بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

مطالعه‌ی گرمایش پوست توسط امواج مایکروویو

مهشاد حاجیان، محمد علی انصاری، علیرضا نیکنام

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی تهران
mahshashajian@yahoo.com, m_ansari@sbu.ac.ir, a-niknam@sbu.ac.ir

چکیده – در این مقاله، پاسخ گرمایی بافت پوست انسان که تحت تاثیر تابش امواج مایکروویو قرار دارد به دو روش تحلیلی و تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان بررسی شده‌است. با توجه به اینکه در گرمایش الکترومغناطیسی، توزیع دما در نمونه وابستگی زیادی به خصوصیات دی‌الکتریک ماده که تابعی از فرکانس، دما و ترکیب ماده است، دارد، بنابراین، ما روشی را برای نشان دادن وابستگی دمایی خصوصیات دی‌الکتریک پوست انسان برای بدست‌آوردن توزیع دمایی در زمان‌های مختلف ارائه دادیم. نتایج ما نشان می‌دهد در فرکانس معینی، تشدید قابل توجهی داریم.

کلید واژه- پوست، امواج مایکروویو، روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان

Study of skin Tissue Heating by Microwave Radiation

Mahshad Hajian, Mohammad Ali Ansari, and Alireza Niknam

Laser and Plasma Research Insititute, Shahid Beheshti university, Tehran, Iran
mahshashajian@yahoo.com, m_ansari@sbu.ac.ir, a-niknam@sbu.ac.ir

Abstract- In this paper, the thermal response of human skin tissue under microwave irradiation is investigated by both the finite-difference time-domain (FDTD) simulation and an analytical method. Given that in the electromagnetic heating, the temperature distribution within a sample greatly depends on the dielectric properties which are functions of frequency, temperature and the composition of the object, therefore, we presented a method to incorporate temperature dependent properties of the skin tissue in determining the temperature distribution at different times. Our results show that there is a significant resonance in a certain frequency.

Keywords: Skin, Microwave, Finite difference time domain method

۱-مقدمه

در سال‌های اخیر، نگرانی‌ها درباره‌ی خطرهای ناشی از منتشر شدن امواج از دستگاه‌های مختلف (مانند: دستگاه‌های پزشکی، اجاق‌های ماکروویو و ...) برای سلامت انسان افزایش پیدا کرده‌است[1]. عمق نفوذ این امواج کوچک است و گرمایش در پوست اتفاق می‌افتد. قابلیت گرمایش الکترومغناطیسی به توانایی ماده در جذب انرژی الکترومغناطیسی و تبدیل آن به انرژی گرمایی بستگی دارد [2]. میزان انرژی جذب شده و افزایش دما به عامل‌های مختلفی همچون فرکانس، شدت و مدت زمان

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

تابش بستگی دارد. در حال حاضر امواج مایکروویو کاربردهای درمانی فراوانی از جمله چشم‌پزشکی، تشخیص و درمان سرطان دارد. بنابراین گروه‌های زیادی وجود دارند که به مطالعه برهمکنش امواج مایکروویو با بافت‌های بدن انسان پرداخته‌اند. بعنوان مثال برهمکنش امواج الکترومغناطیسی با یک نمونه مکعب مستطیلی از بافت موجود زنده که از دو طرف مورد تابش قرار گرفته‌است توسط حسان و دوتا بررسی شده‌است [۳]. در پژوهشی دیگر، اثر جمجه و مایع مغزی نخاعی در انتشار امواج ماکروویو در مغز انسان مطالعه شده‌است [۴].

با توجه به اینکه پوست یکی از بزرگترین ارگان‌های بدن می‌باشد و اولین سد دفاعی را در مقابل عوامل بیماری‌زا و محیطی تشکیل می‌دهد. بنابراین، در این مقاله به مطالعه‌ی برهمکنش امواج مایکروویو با پوست می‌پردازیم. ابتدا وابستگی خواص دی‌الکتریک پوست به دما و فرکانس را بدست می‌آوریم[۵-۶]. دمای پوست به دو روش تحلیلی و تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان در چند فرکانس و توان و پس از یک ثانیه تابش مایکروویو برای نمونه پوست واقعی بدست می‌آید و سپس باهم مقایسه شده‌است.

