

“Review article”

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1223478

A comprehensive review of the health and environmental impacts of mobile phone masts and mitigation strategies

Ahmad Asl Hashemi^{1,2}, Behzad Mohammadi Khangahi³, Gholam Hossein Safari^{1,2,*}

¹Health and Environment Research Center, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

²Department of Environmental Health Engineering, Faculty of Health, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

³Student Research Committee, Tabriz University of Medical Sciences, Tabriz, Iran

* Corresponding author: hsafari13@yahoo.com

(Received: 5 November 2025, Accepted: 13 December 2025)

Abstract

The rapid expansion of mobile communication technologies has led to the widespread deployment of base stations in urban and rural areas. These infrastructures provide stable wireless connectivity through non-ionizing radiofrequency (RF) electromagnetic fields. This review aims to systematically analyze the health and environmental impacts of mobile phone base stations and to identify priorities for future research. A comprehensive review of epidemiological, experimental, and environmental studies was conducted. Human health indicators included non-specific symptoms, neurodegenerative disorders, genetic alterations, and tumor occurrence. Environmental endpoints encompassed plant growth, bird behavior, and pollinator activity. Evidence suggests that chronic RF exposure may be associated with non-specific symptoms such as headaches, sleep disturbances, decreased concentration, and fatigue. Although findings remain inconclusive, some studies indicate potential links with neurodegenerative disorders and tumors. Vulnerable populations, including children, older adults, and pregnant women, may be at higher risk due to physiological sensitivity and longer cumulative exposure. Environmentally, RF exposure may affect plant physiology, disrupt bird orientation and reproductive behavior, and reduce pollinator activity, posing threats to biodiversity and ecosystem services. While definitive causal links between mobile phone base stations and severe health outcomes are lacking, converging evidence underscores the need for large-scale, longitudinal, and interdisciplinary studies. Transparent risk communication, continuous environmental monitoring, and the adoption of innovative engineering solutions are essential to balance the benefits of mobile networks with protection of human and ecological health.

Conflict of interest: None declared.

Keywords: Mobile phone base stations, RF radiation, Health effects, Environmental effects, Mitigation strategies, Public health



دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
فصلنامه آلودگی‌های محیطی و توسعه پایدار شهری

دوره ۲، شماره ۳، پیاپی ۷
پاییز ۱۴۰۴، صفحات ۱۸-۱

DOI: 10.82460/jepsud.2025.1223478

«مقاله مروری»

مروری جامع بر اثرات بهداشتی و محیط زیستی دکل‌های تلفن همراه و راهبردهای کاهش اثرات

احمد اصل هاشمی^{۱*}، بهزاد محمدی خانقاهی^۳، غلامحسین صفری^{۲،۱*}

^۱مرکز تحقیقات سلامت و محیط زیست، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۲گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

^۳کمیته تحقیقات دانشجویی دانشگاه علوم پزشکی تبریز، تبریز، ایران

*نویسنده مسئول مکاتبات: hsafari13@yahoo.com

(دریافت مقاله: ۱۴۰۴/۰۸/۱۴، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۰۹/۲۲)

چکیده

گسترش سریع فناوری‌های ارتباطات سیار موجب استقرار گسترده ایستگاه‌های پایه مخابراتی (دکل‌های تلفن همراه) در مناطق شهری و روستایی شده است. این زیرساخت‌ها با انتشار پرتوهای الکترومغناطیسی غیر یونیزان در طیف امواج رادیوفرکانس (RF) اتصال بی‌سیم پایدار را فراهم می‌کنند. هدف این مطالعه مروری، ارائه تحلیل جامع از اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی دکل‌های تلفن همراه و شناسایی خلأهای پژوهشی و اولویت‌های تحقیقاتی آینده است. این مقاله با مرور جامع مطالعات اپیدمیولوژیک، آزمایشگاهی و محیط‌زیستی منتشرشده، اثرات مواجهه مزمن با RF بر سلامت انسان و زیست‌مندان غیر انسانی را بررسی کرده است. شاخص‌های سلامت شامل علائم غیر اختصاصی، اختلالات نورودژنراتیو، تغییرات ژنتیکی و تومورها و شاخص‌های زیست‌محیطی شامل رشد گیاهان، رفتار پرندگان و فعالیت حشرات گرده‌افشان مدنظر قرار گرفته‌اند. شواهد نشان می‌دهند که مواجهه مزمن با RF می‌تواند علائم غیر اختصاصی مانند سردرد، اختلال خواب، کاهش تمرکز و خستگی ایجاد کند. شواهد غیر قطعی احتمال افزایش خطر اختلالات نورودژنراتیو و برخی تومورها را مطرح می‌کنند. گروه‌های آسیب‌پذیر شامل کودکان، سالمندان و زنان باردار در معرض ریسک بالاتری هستند. از منظر زیست‌محیطی، مواجهه با RF می‌تواند باعث کاهش نرخ رشد گیاهان، اختلال در جهت‌یابی و رفتار تولید مثلی پرندگان و کاهش فعالیت گرده‌افشان‌ها شود که تهدیدی برای تنوع زیستی و عملکرد اکوسیستم‌ها است. اگرچه پیوند قطعی میان دکل‌های تلفن همراه و پیامدهای شدید بهداشتی اثبات نشده است، شواهد موجود ضرورت پژوهش‌های میان‌رشته‌ای، طولی و با مقیاس بزرگ را نشان می‌دهند. اطلاع‌رسانی شفاف، پایش اثرات زیست‌محیطی و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای کاهش مواجهه، کلید مدیریت متوازن میان توسعه شبکه‌های ارتباطی و حفاظت از سلامت انسان و محیط زیست است.

واژه‌های کلیدی: دکل‌های تلفن همراه، پرتوهای RF، اثرات بهداشتی، اثرات زیست‌محیطی، استراتژی‌های کاهش اثرات، سلامت انسان

مقدمه

ارتباطات سیار^۱ به معنای تبادل داده‌ها و گفت‌وگو از طریق شبکه‌های بی‌سیم است که توسط ایستگاه‌های پایه مخابراتی (BTS^۲) یا دکل‌های تلفن همراه انجام می‌شود. این ایستگاه‌ها با انتشار امواج الکترومغناطیسی از نوع غیر یونیزان در طیف فرکانس رادیویی (RF^۳) قادر به برقراری ارتباط بین کاربران و شبکه مرکزی هستند (۱ و ۲). این امواج در محدوده فرکانسی kHz ۳۰ تا ۳۰۰ GHz قرار دارند و اثرات عمدتاً حرارتی و غیرحرارتی بر بافت‌های زنده ایجاد می‌کنند (۳).

فناوری‌های سیار، به ویژه در جهان معاصر، نقش محوری در توسعه اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی ایفا می‌کنند. COSMOS یک مطالعه کوهورت بین‌المللی است که در پنج کشور اروپایی، بریتانیا، دانمارک، سوئد، فنلاند، هلند و فرانسه در مورد استفاده از تلفن همراه و سلامت انجام می‌شود. این مطالعه اثرات احتمالی استفاده طولانی مدت از تلفن‌های همراه و سایر فناوری‌های بی‌سیم بر سلامت را بررسی می‌کند. یافته‌های این پژوهش نشان داد که دسترسی پایدار به شبکه‌های موبایل برای حفظ ارتباطات اجتماعی و رفاه جمعیت ضروری است (۴). علاوه بر این، فناوری‌های نوین مانند شبکه‌های سلولی کوچک^۴، 5G و فیبر نوری برای افزایش پوشش و کیفیت خدمات توسعه یافته‌اند؛ این فناوری‌ها موجب افزایش تراکم انتشار RF می‌شوند و توجه به پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی آن‌ها ضروری است (۵ و ۶).

