. اندازه هر اندامک از منابع مختلف به دست آمد [6]، و با تصویر میکروسکوپی موجود از آنها چک شد. با توجه به مقیاس شکل سلول مکعبی از قشر بازال ابعاد متوسط میتوکندری استخراج شد (شکل ۴، جدول ۱)، اما برای مشخص کردن تعداد این اندامک‌ها در سلول از دو روش می‌توان استفاده کرد که روش اول تخمین تعداد در کل حجم سلول با شمارش تعداد در یک تصویر دوبعدی و روش دوم استفاده از داده‌های نسبت حجمی موجود در مطالعات پیشین است [8]، که با استفاده از تصاویر متعدد میکروسکوپی از سلول حاصل شده که در مطالعه حاضر از نتایج حاصل از روش دوم به دلیل نزدیک‌تر بودن به واقعیت استفاده شد (جدول ۲).

جدول ۱) اطلاعات ابعاد و هندسه اندامک‌ها

نام اندامک	ابعاد (میکرومتر)	شکل هندسی
میتوکندری	۰/۳×۰/۳×۰/۶	محصول در بیضی
گلژی (ارتفاع و قطر قاعده)	(۰/۷، ۰/۹)	محصول در مخروط
ریبوزوم	۰/۰۳۰	کروی
لیزوزوم	۰/۲۸×۰/۲۸×۰/۱۳۵	بیضی
رنگدانه ملانین	۰/۱۵×۰/۱۵×۰/۲	بیضی

رابطه (۱)

$$P1 = \left| \frac{1}{a} \cos(m \frac{\theta}{4}) \right|^{n_2} + \left| \frac{1}{b} \sin(m \frac{\theta}{4}) \right|^{n_3}$$

رابطه (۲)

$$P2 = \left| \frac{1}{a} \cos(m \frac{\theta}{4}) \right|^{n_2} + \left| \frac{1}{b} \sin(m \frac{\theta}{4}) \right|^{n_3}$$

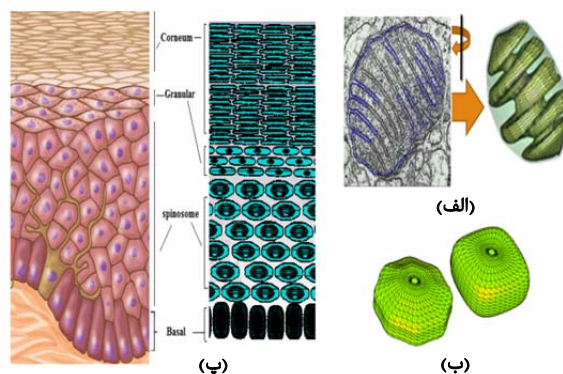
رابطه (۳، ۴)

$$r1 = \frac{1}{n_1 \sqrt{|P1|}} \quad r2 = \frac{1}{n_1 \sqrt{|P2|}}$$

رابطه (۵-۷)

$$x = r1 \cos(\phi) r2 \cos(\theta) \quad y = r1 \sin(\phi) r2 \sin(\theta) \quad z = r2 \sin(\theta)$$

بدنه سلولی با این فرمول ایجاد شد (شکل ۲- ب).



شکل ۲) امکانات نرم‌افزار ساوی

الف) ایجاد شکل سه بعدی از تصویر دوبعدی

ب) نمونه بدنه سلول ایجاد شده با رابطه SF

پ) تصویر سمت راست مدل هندسی سه بعدی ساخته شده و تصویر چپ شماتیکی از قشرهای مختلف لایه اپی‌درم پوست

بخش یک اندامک در سلول با توزیع تصادفی و تعداد قابل تعیین:

