



بررسی اثرات بیومکانیکی میدان‌های رادیوفرکانسی بر خواص مکانیکی بافت

حسن قلمی باویل علیایی*

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

olyaee@iau.ir

آی سان طالبی*

دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد کیش

aysantalebi1998@gmail.com

چکیده

با افزایش روزافزون استفاده از فناوری‌های بی‌سیم نسل جدید مانند G5، میزان تماس انسان با میدان‌های رادیوفرکانسی (RF-EMF) رشد چشمگیری داشته و نگرانی‌ها در خصوص پیامدهای احتمالی آن بر بافت‌های زیستی بیشتر شده است. در پژوهش حاضر، اثرات مواجهه با امواج ۳.۵ گیگاهرتز بر ویژگی‌های مکانیکی استخوان و عضله مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها بر روی موش‌های صحرایی سالم و دیابتی انجام شد و حیوانات روزانه به مدت دو ساعت، طی سی روز، در معرض تابش قرار گرفتند. 3YSAR : mW/kg نتایج حاکی از آن بود که در گروه‌های سالم، مدول یانگ کاهش یافت و در گروه‌های دیابتی، جابجایی نهایی افزایش پیدا کرد؛ این تغییرات نشان‌دهنده کاهش استحکام و افزایش شکنندگی بافت‌ها است. با این وجود، شاخص‌های نشان‌دهنده استرس اکسیداتیو افزایش یافته و این افزایش در نمونه‌های مبتلا به دیابت به مراتب بیشتر مشاهده شد. شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار gprMax، میانگین SAR را تقریباً 0.35 W/kg محاسبه کرده و وجود توزیع نامتوازن انرژی را تأیید نمود. نتایج این مطالعه بیانگر آن است که میدان‌های RF حتی در سطوح غیرحرارتی می‌توانند ساختار و کیفیت مکانیکی بافت‌ها را تحت تأثیر قرار دهند و ضرورت بازنگری در استانداردهای ایمنی به‌ویژه برای گروه‌های آسیب‌پذیر مانند بیماران دیابتی را گوشزد می‌کنند.

کلمات کلیدی

میدان‌های رادیوفرکانسی، بیومکانیک استخوان، خواص مکانیکی بافت، استرس اکسیداتیو

مقدمه

در دنیای مدرن، با گسترش سریع فناوری‌های ارتباطی بی‌سیم مانند شبکه‌های G5، مواجهه انسان با میدان‌های الکترومغناطیسی رادیوفرکانسی (RF-EMF) به یک پدیده فراگیر تبدیل شده است. این میدان‌ها در طیف غیریونیزان قرار دارند و انرژی کافی برای شکستن پیوندهای اتمی ندارند، اما پژوهش‌ها نشان داده‌اند که اثرات غیرحرارتی آن‌ها می‌تواند بر سیستم‌های بیولوژیکی،

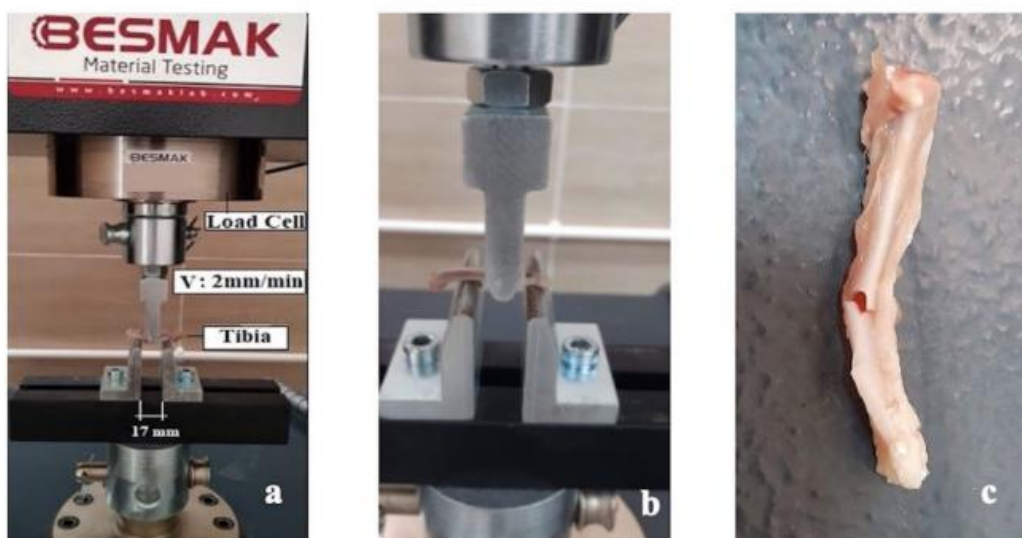
به ویژه خواص مکانیکی بافت‌های استخوانی و عضلانی تأثیرگذار باشد؛ این موضوع به‌ویژه در شرایطی مانند دیابت که بافت‌ها حساس‌تر هستند، اهمیت پیدا می‌کند [۱]. نگرانی‌ها درباره این اثرات از دهه ۱۹۹۰ با آغاز پروژه بین‌المللی EMF توسط سازمان بهداشت جهانی (WHO) شکل گرفت و نرخ جذب خاص (SAR) به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری جذب انرژی توسط بافت‌ها معرفی گردید [۲]. با وجود این، اثرات غیرحرارتی، از جمله اختلال در تعادل اکسیداتیو، همچنان محل بحث است و مطالعات نشان می‌دهند مواجهه با RF می‌تواند موجب افزایش تولید گونه‌های اکسیژن واکنش‌پذیر (ROS) شود که ساختار و عملکرد بافت‌ها را دچار تغییر می‌کند [۳].