۲- مشخصات فیزیکی پوست طبیعی

بیشتر انرژی اموج مایکرویو در پوست جذب می‌شود. بنابراین در این شبیه‌سازی پوست را شامل یک لایه درنظر می‌گیریم. همچنین برای مدل‌سازی خواص فیزیکی پوست ما از مدل ترکیبی براگمن استفاده می‌کنیم. در این مدل پوست را به دو فاز تقسیم می‌کنند(محتوای سیال و بافت خشک) و برحسب درصد وجود این دوفاز در آن لایه خواص فیزیکی لایه بدست می‌آید[1].

$$(f)\frac{\varepsilon_w-\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_w+2\varepsilon_{eff}}+(1-f)\frac{\varepsilon_{dry}-\varepsilon_{eff}}{\varepsilon_{dry}+2\varepsilon_{eff}}=0 \qquad (۱)$$

که در آن ε_w ، ε_{dry} و ε_{eff} گذردهی آب، بافت خشک و برایند هستند و f کسری از آب که در بافت وجود دارد، است. وابستگی گذردهی آب به دما و فرکانس با معادله‌ی دبای بدست می‌آید که به صورت زیر می‌باشد[۵].

$$\varepsilon_r=\varepsilon_\infty+\frac{\varepsilon_s-\varepsilon_\infty}{1+j\omega\tau} \qquad (۲)$$

که در آن ε_∞، ε_s، τ و ω گذردهی اپتیکی(گذردهی فرکانس بالا)آب، گذردهی ایستایی(گذردهی فرکانس پایین)آب، زمان واهلش آب و فرکانس زاویه‌ای هستند که ازروابط زیر بدست می‌آیند[۵]:

$$\varepsilon_s=10^{1.94404-1.991\times10^{-3}(T-273.15)} \qquad (۳)$$

$$\varepsilon_\infty=5.77-2.74\times10^{-2}(T-273.15) \qquad (۴)$$

$$\tau=(3.754\times10^{-15})(1+(7\times10^{-5})\times (T-300.65)^2)\exp(2.2975\times10^3/T) \qquad (۵)$$

با قراردادن گذردهی بافت و محتوای سیال در معادله براگمن ضریب گذردهی لایه اپیدرم-درم به صورت $\varepsilon_{eff}=(-b+\sqrt{b^2-4ac})/2a$ بدست می‌آید. که در آن $a=2$ ، $b=3f\varepsilon_{dry}-2\varepsilon_{dry}-3f\varepsilon_w+\varepsilon_w$ و $c=\varepsilon_w\varepsilon_{dry}$ می‌باشند.

برای بدست‌آوردن گذردهی اپتیکی، گذردهی ایستایی و زمان واهلش پوست، ابتدا ε_{eff} در دمای معین برحسب فرکانس رسم می‌شوند و سپس با تطبیق دادن آن با معادله دبای این سه پارامتر برای پوست در آن دما بدست می‌آید همین کار را برای چند دمای دیگر انجام می‌شود. اکنون این ضرایب را در دماهای مختلف وجود دارد بنابراین می‌توان آن‌ها را برحسب دما با یک تابع مناسب تطبیق داد. بنابراین وابستگی دمایی و فرکانسی ضریب گذردهی نسبی پوست به صورت زیر (با استفاده از معادله دبای)بدست می‌آید.

$$\varepsilon_s=(3.714e-4)T^3-0.3476T^2+108.2T-1.11e4 \qquad (۶)$$

$$\varepsilon_\infty=(5.401e-5)T^3-0.05069T^2+ \qquad (۷)$$

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

$$15.83T-1641$$

$$\tau=(3.572e-17)T^3-(3.114e-14)T^2+(8.857e-12)T-(8.112e-10) \quad (۸)$$

۲-۱ حل تحلیلی برهمکنش امواج مایکروویو با پوست

با توجه به اینکه میدان درون پوست به صورت زیر بدست می‌آید(اندیس 0 برای محیط و اندیس 1 برای پوست می‌باشد):

$$E_1=T_{01}E_0\exp(i\chi_1 z) \quad (۹)$$

که در آن $T_{01}=2\xi_1/(\xi_1+\xi_0)$ ضریب تراگسیل و $\xi=\mu\omega/\chi$ امپدانس ذاتی محیط می‌باشد. E اندازه میدان الکتریکی، μ نفوذپذیری مغناطیسی است و ضریب انتشار در پوست به صورت $\chi_1=\sqrt{\omega^2\mu_0\varepsilon_0(\kappa'+i\kappa'')}$ می‌باشد. $\varepsilon=\varepsilon_0(\kappa'+i\kappa'')$ ضریب گذردهی پوست است (κ' ضریب گذردهی استاتیک نسبی و κ'' اتلاف نسبی دی‌الکتریک می‌باشد).