بعضی از اندامک‌ها به خصوص در لایه‌های عمقی اپیدرم پوست به تعداد بالایی در سلول حضور دارند اما نحوه دقیق توزیع آنها مشخص نیست. در خصوص برخی از اندامک‌ها مانند رنگدانه ملانین که نقش مهمی در محافظت از هسته در برابر اشعه فرابنفش خورشید دارد، محل حضور آن عمدتاً در اطراف هسته است ولی در خصوص میتوکندری چنین اطلاعاتی وجود ندارد. بنابراین برای توزیع اندامک‌ها از یک توزیع تصادفی استفاده شد. از آنجا که یک نمونه میتوکندری (و یا چند نمونه) با توزیع تصادفی کپی شد، برای جلوگیری از مشابهت جهت‌گیری اندامک‌ها در سلول هر اندامک با زاویه‌ای تصادفی چرخش داده می‌شود. رابطه زیر نحوه محاسبه مختصات شکل دوران داده شده در سه جهت با سه زاویه $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ را نشان می‌دهد.

رابطه (۸)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_x) & -\sin(\theta_x) \\ 0 & \sin(\theta_x) & \cos(\theta_x) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) & 0 & \sin(\theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_y) & 0 & \cos(\theta_y) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_z) & -\sin(\theta_z) & 0 \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x & y & z \\ x & y & z \\ x & y & z \end{bmatrix}$$

[مختصات نقاط پس از چرخش] = [مختصات نقاط شکل اصلی]

ذخیره به فرمت‌های مناسب برای MATLAB، CST و

COMSOL تبدیل شکل هندسی به واکسل: روش شبکه انتقالی یکی از روش‌های شبیه‌سازی میدانی و بررسی نحوه توزیع میدان در بافت است. در این روش تمام حجم بافت/سلول به مکعب‌هایی با ابعاد مشخص تقسیم می‌شود که این عمل واکسل کردن و هر

جدول ۲) اطلاعات ابعاد و تعداد سلول و اندامکها

ویژگی‌ها	قشر بازال	قشر اسپینوزوم	قشر گرانولار	قشر کورنئوم ^۲
ابعاد بدنه ^۱ (میکرومتر)	۱۰×۶×۶	۸/۵×۷/۵×۷/۵	۱۴×۱۴×۴	۱×۱۰×۱۰
ابعاد هسته (میکرومتر)	۴×۴×۶	۵×۵×۶	۷×۷×۲	-
تعداد لایه	۱	۴	۳	۲۰
تعداد گلژی	۱۰	۳۴	۱۲	۲۰
تعداد میتوکندری	۵۵۳±۱۰۲	۴۶±۱۴۲	۱۷۷±۴۶	صفر
تعداد لیزوزوم	۳±۲۶	۱۷±۲۰	صفر	صفر
تعداد ریبوزوم	۱۱۴۱۰۶±۲۵۳۲۵۱	۱۸۵۲۸۰۴±۲۱۷۹۲۶	۱۱۱۲۴۳۲±۳۷۰۴۷۸	صفر

۱) تمامی ابعاد به صورت قطر بیان شده است. بدنه به صورت مکعب و هسته به صورت بیضی در نظر گرفته شده است. ۲) سطح سلول این لایه دو تا سه برابر سطح لایه قبل می‌باشد [7]

منبع: تصاویر میکروسکوپی [8, 10]

تخمین با استفاده از تصویر میکروسکوپی: اگر در سلول مکعبی قشر بازال (شکل ۴) [9] ابعاد بدنه برابر با $a_2 \times b_2 \times b_2$ میکرومتر، ابعاد هسته بیضی $a_0 \times b_0 \times b_0$ میکرومتر و ابعاد میتوکندری بیضی $h \times a \times a$ میکرومتر مکعب و تعداد میتوکندری در یک برش دوبعدی n باشد (در یک برش با ضخامت h میکرومتر)، براساس تناسب بین حجم قابل مشاهده و حجم سیتوپلاسم، تعداد میتوکندری در کل حجم سلول با رابطه زیر برابر است:

$$n^{3D} = n \times \left(\frac{V}{V_i}\right) = n \times \frac{8a_2b_2^2 - \frac{4}{3}\pi a_0b_0^2}{h \times (4a_2b_2 - \pi a_0b_0)}$$

که n تعداد میتوکندری شمارش شده در تصویر، a_2, b_2 شعاع

سلول و a_0, b_0 شعاع هسته است.