با وجود مزایای فناوری‌های ارتباطی، نگرانی‌هایی در خصوص پیامدهای بلندمدت مواجهه با تابش RF وجود دارد. این نگرانی‌ها عمدتاً در سه حوزه بهداشت عمومی و سلامت انسان، زیست‌بوم و اکوسیستم‌ها و خط‌مشی و مقررات مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در حوزه بهداشت عمومی و سلامت انسان، مطالعات نشان داده‌اند افرادی که در فاصله کم‌تر از ۵۰۰ متر از ایستگاه‌های پایه زندگی می‌کنند، ممکن است علائم نورویولوژیک مانند سردرد، اختلال خواب یا خستگی را تجربه کنند (۷ و ۸). بازبینی‌های مروری نشان داده است که ۷۳/۶ درصد مطالعات شواهدی از «بیماری ناشی از RF»، «سرطان» یا «تغییرات پارامترهای بیوشیمیایی» گزارش کرده‌اند (۹).

در زمینه زیست‌بوم و اکوسیستم‌ها، تابش RF می‌تواند فرآیندهای فیزیولوژیک گیاهان و حیوانات را تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، اثرات بر جوانه‌زنی گیاهان، مسیر مهاجرت پرندگان و فعالیت گرده‌افشانی زنبورها مشاهده شده است (۱۰-۱۲).

مطالعات اپیدمیولوژیک درباره مواجهه با امواج دکل‌های تلفن همراه نشان داده‌اند که برخی افراد ساکن در مجاورت ایستگاه‌های پایه (BTS) شیوع بالاتری از علائمی مانند سردرد و اختلال خواب را گزارش می‌کنند؛ هرچند این یافته‌ها به دلیل محدودیت‌های روش‌شناختی همچنان قطعی تلقی نمی‌شوند (۷ و ۱۳). همچنین مطالعات حاکی از ۷۳/۹ درصد شواهد مرتبط با سرطان و تغییرات بیوشیمیایی هستند (۹). با این حال، سازمان جهانی بهداشت

^۱ Mobile Communications^۲ Base Transceiver Station^۳ Radiofrequency^۴ Small cell

(WHO^۱) و آژانس حفاظت در برابر تشعشع و ایمنی هسته‌ای استرالیا (ARPANSA^۲) تأکید دارند که در سطوح مواجهه عمومی، شواهد قطعی از زیان‌بار بودن RF مشاهده نشده است (۱۶-۱۴).

افزون بر این، برخی گروه‌ها نظیر کارکنان آتش‌نشانی نگرانی‌هایی درباره اثرات احتمالی طولانی‌مدت بر سیستم عصبی و ایمنی در نتیجه مواجهه مداوم با میدان‌های RF مطرح کرده‌اند (۸). با این حال، آزمون‌های کنترل‌شده - از جمله مطالعات دوسوکور - نشان داده‌اند افرادی که خود را «حساس به امواج» می‌دانند، در شرایط استاندارد آزمایشگاهی قادر به تشخیص حضور یا عدم حضور سیگنال RF نیستند (۱۶).

در حوزه محیط زیست، پژوهش‌های انجام‌شده روی گیاهان و جانوران گزارش کرده‌اند که میدان‌های RF می‌توانند برخی فرآیندهای فیزیولوژیک و رفتاری را به‌ویژه در گونه‌هایی مانند زنبورها و پرندگان متکی بر جهت‌یابی مغناطیسی، تحت تأثیر قرار دهند (۱۰ و ۱۷-۱۹).

برخی پژوهش‌ها معتقدند استانداردهای موجود برای مواجهه RF مانند کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونیزان (ICNIRP^۳) عمدتاً بر اثرات حرارتی تمرکز دارند و اثرات غیرحرارتی را لحاظ نمی‌کنند (۲۰ و ۲۱).

بررسی مطالعات موجود مروری نشان می‌دهند که داده‌های بلندمدت درباره اثرات غیر اختصاصی ناکافی و متناقض‌اند و نیاز به مطالعات طولی با اندازه نمونه

بزرگ وجود دارد (۹ و ۲۰). پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی ایستگاه‌های پایه تلفن همراه در شکل (۱) نشان داده شده است.

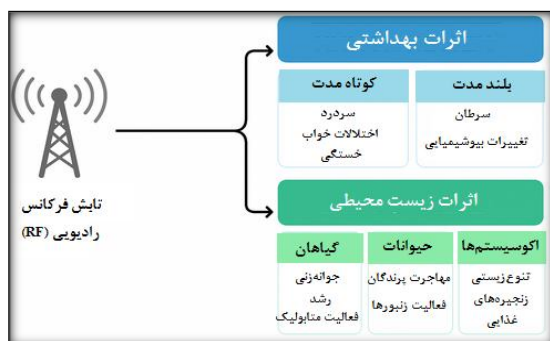
با توجه به اهمیت موضوع، هدف این مقاله مروری عبارت است از:

۱- ارائه خلاصه‌ای علمی از ادبیات شناخته شده در زمینه اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی ناشی از دکل‌های تلفن همراه؛

۲- شناسایی شکاف‌ها و کاستی‌های پژوهشی، شامل کمبود داده‌های طولی، ناکافی بودن اندازه‌گیری مواجهه و کنترل متغیرهای مداخله‌گر؛

۳- معرفی راهکارهای فنی و سیاستی برای کاهش مواجهه RF، شامل فناوری‌هایی مانند شبکه‌های سلولی کوچک، ساختارهای فیبر نوری و طراحی شبکه‌های 5G بهینه شده؛

۴- ارائه توصیه‌هایی در زمینه بهبود استانداردها، اطلاع‌رسانی عمومی و توسعه پژوهش‌های بلندمدت میان‌رشته‌ای.



شکل (۱): پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی ایستگاه‌های پایه تلفن همراه

¹ World Health Organization

² Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency

³ International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

روش اجرای تحقیق

- نوع مطالعه

این پژوهش یک مطالعه مروری جامع - روایتی است که با هدف گردآوری، جمع‌بندی و تحلیل انتقادی شواهد علمی موجود درباره اثرات مواجهه با میدان‌های الکترومغناطیسی فرکانس رادیویی (RF-EMF) بر سلامت انسان و اکوسیستم انجام شد.

- جستجوی منابع و داده‌ها

فرایند جستجوی منابع بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در پایگاه‌های علمی معتبر شامل Scopus، PubMed، ScienceDirect، IEEE Xplore، Web of Science، SpringerLink و Google Scholar انجام گرفت. انتخاب کلیدواژه‌ها بر اساس ترکیبی از موارد زیر انجام گرفت:

- ۱- استخراج واژگان پرتکرار در ادبیات موضوع؛
 - ۲- اصطلاحات رایج در پایگاه‌های علمی حوزه EMF و سلامت؛
 - ۳- کلیدواژه‌هایی که در مقالات کلیدی و پرارجاع این حوزه استفاده شده بودند؛
 - ۴- پوشش سه محور اصلی پژوهش (نوع پرتو، منبع انتشار، پیامدهای سلامت و محیط زیست).
- کلیدواژه‌های مورد استفاده شامل ترکیب‌هایی از اصطلاحات زیر بود:

Radiofrequency Electromagnetic Fields (RF-EMF) -
Mobile Phone Base Stations -
Health Effects -
Ecological Impacts -
Environmental Health -
Electromagnetic Hypersensitivity (EHS) -
Non-Ionizing Radiation -

همچنین منابع خاکستری شامل گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی (WHO، ICNIRP، IEEE،

ARPANSA) و سازمان ملی استاندارد ایران نیز مورد بررسی قرار گرفتند. در مجموع ۳۱۲ منبع اولیه بازیابی شد. که پس از غربالگری، ۵۸ منبع نهایی برای تحلیل محتوا انتخاب شدند. فرآیند غربالگری در دو مرحله و توسط دو پژوهشگر به صورت مستقل انجام شد:

- ۱- غربالگری عنوان و چکیده: حذف مطالعات نامرتبط با دکل‌های تلفن همراه، میدان‌های RF، یا اثرات سلامت و محیط زیست.