یکی از مطالعات کلیدی، تحقیق Bektas و همکاران (۲۰۲۳) است که اثرات مواجهه با فرکانس ۳٫۵ گیگاهرتز بر بیومکانیک استخوان و عضله در موش‌های صحرایی سالم و دیابتی را بررسی کرد. این مطالعه نشان داد که کاهش مدول یانگ و افزایش جابجایی حداکثری در گروه‌های مواجهه‌یافته، به‌ویژه دیابتی‌ها، رخ داده است که ممکن است به دلیل آسیب‌پذیری بالای بافت‌ها در شرایط هیپرگلیسمی و افزایش استرس اکسیداتیو باشد [۴]. ادبیات اخیر بر تأثیر میدان‌های RF بر پیری و استرس اکسیداتیو تأکید دارد و نشان می‌دهد که این اثرات می‌توانند با تغییرات در ساختار کلاژن و الاستین همراه شوند که خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵]. با گسترش G5 و استفاده از فرکانس‌های بالاتر، ارزیابی ریسک‌های بیومکانیکی ضروری است، هرچند مطالعات اپیدمیولوژیک محدود هستند و نیاز به تحقیقات بلندمدت احساس می‌شود [۶].

مواد و روش‌ها

این مطالعه بر اساس مدل تجربی مقاله مرجع طراحی شد. ۲۸ موش نر Wistar Albino (۸-۱۰ هفته‌ای، ۲۰۰-۲۵۰ گرم) به چهار گروه تقسیم شدند: سالم + شام، سالم + RFR، دیابتی + شام، دیابتی + RFR. دیابت با تزریق ۴۵ mg/kg STZ القا شد و مواجهه با ۳٫۵ RFR GHz برای ۲ ساعت روزانه به مدت ۳۰ روز با ۳۷ SAR mW/kg انجام گرفت [۴].