در نتیجه درصد حجمی حضور میتوکندری با فرمول زیر برابر است:

$$v_{mito} = \frac{V_{mito}}{V_{cell}} = \frac{\frac{4}{3}\pi \times a \times a \times h}{a_2 \times b_2 \times b_2 - \frac{4}{3}\pi \times a_0 \times b_0 \times b_0} \times n^{3D}$$

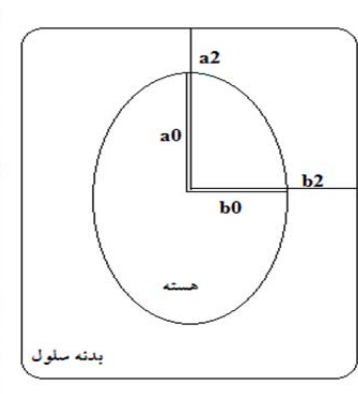
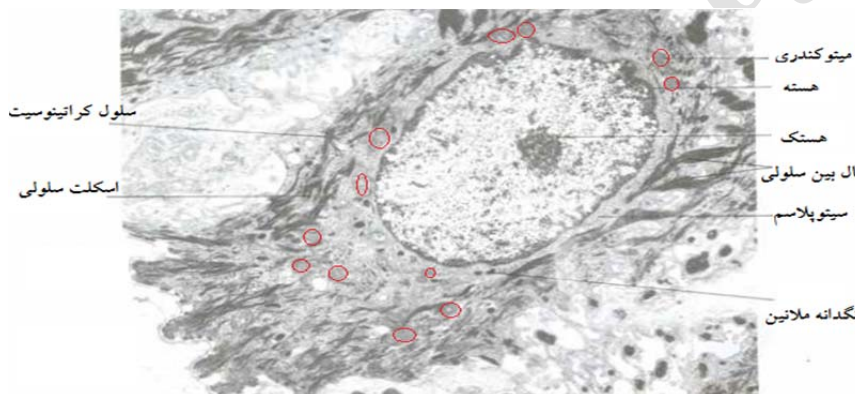
استفاده از نسبت حجمی: با استفاده از نسبت حجمی گزارش شده در مطالعات پیشین و با مشخص بودن ابعاد سلول، هسته و اندامکها (جدول‌های ۱ و ۲) می‌توان تعداد اندامکها را با فرمول

$$\text{تعداد اندامک} = \frac{\text{نسبت حجمی در سیتوپلاسم} \times \text{حجم سیتوپلاسم}}{\text{حجم اندامک}} \text{ محاسبه کرد [10].}$$