- ۲- ارزیابی متن کامل: انتخاب منابعی که مستقیماً به پیامدهای بالینی، اپیدمیولوژیک، زیست‌محیطی یا استانداردهای مواجهه با RF مربوط بودند.

اختلاف‌نظرهای احتمالی میان دو پژوهشگر، بدون نیاز به داور سوم، از طریق بحث و توافق حل شد.

- معیارهای انتخاب منابع

- مطالعات منتشر شده در مجلات معتبر علمی یا گزارش‌های رسمی سازمان‌های بین‌المللی؛ مقالات تجربی، اپیدمیولوژیک، مرورهای نظام‌مند مرتبط با مواجهه انسانی یا اثرات زیست‌محیطی RF-EMF.
- مقالات با چکیده و متن کامل در دسترس به زبان انگلیسی یا فارسی.
- گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و ملی.

- روش تحلیل و دسته‌بندی محتوا

منابع انتخاب‌شده بر اساس رویکرد تحلیل محتوای کیفی بررسی شدند. ابتدا داده‌ها در سه محور اصلی دسته‌بندی شدند:

- اثرات بر سلامت انسان (علائم خودگزارش‌شده، اثرات عصبی-شناختی، سرطان‌زایی، اثرات بر کودکان و گروه‌های حساس)

- اثرات زیست‌محیطی و اکولوژیک (گیاهان، پرندگان، حشرات، درختان و اکوسیستم‌های شهری)
- استانداردها و سیاست‌گذاری‌ها (حدود مجاز مواجهه، نقدها و پیشنهادها برای بازنگری)
تاریخچه استقرار دکل‌های تلفن همراه

ظهور ارتباطات سیار به دهه ۱۹۸۰ میلادی بازمی‌گردد، زمانی که نسل اول تلفن‌های همراه (1G) مبتنی بر سیگنال‌های آنالوگ معرفی شد. با ورود نسل دوم (2G) در اوایل دهه ۱۹۹۰، نیاز به استقرار گسترده‌تر BTS برای پوشش‌دهی افزایش یافت. در این دوره، رشد نمایی تعداد کاربران، موجب گسترش چشمگیر زیرساخت‌های مخابراتی شد (۲۲). نسل‌های سوم (3G) و چهارم (4G) نیز به دلیل افزایش شدید ترافیک داده، استقرار دکل‌ها را به‌ویژه در مناطق شهری تشدید کردند (۲۳). در نسل پنجم (5G)، به دلیل استفاده از فرکانس‌های بالاتر و نیاز به سلول‌های کوچک، تراکم ایستگاه‌ها به سطحی بی‌سابقه رسید (۲۴). افزایش تاریخی در تعداد و تراکم دکل‌ها، توجه محققان و سیاست‌گذاران را به پیامدهای احتمالی ناشی از مواجهه جمعیتی با پرتوهای رادیوفرکانس جلب کرده است. از زمان راه‌اندازی تلفن‌های همراه در دهه ۱۹۸۰، تعداد کل مشترکین تلفن همراه و ایستگاه‌های پایه نصب شده به طور قابل توجهی افزایش یافته است. تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل در سال ۲۰۱۳ ۶/۷ میلیارد بود. در نتیجه بهبود عملکرد سیستم، انواع دستگاه‌ها و برنامه‌های جدید پرکاربرد، تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل در آینده به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. تخمین زده شده است که تعداد اشتراک‌های جهانی موبایل می‌تواند در سال

۲۰۲۵ به ۱۳/۸ میلیارد و در سال ۲۰۳۰ به ۱۷/۱ میلیارد برسد. (۲۵). از زمان ظهور تلفن‌های همراه، نگرانی‌هایی در مورد خطرات بالقوه سلامتی ناشی از قرار گرفتن در معرض RF و EMF مایکروویو مطرح شده است (۲۶). از اوایل دهه ۱۹۹۰، ده‌ها هزار ایستگاه پایه در کشورهایی که شبکه‌های دیجیتالی معرفی شده‌اند، ساخته شده‌اند. در حالی که سیستم‌های قدیمی‌تر با تعداد کم ایستگاه‌های پایه، به سختی مورد توجه عموم قرار گرفته‌اند. افزایش گسترده ایستگاه‌های پایه، منجر به نگرانی‌های عمومی در سراسر جهان شده است (۲۷).

اصول تابش امواج رادیوفرکانس

ایستگاه‌های پایه تلفن همراه با انتشار امواج الکترومغناطیسی در محدوده رادیوفرکانس (معمولاً ۴۰۰ مگاهرتز تا ۳ گیگاهرتز در 2G-4G و تا ۲۶ گیگاهرتز در 5G) امکان ارتباط بی‌سیم پایدار را فراهم می‌کنند (۳). این امواج در دسته پرتوهای غیر یونیزان قرار می‌گیرند، یعنی انرژی آن‌ها برای شکستن پیوندهای مولکولی کافی نیست، اما می‌توانند منجر به گرمایش بافتی شوند (۲۸). شاخص اصلی برای سنجش میزان جذب در واحد جرم توسط بدن انسان در مواجهه با میدان الکترومغناطیسی فرکانس رادیویی، نرخ جذب ویژه تلفن همراه (SAR^1) است که به وات بر کیلوگرم اندازه‌گیری می‌شود (۲). برای دکل‌های تلفن همراه، شاخص‌هایی مانند شدت میدان (ولت بر متر) و چگالی توان (وات بر متر مربع) نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱).

اثرات تشعشعات را می‌توان به غیر حرارتی و حرارتی طبقه‌بندی کرد. اثرات حرارتی ناشی از افزایش

¹ Specific Absorption Rate

دمای بافتی مشابه اثرات پخت و پز در مایکروویو است. اثرات غیر حرارتی به درستی تعریف نشده‌اند، اما مشخص شده است که این اثرات سه تا چهار برابر خطرناک‌تر از اثرات حرارتی هستند که همچنان بحث‌برانگیز است و شامل تغییرات ژنتیکی، عصبی یا سلولی که بدون افزایش محسوس دما رخ می‌دهند (۹ و ۲۹).

اثرات بهداشتی دکل‌های تلفن همراه

- اثرات کوتاه‌مدت^۱

مطالعات متعددی اثرات کوتاه‌مدت و غیراختصاصی را در جمعیت‌های ساکن در نزدیکی ایستگاه‌های پایه (BTS) گزارش کرده‌اند؛ شایع‌ترین شکایات شامل سردرد، اختلالات خواب، خستگی، کاهش تمرکز، سرگیجه و ناراحتی عمومی است (۸ و ۳۰-۳۲). این یافته‌ها اغلب از مطالعات مقطعی مبتنی بر پرسش‌نامه به‌دست آمده‌اند که در آن‌ها ساکنان مجاور دکل‌ها نسبت به گروه‌های دورتر، فراوانی بیش‌تری از علائم غیراختصاصی را گزارش کرده‌اند (۳۱ و ۳۲). با این حال، سمت و سوی علت و معلولی این ارتباط در بسیاری از مطالعات نامشخص است؛ زیرا نگرانی و آگاهی از وجود دکل می‌تواند خود منشأ گزارش اثر نوسیبو^۲ نباشد (۳۳).