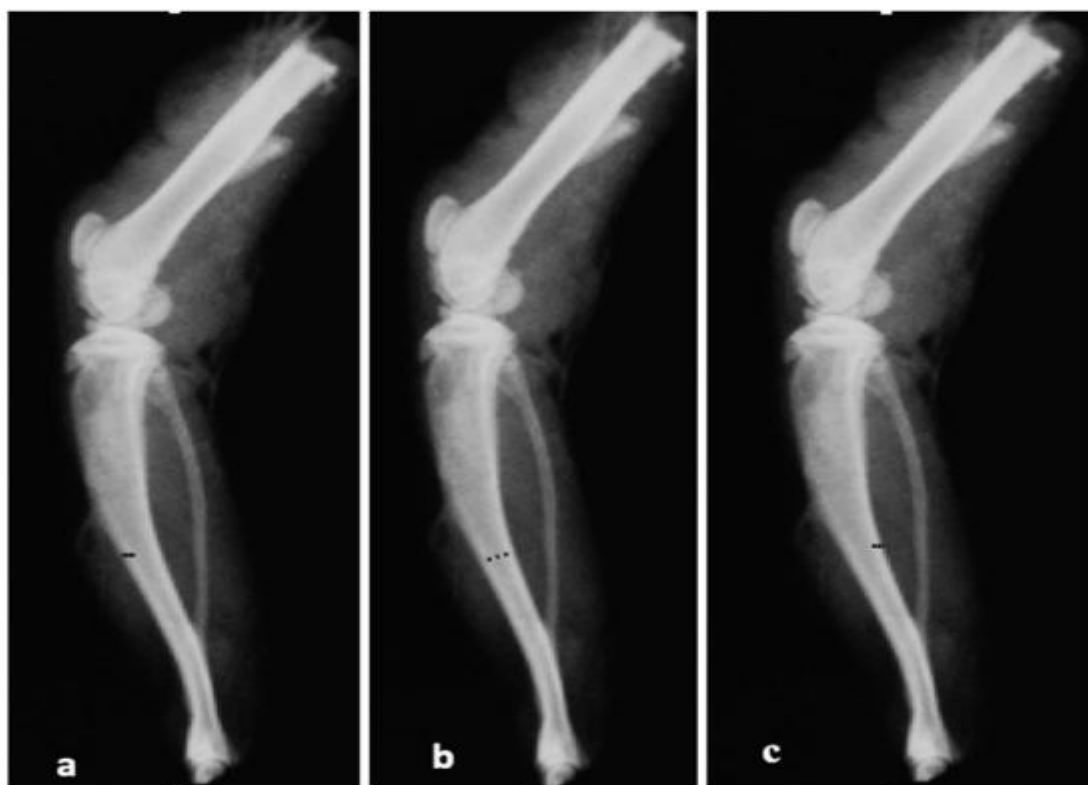
برای محاسبه میزان جذب انرژی توسط بافت‌ها (SAR)، از نرم‌افزار gprMax که بر پایه روش FDTD (Finite-Difference Time-Domain) عمل می‌کند، استفاده شد. این روش عددی با تقسیم فضا و زمان به واحدهای بسیار کوچک، امکان شبیه‌سازی دقیق انتشار امواج الکترومغناطیسی و تعامل آن‌ها با بافت‌های زیستی را فراهم می‌کند. در این شبیه‌سازی فرکانس تابش روی ۳٫۵ گیگاهرتز تنظیم شد و نتایج نشان داد میانگین نرخ جذب خاص (SAR) برابر با ۰٫۰۳۵ وات بر کیلوگرم است، در حالی که توزیع انرژی در بافت یکنواخت نبوده و تمرکز بیشتری در نواحی مرکزی مشاهده گردید. برای ارزیابی خواص مکانیکی استخوان، از تست خمش سه‌نقطه‌ای با دستگاه BESMAK BMT-100E استفاده شد؛ در این روش، نمونه استخوان در دو نقطه تکیه‌گاه قرار گرفته و با اعمال نیروی تدریجی در نقطه میانی، مقاومت و میزان تغییر شکل ۱ استخوان تا زمان شکست ثبت می‌شود. علاوه بر این، برای بررسی وضعیت استرس اکسیداتیو، شاخص‌های زیستی شامل GSH گلوتاتیون کاهش‌یافته، CAT کاتالاز، IMA آلبومین اصلاح‌شده ایزوفریم و MDA مالون‌دی‌آلدئید با روش‌های بیوشیمیایی استاندارد اندازه‌گیری شدند. در نهایت، داده‌های به‌دست‌آمده با استفاده از آزمون‌های آماری ANOVA و Tukey مورد تحلیل قرار گرفتند و سطح معنی‌داری برابر با $p < 0.05$ در نظر گرفته شد تا اطمینان از معناداری تفاوت‌های مشاهده‌شده حاصل شود.



شکل ۱: تجهیزات مورد استفاده در تست خمش سه نقطه‌ای: (a) دستگاه BESMAK BMT-100E با تنظیم سرعت ۲ میلی‌متر در دقیقه و فاصله ۱۷ میلی‌متر، (b) نمونه tibia در حال تست، و (c) tibia پس از شکست تحت فشار [۴].

نتایج

شبیه‌سازی SAR توزیع غیریکنواختی نشان داد، با میانگین 0.35 W/kg و تمرکز بالاتر در نواحی مرکزی بافت. در بیومکانیک، مدول ینگ در گروه سالم + RFR کاهش یافت و جابجایی حداکثری در دیابتی‌ها افزایش یافت. حداکثر بار در دیابتی + RFR نیز پایین‌تر بود. استرس اکسیداتیو با افزایش MDA و IMA در گروه‌های RFR، به‌ویژه دیابتی‌ها، همراه بود و رادیولوژی کاهش ضخامت کورتکس در دیابتی‌ها را نشان داد (شکل ۲) [۴].