معادله ی توزیع دمایی در پوست به صورت زیر می‌باشد:

$$\nabla^2T+\frac{\dot{q}_{(T,z)}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (۱۰)$$

که در آن $\dot{q}=(1/2)\omega\varepsilon_0\kappa''|E|^2$ (انرژی پراکنده شده در واحد حجم) و $(1/\alpha)=(\rho c_p/k)$ می‌باشد.

معادله انرژی ارائه شده غیرخطی می‌باشد، با این وجود می‌توانیم مسئله را خطی در نظر بگیریم با این شرط که توزیع دمایی برای زمان بسیار کوتاهی مورد بررسی قرار بگیرد. در آن صورت به موجب تغییرات جزیی در دما نمونه، تغییرات خواص دی‌الکتریک قابل چشمپوشی خواهد بود.

شرایط مرزی و اولیه برای این سیستم به کمک قانون خنک‌سازی نیوتن ($q_{conv}=h\Delta T$) و قانون رسانش حرارتی فوریه ($q_{cond}=-K\nabla T$) تعیین می‌شود. که درآن h ثابت همرفت و K ثابت رسانش است.

با انتقال فوریه می‌توان مشتق‌های جزئی نسبت به مکان که در معادله توزیع دمایی وجود دارد را حذف کرد و معادله توزیع را در فضای فوریه به آسانی حل کرد. بنابراین دما پس از گذشت یک بازه زمانی کوچک بدست می‌آید و سپس دمای بدست آمده را به عنوان دمای اولیه در نظر گرفته و سپس دوباره مراحل ذکر شده را طی می‌کنیم بنابراین دما به صورت زیر بدست می‌آید.

$$T=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\gamma\sin(\eta_n z)+\eta\cos(\eta_n z)}{\sqrt{\frac{b(\eta_n{}^2+\gamma^2)+2\gamma}{2}}}[c(\eta_n,b,\theta_i)e^{-\alpha\eta_n{}^2\tau}+\frac{\Phi}{\alpha\eta_n{}^2}(1-e^{-\alpha\eta_n{}^2\tau})]+T_\infty \quad (۱۱)$$

که در آن $\gamma=h/k$ و η_n از حل معادله $\tan(\eta b)=\gamma/\eta$ بدست می‌آید و b عمق نفوذ می‌باشد. $\Phi=\alpha\bar{\dot{q}}/k$ و $\bar{\dot{q}}=\int_0^b\dot{q}K(\eta_n,z)dz$ می‌باشد.

۲-۲ حل عددی برهمکنش امواج و پوست

جهت شبیه‌سازی برهمکنش امواج الکترومغناطیسی با محیط‌های مختلف بدون شک روش تفاضل محدود در حوزه زمان به عنوان مهم‌ترین ابزار تحلیل امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های مختلف از جمله پلاسما محسوب می‌شود که در این پژوهش از این روش استفاده شده‌است.

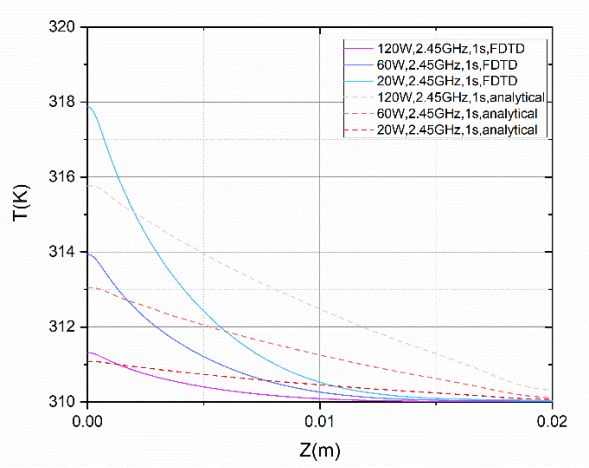
۳- نتایج

در شکل (۱) دمای پوست برحسب عمق به دو روش تحلیلی و عددی محاسبه شده‌است. در هر دو روش تاعمق خاصی افزایش دما صورت می‌گیرد، ولی در روش تحلیلی با افزایش دمای کمتری روبه‌رو هستیم که این نشان دهنده دقت بیشتر این روش است.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