در یکی از مطالعات، شرکت‌کنندگان حساس به الکترومغناطیس تحت قرارگیری کوتاه‌مدت با سیگنال‌های پایه قرار گرفتند؛ نتایج نشان داد شرکت‌کنندگان در شرایط دو گروهی قادر به تشخیص معرض یا غیرمعرض بودن بیش‌تر از حد تصادفی نبودند و علائم گزارش‌شده نیز تفاوت معناداری بین

حالات فعال و کنترل نشان ندادند (۱۶ و ۳۴). نتایج جمع‌بندی‌شده از مطالعات تحریک کوتاه‌مدت حاکی از این است که شواهد پشتیبان اثرات فیزیولوژیک فوری و قابل تکرار در سطح‌های مواجهه معمول محیطی ضعیف یا نامشخص است (۱۶ و ۳۵). در نتیجه، شواهد مربوط به اثرات کوتاه‌مدت نشانگر وجود علائم گزارش‌شده در برخی جمعیت‌ها است، اما تفکیک نقش مواجهه واقعی از عوامل روان‌شناختی، استرس و سوگیری‌های گزارشگری نیازمند مطالعات با طراحی دقیق‌تر و کنترل‌شده‌تر است. در مجموع، شواهد تجربی دربارهٔ اثرات کوتاه‌مدت نشانگر وجود علائم گزارش‌شده در برخی جمعیت‌ها است، اما مطالعات کنترل‌شده تداوم علت‌معلولی را تأیید نمی‌کنند. دربارهٔ پیامدهای بلندمدت، شواهد قطعی و یکنواختی که مؤید رابطهٔ علی بین مواجهه محیطی با ایستگاه‌های پایه و بیماری‌های مزمن (از جمله سرطان) باشد، وجود ندارد؛ ولی محدودیت‌های روش‌شناسی و کمبود مطالعات طولی و با اندازه مناسب مانع انحصار نتیجه‌گیری قطعی است. در نتیجه، اولویت‌های پژوهشی آتی باید شامل مطالعات طولی با اندازه مناسب، ارزیابی‌های دقیق مواجهه (شامل اندازه‌گیری‌های زمانی-فضایی) و تمرکز بر گروه‌های پرخطر و اثرات غیرحرارتی احتمالی باشد. همزمان، سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر احتیاط و رویکردهای احتیاطی^۳ به‌خصوص در نزدیک مدارس و مراکز حساس و بهبود مکانیسم‌های اطلاع‌رسانی و پایش سلامت عمومی توصیه می‌شود (۱۶، ۳۴ و ۳۵).

^۳ Precautionary approaches

^۱ Short-term effects

^۲ Nocebo effect

- اثرات بلندمدت^۱

ادعای وجود پیامدهای بلندمدت، از جمله افزایش خطر تومورهای مغزی یا اختلالات نورودژنراتیو، بحث‌برانگیز و محور بسیاری از مطالعات و بازبینی‌ها بوده است. آژانس بین‌المللی پژوهش در سرطان (IARC) در سال ۲۰۱۳، RF-EMF (اشاره عمدتاً به تابش تلفن همراه و نیز منابع محیطی) را در گروه «احتمالاً سرطان‌زا برای انسان» در گروه 2B طبقه‌بندی کرد؛ این طبقه‌بندی بر پایه مدارک محدود اپیدمیولوژیک و شواهد آزمایشی بود (۲۸).

مطالعات اپیدمیولوژیک روی جمعیت‌های اطراف ایستگاه‌های پایه نسبتاً محدود و عمدتاً مقطعی یا مقایسه‌ای بوده‌اند. برخی مطالعات کوچک‌تر، افزایش نسبی در بروز علائم نورویژرفشی یا تغییرات عملکردی را گزارش کرده‌اند (۱۳، ۲۰ و ۳۶)، در حالی که مطالعات بزرگ‌تر و با اندازه‌گیری میدانی دقیق‌تر، اغلب رابطه‌ای معنادار نیافته‌اند (۲۷). مسئله کلیدی در تفسیر این ادعاها ضعف در ارزیابی مواجهه^۳، اندازه نمونه ناکافی، دوره پیگیری کوتاه، و عدم کنترل کامل عوامل مخدوش‌کننده است.

دربارۀ سرطان، بیش‌تر شواهد مرتبط با استفاده طولانی‌مدت از گوشی‌های تلفن همراه است تا تابش مستقیم از دکل‌ها. مطالعات بروز سرطانی^۴ نشان داده‌اند که نرخ تومورهای مغزی در جمعیت‌های با نفوذ تلفن همراه بالا، به‌طور کلی ثابت یا رو به افزایش نبوده است؛ هرچند تحلیل‌های حساس‌تر و طولانی‌مدت کماکان مورد نیاز است (۲۲ و ۳۷).

بنابراین، در سطح کنونی دانش، شواهد قطعی مبنی بر اینکه قرارگیری محیطی در نزدیکی ایستگاه‌های پایه منجر به افزایش قابل اثبات بیماری‌های مزمن یا سرطان می‌شود، ناکافی و متناقض باقی می‌ماند.

- گروه‌های آسیب‌پذیر و مستعد^۵

در ادبیات موضوعی، گروه‌هایی به‌عنوان گروه‌های آسیب‌پذیرتر نسبت به مواجهه RF مطرح شده‌اند: کودکان، زنان باردار، سالمندان و افراد مبتلا به بیماری‌های مزمن یا نقایص ایمنی (۲۸ و ۳۸). استدلال‌های اصلی برای حساسیت بالاتر کودکان شامل نسبت سطح به جرم بالاتر، ساختار مغزی در حال تکامل و پتانسیل مواجهه طولانی‌تر در طول عمر است؛ به همین دلیل برخی محققان و سیاست‌گذاران توصیه به احتیاط بیش‌تری در مورد استقرار دکل‌ها نزدیک مدارس و مراکز نگهداری کودکان کرده‌اند (۳۸ و ۳۹).

کارکنان حرفه‌ای که در فاصله نزدیک یا در معرض مداوم آنتن‌ها کار می‌کنند (مثلاً تکنسین‌های مخابراتی، کارکنان پشت‌بام) نیز در معرض سطوح شغلی بالاتری قرار دارند که نیازمند استانداردها و پایش شغلی مجزا است (۲). علاوه بر این، افرادی که حساسیت خودگزارش‌شده به امواج الکترومغناطیسی (EHS^۶) دارند، علی‌رغم ناتوانی مطالعه‌محور در اثبات فیزیولوژیک بودن حساسیت در اغلب آزمایش‌های دوکور، معمولاً گزارش‌دهنده علائم شدیدتری هستند. مدیریت این گروه غالباً بر مبنای رویکردهای

^۵ Vulnerable/Susceptible Populations^۶ Electromagnetic Hypersensitivity^۱ Long-term effects^۲ International Agency for Research on Cancer^۳ Exposure Assessment^۴ Incidence Trend Analyses

روان پزشکی/تسهیلی و کاهش قرارگیری خود گزارش شده متمرکز است (۱۶ و ۴۰).

اثرات زیست محیطی دکل های تلفن همراه

- اثرات بر گیاهان

گیاهان به عنوان موجودات ساکن و حساس به عوامل محیطی، می توانند تحت تأثیر قرارگیری مزمن در برابر پرتوهای RF قرار گیرند. مطالعات آزمایشگاهی و میدانی نشان داده اند که RF می تواند موجب تغییر در جوانه زنی، رشد و فرایندهای فیزیولوژیک گیاهان شود (۴۳-۴۱). همچنین، نتایج تحقیقات نشان داده اند که RF می تواند فرآیند فتوسنتز را مختل کرده و فعالیت آنزیمی و متابولیسم ثانویه را تغییر دهد (۱۱). نتایج مطالعه بالمری^۱ در سال ۲۰۱۰ نشان داد که درختان واقع در نزدیکی ایستگاه های پایه تلفن همراه بیش تر دچار آسیب های غیرقابل توضیح در برگ ها، تغییر رنگ و خشکیدگی شاخه ها می شوند (۴۴). اگرچه مکانیزم دقیق هنوز روشن نیست، اما فرض بر این است که RF می تواند با ایجاد استرس اکسیداتیو و تغییر در تعادل آب و مواد معدنی گیاهان، اثرات زیستی بر جای گذارد (۴۵).