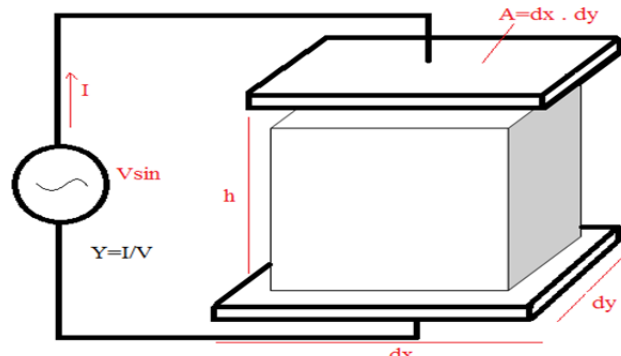
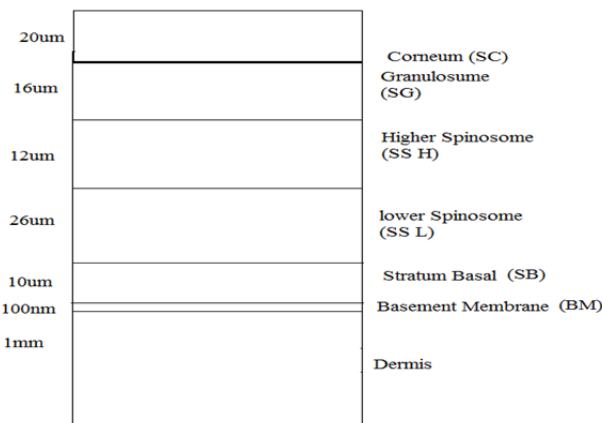
به منظور بررسی کاربرد و اعتبار مدل‌های هندسی ایجاد شده، با فرض متناوب بودن چینش سلول‌ها در بافت و با استفاده از مدل هندسی سلول هر زیرلایه، خواص الکتریکی آن زیرلایه از شبیه‌سازی در نرم‌افزار HSPICE.sp1.2012 محاسبه شد (شکل ۵). طبق رابطه زیر رسانایی و گذردهی هر زیرلایه با اندازه‌گیری جریان خروجی شبیه‌سازی محاسبه و در نهایت خواص الکتریکی لایه اپیدرم با موازی قراردادن لایه‌ها (سری شدن امپدانس‌ها) محاسبه شدند. برای قسمت درمیس و غشای پایه از دادگان تجربی موجود استفاده شد [11].

$$Y = \frac{I < 0i}{V < 0v} = G + j\omega C = \sigma \frac{A}{h} + j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{h}$$

نتایج حاصل با نتایج موجود از خواص الکتریکی پوست مقایسه و بررسی شد. دقت شود که اطلاعات تجربی از خواص الکتریکی هر زیرلایه موجود نیست و نتایج خواص الکتریکی کل اپیدرم ایجاد شده از مدل‌های هندسی سلولی به همراه داده‌های درمیس با دادگان موجود برای پوست مقایسه شدند.



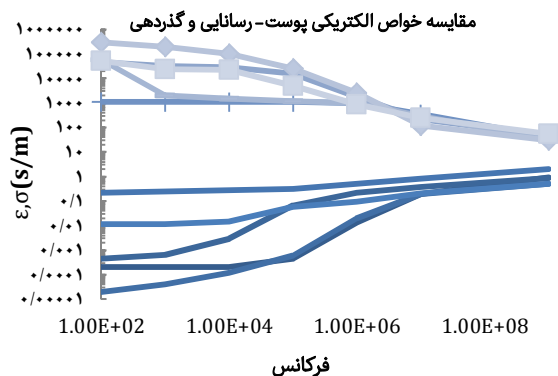
شکل ۴) سلول قشر بازال [9]



شکل ۵) نمایی از نحوه محاسبه خواص الکتریکی هر لایه و موازی بودن لایه‌های اپیدرم. بلوکی که بین صفحات خازن شبیه‌سازی قرار می‌گیرد شامل مدل‌های (ناهمگن) سلولی با اندامکها است

تفکیک بافت سالم از بیمار، مقدار امپدانس بافت بیمار اهمیت ندارد، بلکه تغییرات نسبت به حالت سالم معیار تفکیک است. بنابراین مدل‌های هندسی موجود توانایی مدل‌سازی پوست و بیماری‌های پوستی با منشا تغییر در مشخصات فیزیکی را دارند. در نمودار ۱ خواص الکتریکی اپیدرم پوست با نتایج تجربی موجود [12] مقایسه شده است.