شکل ۲: ارزیابی رادیولوژیکی استخوان tibia: (a) ضخامت کورتکس جانبی، (b) عرض مدولا، و (c) ضخامت کورتکس مدیال، که تغییرات ساختاری در گروه‌های دیابتی و مواجهه‌یافته را نشان می‌دهد [۴].

در شکل ۳ به نتایج شبیه‌سازی نرخ جذب ویژه (SAR) در فرکانس ۳٫۵ گیگاهرتز اشاره می‌شود. در این شبیه‌سازی، میزان انرژی جذب‌شده توسط بافت‌ها در دو مقیاس مختلف محاسبه شده است:

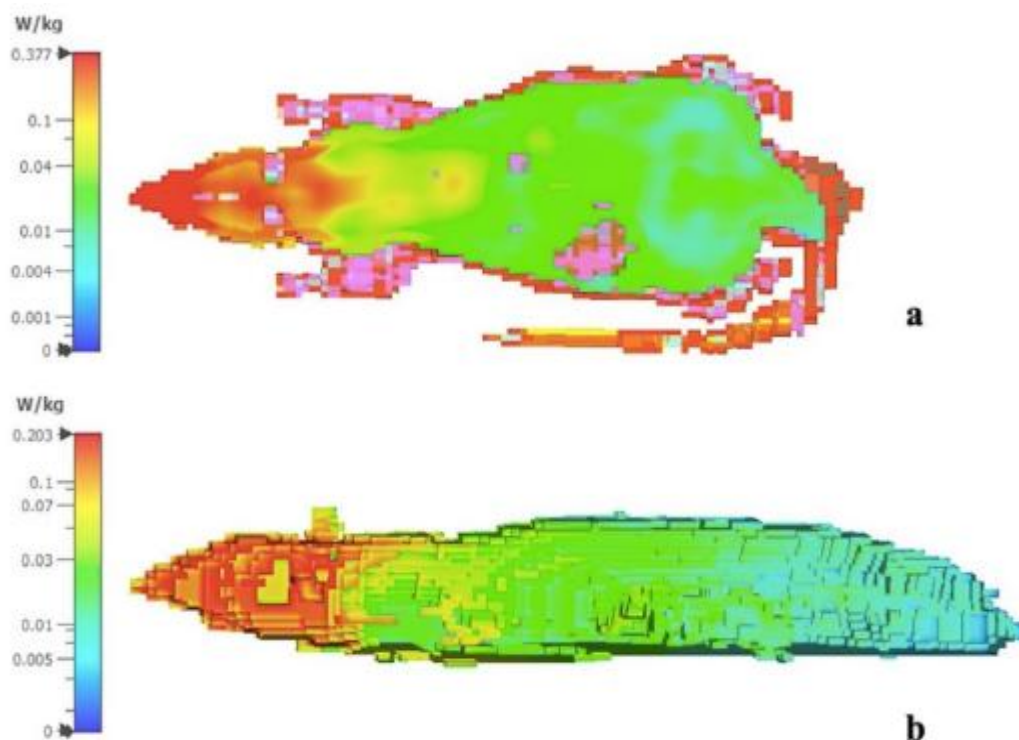
۱. میانگین SAR بر اساس ۱ گرم در صفحه فرونتال (a):

این نمودار نشان می‌دهد که وقتی انرژی جذب‌شده بر مبنای حجم‌های کوچک یک گرمی محاسبه شود، شدت میدان در برخی نواحی بیشتر از سایر نقاط است. در صفحه فرونتال (نمای روبه‌رو) می‌توان مشاهده کرد که انرژی در بخش‌های مرکزی بافت به‌طور محسوسی بالاتر از نواحی کناری است. این موضوع به دلیل ویژگی‌های تضعیف و بازتاب امواج در برخورد با مرزهای بافتی و تغییرات ضریب دی‌الکتریک در بخش‌های مختلف رخ می‌دهد.

۲. میانگین SAR بر اساس ۱۰ گرم در صفحه سائیتال (b):

در این حالت، انرژی جذب‌شده در بلوک‌های حجمی بزرگ‌تر (۱۰ گرمی) محاسبه شده است. نتایج در صفحه سائیتال (نمای جانبی) نشان می‌دهند که اگرچه شدت موضعی انرژی در مقیاس کوچک‌تر بیشتر است، اما وقتی حجم بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود، توزیع انرژی یکنواخت‌تر به نظر می‌رسد. با این حال، همچنان تمرکز نسبی انرژی در بخش‌های میانی بافت دیده می‌شود.