- اثرات بر حیوانات

تأثیر پرتوهای RF بر حیوانات در مطالعات متعدد بررسی شده است. شواهد نشان می دهد که پرندگان به ویژه به دلیل وابستگی به سیگنال های مغناطیسی و الکتریکی برای ناوبری، در برابر RF آسیب پذیر هستند. بالمری و هالبرگ^۲ در سال ۲۰۰۷، کاهش تراکم پرندگان در مناطقی با تراکم بالای دکل های مخابراتی را گزارش کردند (۱۹). همچنین، تغییر در الگوهای

مهاجرت و رفتار تغذیه ای در برخی گونه های پرندگان در مجاورت ایستگاه های پایه مشاهده شده است (۱۸).

حشرات نیز به شدت تحت تأثیر قرار می گیرند، به ویژه زنبورهای عسل (*Apis mellifera*) که به میدان های الکترومغناطیسی حساس هستند. پژوهش های متعددی نشان داده اند که RF می تواند منجر به اختلال در بازگشت زنبورها به کندو، کاهش فعالیت گرده افشانی و در نهایت فروپاشی کلنی شود (۱۲ و ۱۷). در یک مطالعه تجربی، شارما و کومار^۳ در سال ۲۰۱۰ مشاهده کردند که تابش RF منجر به کاهش قابل توجه سطح هموگلوبین و پروتئین در زنبورها می شود (۱۷). پستانداران کوچک مانند موش ها نیز در معرض اثرات بیولوژیک قرار گرفته اند؛ تغییرات در الگوی خواب، سیستم تولید مثل و استرس اکسیداتیو در مطالعات حیوانی گزارش شده است (۴۶). اگرچه این نتایج بیش تر در معرض گذاری های آزمایشگاهی با شدت بالاتر به دست آمده اند، اما نگرانی ها درباره اثرات تجمعی مواجهه های محیطی باقی است.

- اثرات بر تنوع زیستی و اکوسیستم

تأثیر امواج RF محدود به گونه های منفرد نیست و می تواند بر کل اکوسیستم اثرگذار باشد. از آنجا که بسیاری از گونه های حیوانی و گیاهی در شبکه های پیچیده غذایی و بوم شناختی در تعامل هستند، تغییر در یک گونه می تواند پیامدهای زنجیره ای ایجاد کند (۴۷). برای مثال، کاهش جمعیت زنبورهای گرده افشان می تواند مستقیماً بر باروری گیاهان و تولید محصولات کشاورزی تأثیر بگذارد (۱۲). مطالعات میدانی در اروپا

³ Sharma and Kumar

¹ Balmori

² Balmori and Hallberg

و آسیا نشان داده‌اند که مناطقی با تراکم بالای دکل‌های تلفن همراه کاهش معنی‌داری در تراکم پرندگان، حشرات گرده‌افشان، و کیفیت سلامت درختان داشته‌اند (۱۱، ۱۹ و ۴۴). چنین تغییراتی به مرور می‌توانند منجر به کاهش تنوع زیستی، اختلال در تعادل اکولوژیک و در نهایت تهدید امنیت غذایی شوند. همچنین، برخی مرورهای اخیر هشدار داده‌اند که RF ممکن است به‌عنوان یک آلاینده نوظهور زیست‌محیطی طبقه‌بندی شود که اثرات آن باید مشابه دیگر آلاینده‌های شیمیایی و فیزیکی مورد پایش قرار گیرد (۴۸ و ۴۹).

بررسی استانداردها و رهنمودهای موجود

- رهنمودهای WHO

WHO یکی از نهادهای مرجع در زمینه ارزیابی اثرات EMF و RF بر سلامت انسان است و هدف از تدوین دستورالعمل‌ها را کاهش پیامدهای احتمالی سلامت و فراهم کردن داده‌های علمی برای سیاست‌گذاران عنوان کرده است (۳). بر اساس رهنمودهای WHO، شواهد علمی موجود نشان می‌دهد که قرارگیری در معرض RF ایستگاه‌های پایه تلفن همراه در سطوح معمول شهری، باعث بروز اثرات بهداشتی جدی نمی‌شود. با این حال، WHO بر ضرورت پایش مداوم علمی، انجام مطالعات طولی و ارزیابی اثرات جمعیتی تأکید دارد. علاوه بر این، توصیه‌های WHO حاکی از اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه و احتیاطی به‌ویژه در مناطق حساس مانند مدارس، بیمارستان‌ها و مناطق مسکونی متراکم است. (۳ و ۱۴).

- رهنمودهای ICNIRP

کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر پرتوهای غیر یونیزان یک نهاد علمی مستقل است که دستورالعمل‌هایی برای محدودسازی مواجهه با RF و EMF تدوین می‌کند. در آخرین دستورالعمل منتشر شده در سال ۲۰۲۰، ICNIRP محدودیت‌های شدت میدان و چگالی توان برای طیف فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز را ارائه کرده است (۱). این دستورالعمل‌ها بر اثرات حرارتی و جلوگیری از افزایش دمای بافتی به بیش از ۱°C در سطح بدن تمرکز دارند.

- رهنمودهای IEEE

انجمن مهندسان برق و الکترونیک نیز رهنمودهای مشابهی برای مواجهه انسان با RF و EMF تدوین کرده است. رهنمودهای IEEE شامل توصیه‌هایی برای محدودیت‌های مواجهه عمومی و شغلی است و علاوه بر اثرات حرارتی، به برخی اثرات غیرحرارتی نیز اشاره دارد (۲). هر دو نهاد ICNIRP و IEEE، توصیه می‌کنند که فعالیت‌های عملیاتی و ساخت و سازهای زیرساخت‌های مخابراتی باید محدودیت‌های ایمنی را رعایت کنند و پایش منظم مواجهه صورت گیرد تا اثرات احتمالی بلندمدت کاهش یابد.

در سطح ملی، کشورها بر اساس دستورالعمل‌های بین‌المللی و شرایط محیطی خود، استانداردهای ویژه‌ای وضع کرده‌اند. برخی کشورها نیز، علاوه بر تعیین حد مجاز مواجهه، اقدام به اطلاع‌رسانی عمومی، برچسب‌گذاری و آموزش کارکنان کرده‌اند تا رعایت دستورالعمل‌ها و کاهش مواجهه انسانی و محیطی تضمین شود. با این وجود، تفاوت‌های کشوری در اعمال محدودیت‌ها و استانداردها، چالش‌هایی برای هماهنگی بین‌المللی ایجاد کرده است (۴۷، ۵۰ و ۵۱).

در زمینه خط‌مشی و مقررات، سازمان‌هایی مانند ICNIRP و WHO دستورالعمل‌هایی برای محدودیت مجاز تابش ارائه کرده‌اند، اما تفاوت در سیاست‌های ملی و فقدان داده‌های بلندمدت باعث شده است که تصمیم‌گیری سیاست‌گذاران همیشه مبتنی بر شواهد کامل نباشد (۱۴، ۱۵ و ۲۰).