از جمله پیشنهادات این مطالعه می‌توان به امکان افزودن خاصیت غیرخطی غشا به مساله و همچنین در نظر گرفتن اتصالات بین سلولی در مدل سلولی اشاره نمود. محدودیت مطالعه حاضر نیز قابلیت‌های محدود نرم‌افزار ساوی در ایجاد اشکال و تبدیل آنها به مدل واکسل و همچنین نحوه توزیع اندامک‌ها و یکسان در نظر گرفتن ابعاد میتوکندری‌ها بود که با پیشرفت این نرم‌افزار می‌توان این محدودیت‌ها را برطرف کرد.



نمودار ۱) مقایسه نتایج مدل‌سازی بافت پوست با داده‌های تجربی آزمایشگاهی و مدل‌های ریاضی [12]

نتیجه‌گیری

ایجاد هندسه سه‌بعدی از سلول و اندامک‌های درون آن برای شبیه‌سازی بیوالکترومغناطیس امکان‌پذیر است. این مدل سه‌بعدی قابلیت ذخیره‌سازی به سه فرمت stl، mat و vox و بازایی در نرم‌افزارهای CST studio، SAVI و MATLAB را دارد.

تشکر و قدردانی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشد.

تاییدیه اخلاقی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشد.

تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافی بین نویسندگان مقاله وجود ندارد.

سهم نویسندگان: الهام شریفی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری (۴۵٪)؛ امیرحسین بوجالی (نویسنده دوم)، نگارنده بحث (۱۵٪)؛ مهرداد ساویز (نویسنده سوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)

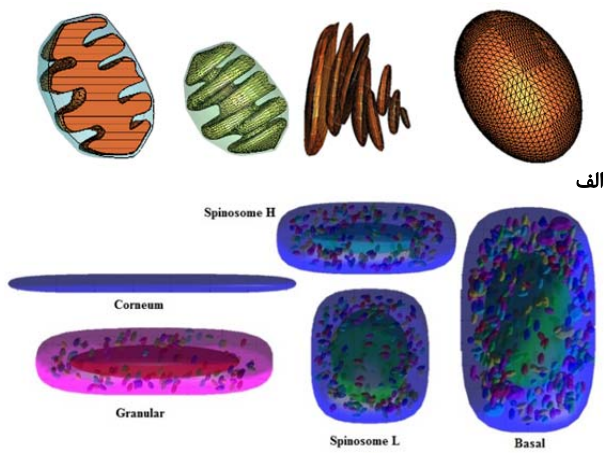
منابع مالی: موردی از سوی نویسندگان گزارش نشد.

منابع

- 1- Aberg P, Nicander I, Hansson J, Geladi P, Holmgren U, Ollmar S. Skin cancer identification using multifrequency electrical impedance-a potential screening tool. IEEE Trans Biomed Eng. 2004;51(12):2097-102.
- 2- Huclova S, Erni D, Fröhlich J. Modelling effective

پایته‌ها

شکل هندسی برای اندامک‌ها و نمونه سلولی برای تمام قشرهای لایه اپیدرم متناسب با واقعیت ایجاد شد (شکل ۶)، سلول‌های قشر بازال به صورت سلول‌های مکعبی و دارای هسته، سلول‌های قشر اسپینوزوم چندوجهی و هسته‌دار، سلول‌های قشر گرانولار مسطح و هسته‌دار بودند و قشر شاخی نیز سلول‌های کامل مسطح و فاقد هسته داشت.



شکل ۶) الف) نمونه‌ای از شکل هندسی اندامک‌های درون سلول. به ترتیب از راست لیزوزوم، جسم گلژی و میتوکندری
ب) قسمت ب) نمونه‌ای از سلول‌های قشرهای مختلف لایه اپیدرم پوست، به ترتیب از راست سلول بازال، اسپینوزوم و گرانولار

بحث

مطالعه حاضر با هدف ایجاد هندسه سه‌بعدی از سلول و اندامک‌های درون آن برای شبیه‌سازی بیوالکترومغناطیس انجام شد.