این مقایسه بین $g-SAR$ ۱ و $g-SAR$ ۱۰ اهمیت زیادی دارد؛ زیرا استانداردهای بین‌المللی مانند ICNIRP و IEEE برای ارزیابی ایمنی مواجهه با امواج رادیوفرکانسی معمولاً از این معیارها استفاده می‌کنند. نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که توزیع انرژی جذب‌شده در بافت یکنواخت نیست و بخش‌های مرکزی بافت بیشتر در معرض اثرات قرار می‌گیرند. این ناهمگونی در توزیع انرژی می‌تواند دلیلی بر تغییرات مکانیکی و بیوشیمیایی مشاهده‌شده در بافت‌ها باشد، به‌ویژه در شرایطی که بافت‌ها از قبل آسیب‌پذیر هستند (مانند دیابت).



شکل ۳: نتایج شبیه‌سازی SAR در فرکانس ۳٫۵ GHz: (a) میانگین $g-SAR$ در صفحه فرونتال، و (b) میانگین $g-SAR$ در صفحه sagittal، که توزیع غیریکنواخت انرژی را نشان می‌دهد [۴].

تحلیل داده‌ها

یافته‌ها به وضوح نشان می‌دهند که تابش فرکانس رادیویی در محدوده ۳٫۵ گیگاهرتز تأثیرات منفی چشمگیری بر بیومکانیک استخوان دارد؛ به‌طوری که کاهش مدول یانگ نشان‌دهنده افت قابل توجه در انعطاف‌پذیری و استحکام این بافت حیاتی است. این آسیب به احتمال زیاد ناشی از افزایش تولید گونه‌های واکنش‌پذیر اکسیژن (ROS) و اختلال در فرایند معدنی‌سازی استخوان است که در افراد مبتلا به دیابت شدت یافته و وضعیت را به مراتب وخیم‌تر می‌کند. به‌ویژه، هیپرگلیسمی مزمن در دیابت با افزایش استرس اکسیداتیو، تخریب ساختار سلولی و کاهش کارایی سلول‌های استخوان‌ساز (استئوبلاست‌ها) موجب کاهش کیفیت و مقاومت بافت استخوانی می‌شود. این امر باعث می‌گردد که استخوان‌ها در برابر فشارها و ضربات محیطی آسیب‌پذیرتر شده و خطر شکستگی و شکنندگی آنها به‌طور چشمگیری افزایش یابد. بنابراین، این مطالعه بر اهمیت توجه ویژه به اثرات تابش رادیویی به خصوص در شرایط بیماری‌های مزمن مانند دیابت تأکید می‌کند و لزوم تحقیقات عمیق‌تر در این زمینه را برجسته می‌سازد. [۷]. تحلیل میزان جذب ویژه (SAR) شبیه‌سازی‌شده با مقدار ۰٫۰۳۵ وات بر کیلوگرم و توزیع غیریکنواخت انرژی

تابشی، نشان می‌دهد که آسیب‌های وارده عمدتاً در بخش‌های مرکزی بافت استخوانی متمرکز می‌شوند، جایی که شدت تابش و انباشت انرژی بیشتر است. این تمرکز انرژی می‌تواند باعث ایجاد نقاط ضعف موضعی شود که به مرور زمان منجر به افزایش جابجایی حداکثری و تغییر شکل‌های غیرطبیعی در استخوان‌ها به ویژه در نمونه‌های دیابتی می‌گردد؛ موضوعی که نشانه واضح شکنندگی و آسیب‌پذیری فزاینده بافت است. از سوی دیگر، استرس اکسیداتیو ناشی از تابش با افزایش غلظت مالون دی آلدئید (MDA) به عنوان شاخصی از آسیب غشایی و کاهش ظرفیت دفاع آنتی‌اکسیدانی در بدن به خصوص در حیوانات دیابتی، سبب اختلالات ساختاری قابل توجهی در بافت استخوان می‌شود و عملکرد طبیعی سلول‌های استخوان‌ساز و بازسازی‌کننده را مختل می‌کند. با این حال، مهم‌ترین محدودیت این تحقیق استفاده از مدل حیوانی است که علی‌رغم مشابهت‌هایی که با شرایط انسانی دارد، پاسخ‌های فیزیولوژیکی و متابولیکی کاملاً قابل تعمیم به انسان نیستند. بنابراین، برای درک دقیق‌تر اثرات تابش فرکانس رادیویی بر بافت استخوانی و ارزیابی پیامدهای بالینی آن، پژوهش‌های جامع و کنترل‌شده در محیط انسانی ضروری به نظر می‌رسد تا بتوان راهکارهای مؤثر و ایمنی را در برابر این نوع تابش توصیه نمود [۸-۱۰].

نتیجه‌گیری

مطالعات این تحقیق نشان می‌دهد که قرارگیری طولانی‌مدت در معرض میدان‌های رادیوفرکانسی با فرکانس ۳.۵ گیگاهرتز توانایی تغییر ویژگی‌های مکانیکی بافت‌های استخوانی و عضلانی را دارد. کاهش مدول یانگ و استحکام در نمونه‌های سالم و افزایش شکنندگی در گروه‌های دیابتی، همراه با ارتقاء شاخص‌های استرس اکسیداتیو، نمایانگر اثرات زیان‌آور این تابش‌ها بر بافت‌ها است. نتایج شبیه‌سازی نیز توزیع غیر یکنواخت انرژی جذب‌شده در بافت را نشان داد که می‌تواند بر تغییرات ساختاری مانند اختلال در کلاژن و کاهش مقاومت مکانیکی مؤثر باشد. با توجه به این شواهد، لازم است در تدوین دستورالعمل‌های ایمنی، علاوه بر اثرات حرارتی، پیامدهای غیرحرارتی نیز مورد توجه قرار گیرند. همچنین انجام مطالعات انسانی و پیگیری‌های طولانی‌مدت برای درک بهتر اثرات RF و تدوین سیاست‌های پیشگیرانه در حوزه سلامت عمومی ضروری است.

مراجع

- [۱] Haiying Wang, Weijin Zou, Caihua Ding, "Activating Transcription Factor 4 regulation of radiofrequency radiation-induced ferroptosis in osteoblasts" *Electromagnetic Biology and Medicine*, 19 Aug 2025
- [۲] K. Karipidis, R. Mate, D. Urban, R. Tinker, and A. Wood, "5G mobile networks and health—a state-of-the-science review of the research into low-level RF fields above 6 GHz," *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, vol. 31, no. 4, pp. 585-605, 2021.
- [۳] M. Bagheri Hosseinabadi, N. Khanjani, M. R. Samaei, and F. Nazarkhani, "The associations of workload, individual and organisational factors on nurses' occupational injuries," *Environmental and Molecular Mutagenesis*, vol. 65, no. 4, pp. 102-110, 2019.
- [۴] X. Gao, J. Li, X. Wang, S. Zhou, and Y. Jing, "Diabetes mellitus impairs bone regeneration and biomechanics," *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, vol. 18, no. 1, p. 168, 2023.
- [۵] A. Vian, F. Soulier, S. Poyer, et al., "Effects of 5G-modulated 3.5 GHz radiofrequency field exposures on skin cells in vitro," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 8390, 2023.

[۶] E. Chiaramello, J. Rooke, S. Fiocchi, et al., "A comprehensive review of 5G NR RF-EMF exposure assessment studies: Open issues and solutions," *Environmental Research*, vol. 259, p. 119429, 2024.

[۷] A. R. Mehdizadeh and S. M. J. Mortazavi, "Association of Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Field Radiation (RF-EMFR) Generated by Mobile Phone Base Stations with Glycated Hemoglobin (HbA1c) and Risk of Type 2 Diabetes Mellitus," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12, no. 11, pp. 14519-14528, 2015.

[۸] A. Napp, C. Kolb, C. Lennerz, et al., "The Effect of Type 2 Diabetes on Bone Biomechanics," *Current Osteoporosis Reports*, vol. 17, no. 5, pp. 291-301, 2019.

[۹] H. Bektas, S. Dasdag, A. Nalbant, et al., "Effects of 3.5-GHz radiofrequency radiation on energy-regulatory hormones in the blood and adipose tissue," *Electromagnetic Biology and Medicine*, vol. 43, no. 1, pp. 1-10, 2024.

[۱۰] H. Bektas, S. Algul, B. Altindag, K. Yegin, M. Z. Akdag, and S. Dasdag, "Effects of 3.5 GHz radiofrequency radiation on ghrelin, nesfatin-1, and irisin levels in diabetic and healthy brains," *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol. 126, p. 102168, 2022.