- قوانین و ضوابط نصب دکل‌های تلفن همراه در جمهوری اسلامی ایران

قوانین و ضوابط نصب دکل مخابراتی شامل استانداردهایی است که باید رعایت شوند تا ایمنی افراد، تأسیسات و محیط زیست حفظ شود. از جمله این قوانین، رعایت فاصله مناسب دکل مخابراتی از مناطق مسکونی، تأسیسات حساس، حیوانات و دیگر موانع است تا از هرگونه ضرر و زیان احتمالی جلوگیری شود. علاوه بر این، دکل‌های مخابراتی باید در برابر بلایای طبیعی نظیر سیل، زلزله و طوفان مقاوم باشند. برای اطمینان از رعایت این موارد، سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی مجموعه‌ای از ضوابط و استانداردها را برای نصب دکل‌های مخابراتی تدوین کرده است که به تضمین ایمنی و عملکرد صحیح این سازه‌ها کمک می‌کند. این ضوابط و استانداردها به منظور تضمین ایمنی عمومی و کارایی دکل‌های مخابراتی تدوین شده‌اند و رعایت دقیق آن‌ها در هنگام نصب و بهره‌برداری از دکل‌ها ضروری است. در حال حاضر، در تهران حدود ۱۰ هزار دکل مخابراتی وجود دارد. چند سال قبل، در تهران وزش باد شدیدی باعث سقوط ۱۶۰ آنتن شد. این حادثه نشان‌دهنده اهمیت پایداری ساختار و مهار دکل‌های مخابراتی است. بنابراین، از آن زمان به بعد، تأکید

بیش‌تری بر استحکام سازه‌ها و جلوگیری از واژگونی آنتن‌ها صورت گرفته است. علاوه بر پایداری ساختار، مسائل ایمنی عمومی نیز به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این شامل نصب صاعقه‌گیرها و علائم هشداردهنده در اطراف آنتن‌ها برای جلوگیری از حوادث احتمالی است. همچنین، باید از دسترسی افراد غیرمجاز به تجهیزات دکل‌ها جلوگیری شود، چرا که این تجهیزات برای افراد غیرمتخصص خطرناک هستند. مورد دیگر آموزش پرسنلی است که با این تجهیزات کار می‌کنند. این افراد باید به‌طور کامل آموزش دیده و از خطرات احتمالی آگاهی داشته باشند تا در شرایط اضطراری بتوانند اقدامات لازم را به‌درستی انجام دهند. تمامی این پنج پارامتر شامل پایداری سازه، ایمنی عمومی، دسترسی محدود، آموزش پرسنل، و نظارت مستمر، در قالب یک دستورالعمل توسط وزارت بهداشت و درمان به کل کشور ابلاغ شده است و نظارت‌ها براساس این دستورالعمل به‌طور دقیق اعمال می‌شود. در اجرای ماده ۳۰ قانون هوای پاک و با هدف نظارت بر نصب سایت، آنتن و دکل‌های مخابراتی در سطح کشور «ضوابط نصب سایت، آنتن و دکل‌های مخابراتی» بر اساس بندهای ۳ تا ۵ سیاست‌های ابلاغی مقام معظم رهبری در حوزه محیط زیست و به منظور حفظ محیط زیست و سلامت شهروندان، رعایت مبلمان شهری، حفظ زیبایی سیمای شهری و استفاده حداکثری از سایت شیرینگ^۱ در کل کشور در قالب ۲۲ ماده مشخص به اپراتورها و مسئولین مربوطه ابلاغ شده است و رعایت آن‌ها برای نصب و نگهداری دکل‌های آنتن الزامی است. این ضوابط شامل تعاریف (ماده ۱)، حوزه

¹ Site sharing

شامل این ضوابط (ماده ۲)، ضوابط استفاده مشترک از دکل آنتن (ماده ۳-۴)، ضوابط ایمنی در مقابل تشعشعات (ماده ۵-۱۰)، ضوابط نصب و مجوزهای نصب دکل آنتن (ماده ۱۱-۱۵) و ضوابط ایمنی محیطی (ماده ۱۶-۲۲) می‌باشد. این قوانین نه تنها به ایمنی و سلامت افراد کمک می‌کنند؛ بلکه به محافظت از محیط زیست و ایجاد استانداردهای مناسب در صنعت نیز می‌پردازند (۵۲).

- حدود مواجهه

تشعشعات RF بر حسب میلی وات بر متر مربع محاسبه می‌شود. طبق بررسی توصیه‌ها و سیاست‌های ایمنی تلفن همراه در سراسر جهان توسط WHO و ICNIRP انجام شده است. مناطق/حوزه‌های دارای سطوح تشعشع مختلف و محدوده‌های مجاز سطوح تابش در کشورهای مختلف به ترتیب در جداول (۱) و (۲) ارائه شده است (۲۹).

جدول (۱): طبقه‌بندی سطوح تشعشع (۲۹)

نوع مناطق	محدوده‌های تشعشع (mW/m^2)
منطقه امن	۰-۶۰۰
منطقه با خطر ناچیز	۶۰۰-۱۰۰۰
منطقه خطر	۱۰۰۰-۴۰۰۰
خطرناک‌ترین منطقه	بزرگ‌تر از ۴۵۰۰

جدول (۲): محدودیت‌های مجاز سطوح تابش در کشورهای مختلف (۲۹)

نام کشور	سطوح تابش (mW/m^2)
سوئیس	۴۲
روسیه	۱۰۰
چین	۱۰۰
آمریکا	۳۰۰۰
هند	۴۵۰۰

در جمهوری اسلامی ایران نیز استانداردهایی برای محدودسازی مواجهه با پرتوهای الکترومغناطیسی (EMF) و رادیوفرکانس (RF) تدوین شده است. این استانداردها به‌ویژه در زمینه ایمنی کارکنان شاغل در صنایع مخابراتی و زیرساخت‌های مخابراتی اعمال می‌شوند. سازمان ملی استاندارد ایران (ISIRI) مسئول تدوین و نظارت بر این استانداردها است. سطح مجاز چگالی توان تشعشی در استاندارد «پرتوهای غیریونساز حدود پرتوگیری» با کد ۸۵۶۷ برای موارد مردم و موارد شغلی مطابق جدول (۳) است (۵۳).

جدول (۳): سطح مجاز چگالی توان تشعشی برای مردم

f (MHz)	و شاغلین (mW/m^2)	
	مردمی	شغلی
۱۰۰ تا ۴۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰
۴۰۰ تا ۲۰۰۰	f/200	f/40
۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۵۰۰۰۰

بهر حال، انتقادات قابل توجهی به استانداردهای موجود از جمله تمرکز بیش از حد بر اثرات حرارتی و نادیده گرفتن اثرات غیرحرارتی و مزمن ناشی از مواجهه طولانی‌مدت وارد است. این اختلاف نظرها سبب شده، بحث پیرامون بازنگری در دستورالعمل‌ها همچنان ادامه داشته باشد.

راهکارها و پیشنهادها برای کاهش اثرات دکل‌های تلفن همراه

- طراحی مهندسی و استقرار ایمن دکل‌ها

یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش مواجهه جمعیتی با پرتوهای RF، طراحی مهندسی مناسب و

¹ Electromagnetic Fields

² Institute of Standards and Industrial Research of Iran

- مدیریت شهری و اطلاع‌رسانی به شهروندان

مدیریت شهری و سیاست‌گذاری شفاف نقش مهمی در کاهش نگرانی‌های عمومی دارد. تدوین طرح‌های فضایی و محدودیت‌های فاصله‌گذاری برای دکل‌ها، همراه با نظارت دوره‌ای بر پایبندی به استانداردها، می‌تواند مواجهه شهری را کنترل کند (۴۷). علاوه بر آن، اطلاع‌رسانی به شهروندان درباره شدت میدان واقعی، اثرات شناخته‌شده و محدودیت‌های ایمنی، به کاهش اثرات روانی کمک می‌کند و شفافیت علمی را تقویت می‌کند (۵۸). برخی مطالعات توصیه می‌کنند که برچسب‌گذاری ایستگاه‌ها، انتشار گزارش‌های دوره‌ای و ایجاد خطوط ارتباطی با شهروندان می‌تواند اعتماد عمومی را افزایش دهد و نگرانی‌های بهداشتی را کاهش دهد (۴۷ و ۵۸).

نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده در زمینه اثرات دکل‌های تلفن همراه بر سلامت انسان و محیط زیست نتایج متناقضی ارائه کرده‌اند. از یک سو، پژوهش‌های مقطعی و برخی مطالعات میدانی گزارش‌دهنده علائم کوتاه‌مدت غیر اختصاصی مانند سردرد، اختلالات خواب و خستگی در جمعیت‌های نزدیک دکل‌ها هستند. از سوی دیگر، مطالعات تحریک کنترل‌شده و مرورهای نظام‌مند نشان داده‌اند که شواهد علمی برای تأیید وجود رابطه علیت مستقیم بین مواجهه محیطی و اثرات سلامت کوتاه‌مدت یا بلندمدت بسیار محدود و اغلب ناکافی است. مطالعات تجربی که به بررسی اثرات قرارگیری کوتاه‌مدت در معرض سیگنال‌های ایستگاه‌های پایه پرداخته‌اند، نتایج متناقضی گزارش کرده‌اند؛ با این حال، شواهد محدودی وجود دارد که نشان می‌دهد

استقرار ایمن دکل‌های تلفن همراه است. انتخاب محل استقرار دکل‌ها باید بر اساس فاصله از مناطق مسکونی، مدارس، بیمارستان‌ها و اماکن عمومی حساس انجام شود تا شدت میدان در فضا‌های انسانی به حداقل برسد (۵۴).

استفاده از مدل‌سازی عددی و شبیه‌سازی انتشار امواج در مراحل طراحی، می‌تواند به تعیین مناسب‌ترین ارتفاع آنتن، زاویه تابش و جهت‌گیری آن کمک کند تا انرژی منتشره به جمعیت محدود شود (۵۵). علاوه بر این، رعایت استانداردهای بین‌المللی و ملی (IEEE, ICNIRP، استانداردهای ایران) در طراحی و راه‌اندازی دکل‌ها الزامی است (۱ و ۲).

- فناوری‌های نوین (شبکه سلولی کوچک 5G، فیبر نوری)

ظهور فناوری‌های نوین مخابراتی، امکان کاهش مواجهه محیطی را فراهم کرده است. در شبکه‌های 5G، به دلیل توان پایین و پوشش محدود، نیاز به دکل‌های پرتوان و با تابش گسترده کاهش می‌یابد (۵۶). این تکنیک‌ها می‌توانند چگالی پرتوها را در مناطق مسکونی کاهش داده و اثرات بالقوه بر سلامت را به حداقل برسانند (۵).

علاوه بر آن، استفاده از فیبر نوری^۱ به جای اتصال بی‌سیم تا حد امکان، می‌تواند انتقال داده را بدون تابش RF فراهم کند و در مناطق پرجمعیت به کاهش مواجهه کمک نماید (۵۷). برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که ترکیب شبکه‌های سلولی کوچک با فیبر نوری، ضمن بهبود کیفیت سرویس‌دهی، کاهش چشمگیر شدت میدان محیطی ایجاد می‌کند (۵۶ و ۵۷).

^۱ Fiber Optics

سیگنال‌های UMTS^۱ و تا حد کم‌تری سیگنال‌های GSM^۲ ممکن است موجب کاهش سطح رفاه در افرادی شوند که خود را نسبت به این نوع مواجهه‌ها حساس می‌دانند. سازمان جهانی بهداشت اظهار می‌دارد که تا به امروز و پس از تحقیقات فراوان انجام شده، هیچ اثر نامطلوبی بر سلامت به طور علّیتی با قرار گرفتن در معرض فناوری‌های بی‌سیم مرتبط نبوده است.

در زمینه اثرات زیست‌محیطی، نتایج حاکی از اختلال در رشد گیاهان، رفتار حیوانات و کاهش تنوع زیستی در مجاورت ایستگاه‌های پایه است. با این حال، شدت این اثرات به عوامل مختلفی همچون فاصله، توان آنتن، نوع گونه و شرایط محیطی بستگی دارد و نتایج کلی‌گیری دقیق در مقیاس جمعیتی دشوار است.

در مجموع، مقایسه مطالعات نشان می‌دهد که اثرات کوتاه‌مدت انسان اغلب تحت تأثیر عوامل روان‌شناختی و سوگیری گزارشگری قرار دارد، اثرات بلندمدت انسانی شواهد قطعی ندارند و اثرات زیست‌محیطی در برخی شرایط ملموس است؛ ولی نیازمند بررسی‌های دقیق‌تر و طولی است.

چالش اصلی پژوهش‌ها شامل محدودیت در اندازه نمونه، طراحی مطالعات، و ارزیابی دقیق مواجهه است. بسیاری از مطالعات مبتنی بر پرسش‌نامه یا مقیاس فاصله بوده‌اند و ارزیابی میدانی شدت میدان یا چگالی توان انجام نشده است، که منجر به عدم دقت در تعیین دوز واقعی مواجهه می‌شود.

همچنین، تفاوت در معیارها، سنجش علائم و جمعیت‌های هدف بین مطالعات باعث شده است که

مقایسه مستقیم دشوار شود. پژوهش‌های طولی محدود و کوتاه‌مدت بوده‌اند و اطلاعات کافی درباره اثرات تجمعی یا بلندمدت مواجهه با دکل‌ها وجود ندارد.

در حوزه زیست‌محیطی نیز، شکاف‌های پژوهشی شامل کمبود مطالعات کنترل‌شده بر گونه‌های حساس، اثرات بلندمدت بر اکوسیستم و تعامل با سایر عوامل محیطی است.

در نهایت، نیاز به مطالعات چندمرکزی، طولی با ارزیابی دقیق مواجهه و همچنین ترکیب داده‌های انسانی و زیست‌محیطی برای ارائه سیاست‌های علمی و عملیاتی مشخص، کاملاً مشهود است.

بر اساس شواهد موجود، می‌توان گفت که:

- اثرات کوتاه‌مدت انسانی ناشی از مواجهه محیطی با دکل‌های تلفن همراه ممکن است در برخی افراد گزارش شود، اما شواهد علمی برای اثبات علت مستقیم محدود و متناقض است.

- اثرات بلندمدت انسانی، از جمله خطرات سرطان یا اختلالات مزمن، تا کنون به طور قطعی اثبات نشده است؛ مطالعات طولی و با ارزیابی دقیق‌تر لازم است. - اثرات زیست‌محیطی، به ویژه بر گیاهان، حیوانات و تنوع زیستی، در شرایط خاص مشاهده شده و توجه به طراحی مهندسی، فناوری‌های کم‌انرژی و مدیریت شهری برای کاهش مواجهه ضروری است.

- شکاف‌های پژوهشی و چالش‌های روش‌شناسی، نیاز به مطالعات جامع و چندبعدی را برجسته می‌کند تا سیاست‌گذاری‌های علمی و مبتنی بر احتیاط تقویت شوند.