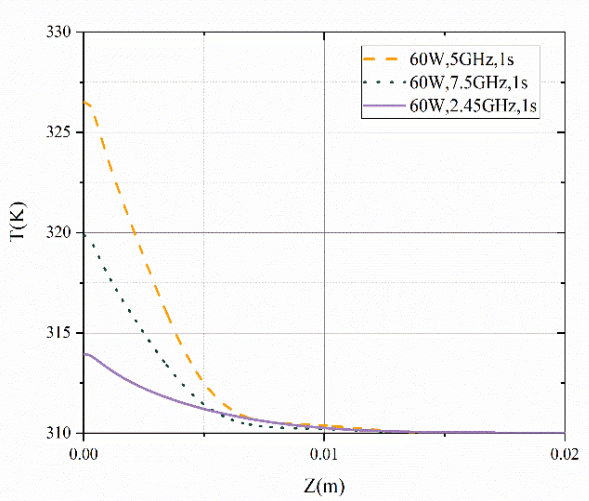
در شکل (۲) تاثیر فرکانس روی دما درون بافت پوست نشان داده شده‌است. با توجه به شکل (۲) و مقایسه افزایش دما در یک توان مشخص و فرکانس‌های متفاوت، شاهد افزایش دما با افزایش فرکانس(برای فرکانس های ۲.۴۵۰ و ۷.۵ گیگاهرتز) هستیم اما در فرکانس ۵ گیگاهرتز شاهد تشدید هستیم زیرا در این فرکانس افزایش دمای بیشتری داریم.



شکل۱: مقایسه حل تحلیلی و عددی برای توان‌های مختلف در فرکانس ۲.۴ گیگاهرتز. در نمودار، خطوط پیوسته جواب عددی و خطوط گسسته پاسخ تحلیلی را نشان می‌دهند.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله توسط دو روش تحلیلی و تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان به بررسی برهمکنش امواج مایکروویو با پوست انسان می‌پردازد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد در فرکانس‌های خاصی شاهد تشدید هستیم یعنی در این فرکانس‌ها افزایش دما بیشتر از انتظار می‌باشد. در هردو روش دمای پوست در سطح بدن افزایش می‌یابد و در پوست دما به صورت پیوسته کاهش پیدا می‌کند تا در عمق ۲ سانتی‌متر از سطح بدن، دمای پوست به دمای بدن می‌رسد.



شکل۲: مقایسه تاثیر فرکانس روی گرمایش پوست.

مرجع‌ها

[1] R. Aminzadeh, M. Saviz, and A.A. Shishegar, “Dielectric properties estimation of normal and malignant skin tissues at millimeter-wave frequencies using effective medium theory,” 2014 ۲۲nd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). IEEE, 2014.

[2] A. Vander Vorst, A. Rosen, and Y. Kotsuka, “ RF/microwave interaction with biological tissues” (Vol. 181) New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 2006.

[3] M. R. Hossan and P. Dutta, “Effects of temperature dependent properties in electromagnetic heating,” International journal of heat and mass transfer 55.13-14 (2012): 3412-3422.

[4] M. A. Ansari, M. Zarei, N. Akhlaghipour, and A. R. Niknam, “Skull and cerebrospinal fluid effects on microwave radiation propagation in human brain,” Journal of Physics D: Applied Physics 50.49 (2017): 495401.

[5] U. Kaatze, “Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature,” Journal of Chemical and Engineering Data 34.4 (1989): 371-374.

[6] A. Taflove and C. S. Hagness, “Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method,” Norwood, 2nd Edition, MA: Artech House, l995 (1995)

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-30]

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.