با استفاده از نرم‌افزار ساوی و تصاویر میکروسکوپی می‌توان شکل‌های واقع‌گرایانه از سلول به همراه اندامک‌های آن ایجاد کرد. امکان تبادل مدل‌ها بین نرم‌افزارهای CST، MATLAB و ساوی برقرار است. علاوه بر این از جمله الگوریتم‌های جدید می‌توان به کپی تعداد زیادی از یک شکل با توزیع و جهت‌گیری تصادفی، و تولید مدل واکسل اشاره نمود که به نرم‌افزار افزوده شد و در تولید مدل‌های سلولی این مطالعه به کار رفتند. در نهایت می‌توان از مدل‌های هندسی حاصل در بحث محاسبه امپدانس بافت، و محاسبات توزیع میدان استفاده کرد. نمونه‌ای از سلول‌های قشرهای مختلف لایه اپیدرم پوست به همراه اندامک‌های درونی آنها در مطالعه حاضر ایجاد شد. ایجاد مدل واکسل از مدل‌های هندسی این امکان را می‌دهد که برای هر واکسل، امپدانس متناسب با ماده درون آن جزء تعریف کرد و حتی می‌توان در محل حضور غشا از مدل امپدانس غیرخطی استفاده نمود که به‌ویژه در بحث الکتروپوریشن می‌تواند کارساز باشد.

با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی پوست با نتایج مدل‌های ریاضی حاصل از اندازه‌گیری تجربی موجود مشاهده شد که نتایج مدل به واقعیت نزدیک بود و روند تغییرات مشابه دیده شد اما علت تفاوت نتایج را می‌توان به دلایلی از جمله فرض یکسان بودن سلول‌ها در بافت، توزیع تصادفی اندامک‌ها در سلول، متفاوت بودن درصد مواد و خصوصیات فیزیکی سلول‌ها در بافت‌های مختلف ربط داد. دقت شود که در روش‌های اندازه‌گیری امپدانس برای

- secretion of cellular lipids. *J Lipid Res.* 1991;32(10):1539-70.
- 8- Klein-Szanto AJ. Clear and dark basal keratinocytes in human epidermis, a stereologic study. *J Cutan Pathol.* 1977;4(5):275-80.
- 9- Sathananthan AH. Human cell and tissue fine structure for teaching and research in stem cells. 1st Volume. Sri Lanka: Professor Arunachalam Henry Sathananthan; 2015.
- 10- Hartinger AE, Guardo R, Kokta V, Gagnon H. A 3-D hybrid finite element model to characterize the electrical behavior of cutaneous tissues. *IEEE Trans Biomed Eng.* 2010;57(4):780-9.
- 11- Walker DC, Brown BH, Smallwood RH, Hose DR, Jones DM. Modelled current distribution in cervical squamous tissue. *Physiol Meas.* 2002;23(1):159.
- 12- Gabriel S, Lau RW, Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Phys Med Biol.* 1996;41(11):2271.
- dielectric properties of materials containing diverse types of biological cells. *J Phys D, Appl Phys.* 2010;43(36):365405.
- 3- Urken ML, Mehra S. About the head & neck cancer guide [Internet]. New York: THANC Foundation; 2016 [cited 2016 May 22]. Available from: <https://headandneckcancerguide.org/about/>
- 4- Saviz M, Faraji Dana R. Realistic cell and organelle shape modeling for computational bioengineering: A new open-source toolbox. 2014 22nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). New Jersey: IEEE; 2014.
- 5- Huclova S, Erni D, Fröhlich J. Modelling and validation of dielectric properties of human skin in the MHz region focusing on skin layer morphology and material composition. *J Phys D, Appl Phys.* 2012;45(2):025301.
- 6- Zelickson AS, Hartmann JF. An electron microscopic study of human epidermis. *J Investig Dermatol.* 1961;36(2):65-72.
- 7- Schmitz G, Müller G. Structure and function of lamellar bodies, lipid-protein complexes involved in storage and