^۱ Universal Mobile Telecommunications System

^۲ Global System for Mobile Communications

- [8] Abdel-Rassoul, G., Abou El-Fateh, O., Abou Salem, M., Michael, A., Farahat, F., El-Batanouny, M., Salem, E., 2007, Neurobehavioral effects among inhabitants around mobile phone base stations. *Neurotoxicology*, 28, 434.
- [9] Rösli, M., Frei, P., Mohler, E., Hug, K., 2010, Systematic review on the health effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields from mobile phone base stations. *Bulletin of the World Health Organization*, 88(12), 887.
- [10] Tkalec, M., Malarić, K., Pavlica, M., Pevalek-Kozlina, B., Vidaković-Cifrek, Ž., 2009, Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L.. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 672, 76.
- [11] Waldmann-Selsam, C., Balmori-de la Puente, A., Breunig, H., Balmori, A., 2016, Radiofrequency radiation injures trees around mobile phone base stations. *Science of the Total Environment*, 572, 554.
- [12] Favre, D., 2011, Mobile phone-induced honeybee worker piping. *Apidologie*, 42, 270.
- [13] Hutter, H.P., Moshhammer, H., Wallner, P., Kundi, M., 2006, Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occupational and Environmental Medicine*, 63(5), 307.
- [14] World Health Organization (WHO), 2006, Base stations and wireless technologies. (Available online: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/non-ionizing/wireless>)
- [15] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), 2021, Radiofrequency fields: Environmental health criteria.
- [16] Eltiti, S., Wallace, D., Ridgewell, A., Zougkou, K., Russo, R., Sepulveda, F., Mirshekar-Syahkal, D., Rasor, P., Deeble, R., Fox, E., 2007, Does short-term exposure to mobile phone base station signals increase symptoms in individuals who report sensitivity to electromagnetic fields? A double-blind randomized provocation study. *Environmental Health Perspectives*, 115(11), 1603.
- [17] Sharma, V.P., Kumar, N.R., 2010, Changes in honeybee behaviour and biology

- در نتیجه، رویکرد ترکیبی شامل پایش علمی، استانداردسازی، طراحی ایمن و اطلاع رسانی عمومی، بهترین مسیر برای کاهش اثرات احتمالی و ارتقای سلامت انسانی و محیط زیست است.

تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تعارض منافی برای اعلام ندارند.

منابع

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), 2020, Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118, 483.
- [2] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety, 2019, IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic, and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. *IEEE Std C95.1-2019*.
- [3] World Health Organization (WHO), 2010, Electromagnetic fields and public health: Mobile phones. *Fact Sheet No. 193*.
- [4] Schüz, J., Elliott, P., Auvinen, A., Kromhout, H., Poulsen, A.H., Johansen, C., Olsen, J.H., Hillert, L., Feychting, M., Fremling, K., Toledano, M., Heinävaara, S., Slottje, P., Vermeulen, R., Ahlbom, A., 2011, An international prospective cohort study of mobile phone users and health (Cosmos): Design considerations and enrolment. *Cancer Epidemiology*, 35(1), 37.
- [5] Rappaport, T.S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., 2013, Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!. *IEEE Access*, 1, 335.
- [6] 5G Infrastructure Public Private Partnership (5G PPP), 2020, Small cell deployment for 5G networks: Opportunities and challenges.
- [7] Santini, R., Santini, P., Danze, J.M., Le Ruz, P., Seigne, M., 2002, Investigation on the health of people living near mobile telephone relay stations: I/Incidence according to distance and sex. *Pathologie Biologie (Paris)*, 50(6), 369. (in French)

- [26] Dash, M., Mehta, A., 2011, Understanding mobile phone radiation and its effects. *Economic and Political Weekly*, 46(17), 22.
- [27] Kundi, M., Hutter, H.-P., 2009, Mobile phone base stations-Effects on wellbeing and health. *Pathophysiology*, 16(2-3), 123.
- [28] International Agency for Research on Cancer (IARC), 2013, Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 102. (Available online: <https://publications.iarc.who.int/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Non-ionizing-Radiation-Part-2-Radiofrequency-Electromagnetic-Fields-2013>)
- [29] Jayaraju, N., Kumar, M.P., Sreenivasulu, G., Lakshmi Prasad, T., Lakshmana, B., Nagalaksmi, K., Madakka, M., 2023, Mobile phone and base stations radiation and its effects on human health and environment: A review. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, 2, 100031.
- [30] Amraee, A., Seif, F., Bayatiani, M.R., Shakeri, M., Zakeri, F., 2021, Correlation between base transceiver station and the quality of sleep and life of nearby residents. *Iranian Journal of Medical Physics*, 18(1), 10.
- [31] Shariful Islam, S.M., 2014, Awareness and self-reported health hazards of electromagnetic waves from mobile phone towers in Dhaka, Bangladesh: A pilot study. *Advances in Public Health*, 2014(1), 952832.
- [32] Hutter, H.-P., Moshhammer, H., Wallner, P., Kundi, M., 2006, Subjective symptoms, sleeping problems, and cognitive performance in subjects living near mobile phone base stations. *Occupational and Environmental Medicine*, 63, 307.
- [33] EU Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), 2015, Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). (Available online: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_041.pdf)
- [34] Eltiti, S., Wallace, D., Russo, R., Fox, E., 2015, Aggregated data from two double-blind base station provocation studies comparing individuals with idiopathic environmental intolerance with attribution to electromagnetic under the influence of cellphone radiations. *Current Science*, 98(10), 1376.
- [18] Everaert, J., Bauwens, D., 2007, A possible effect of electromagnetic radiation from mobile phone base stations on the number of breeding house sparrows (*Passer domesticus*). *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26, 63.
- [19] Balmori, A., Hallberg, Ö., 2007, The urban decline of the house sparrow (*Passer domesticus*): A possible link with electromagnetic radiation. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 26, 141.
- [20] Berg-Beckhoff, G., Blettner, M., Kowall, B., Breckenkamp, J., Schlehofer, B., Schmiedel, S., Bornkessel, C., Reis, U., Potthoff, P., Schüz, J., 2009, Mobile phone base stations and adverse health effects: Phase 2 of a cross-sectional study with measured radio frequency electromagnetic fields. *Occupational and Environmental Medicine*, 66(2), 124.
- [21] Hardell, L., Carlberg, M., Hansson Mild, K., 2009, Epidemiological evidence for an association between use of wireless phones and tumor diseases. *Pathophysiology*, 16(2-3), 113.
- [22] Han, H., Guo, W., Lu, Y., Wang, M., 2020, Effect of mobile applications on blood pressure control and their development in China: A systematic review and meta-analysis. *Public Health*, 185, 356.
- [23] Khurana, V.G., Hardell, L., Everaert, J., Bortkiewicz, A., Carlberg, M., Ahonen, M., 2010, Epidemiological evidence for a health risk from mobile phone base stations. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 16(3), 263.
- [24] Chiaraviglio, L., Elzanaty, A., Alouini, M.-S., 2021, Health risks associated with 5G exposure: A view from the communications engineering perspective. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 2131.
- [25] International Telecommunications Union (ITU), 2022, Detailed specifications of the terrestrial radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2020 (IMT-2020), M Series - Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services. Recommendation ITU-R M.2150-1. (Available online: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2150-1-202202-S/en>)

- electromagnetic fields on *Lemna minor* growth and peroxidase activity. Bioelectromagnetics, 26, 185.
- [44] Balmori, A., 2010, Mobile phone mast effects on common frog (*Rana temporaria*) tadpoles: The city turned into a laboratory. Electromagnetic Biology and Medicine, 29(1-12), 31.
- [45] Roux, D., Vian, A., Girard, S., Bonnet, P., Paladian, F., Davies, E., Ledoigt, G., 2008, High frequency (900 MHz) low amplitude (5 V m^{-1}) electromagnetic field: A genuine environmental stimulus that affects transcription, translation, calcium and energy charge in tomato. Planta, 227, 883.
- [46] Aburawi, S., Abusaida, H., El Jaafari, H., Alkayed, F., Shibani, N., Dali, A., Shalabi, S., Ayad, M., Altaboni, O., 2021, