Islamic Azad University , Shiraz Branch
نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis
sanad.iau.ir/journal/jcdsa

Interaction between biological tissues and extremely low frequency fields

Asmae Lak[1*]

[1]Department of Electrical Engineering, Boushehr Branch, Islamic Azad University, Boushehr, Iran
lak.asmae@gmail.com

Abstract: Studing biological effects of electromagnetic fields is an attractive subject for researchers all of the world. The extremely low frequency fields frequency band (0-3KHz) is very applicable in the human life because of its benefits and utilizations. In this paper it is tried to investigate the biological effects of extremely low frequency fields (50/60 Hz) on biological effects of electromagnetic fields. It is due to computers, shavers, TVs, hair dryers and other low frequency devices. Some systems and equipment such as high voltage transmission lines are extremely low frequency fields sources too. The effects of these sources are divided into thermal and non-thermal which in turn focus on micronucleus formation, DNA strand, chromosome effects, enzyme activity, cell proliferation, leukemia, effects on memory and learning, brain tumor and effects on nervous system. Some exposure standard limits are introduced from IEEE and ICNIRP. Also, standard values and protection for human safety against extremely low frequency fields are proposed.

Keywords: Electric Fields, Magnetic Fields, Biological Effects, Extremely Low Frequency.

JCDSA, Vol. 2, No. 6, Summer 2024	Online ISSN: 2981-1295	Journal Homepage: https://sanad.iau.ir/en/Journal/jcdsa
Received: 2024-08-16	Accepted: 2024-09-17	Published: 2024-09-22

CITATION

Lak, A., *" Interaction between biological tissues and extremely low frequency fields "*, Journal of Circuits, Data and Systems Analysis (JCDSA), Vol. 2, No. 6, pp. 50-62, 2024.
DOI: 00.00000/0000

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by the Islamic Azad University Shiraz Branch. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0

* Corresponding author

Extended Abstract

Introduction

Todays the electronic devices which are extremely low frequency fields sources have important role in human life. On the other hand, users are concern about the biological effects of extremely low frequency fields sources. the most extremely low frequency fields sources work at 50/60hz. so nearby all of electronic devices around us operate in these frequencies. the effects of extremely low frequency fields divide into thermal and non-thermal effects. the extremely low frequency fields is in non-ionization group. Thermal effects are in two kinds: dielectric thermal and induced thermal. Because of importance of the probable biological effects, the researchers the entire world tries to find these effects. Also the standard institutes provide the limited exposure values to protect human from the extremely low frequency fields sources. in this paper it is tried to investigate the biological effects of extremely low frequency fields on living beings tissues (50/60 Hz) for example computers, shavers, TVs, hair dryers and other low frequency devices. Some systems and equipment such as high voltage transmission lines are extremely low frequency fields sources too. Some of the biological effects are micronucleus formation, DNA strand, chromosome effects, enzyme activity, cell proliferation, leukemia, effects on memory and learning, brain tumor and effects on nervous system. Some exposure standard limits are introduced from IEEE and ICNIRP standards to human safety and protection from extremely low frequency fields sources and vdts. also to protect to extremely low frequency fields probable hazard some cases is proposed.

Methodology

The main method in this research is systematic review of biological effects of fields and their mechanism from about 80 researches. In this paper the collections of the mechanisms and probable effects of extremely low frequency fields fields on human body are provided. The information from the researches has been investigated from the thermal or nonthermal effects, cellular or organ and other divisions points of view. So the data are analyzed from 1974 to 2024. To classify the effects some of the effects the thesis, papers, sites and related book chapters were studied. For standard value limitations two guideline was perused; IEEE and ICNIRP. In the extremely low frequency fields field band the parameter which surveyed are Electric and Magnetic density. thus, in this paper some of value standard for extremely low frequency fields exposure are presented from the references.

Results and discussion

To find the biological effects of extremely low frequency fields on living being systems, many researches are studied. The in vivo and in vitro experiments show that the biological effects are micronucleus formation, single and double DNA strand, chromosome effects, enzyme activity, cell proliferation, leukemia, effects on memory and learning, brain tumor and effects on nervous system. Table 1 shows the summery of threshold of effects in mA/m^2 at 3-300Hz. For $I > 1000$ mA/m^2 ventricular contractions and health hazards may be happen. Because of dielectric properties of body tissues, they can interact with them. Study on cellular level shows that micronucleus formation, DNA strand, chromosome effects, enzyme activity and cell proliferation are the biological effects at power frequency fields. The indirect effects of extremely low frequency fields fields are in Table 2. Electric shock is one of the e effects. Table 4 shows the reference values of ICNIRP standards for public and occupational environments at 50Hz for Electric and Magnetic mass density. Also the other effects i.e. leukemia, effects on memory and learning, brain tumor and effects on nervous system are reported. Also to reduce the biological effects of extremely low frequency fields some points should be observed. For example the fence around the sources should be provided and respect the distance from powerlines and the other mentioned in the paper.

Conclusion

By the growing of use of electronic devices and the facilities of it in the human life and on the other hand biological effects of them (because they are electromagnetic fields sources) which mentioned in this paper, the investigations and evaluations for reduction of these field sources effects or remove them is inevitable. However, by consideration of the protective points and limited exposure values which proposed in the paper we can reduce the probable biological effects from extremely low frequency fields. In is essential that biologists and engineers should work with each other tightly and jointly to study the health aspects and engineering aspects and detect the thresholds of dangers carefully. Also the thresholds of dangers or limited standard values should be notified to the people to guarantee the public health, care from themselves and reduction of biological effects.

Islamic Azad University , Shiraz Branch
نشریه تحلیل مدارها، داده ها و سامانه ها
Journal of Circuits, Data and Systems Analysis
sanad.iau.ir/journal/jcdsa

برهمکنش بافت‌های بیولوژیکی و امواج الکترومغناطیسی فرکانس پایین

اسما لک[1*]

۱- گروه مهندسی برق، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران (lak.asmae@gmail.com)

چکیده: بررسی اثرات بیولوژیکی میدان‌های الکترومغناطیسی یک موضوع جذاب برای محققین در سرتاسر دنیا می‌باشد. باند فرکانسی امواج فرکانس خیلی پایین، صفر تا ۳۰ کیلوهرتز می‌باشد که برای زندگی انسان بسیار پرکاربرد و مفید است. در این مقاله تلاش می‌شود اثرات بیولوژیکی حاصل از امواج فرکانس پایین ۵۰ و ۶۰ هرتز روی بافت‌های بیولوژیکی موجودات زنده بررسی شود. این منابع شامل کامپیوتر، ریش‌تراش، سشوار و سایر وسایل الکترونیکی و همچنین برخی سیستم ها و تجهیزات مانند خطوط انتقال ولتاژ نیز از منابع فرکانس پایین می‌باشند. این آثار شامل اثرات گرمایی و غیرگرمایی است که خود به مسائلی مانند اثر بر تشکیل میکرونوکلئوس، اثر بر کروموزوم، فعالیت آنزیم، تکثیر سلول، سرطان خون، اثر روی حافظه و یادگیری، شکسته شدن DNA و اثر روی سیستم عصبی می‌پردازد. برخی استانداردهای مجاز تابش نیز مانند IEEE و ICNIRP معرفی شده است. همچنین مقادیر استاندارد و نکات پیشگیرانه برای حفاظت در مقابل این امواج و حفظ سلامت انسان بیان شده است.

واژه های کلیدی: میدان‌های الکتریکی، میدان‌های مغناطیسی، اثرات بیولوژیکی، فرکانس پایین

نوع مقاله: پژوهشی

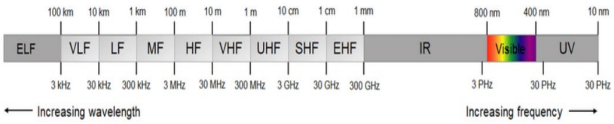
تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۷ تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۸

DOI: 00.00000/0000

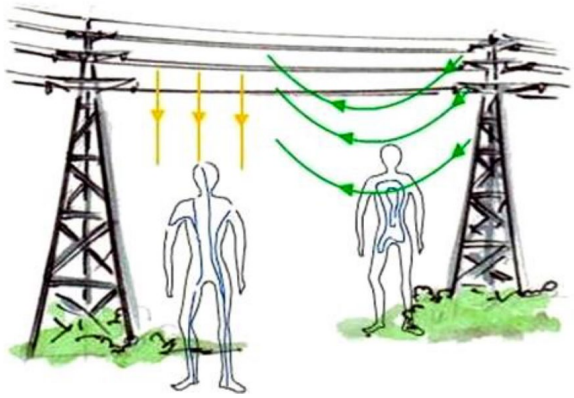
۱- مقدمه

امروزه، استفاده از ابزاری که در آنها منابع تشعشع میدان‌های الکترومغناطیسی وجود دارد، نقش مهمی در زندگی بشر دارد. اما همزمان با پیشرفت تکنولوژی و استفاده از این ابزارها نگرانی‌هایی نیز برای کاربران به جهت تاثیر این امواج بر سلامتی آنها به وجود آمده است. از حدود صد سال پیش ابتدا خطوط انتقال توان و سپس دستگاه‌های الکترونیکی پرکاربرد در منازل و محیط کار مانند بخاری برقی، تلویزیون، جاروبرقی، کامپیوتر و خشک‌کننده‌ها در فرکانس‌های ۵۰/۶۰ هرتز استفاده شده و کار می‌کنند. این فرکانس‌ها جزء طیف امواج فرکانس خیلی پایین[1] (شکل (۱)) هستند. با گسترش صنعت برق اهمیت میدان-های حاصل از این ابزار و سیستم‌ها در مقایسه با میدان‌های داخلی طبیعی بدن بیشتر شده است. اندام‌های بدن دارای جریان‌های داخلی و به تبع آن میدان‌های داخلی هستند که نقش کلیدی در مکانیزم‌های پیچیده کنترل فیزیکی، فعالیت‌های عصبی، رشد بافت‌ها و ترمیم آن‌ها می‌باشد، لذا بررسی اثرات این میدان‌های خارجی باید بیشتر مطالعه شود. خطوط انتقال توان حاوی جریان الکتریکی هستند که این جریان-ها، میدان‌هایی را در اطراف خطوط ایجاد می‌کنند. میدان‌های ایجاد شده می‌توانند در بدن انسان وارد شده و آثار بیولوژیکی ایجاد کنند. شکل (۲) میدان‌های ایجاد شده حاصل از خطوط توان در بدن انسان را نشان می‌دهد. افراد ساکن و افراد شاغل در مکان‌هایی که با منابع تشعشع مانند خطوط انتقال سر و کار دارند، مرتباً تحت تابش میدان‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین هستند. بنابراین باید برای حفظ سلامتی آنها بررسی‌های لازم صورت گرفته و استانداردهای پرتوگیری را رعایت نمود [۲، ۳]. شکل (۳) نیز برهم‌کنش بین میدان‌های داخلی و خارجی بدن انسان را نشان می‌دهد. مطالعات زیادی برای بررسی میزان اثرات مثبت و منفی امواج الکترومغناطیسی بر بدن موجودات زنده به صورت اپیدمیولوژیکی، جانوری در شرایط طبیعی (بافت زنده) و مصنوعی (در آزمایشگاه)، پزشکی، شغلی و .... انجام شده است [۴-۸]. اثر میدان‌های الکترومغناطیسی بر موجودات زنده بر اساس القای بارهای الکتریکی و در نتیجه‌ی آن جریان‌های الکتریکی در موجودات تحت تابش است که شامل اثرات گرمایی و غیرگرمایی است [۹]. اثرات غیرگرمایی غالباً اثرات تحریک الکتریکی نامیده می‌شود و شامل تحریک عصب‌ها و بافت‌های عضلانی است که از طریق جریان‌های الکتریکی القا شده در موجود تحت تابش به وجود می‌آیند و به مقدار جریان و فرکانس و مدت زمان تابش بستگی دارد [۱۰، ۱۱]. اثرات نسبتاً بزرگتر، در فرکانس‌های پایین‌تر و اثرات نسبتاً کمتر در فرکانس‌های بالاتر مشاهده می‌شود. در فرکانس‌های بالاتر از حدود چندین کیلوهرتز اثر تحریک با فرکانس رابطه عکس دارد. اثرات گرمایی با تبدیل میدان الکترومغناطیسی جذب شده در بدن موجودات زنده به گرما ایجاد می‌شوند. همچنین بسته به اینکه گرما از طریق میدان الکتریکی یا مغناطیسی ایجاد شده، گرمایش به دو نوع دی الکتریکی و القایی تقسیم می‌شود [۱۲].

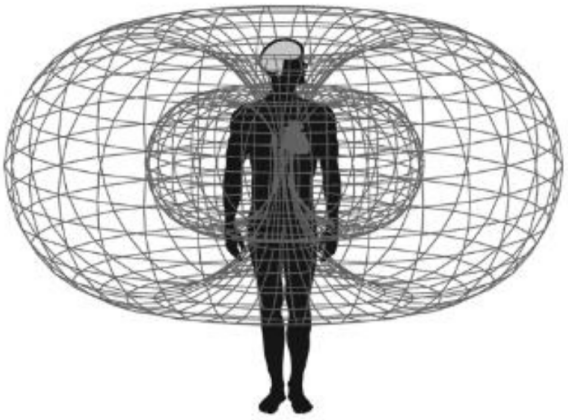
[1] Extremely low frequency fields



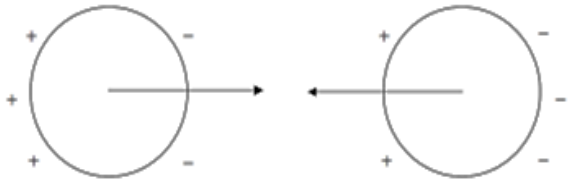
شکل (۱): طیف امواج الکترومغناطیسی [۱]



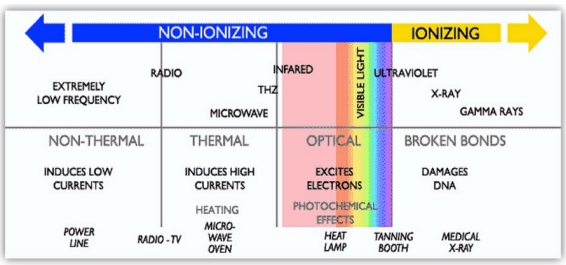
شکل (۲): میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی حاصل از خطوط انتقال توان و تأثیر آن بر بدن انسان [۳]



شکل (۳): برهم‌کنش بین میدان‌های داخلی و خارجی بدن انسان



شکل(۴): اثر زنجیره به صف در آمده [۱۳]



شکل (۵): طیف امواج یون‌ساز و غیر یون‌ساز [۱۵]

گرمایش دی‌الکتریکی، گرمایی است که وقتی ماده عایق در میدان الکتریکی متغیر با زمان قرار می‌گیرد به دلیل خواص دی‌الکتریکی تلفاتی خود به‌دست می‌آورد و در فرکانس‌های نسبتاً پایین (کیلوهرتز و مگاهرتز) رخ می‌دهد. گرمایش القایی، گرمایی است که در یک ماده رسانا با ایجاد جریان گردابی در ماده، هنگامی که در میدان مغناطیسی متغیر با زمان قرار داده می‌شود به وجود می‌آید و در فرکانس‌های بالاتر از رادیوفرکانسی تا ماکروویو هم ایجاد می‌شود [۱۱]. اثرپذیری بدن انسان از میدان‌ها از آنجا ناشی می‌شود که بسیاری از ذرات غوطه‌ور در محیط مایع تحت تابش یک میدان الکتریکی به کار رفته به صف در می‌آیند و یک زنجیره تشکیل می‌دهند که همراستا با میدان الکتریکی خواهد بود. شکل (۴) زنجیره به‌صف در آمده بسته به فرکانس میدان به‌کار رفته، دارای تأخیر زمانی است و می‌تواند زمانی اتفاق بیافتد که شدت میدان از یک مقدار کمینه بیشتر باشد. پدیده چرخش سلول، وقتی در یک میدان پلاریزه شده دایروی قرار گرفته نیز مشاهده شده است [۱۳]. تحریکات الکتریکی و اثرات غیر گرمایی در فرکانس‌های پایین، بزرگ هستند و با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابند. پرتوها به طور کلی به دو دســـته یون‌ساز و غیریون‌ساز تقسیم می‌شوند. پرتوهای یون‌ساز با عبور از محیط، تولید ذرات باردار می‌کنند. منابع مولّد پرتوهای یون‌ساز می‌تواند مانند پرتو X، حاصل از انرژی هسته‌ای و زباله‌های ساخت بشر باشد؛ یا می‌تواند مانند پرتوهای کیهانی حاصل از خورشید یا مواد رادیواکتیو پوسته زمین که به صورت ذره یا انرژی خالص بدون جرم و بار الکتریکی (پرتوهای الکترومغناطیسی) تابش می‌شوند، زمینه طبیعی داشته باشند. برای حفاظت در برابر پرتوهای یون‌ساز به نحویکه اطمینان حاصل شود مقدار جذب شده به وسیله فرد بیش از حداکثر مجاز نبوده یا حداقل پرتوگیری ممکن باشد، سه عامل مدت زمان پرتوگیری، فاصله از منبع و حفاظت، مؤثر می‌باشد. پرتوهای غیریون‌ساز بخشی از پرتوهای الکترومغناطیس هستند که انرژی آنها برای یونیزاسیون ماده کافی نمی‌باشد. طول موج این پرتوها بلندتر از ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. امواج با فرکانس کم، بسیار کم و بی‌نهایت کم با طول موج از ۱ کیلومتر تا بیش از ۱۰۰۰ کیلومتر جزء این پرتوها می‌باشند [۱۴].

میدان‌های فرکانس پایین توانایی آن را ندارند که باعث یون‌سازی شوند. انرژی این میدان‌ها کمتر از آن است که بتواند پیوندهای شیمیایی را بشکنند اما به خوبی محرز است که میدان‌های الکترومغناطیسی بدون شکستن پیوند هم می‌توانند اثرات بیولوژیکی تولید کنند. برای مثال انرژی اشعه X، ۱۰۰۰ الکترون ولت و انرژی فرکانس قدرت 10^{-13} الکترون ولت می‌باشد. شکل (۵) طیف امواج یون‌ساز و غیر یون‌ساز را نشان می‌دهد. به طور خلاصه، در فرکانس‌های پایین، پرتوگیری از میدان‌های الکترومغناطیسی می‌تواند تحریک الکتریکی ایجاد کند که آغازگر اثرات غیرگرمایی است. میدان‌های الکتریکی می‌توانند نیروهایی بر مولکول‌های باردار و بدون بار یا ساختار سلول‌های درون بدن موجود زنده وارد کنند. این نیروها باعث حرکت ذرات باردار، جهت‌گیری و شکسته‌شدن ساختمان سلول‌های دو قطبی یا القای ولتاژ در غشای سلولی شود. میدان‌های مغناطیسی می‌توانند نیروهایی در میان ساختار سلول‌ها ایجاد کنند ولی از آنجا که مواد بیولوژیکی اغلب غیرمغناطیسی هستند این نیروها ضعیف هستند [۱۵، ۱۶].

۲- اثرات غیرگرمایی

اثر غیرگرمایی، حاصل از تحریک احساس شده توسط عصب‌ها و عضله است و هنگامی‌که یک موجود زنده جسم بارداری را لمس کند، اتفاق می‌افتد. در این حالت شار الکتریکی جریان یافته و شوک الکتریکی حس می‌شود. بسته به میزان شدت جریان القایی، اثرات از یک تکان غیر ارادی (شوک) تا فیبریلاسیون بطنی که می‌تواند مهلک باشد تغییر می‌کند. برای مردان میان‌سال آستانه تحریک ۱ میلی آمپر و برای زنان دو سوم این مقدار است. اختلال شدید قلبی (مثل ضربان اضافی قلب) در سطوح ۱۰۰۰ برابر بزرگتر اتفاق می‌افتد [۱۷]. جدول (۱) محدوده چگالی جریان القائی که اثرات احتمالی ایجاد می‌کنند را نشان می‌دهد. جریان القائی می‌تواند باعث گرمایش قابل توجه بافت‌ها تا سوختن‌های شدید شود. خطر شوک‌های الکتریکی، مکانیسم‌های آسیب و .... نیز تاکنون گزارش شده‌اند. مگنتوفسفن از اثرات تحریک میدان مغناطیسی در فرکانس‌های پایین است. این پدیده مانند مشاهده فلش‌های نوری است که به دلیل پرتوگیری سر و چشم در یک میدان مغناطیسی فرکانس پایین در شبکیه ایجاد می‌شوند. آستانه احساس حدود ۱۰ میلی تسلا در فرکانس ۲۰ هرتز است. میزان چگالی جریان برای رخداد این واقعه ۱۰mA بر متر مربع است [۱۷-۱۹].

۳- اثرات گرمایی

میدان الکترومغناطیسی جذب شده در بدن موجود زنده به گرما تبدیل می‌شود و اثرات گرمایی را به وجود می‌آورد. اگر مقدار انرژی جذب شده گرمایی بیشتر از دمای نرمال سوخت و ساز بدن باشد مشکلات مهم بیولوژیکی به‌وجود می‌آید [۲۰]. اگر نرخ جذب ویژه میانگین کل بدن به ۴ وات بر کیلوگرم برسد دمای درونی بدن افزایش می‌یابد. سطوح گرمایی کمتر از ۴ وات بر کیلوگرم به عنوان یک مقدار ناچیز در نظر گرفته می‌شود که می‌تواند به آسانی به واسطه فعالیت‌های طبیعی بدن مانند تعرق و افزایش گردش خون خنثی شود. برای اطمینان از حفظ سلامتی انسان، استاندارد ICNIRP هنگام تعیین محدودیت‌های تابش شغلی مجاز، ضریبی به اندازه ۰/۱ لحاظ کرد. بنابراین میزان پرتوگیری مجاز انسان در مدت زمان ۶ دقیقه در فرکانس‌های ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۱۰ گیگاهرتز ۰/۴ وات بر کیلوگرم می‌باشد [۲۱]. برای ایجاد انرژی برابر با نرخ سوخت و ساز بدن انسان یعنی ۱ وات بر کیلوگرم، یک میدان الکتریکی ۱۰۷ تا ۱۰۸ ولت بر متر یا میدان مغناطیسی ۱۰۴ تا ۱۰۵ تسلا مورد نیاز خواهد بود. به طور کلی شدت میدان‌های الکتریکی تجربه شده توسط انسان تا چند ده ولت بر متر است. در حالی‌که یک میدان «قوی» الکتریکی ۱۰۷ ولت بر متر است. همچنین میدان مغناطیسی تجربه شده توسط انسان‌ها تا چندین میکروتسلا است؛ در حالی‌که یک میدان «قوی» مغناطیسی ۱۰ تا ۲۰ میکروتسلا است. همانطور که قبلاً اشاره شد در فرکانس‌های پایین‌تر، پرتوگیری، آثار غیرگرمایی ایجاد می‌کند و در فرکانس‌های بالاتر واکنش اصلی میدان الکترومغناطیسی با موجودات بیولوژیکی گرمایش بافت‌هاست [۲۱-۲۳].

جدول (۱): خلاصه اثرات بیولوژیکی در فرکانس‌های بین 3-300 Hz

چگالی جریان (mA/m^2)	اثرات
۱<	عدم اثر تصدیق شده
۱۰-۱	اثرات بیولوژیکی جزئی گزارش شده
۱۰۰-۱	احتمال ایجاد مگنتوفوسفن، اثر بر سیستم عصبی
۱۰۰۰-۱۰۰	تغییر در تحریک پذیری سیستم عصبی مرکزی، آستانه‌های تحریک و احتمال آسیب سلامتی
۱۰۰۰>	ضربان اضافی در قلب، انقباض بی نظم رشته های بطنی و احتمال آسیب سلامتی

۴- معرفی برخی اثرات امواج فرکانس پایین

موجودات زنده مانند انسان، سیستم‌های مختلط و پیچیده‌ای هستند که به دلیل مشخصه‌های دی الکتریکی که دارند (شامل ضریب نفوذپذیری مغناطیسی (μ)، گذردهی دی‌الکتریکی (ε) و رسانایی (σ)) با میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی واکنش می‌کنند. واکنش امواج الکترومغناطیسی با سیستم بیولوژیکی بسیار پیچیده است و می‌تواند در سطوح مختلف سلولی، مولکولی یا اندامی یا کل بدن بررسی شود. علاوه بر نوع میدان، میزان واکنش‌ها به عکس‌العمل‌های سیستم‌های بیولوژیکی هم بستگی دارد. سیستم‌های زنده قابلیت بالایی در جبران‌سازی تأثیرات میدان‌های القایی خارجی در بدن دارند. مکانیزم‌های مختلفی برای واکنش‌های الکترومغناطیسی با بدن ارائه شده که می‌توان آن‌ها را به جریان‌ها و میدان‌های القا شده و دیگر اثرات مستقیم و غیرمستقیم تقسیم نمود [۱۱، ۱۲]. اساس واکنش میدان‌های الکترومغناطیسی با مواد از قرن گذشته بر پایه معادله ماکسول بنا شده است. به کارگیری این اصول برای سیستم‌های بیولوژیکی به‌دلیل پیچیدگی زیاد و سطوح چندگانه در بافت‌های بدن موجود زنده بسیار مشکل است. به علاوه بافت‌های بیولوژیکی طیف خواص الکتریکی گسترده‌ای دارند. دشواری‌های فوق‌الذکر فرایند درک اثرات بیولوژیکی را کند می‌کند. با این حال در شرایط طبیعی و آزمایشگاهی با آزمون روی حیوانات و بررسی‌های انسانی می‌توان به آثار احتمالی پی برد [۲۴-۲۷]. مطالعات سلولی، بررسی میزان اثرات امواج بر بدن موجودات زنده به صورت آزمایش‌های مختلف روی سلول‌های کشت شده تحت شرایط متفاوت، بررسی‌های اپیدمیولوژیکی، مطالعات حیوانی در شرایط طبیعی و مصنوعی، مطالعات پزشکی و شغلی قابل اجرا می‌باشد. به دلیل ساختار غیرهمگن موجودات بیولوژیکی، در هنگام پرتوگیری از امواج الکتریکی و مغناطیسی تغییرات مهم سلولی در آنها رخ می‌دهد که ممکن است این تغییرات در غشاء سلول، یون‌ها، فعالیت آنزیم، هورمون‌ها، تأثیرات ژنی و تأثیرات ژنوتوکسیک و آسیب به ژن باشد [۲۸]. در ادامه به چند مورد از آثار سوء امواج پرداخته می‌شود.

۴-۱- شکسته شدن DNA

مجموعه ای از DNA که برای تولید پروتئین‌های خاص کدگذاری شده ژن نامیده می‌شود. کروموزوم‌ها ساختارهای درون سلولی هستند که حاوی ژن می‌باشند. تقریباً هر موجود زنده‌ای دارای ژنوم است، از جمله باکتری‌ها، گیاهان، پرندگان، ماهی‌ها و انسان. ژن انسان رشته‌های شیمیایی حاوی اطلاعات پایه‌ی کارکرد بدن انسان است و از رشته‌های مارپیچی سفت و محکم DNA و مولکول‌های پروتئین مربوط تشکیل شده است. این نوع سازماندهی کروموزوم نامیده می‌شود. کروموزوم‌ها شامل قسمت‌های یکسان پروتئین و DNA هستند. میدان‌های فرکانس پایین ممکن است باعث تغییر در فرآیند سلول شده و می‌تواند منجر به شکسته شدن DNA، مرگ سلول و سرطان شود. ضمناً میدان‌های فرکانس پایین با شدت خیلی بیشتر از شدت میدان‌های محیطی ممکن است باعث افزایش سنتز DNA، تغییر توزیع وزنی مولکولی در هنگام سنتز پروتئین و ایجاد ناهنجاری در کروموزوم‌ها شود [۲۹-۳۰]. شکسته شدن رشته‌های DNA ممکن است بر کارکرد سلول اثر گذاشته و منجر به سرطان‌زایی و مرگ سلول شود. در یک مطالعه مغز تعدادی رت در میدان‌های مغناطیسی ۰/۵ تا ۱ میلی تسلا در فرکانس ۶۰ هرتز به مدت ۲ ساعت تحت تابش قرار داده شد و نتیجه روش سنجش دنباله‌دار[1] افزایشی، شکستگی تک‌رشته‌ای DNA را نشان داد. شکسته شدن دو رشته‌ای DNA نیز در شدت میدان‌های ۰/۱ ، ۰/۲۵ و ۰/۵ میلی‌تسلا مشاهده شد [۳۰]. در مطالعه‌ی دیگر در پرتوگیری‌های میدان مغناطیسی ۴۰۰ میلی‌تسلا در فرکانس ۵۰ هرتز یک جهش ژنتیکی گزارش شد. در آزمونی دیگر با استفاده از سنجش دنباله‌دار با سلول‌های تومور مغز انسان (MO54) افزایش چشمگیری روی افزایش میزان شکسته شدن تک‌رشته ای DNA در میدان ۴۰۰ میلی‌تسلا در فرکانس ۵۰ هرتز و برای مدت ۳۰ دقیقه مشاهده نشد [۳۱]. در یک تحقیق، سلول‌های مغز رت در میدان مغناطیسی ۰/۰۱ میلی‌تسلا در فرکانس ۶۰ هرتز به مدت ۲۴ ساعت تحت تابش قرار گرفت. شکسته شدن تک رشته‌ای و دو رشته‌ای نسبت به حالت نرمال مشاهده شد [۳۲]. مطالعه بسیار خوبی در شرایط طبیعی و آزمایشگاهی در فرکانس‌های ۵۰ و ۶۰ هرتز روی تأثیرات امواج الکترومغناطیسی فرکانس پایین روی DNA در مرجع [۳۳] انجام شده و نتایج نشان داده امواج الکترومغناطیسی فرکانس پایین می‌تواند باعث شکسته شدن DNA شود. شکسته شدن DNA یکی از منابع بی‌ثباتی ژن‌ها می‌باشد که ممکن است منجر به پیر شدن، افزایش رادیکال‌های آزاد و حتی مرگ شود. یک مطالعه روی ۲۹ کارگر شاغل در نیروگاه برق و تحت تابش میدان نسبت به گروه کنترل شده، انجام شد که با روش سنجش دنباله‌دار مشخص شد میدان دارای مقدار ۰/۸۵ میکرو تسلا می‌تواند باعث شکسته شدن DNA شود [۳۴].

۴-۲- ناهنجاریهای کروموزومی

مطالعه‌ای بر روی لنفوسیت‌های خون انسان با تابش پیوسته یک میدان مغناطیسی ۱/۰۵ میلی تسلا در فرکانس ۵۰ هرتز و به مدت ۷۲ ساعت با پالس‌های ۱۰ میلی ثانیه‌ای در [۳۵] انجام شده که افزایش قابل توجهی در تغییر ناهنجاری‌های کروموزومی نشان داد. ناهنجاری‌های کروموزومی در سلول‌های M5S بعد از مواجهه با میدان مغناطیسی ۵۰ هرتز ۴۰۰ میلی تسلا و با حضور میتومایسین –C و اشعه X در [۳۶، ۳۷] دیده شده و افزایشی حدود سه برابری در تغییرات ناهنجاری‌های کروموزومی در سلول‌های تحت پرتوگیری ۴۰۰ میلی‌تسلا در مقایسه با سلول‌های کنترل شده مشاهده شده است. همچنین پرتوگیری پیوسته و متناوب سلول‌های جنین انسان (۱۵ ثانیه روشن و ۱۵ ثانیه خاموش) از میدان مغناطیسی ۳۰ میکروتسلا برای مدت ۷۲ ساعت ناهنجاری‌های کروموزومی را ایجاد کرد. تغییرات در سلول‌های تحت تابش تقریباً دو برابر شد. همچنین تحقیقات نشان داد میدان‌های بزرگتر از ۵۰ میلی‌تسلا، باعث ایجاد اثرات بیولوژیکی می‌شوند به خصوص اگر با کاتالیزورهای فیزیکی یا شیمیایی ترکیب شوند [۳۸]. در یک آزمایش تعداد ۴۸ موش در گروه کنترل شده و تحت آزمون قرار گرفتند و نقش ویتامین C در کاهش آسیب‌های کروموزمی روی آن‌ها بررسی شد. آزمایش در فرکانس ۵۰ هرتز و شدت میدان ۵۰ گاوس برای ۴ روز و هر روز ۴ ساعت انجام شد. یافته‌های پژوهش نشان داد که ویتامین C نقش آنتی ژنوتوکسیکی داشته و باعث کاهش آسیب‌های کروموزومی القا شده توسط امواج الکترومغناطیس با فرکانس پایین (۵۰ هرتز) در اریتروسیت‌های پلی‌کروماتیک موش نر بالغ (نژاد بالب سی) می‌شود. بنابراین این نکته هم از اهمیت برخوردار است که می‌توان ضمن شناسایی راه‌کارهای مقابله با اثرات مخرب این امواج، با استفاده از ترکیبات آنتی اکسیدان نظیر ویتامین C آسیب‌های ژنتیکی ایجاد میکرونوکلئوس در اریتروسیت‌ها را کاهش داد [۳۹].

۴-۳- تشکیل میکرونوکلئوس

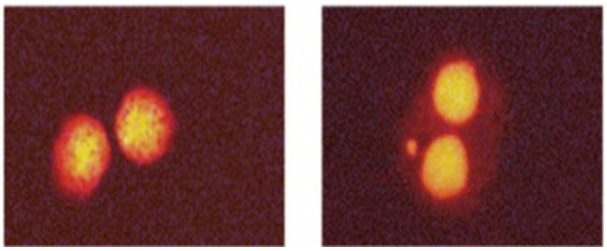
میکرونوکلئوس مکرراً به عنوان یک شاخص تشخیص ژنوتوکسیسیتی استفاده شده است. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که DNA از هسته اصلی جدا می‌گردد و به صورت یک هسته جدا و کوچک به نظر می‌رسد [۴۰]. شکل (۶) نحوه تشکیل میکرونوکلئوس را نشان می‌دهد. امکان اتفاق افتادن میکرونوکلئوس به طور خود به خودی وجود دارد (به ندرت) بنابراین تشکیل میکرونوکلئوس در دو گروه تحت کنترل و تحت تابش ارزیابی می‌شود و از روش‌های آماری برای ارزیابی اختلاف‌ها استفاده می‌گردد [۴۱]. در [۴۲] اثرات ژنوتوکسیک میدان سینوسی AC با شدت ۰/۵ ، ۲، ۵ و ۱۰ کیلوولت بر متر با استفاده از لنفوسیت‌های انسان در بافت‌های تحت تابش و تحت کنترل بررسی شده است. در همه شدت میدان‌های آزمایش شده تفاوتی در فراوانی تشکیل میکرونوکلئوس‌ها در دو گروه مشاهده نشد. وقتی میتومایسین– C به بافت‌ها اضافه شد تعداد میکرونوکلئوس‌ها به شدت افزایش یافت.

[1] Comet Assay

گزارشـــاتی توســـط [۴۳، ۴۴] مبنی بر افزایش میکرونوکلئوس در یک میدان مغناطیسی ۵۰ هرتز پیوسته با شدت ۱ - ۰/۸ میلی‌تسلا بعد از ۴۸ و ۷۲ ســاعت مشــاهده شــده اســت. در یک مطالعه از ســلول‌های لنفوسیت انسان و بنزوپیرن برای بررسی اثر میدان‌های فرکانس پایین بر روی تغییرات میکرونوکلئوس اســـتفاده شـــد. پرتوگیری همزمان بنزوپیرن با یک میدان ۰/۸ میلی‌تســـلا در فرکانس ۶۰ هرتزبرای ۲۴ ساعت و بعد ادامه پرتوگیری با بنزوپیرن به مدت ۴۸ ساعت افزایشی در تشـکیل میکرونوکلئوس در مقایسـه با ۷۲ ساعت تابش با بنزوپیرن تنها ایجاد کرد [۴۵].

۴-۴- تکثیر سلول

تکثیر نامتعارف ســلول باعث تولید ســرطان می‌شــود. هر نشــانه‌ای که باعث تغییر نرخ تکثیر ســلول‌ها شــود ســرطان تولید می‌کند. تحقیقات نشـان داده که میدان‌های فرکانس پایین باعث چنین تغییراتی می‌شـود [۴۶]. سلول‌های تقسیم‌نشدنی در خطر کمتری هستند. اگر میدان‌های مغناطیسی فرکانس‌های پایین باعث تکثیر سلول شود، در سرطان‌زایی مؤثر خواهد بود و بر عکس کاهش تکثیر سلول یا مرگ سلول‌ها بر روی سم‌زدایی اثرگذار است. در [۴۷] گزارش شده که تابش یک ساعته در میدان ۲ میلی تسلا و ۵۰ هرتز مغناطیسی باعث تغییراتی در سلول‌های فیبروبلاســـت موش شـــد. در [۴۸] در یک تابش ۳۰ دقیقه ای ۸۰ میکروتســلا و ۵۰ هرتز، افزایش نرخ تکثیر ســلول‌های AMA[1] انسـان گزارش شـد. ملاتونین اغلب در شـب تولید شـده و از طریق خون در سرتاسر بدن پخش می‌شود. این جریان سریع و موجدار در هر سلول در بدن انسـان باعث نابود شـدن رادیکال‌های آزاد و تقسـیم سـلولی برای جایگزین شدن با DNA های آسیب نرسیده می‌شود. اگر میزان تولید ملاتونین کاهش یابد ممکن اســت انواع ســرطان‌های مختلف به وجود آید. اثرات میدان مغناطیسـی در سـلول‌های MCF-7 سـرطان سـینه انسان بررسی شده و ملاحظه گردید ملاتونین مانع از تکثیر سلول‌های ســرطانی MCF-7 می‌شــود. وقتی ســلول‌ها در مواجهه با یک میدان ســینوســی ۱/۲ میکروتســلا و ۶۰ هرتز قرار گرفتند، اثر بازدارنده تکثیر سلول ملاتونین کاهش یافت [۴۹].



شکل (۶): سمت چپ یک سلول دو هسته‌ای را نشان می‌دهد که میکرونوکلئوس ندارد و شکل سمت راست سلول دوهسته‌ای با میکرونوکلئوس را نشان می‌دهد [۶].

در مطالعه‌ای مشـابه نشـان داده شـده پرتوگیری از میدان‌های مغناطیسـی فرکانس پایین توانایی تاموکسـوفین برای بازداری از تکثیر ســلول ســرطانی را کاهش داد. همچنین کاهش تولید ملاتونین در فرکانس‌های قدرت (۵۰/۶۰ هرتزی) باعث کاهش تولیدی ملاتونین در زدودن رادیکال‌های آزاد می‌شــود [۵۰]. در یک آزمایش که روی سـلول‌های MCF-7 انجام شـد، اثر میدان‌های فرکانس پایین بر روی عملکرد ملاتونین تأیید نشـد. ممکن اسـت این نتیجه بر اثر تفاوت در خواص سـلول‌های MCF-7 اسـتفاده شـده باشـد. سـلول‌های MCF-7 استفاده شده توسط Liburdy حساس به ملاتونین بودند و مسلماً یک گیرنده استروژن داشتند. ولی رشته سلول‌های MCF-7 استفاده شده پاسـخ ضـعیفی به ملاتونین داشـت و به هیچ وجه گیرنده اسـتروژن نداشت [۵۱]. ملاتونین نرخ رشد سلول‌های سرطانی را کاهش می‌دهد و نشـان داده شـده یک میدان مغناطیسـی ۶۰ هرتزی ۱۲ میلی گوسـی می‌تواند توانایی ملاتونین را در رفع رشد سلول‌های سرطانی سد کند. یک مطالعه بر روی موش در میدان‌های مغناطیســی ۵۰ هرتز ، در ۱ و ۱۰ و ۱۰۰ میکروتسـلا و برای ۱۲ سـاعت در روز و یا ۳۰ روز و هر روز ۱۸ ساعت پرتوگیری انجام شد که کاهش ۴۰ درصدی تولید ملاتونین برای ۳۰ روز در تابش‌های ۱۰ و ۱۰۰ میکروتســلا مشــاهده شــد ولی اثری برای ۱ میکروتسلا مشاهده نشد [۵۲].

یک مطالعه جالب روی ۶ نفر در گروه کنترل شده و ۶ نفر در گروه کنترل نشـده که به دلیل شـغلشـان به مدت ۵ سـال، هر روز ۸ سـاعت تحت پرتوگیری (میدان ۰/۲ تا ۶/۶ میکروتسـلا و ۵۰ هرتز) بودند انجام شده است. مشاهده گردید تعداد لنفوسیت‌ها، +CD4 و +CD3 کاهش و NK2 افزایش یافت. شش ماه بعد از پایان پرتوگیری تعداد لنفوسیتها به خصوص +CD4 و +CD3 و +CD19 (به ترتیب ۲۸+ و ۲۲+ و۱۷+ درصد) افزایش یافت [۵۳]. در یک مطالعه اثر میدان بر اشـخاص تحت میدان‌های فرکانس‌های پایین با شـدت‌های ۰/۱ و ۰/۲۵ میلی‌تسـلا در هنگام کار با قوس الکتریکی جوشـکاری انجام شـده اسـت. مقایسـه بین ۱۶ جوشکار و ۱۶ مرد سالم که بین ۲۰ تا ۴۰ سال سن داشتند نشان داد تعداد سلول‌های +CD4 و +CD8 در بدن جوشکارها کاهش یافته اسـت [۵۴]. در یک آزمایش با میدان ۵۰ هرتز ۱ میلی‌تسـلا برای مدت ۷۲ سـاعت روی سـلول K562، بعد از ۲۴ سـاعت اثر حفاظتی روی مرگ ســلولی[3] مشـــاهده گردید [۵۵]. همچنین در [۵۶] اثر امواج فرکانس پایین بر سـلول‌های مختلف بررسـی شـده اسـت. اثرات روی تکثیر سلول‌های مختلف متفاوت مشاهده شده است.

۴-۵- اثر بر فعالیت آنزیم

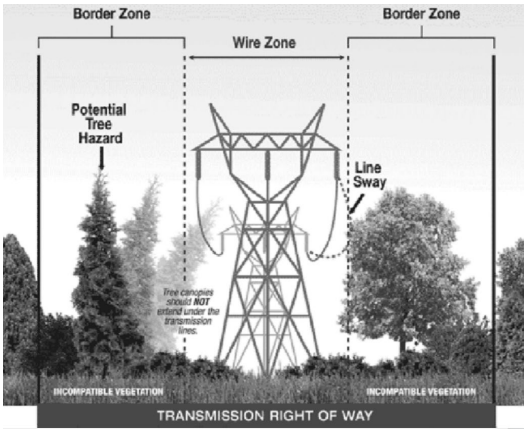
آنزیم‌ها مانند دیگر پروتئین‌ها از زنجیری طولانی از آمینواسـیدها که به وسـیله پپتید به هم چسـبیده‌اند تشـکیل شـده که در تمام سـلول‌های زنده که با کنترل فرایند متابولیسـم، تابع مهمی را اجرا می‌کنند، وجود

[1] Antimitochondrial antibodies (AMA)
AMA یک آنتی‌بادی ضدسیتوپلاسمی و علیه لیپوپروتئین غشای میتوکندری است.
[2] Natural Killer
[3] مرگ سلولی، فرایند مرگ برنامه‌ریزی‌شده سلول است که در جانداران پرسلولی به وقوع می‌پیوندد که اصطلاحاً آنرا خودکشی سلولی هم می‌نامند.

دارند. در یک مطالعه پس از انجام آزمایش‌های گوناگون افزایش فعالیت ODC[1] در غدد لنفاوی موش تحت پرتوگیری میدان ۱۰ میکروتسلای ۶۰ هرتزی مشاهده گردید. همچنین یک مطالعه با استفاده از سلول‌های L929 موش تحت تابش میدان مغناطیسی فرکانس پایین ۶۰ هرتزی و ۱ تا ۱۰۰ میکروتسلا، افزایش حدود ۲ برابری در فعالیت‌های ODC در مقایسه با گروه کنترل نشان داد [۵۸]. آزمایش دیگری روی آنزیم‌های مرتبط با غشاء، با میدان ۲/۵ میلی تسلا و در فرکانس ۷۵ هرتزی انجام شد. در مدت پرتوگیری کاهش شدیدی در فعالیت آنزیم اتفاق افتاد [۵۹]. در مطالعه‌ای که روی آنزیم لاکاز در فرکانس ۱۰، ۴۰ و۵۰ هرتز میدان گردان مغناطیسی با شدت ۱۵ تا ۱۸/۵ میلی تسلا انجام شد، افزایشی در فعالیت آنزیم به ترتیب در فرکانس‌های فوق به صورت ۱۱ درصد، ۱۱ درصد و ۹ درصد مشاهده گردید. کاربرد میدان گردان مغناطیسی راه جدیدی برای کنترل و مدیریت زیست فرایندهای[2] مبتنی بر آنزیم می‌باشد [۶۰].

۵- اثرات غیرمستقیم میدان الکتریکی و مغناطیسی بر بدن از دید ICNIRP

اثرات غیرمستقیم میدان‌های الکترومغناطیسی ممکن است از طریق تماس فیزیکی بین یک شخص و یک جسم، مانند یک فلز در میدان که دارای اختلاف پتانسیل می‌باشند اتفاق بیافتد. نتیجه هر تماس، شارش بارهای الکتریکی (جریان تماسی) است که می‌تواند روی سطح جسم یا در بدن شخص تجمع یابد. در محدوده فرکانسی تا حدود ۱۰۰ کیلوهرتز، شار جریان الکتریکی از جسم ممکن است در تحریک عضلات و یا عصب‌های جانبی اثر داشته باشد. با افزایش میزان جریان ممکن است احساس درد حاصل از شوک الکتریکی و یا سوختن، ایجاد مشکلات تنفسی، اختلال در تشخیص اشیاء و در جریان‌های بالا انقباض رشته‌های عضلانی بطنی قلب آشکار شود. مقدار آستانه برای این اثرات به فرکانس وابسته است. طبق استاندارد ICNIRP، کنترل و مدیریت و حتی پوشیدن لباس‌های محافظ شخصی می‌تواند از ایجاد این مشکلات جلوگیری کند. وقتی شخص به یک جسم که در پتانسیل الکتریکی متفاوت با او باشد خیلی نزدیک شود، حتی بدون تماس مستقیم شخص با آن جسم ممکن است تخلیه الکتریکی به صورت جرقه اتفاق بیافتد [۶۱، ۶۲]. آزمایش بر روی گروهی از داوطلبین که از لحاظ الکتریکی از زمین عایق شده بودند و انگشتان خود را به به یک جسم زمین شده نزدیک کردند نشان داد که آستانه درک تخلیه الکتریکی (جرقه) کمتر از ۰/۶ تا ۱/۵ کیلوولت بر متر می‌باشد. جریان‌های تماسی بزرگ می‌تواند منجر به انقباض عضله شود. آستانه جریان‌ها برای اثرات غیرمستقیم میدان‌ها با فرکانس‌های تا ۱۰۰ کیلوهرتز در جدول (۲) خلاصه شده است [۶۳].



شکل (۷): معبر قانونی

۶- کاهش شدت میدان‌های فرکانس پایین

راه‌های مختلفی برای کاهش میزان تابش امواج الکتریکی و مغناطیسی فرکانس پایین وجود دارد. از بین آنها موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

۱. بالاتر بردن ارتفاع کابل‌های برق نصب شده بر روی پایه‌ها.
۲. نصب علامت‌های اخطار و احتیاط در محل تشعشع.
۳. دفن کابل‌ها در گودال (کابل کشی زیر زمینی).
۴. ایجاد حصار.
۵. خریداری زمین‌های اطراف منبع تشعشع امواج الکترومغناطیسی به دلیل ایجاد محدودیت دسترسی به آن.
۶. استفاده از روش شیلدینگ.
۷. رعایت معبر قانونی نیز گام بزرگی برای کاهش شدت میدان است چون مدت پرتوگیری از خطوط انتقال توان طولانی‌تر از پرتوگیری از میدان‌های مغناطیسی حاصل از دستگاه‌های الکتریکی است.
۸. رعایت فاصله مناسب از شبکه انتقال توان می‌تواند شدت میدان را کاهش دهد. برای مثال در فلوریدا و نیویورک معبر قانونی[3] (شکل (۷)) به صورت جدول (۳) است [۱۶، ۶۴].

۷- مقادیر استاندارد

استانداردهای مختلفی برای مقادیر مجاز پرتوگیری تعریف شده‌اند که از آن جمله ICNIRP[4] و IEEE است.

۷-۱- استاندارد ICNIRP

این استاندارد کمیته‌ای متشکل از کارشناسان علمی در زمینه حفاظت در مقابل امواج الکتریکی و مغناطیسی است. هدف اصلی آن ارائه خطوط راهنما برای ایجاد محدودیت پرتوگیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای اجتناب از اثرات احتمالی سوء بیولوژیکی امواج است. خطوط راهنما به دو گروه تقسیم می‌شوند: پرتوگیری‌های شغلی و پرتوگیری‌های محیط عمومی. پرتوگیری‌های شغلی به افراد بزرگسالی

[1] Orithinin Decarboxylase
آنزیمی که نقش مهمی در تنظیم رشد سلول از طریق سنتز پلی آمین‌های لازم برای سنتز پروتئینها و DNA دارد.

[2] Bioprocess
[3] Right of way
[4] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)

اشـــاره دارد که در محل کار خود تحت تابش امواج الکترومغناطیســـی هستند و از میزان تابش مطلع می‌باشند. برای مثال افرادی که در رادار یا پست‌های انتقال توان کار می‌کنند از این دسته می‌باشند. تابش‌های عمومی به افرادی در تمام سـنین و با وضـعیت سـلامت متفاوت اشـاره دارد کـه از میزان تـابش اطلاع نـدارنـد و نمی‌داننـد تحـت تـابش امواج الکترومغناطیســی هســتند. جدول (۴) مقادیر مرجع در ICNIRP را نشان می‌دهد [۶۵].

۷-۲- استاندارد IEEE

هدف از اسـتاندارد IEEE تعریف سـطوح مرجع برای حفاظت در مقابل اثرات مضـــر تابش الکترومغناطیســـی از ۰ تا ۳ کیلوهرتز اســـت. این اســـتاندارد با در نظر گرفتن مکانیســـم‌های اثرات بیولوژیکی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسـی در انسـانها بنا شـده‌اند. برای فرکانس ۵۰ هرتز ماکزیمم تابش مجاز به‌صورت زیر است [۶۶]:

- میدان مغناطیسی: ۹۰۴ میکروتسلا (برای سر) و ۷۵۸۰۰ میکروتسلا (برای بازو و پا)
- میدان الکتریکی: ۵ تا ۱۰ کیلو ولت بر متر

جدول (۵) مقایسه مقادیر مجاز در چند استاندارد را نشان می‌دهد.

۸- محافظت در مقابل امواج فرکانس پایین VDT

میدان الکتریکی در VDT[1] به دلیل منبع تغذیه و ســـیم پیچ‌ها ایجاد می‌شـود. این قطعات می‌توانند پتانسـیلی سـطحی تا چندین کیلوولت بسـازند که بسـتگی به دما، رطوبت و غلظت یون در هوا دارد. چند نکته ساده می‌تواند برای کاهش پرتودهی این منابع رعایت شود.

۱. استفاده از VDT کم تشعشع.
۲. پرهیز از نشستن یا کارکردن در جایی که فرد را از پشت و اطراف در معرض تشعشع از کامپیوترهای دیگر قرار می‌دهد.
۳. خاموش کردن کامپیوتر و سایر تجهیزات الکترونیکی مشابه، در زمانی که استفاده نمی‌شوند.
۴. نوت بوک با LCD به دلیل باند فرکانسی باریک و توان مصرفی کم می‌تواند جایگزین خوبی برای کامپیوترهای رومیزی باشد.
۵. رعایت فاصله مناسب از VDTها. حداقل فاصله از صفحه VDT ها ۷۰ سانتی‌متر است. با دور شدن از آن، به سرعت شدت میدان مغناطیسی کاهش می‌یابد [۱۶، ۶۸، ۶۹].

۹- سایر اثرات

گونه‌های مختلفی از آثار امواج فرکانس پایین بر بدن انســـان گزارش شـــده اســـت. تحقیقات فراوانی بر روی ارتباط بین ســـکونت در اطراف خطوط انتقال توان و اثرات میدان‌های الکترومغناطیســـی به وجود آمده توسط محققین انجام شده که در ادامه به بیان برخی پرداخته می‌شود:

۹-۱- تومور مغزی

از اثرات مشاهده شده بر روی افراد شاغل در اطراف خطوط انتقال توان، تومور مغزی می‌باشـد [۷۰]. در یک مطالعه روی این افراد گزارش شـد افرادی که در فاصـله کمتر از ۵۰ متری از آن زندگی کرده‌اند دارای دو نوع سرطان شده اند، تومور مغزی و گلیوما[2].

جدول (۲): آستانه جریان‌ها برای اثرات غیرمستقیم میدان‌ها

اثرات غیر مستقیم	آستانه جریان (۶۰/۵۰Hz)	آستانه جریان در (1kHz)	آستانه جریان در (۱۰۰kHz)
درک تماس	۰/۲ تا ۰/۴	۰/۴ تا ۰/۸	۲۵ تا ۴۰
احساس درد	۰/۹ تا ۱/۸	۱/۶ تا ۳/۳	۳۳ تا ۵۵
شوک دردناک	۸ تا ۱۶	۲۱ تا ۲۴	۱۱۲ تا ۲۲۴
شوک شدید	۱۲ تا ۲۳	۱۲ تا ۴۱	۱۶۰ تا ۳۲۰

جدول (۳-الف): شدت میدان مغناطیسی فرکانس پایین در حریم راه و لبه‌های حریم راه

محل	شدت میدان در لبه‌های ROW
فلوریدا	۱۵۰ میلی گوس(خطوط دو مداره ۶۹ تا ۲۳۰ کیلوولتی) ۲۰۰ میلی گوس(خطوط تک مداره ۵۰۰ کیلوولتی)
نیویورک	۲۰۰ میلی گوس (خطوط بیشتر از ۲۳۰ کیلوولتی)

جدول (۳-ب): شدت میدان الکتریکی فرکانس پایین در حریم راه و لبه‌های حریم راه

محل	شدت میدان در ROW	شدت میدان در لبه‌های ROW
فلوریدا	۸ کیلو ولت بر متر(خطوط دو مداره ۶۹ تا ۲۳۰ کیلوولتی) ۱۰ کیلوولت برمتر(خطوط تک مداره ۵۰۰ کیلوولتی)	۲ کیلو ولت بر متر
نیویورک	۱۱/۸ کیلو ولت بر متر	۱/۶ کیلو ولت بر متر

جدول (۴): مقادیر مرجع در ICNIRP (برای ۵۰ هرتز)

مقادیر ICNIRP	شدت میدان الکتریکی	چگالی شارمغناطیسی
تابش‌های عمومی	۵۰۰۰ ولت بر متر	۲۰۰ میکرو تسلا
تابش‌های شغلی	۱۰۰۰۰ ولت بر متر	۱۰۰۰ میکروتسلا

جدول (۵): مقایسه مقادیر مرجع برای میدان‌های الکتریکی(kV/m)

محیط شغلی	استاندارد پیشنهادی	IEEE2000	ICNIRP
نرمال	۱۰	۲۰	۱۰
ویژه	۲۰	۲۰>	۲۰
محیط عمومی	**استاندارد پیشنهادی**	**IEEE2000**	**ICNIRP**
نرمال	۵	۵	۵
ویژه	۱۰	۱۰	-

[1] Video Device Terminal

[2] (Glioma) توموری است که از رشد غیرقابل کنترل سلول‌های گلیال ایجاد می‌شود.

جدول (۶): خلاصه‌ای از آثار امواج فرکانس پایین بررسی شده در پژوهش حاضر

شماره مرجع	بافت مورد آزمون	مشخصات میدان	اثر
۳۰	مغز رت	۶۰ هرتز – ۰/۵ تا ۱ میلی تسلا- ۲ ساعت	شکسته شدن تک رشته ای DNA
۳۱	تومور مغز انسان	۵۰ هرتز – ۴۰۰ میلی تسلا- ۳۰ دقیقه	شکسته شدن تک رشته ای DNA
۳۲	مغز رت	۶۰ هرتز – ۰/۰۱ میلی تسلا- ۲۴ ساعت	شکسته شدن تک رشته ای و دو رشته‌ای DNA
۳۴	۲۹ انسان شاغل در نیروگاه برق	۵۰ هرتز – ۰/۸۵ میکرو تسلا	شکسته شدن DNA
۳۵	لنفوسیت خون انسان	۵۰ هرتز – ۱/۰۵ میلی تسلا- ۷۲ ساعت	ناهنجاری کروموزومی
۳۶	سلول M5S	۵۰ هرتز – ۴۰۰میلی تسلا- + اشعه X و میتومایسین C	ناهنجاری کروموزومی افزایش ۳ برابری
۳۷	سلول‌های جنین انسان	۳۰ میکروتسلا – ۷۲ ساعت	ناهنجاری کروموزومی افزایش ۲ برابری
۴۲	لنفوسیت خون انسان	۵۰ هرتز سینوسی – ۰/۵، ۲، ۵ و ۱۰ کیلوولت بر متر + میتومایسین C	افزایش تشکیل میکرونوکلئوس
۴۳		۵۰ هرتز – ۰/۸تا ۱ میلی تسلا - ۴۸ ساعت	افزایش تشکیل میکرونوکلئوس
۴۵	لنفوسیت خون انسان	۶۰ هرتز – ۰/۸ میلی تسلا - ۲۴ ساعت + بنزوپیرن	افزایش تشکیل میکرونوکلئوس
۴۷	موش	۵۰ هرتز – ۲ میلی تسلا- ۱ ساعت	تغییرات در سلول فیبروبلاست
۴۸	سلول AMA انسان	۵۰ هرتز – ۰۵۸۰ میکرو تسلا- ۳۰ دقیقه	افزایش نرخ تکثیر سلول AMA
۴۹	سلول MCF7 سرطان سینه	۶۰ هرتز –۱/۲ میکرو تسلا	کاهش اثر بازدارندگی ملاتونین در تکثیر سلول- کاهش توان تاموکسوفین در بازدارندگی از تکثیر سلول سرطانی
۵۲	موش	۵۰ هرتز –۱ و ۱۰ میکرو تسلا- ۳۰ روز	کاهش ۴۰ درصدی تولید ملاتونین
۵۳	کارکنان شاغل در پست	۵۰ هرتز – ۰/۲ تا ۶/۶ میکرو تسلا- ۵ سال روزی ۸ ساعت	کاهش تعداد لنفوسیت ها و +CD4 و +CD3 کاهش و NK افزایش
۵۴	جوشکار (انسان) ۲۰ تا ۴۰ سال	۵۰ هرتز – ۰/۱ و ۰/۲۵میلی تسلا	کاهش تعداد لنفوسیت ها و +CD4 و +CD8 کاهش
۵۸	غدد لنفاوی موش سلولL929 موش	۶۰هرتز – ۱۰ میکرو تسلا ۶۰ هرتز – ۱ تا ۱۰۰ میکرو تسلا	افزایش فعالیت ODC افزایش ۲ برابری فعالیت ODC
۵۹	آنزیم مرتبط با غشاء	۷۵ هرتز – ۲/۵ میلی تسلا	کاهش شدید فعالیت آنزیم
۶۰	آنزیم لاکاز	۵۰ هرتز – ۱۵ تا ۱۸/۵ میلی تسلا	کاهش فعالیت آنزیم
۷۰	افراد ساکن در مجاورت و شاغل در خطوط انتقال	۵۰/۶۰ هرتز- دائماً تحت پرتوگیری	تومور مغزی- گلومیا
۷۱ تا ۷۳	انسان	میدان بزرگتر از ۰/۳ تا ۰/۴ میکروتسلا	سرطان خون کودکان
۷۴	میمون	۳۰ هرتز-۰/۷ میکروتسلا- ۲۸ روز و روزی ۲ ساعت	کاهش فرایند یادگیری و حافظه
۷۵	رت	۵۰ هرتز-۱ تا ۲ میلی تسلا- ۴۲ روز	نقص در یادگیری و حافظه
۷۶	رت	۵۰ هرتز- ۱ میلی تسلا- ۲۸ روز و روزی ۲ ساعت	کمک به نورون‌زایی هیپوکمپوس به همراه کم خونی مغزی و تأثیر بر شکاف گذرگاه سیگنالینگ در رت‌ها
۷۶	رت	۵۰ هرتز- ۱ میلی تسلا- ۶ روز و روزی ۳/۵ ساعت	کمک به بقای نورون‌های تازه متولد شده و بهبود یادگیری و حافظه

۹-۱- سرطان خون

در سال ۲۰۰۲ سازمان بهداشت جهانی[1] گزارش کرد میدان‌های بزرگتر از ۰/۳ یا ۰/۴ میکروتسلا باعث ایجاد سرطان خون کودکان می‌شود [۷۱]. در تحقیق دیگری یک بازبینی عمیق بین سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ صورت گرفته که در آن به ارتباط بین خطوط انتقال توان و سرطان خون در افراد زیر ۲۱ سال گزارش شده است [۷۲، ۷۳].

۹-۲- اثر بر روی حافظه

از تأثیرات دیگر امواج فرکانس پایین، اثر بر روی حافظه، یادگیری و همچنین رفتار می‌باشد. در یک آزمایش از ۴ میمون استفاده شد که تحت تابش میدان با شدت ۰/۷ میکروتسلا در فرکانس ۳۰ هرتز به مدت ۳۰ روز و روزانه ۴ ساعت بودند. یک هفته قبل و یک هفته بعد از پرتو دهی تغییرات آناتومیکی مغز میمون‌ها با استفاده از MRI اسکن

[1] World Health Orgenization

شـــد. قرارگیری در معرض میدان الکترومغناطیس با فرکانس ۳۰ هرتز موجب کاهش تعداد پاسـخ‌های صـحیح در فرایند یادگیری و تأخیر در شـکل‌گیری حافظه در دو میمون مورد آزمایش شـد. این نشـان می‌دهد که میـدان الکترومغنـاطیســـی با فرکانس ۳۰ هرتز موجب اختلال در فرآیند یادگیری و حافظه بینایی می‌شـود که احتمالاً این تغییرات را از طریق تأثیر بر فاکتورهای دیگری به غیر از تغییر در سـاختار و آناتومی مغزی اعمال می‌کند [۷۴]. در [۷۵] نیز نقص در یادگیری و حافظه در طولانی مدت در میدان ۱ تا ۲ میلی تسـلا با فرکانس ۵۰ برای ۴۲ روز پرتوگیری هرتز برای رت[1]ها گزارش شده است.

۱۰- اثر بر سیستم عصبی

در مطالعه‌ای که بر روی اثرات امواج الکترومغناطیسـی فرکانس پایین ، در فرکانس ۵۰ هرتز و در میدان‌های ۱ میلی تسلا روی سیستم عصبی رت انجام شـد، مشـاهده گردید پرتوگیری در مدت ۲۸ روز و روزی ۲ سـاعت، باعث کمک به نورون‌زایی هیپوکمپوس[2] به همراه کم خونی مغزی و تأثیر بر شکاف گذرگاه سیگنالینگ در رت‌ها می‌شود. همچنین در مدت ۶ روز و روزی ۳/۵ سـاعت روی رت نوع C57bl/6 مطالعه‌ای انجام شـد که در آن کمک به بقای نورون‌های تازه متولد شـده و بهبود یادگیری و حافظه مشاهده گردید [۷۶].

۱۱- نتیجه‌گیری

با توجه به روند رو به رشد استفاده از وسایل الکتریکی و تسهیلاتی که در زندگی امروزی دارند، و از طرف دیگر اثرات احتمالی حاصـل از آنها، تلاش هر چه بیشـتر برای کاهش یا از بین بردن میزان اثرات میدان‌ها بدیهی به نظر می‌رسد. هر چند با رعایت نکات ذکر شـده برای حفاظت در مقابل امواج فرکانس پایین و همچنین رعایت مقادیر بیان شـده در اسـتانداردها، می‌توان میزان اثرات بیولوژیکی امواج فرکانس پایین را تا حدی کاهش داد اما همکاری مهندسین و بیولوژیست‌ها ضروری است تا هم جنبه‌های سـلامتی و هم جنبه‌های مهندسـی میدان‌ها و آستانه‌های خطر به صورت دقیقتر بررسی گردد. همچنین آستانه‌های آسیب‌های احتمالی و روش‌های پیشگیری از آنها باید به نحو مطلوب به اطلاع عموم و اماکن شـغلی برسـد تا افراد تحت تابش امواج از خود مراقبت بیشتری نمایند و آسیب کمتری ببینند. به منظور جمع بندی، تحقیقات مطالعه شده در این مقاله در جدول (۶) ارائه شده است.

مراجع

[1] F. S. Alqurashi, A. Trichili, N. Saeed, B. S. Ooi, and M.-S. Alouini, “Maritime Communications: A Survey on Enabling Technologies, Opportunities, and Challenges,” IEEE Internet of Things Journal, pp. 1–1, 2022, doi: https://doi.org/10.1109/jiot.2022.3219674.

[2] H. Aliyari, H. Sahraei, S. Gholabi, M.B. Menhaj, M. Kazemi, and Seyed Hossein Hosseinian, “The Effect of Electrical Fields From High-voltage Transmission Line on Cognitive, Biological, and Anatomical Changes in Male Rhesus macaque Monkeys Using MRI: A Case Report Study,” Basic and clinical neuroscience, vol. 13, no. 4, pp. 433–442, Jul. 2022, doi: https://doi.org/10.32598/bcn.2021.1340.3.

[3] Asaad Shemshadi and Pourya Khorampour, “Novel Electric Field Exposure Control Methods for Multi-Story Buldings Installed in Vicinity of High-Voltage Apparatus Using FEM,” ASEAN Engineering Journal, vol. 11, no. 4, pp. 179–203, Oct. 2021, doi: https://doi.org/10.11113/aej.v11.17872.

[4] X. Zhang, “Magnetic Field Parameters and Biological Sample Differences That Lead to Differential Bioeffects,” pp. 1–30, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-19-8869-1_1

[5] P. Stavroulakis, Biological Effects of Electromagnetic Fields. Springer Science & Business Media, 2013.

[6] M. Feychting, A. Ahlbom, and L. Kheifets, “EMF AND HEALTH,” Annual Review of Public Health, vol. 26, no. 1, pp. 165–189, Apr. 2005, doi: https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.26.021304.144445.

[7] G. Vianale, M. Reale, P. Amerio, M. Stefanachi, S. Di Luzio, and R. Muraro, “Extremely low frequency electromagnetic field enhances human keratinocyte cell growth and decreases proinflammatory chemokine production,” British Journal of Dermatology, vol. 158, no. 6, pp. 1189–1196, Jun. 2008, doi: https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2008.08540.x.

[8] C. D’Angelo, E. Costantini, M. A. Kamal, and M. Reale, “Experimental model for ELF-EMF exposure: Concern for human health,” Saudi Journal of Biological Sciences, vol. 22, no. 1, pp. 75–84, Jan. 2015, doi: https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.07.006.

[9] D. Belpomme, L. Hardell, I. Belyaev, E. Burgio, and D. O. Carpenter, “Thermal and non-thermal health effects of low intensity non-ionizing radiation: An international perspective,” Environmental Pollution, vol. 242, pp. 643–658, Nov. 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.019.

[10] A. Lak, “Evaluation of Biological Effects of Extremely Low Frequency Fields on human body,” The national conference of electrical engineering and computer science of south of Iran, April 2013.

[11] A. Lak and Homayoon Oraizi, “Evaluation of SAR Distribution in Six-Layer Human Head Model,” International Journal of Antennas and Propagation, vol. 2013, pp. 1–8, Jan. 2013, doi: https://doi.org/10.1155/2013/580872.

[12] M. Biesuz, T. Saunders, D. Ke, M. J. Reece, C. Hu, and S. Grasso, “A review of electromagnetic processing of materials (EPM): Heating, sintering, joining and forming,” Journal of Materials Science & Technology, vol. 69, pp. 239–272, Apr. 2021, doi: https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.06.049.

[13] C. J. Hu and F. S. Barnes, “A simplified theory of pearl chain effects,” Radiation and Environmental Biophysics, vol. 12, no. 1, pp. 71–76, Jun. 1975, doi: https://doi.org/10.1007/bf02339811.

[14] http://www.environmentalhealth.ir

[15] http://www.radiologyandphysicalmedicine.es

[16] R. Y. Habash, Electromagnetic radiation and safety, Taylor & Francis Group, 2018.

[17] WHO Magnetic fields, Environmental health criteria, Genova, World Health Orgenization, 1987.

[18] Per Lövsund, P. Öberg, G. Nilsson, and T. Reuter, “Magnetophosphenes: a quantitative analysis of

[1] این نوع موش دارای توالی ژنوم کامل (بعد از انسان) است.

[2] هیپوکمپوس قسمتی از دستگاه کناره‌ای مغز که مرکز یادگیری و حافظه است.

Jun. 2020, doi: https://doi.org/10.1007/s11033-020-05563-8.

[34] R. Zendehdel, I. J. Yu, B. Hajipour-Verdom, and Z. Panjali, "DNA effects of low level occupational exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (50/60 Hz)," Toxicology and Industrial Health, vol. 35, no. 6, pp. 424–430, May 2019, doi: https://doi.org/10.1177/0748233719851697.

[35] A. Antonopoulos, B. Yang, A. Stamm, W.-D. . Heller, and G. Obe, "Cytological effects of 50 Hz electromagnetic fields on human lymphocytes in vitro," Mutation Research Letters, vol. 346, no. 3, pp. 151–157, Mar. 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0165-7992(95)90047-0.

[36] H. Yaguchi, M. Yoshida, G. R. Ding, K Shingu, and J Miyakoshi, "Increased chromatid-type chromosomal aberrations in mouse m5S cells exposed to power-line frequency magnetic fields," International Journal of Radiation Biology, vol. 76, no. 12, pp. 1677–1684, Jan. 2000, doi: https://doi.org/10.1080/09553000050201172.

[37] H. Yaguchi, M. Yoshida, Yosuke Ejima, and Junji Miyakoshi, "Effect of high-density extremely low frequency magnetic field on sister chromatid exchanges in mouse m5S cells," vol. 440, no. 2, pp. 189–194, Apr. 1999, doi: https://doi.org/10.1016/s1383-5718(99)00027-3.

[38] I. Nordenson, Kjell Hansson Mild, G. Andersson, and M. Sandström, "Chromosomal aberrations in human amniotic cells after intermittent exposure to fifty hertz magnetic fields," Bioelectromagnetics, vol. 15, no. 4, pp. 293–301, Jan. 1994, doi: https://doi.org/10.1002/bem.2250150404.

[۳۹] وفایی راد م.، اثرآنتی اکسیدانتی ویتامین C در کاهش آسیب های کروموزومی القا شده توسط میدان الکترومغناطیسی با فرکانس پایین در اریتروسیت های مغز استخوان موش کوچک آزمایشگاهی، فصلنامه سلول و بافت، ۱۳۹۱.

[40] S. Koyama, T. Nakahara, K. Wake, M. Taki, Yasuhito Isozumi, and Junji Miyakoshi, "Effects of high frequency electromagnetic fields on micronucleus formation in CHO-K1 cells," Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, vol. 541, no. 1–2, pp. 81–89, Nov. 2003, doi: https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2003.07.009.

[41] M. R. Scarfì et al., "50 Hz AC Sinusoidal Electric Fields Do Not Exert Genotoxic Effects (Micronucleus Formation) in Human Lymphocytes," Radiation Research, vol. 135, no. 1, pp. 64–64, Jul. 1993, doi: https://doi.org/10.2307/3578397.

[42] M. Simkó, Ralf Kriehuber, and S. Lange, "Micronucleus formation in human amnion cells after exposure to 50 Hz MF applied horizontally and vertically," Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, vol. 418, no. 2–3, pp. 101–111, Oct. 1998, doi: https://doi.org/10.1016/s1383-5718(98)00116-8.

[43] E. Saalman, Agneta Önfelt, and B. Gillstedt-Hedman, "Lack of c-mitotic effects in V79 Chinese hamster cells exposed to 50 Hz magnetic fields," Bioelectrochemistry and Bioenergetics, vol. 26, no. 2, pp. 335–338, Oct. 1991, doi: https://doi.org/10.1016/0302-4598(91)80034-z.

[44] M. R. Scarfi, M. B. Lioi, O. Zeni, M Della Noce, C. Franceschi, and F. Bersani, "Micronucleus frequency and cell proliferation in human lymphocytes exposed to 50 Hz sinusoidal magnetic fields," Health Physics, , vol. 76, no. 3, pp. 244–250, Mar. 1999, doi: https://doi.org/10.1097/00004032-199903000-00005.

[45] Y. Cho, "The effect of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on the frequency of micronuclei and sister chromatid exchange in human lymphocytes induced by benzo(a)pyrene," Toxicology thresholds," Medical & Biological Engineering & Computing, vol. 18, no. 3, pp. 326–334, May 1980, doi: https://doi.org/10.1007/bf02443387.

[19] J. Patrick Reilly, Applied Bioelectricity. Springer Science & Business Media, 2012.

[20] T. Wessapan, P. Rattanadecho, N. Somsuk, M. Yamfang, M. Guptasa, and P. Montienthong, "Thermal Effects of Electromagnetic Energy on Skin in Contact with Metal: A Numerical Analysis," Energies, vol. 16, no. 16, p. 5925, Jan. 2023, doi: https://doi.org/10.3390/en16165925.

[21] Hye Sun Kim et al., "Effect of Exposure to a Radiofrequency Electromagnetic Field on Body Temperature in Anesthetized and Non-Anesthetized Rats," Bioelectromagnetics, vol. 41, no. 2, pp. 104–112, Dec. 2019, doi: https://doi.org/10.1002/bem.22236.

[22] ICNIRP Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic and electromagnetic fields(up to 300GHz), 2020.

[23] ICNIRP General approach to protection against non-ionizing radiation, Health physics, 2002.

[24] R. Torchio, A. Arduino, Luca Zilberti, and Oriano Bottauscio, "A fast tool for the parametric analysis of human body exposed to LF electromagnetic fields in biomedical applications," Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol. 214, pp. 106543–106543, Feb. 2022, doi: https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106543.

[25] J. Malmivuo and R. Plonsey, Bioelectromagnetism : principles and applications of bioelectric and biomagnetic fields. New York, N.Y. ; Oxford: Oxford University Press, 2002.

[26] Y. Jiao, F. Cao, and H. Liu, "Radiation-induced Cell Death and Its Mechanisms," Health Physics, vol. 123, no. 5, pp. 376–386, Sep. 2022, doi: https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001601.

[27] H. Lai and B. B. Levitt, "Cellular and molecular effects of non-ionizing electromagnetic fields," Reviews on Environmental Health, vol. 0, no. 0, Apr. 2023, doi: https://doi.org/10.1515/reveh-2023-0023.

[28] J B. Little, "Cellular, Molecular, and Carcinogenic Effects of Radiation," Hematology/Oncology Clinics of North America, vol. 7, no. 2, pp. 337–352, Apr. 1993, doi: https://doi.org/10.1016/s0889-8588(18)30244-2.

[29] C. T. Mihai, P. Rotinberg, F. Brinza, and G. Vochita, "Extremely low-frequency electromagnetic fields cause DNA strand breaks in normal cells," Journal of Environmental Health Science and Engineering, vol. 12, p. 15, Jan. 2014, doi: https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-15.

[30] A. M. Khalil and W. Qassem, "Cytogenetic effects of pulsing electromagnetic field of human lymphocytes in vitro: chromosome aberrations, sister-chromatid exchanges and cell kinetics," Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, vol. 247, no. 1, pp. 141–146, Mar. 1991, doi: https://doi.org/10.1016/0027-5107(91)90041-l.

[31] Junji Miyakoshi, M. Yoshida, K. Shibuya, and M. Hiraoka, "Exposure to Strong Magnetic Fields at Power Frequency Potentiates X-ray-induced DNA Strand Breaks," vol. 41, no. 3, pp. 293–302, Sep. 2000, doi: https://doi.org/10.1269/jrr.41.293.

[32] H. C. Lai and N. P. Singh, "Medical applications of electromagnetic fields," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 10, p. 012006, Apr. 2010, doi: https://doi.org/10.1088/1755-1315/10/1/012006.

[33] A. Karimi, Farzaneh Ghadiri Moghaddam, and Masoumeh Valipour, "Insights in the biology of extremely low-frequency magnetic fields exposure on human health," Molecular Biology Reports, vol. 47, no. 7, pp. 5621–5633,

2002, doi: https://doi.org/10.1016/s0188-4409(01)00337-x.
[57] T. A. Litovitz, D. Krause, M. Penafiel, E. C. Elson, and J. M. Mullins, “The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity,” Bioelectromagnetics, vol. 14, no. 5, pp. 395–403, Jan. 1993, doi: https://doi.org/10.1002/bem.2250140502.
[58] A. Morelli, S. Ravera, I. Panfoli, and I. M. Pepe, “Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on membrane-associated enzymes,” Archives of Biochemistry and Biophysics, vol. 441, no. 2, pp. 191–198, Sep. 2005, doi: https://doi.org/10.1016/j.abb.2005.07.011.
[59] A. Wasak, R. Drozd, D. Jankowiak, and R. Rakoczy, “Rotating magnetic field as tool for enhancing enzymes properties - laccase case study,” Scientific Reports, vol. 9, no. 1, Mar. 2019, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-019-39198-y.
[۶۰] گل محمدی ع.، هندبوک ایمنی در برق ، انتشارات گل محمدی، ۱۳۹۴.
[۶۱] نوشاد ب. ، ایمنی در برق، انتشارات علم آفرین، ۱۳۹۰.
[62] https://www.irpa.net/
[63] M. Garfinkel, S. Hosler, M. Roberts, J. Vogt, C. Whelan, and E. Minor, “Balancing the management of powerline right-of-way corridors for humans and nature,” Journal of Environmental Management, vol. 330, pp. 117175–117175, Mar. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117175.
[64] https://www.icnirp.org
[65] https://standards.ieee.org
[66] H. Tian et al., “System-level biological effects of extremely low-frequency electromagnetic fields: an in vivo experimental review,” Frontiers in Neuroscience, vol. 17, Oct. 2023, doi: https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1247021.
[67] www.safety.rochester.edu
[68] https://www.cdc.gov
[69] C. Carles et al., “Residential proximity to power lines and risk of brain tumor in the general population,” Environmental Research, vol. 185, p. 109473, Jun. 2020, https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109473.
[70] C. Malagoli et al., “Residential exposure to magnetic fields from high-voltage power lines and risk of childhood leukemia,” Environmental Research, vol. 232, pp. 116320–116320, Sep. 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116320.
[71] C. Brabant, A. Geerinck, C. Beaudart, E. Tirelli, C. Geuzaine, and O. Bruyère, “Exposure to magnetic fields and childhood leukemia: a systematic review and meta-analysis of case-control and cohort studies,” Reviews on Environmental Health, vol. 38, no. 2, pp. 229–253, Mar. 2022, doi: https://doi.org/10.1515/reveh-2021-0112.
[۷۲] الف. تکیه، و همکاران، بررسی اثر میدانهای الکترومغناطیس با فرکانس بسیار پایین بر یادگیری و حافظه بینایی و ساختار آناتومیکی مغز در میمون‌های رزوس نر، دو ماهنامه طب جنوب، ۱۳۹۷.
[73] H. Abkhezr, Sh. Babri, M. Farid-Habibi, F. Farajdokht and S. Sadigh Eteghad, , “Effect of prenatal exposure to stress and extremely lowfrequency electromagnetic field on hippocampal and serum BDNF levels in male adult rat offspring,” Iranian Journal of Basic Medical Sciences, 2024. doi: https://dx.doi.org/10.22038/IJBMS.2024.75459.16357.
[74] R. Eskandani and M. I. Zibaii, “Unveiling the biological effects of radio-frequency and extremely-low frequency electromagnetic fields on the central nervous system performance,” Bioimpacts. 2024. doi: 10.34172/bi.2023.30064
Letters, vol. 143, no. 1, pp. 37–44, Jun. 2003, doi: https://doi.org/10.1016/s0378-4274(03)00111-5.
[46] Y. Cho, “The effect of extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on the frequency of micronuclei and sister chromatid exchange in human lymphocytes induced by benzo(a)pyrene,” Toxicology Letters, vol. 143, no. 1, pp. 37–44, Jun. 2003, doi: https://doi.org/10.1016/s0378-4274(03)00111-5.
[47] M. Martínez, A. Úbeda, J. Moreno, and M. Trillo, “Power Frequency Magnetic Fields Affect the p38 MAPK-Mediated Regulation of NB69 Cell Proliferation Implication of Free Radicals,” International Journal of Molecular Sciences, vol. 17, no. 4, pp. 510–510, Apr. 2016, doi: https://doi.org/10.3390/ijms17040510.
[48] M. Barati et al., “Cellular stress response to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF): An explanation for controversial effects of ELF-EMF on apoptosis,” Cell Proliferation, Nov. 2021, doi: https://doi.org/10.1111/cpr.13154.
[49] J. Schimmelpfeng and H Dertinger, “Action of a 50 Hz magnetic field on proliferation of cells in culture, ” Bioelectromagnetics 18:177–183.1997, https://doi.org/10.1002/(sici)1521186x(1997)18:2<177::aid-bem11>3.0.co;2-o.
[50] S. Kwee and P. Raskmark, “Changes in cell proliferation due to environmental non-ionizing radiation 1. ELF electromagnetic fields,” Bioelectrochemistry and Bioenergetics, vol. 36, no. 2, pp. 109–114, Mar. 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0302-4598(94)01760-x.
[51] R. P. Liburdy, T. R. Sloma, R. Sokolic, and P. Yaswen, “ELF magnetic fields, breast cancer, and melatonin: 60 Hz fields block melatonin’s oncostatic action on ER+breast cancer cell proliferation,” Journal of Pineal Research, vol. 14, no. 2, pp. 89–97, Mar. 1993, doi: https://doi.org/10.1111/j.1600079x.1993.tb00491.x.
[52] J.D. Harland, R.P. Liburdy, “Environmental magnetic fields inhibit the antiproliferative action of tamoxifen and melatonin in a human breast cancer cell line,” Bioelectromagnetics,1997.https://doi.org/10.1002/(sici)1521-186x(1997)18:8<555::aid-bem4>3.0.co;2-1.
[53] F. Bersani, Electricity and Magnetism in Biology and Medicine. Boston, MA: Springer US, 1999.
B. Selmaoui, A. Bogdan, A. Auzeby, J. Lambrozo and Y. Touitou, “Acute exposure to 50 Hz magnetic field does not affect hematologic or immunologic functions in healthy young men: a circadian study,” Bioelectromagnetics. 1996. doi: 10.1002/(SICI)1521-186X(1996)17:5<364::AID-BEM3>3.0.CO;2-1.
L. Bonhomme-Faivre, S. Marion, F. Forestier, R. Santini, and H. Auclair, “Effects of Electromagnetic Fields on the Immune Systems of Occupationally Exposed Humans and Mice,” Archives of Environmental Health: An International Journal, vol. 58, no. 11, pp. 712–717, Nov. 2003, doi: https://doi.org/10.3200/aeoh.58.11.712-717.
[54] F. Brisdelli, F. Bennato, A. Bozzi, B. Cinque, F. Mancini, and R. Iorio, “ELF-MF attenuates quercetin-induced apoptosis in K562 cells through modulating the expression of Bcl-2 family proteins,” Molecular and Cellular Biochemistry, vol. 397, no. 1–2, pp. 33–43, Aug. 2014, doi: https://doi.org/10.1007/s11010-014-2169-1.
[55] M. Barati et al., “Cellular stress response to extremely low-frequency electromagnetic fields (ELF-EMF): An explanation for controversial effects of ELF-EMF on apoptosis,” Cell Proliferation, Nov. 2021, doi: https://doi.org/10.1111/cpr.13154.
[56] S. Dasdag, C. Sert, Z. Akdag, and S. Batun, “Effects of extremely low frequency electromagnetic fields on hematologic and immunologic parameters in welders,” Archives of Medical Research, vol. 33, no. 1, pp. 29–32,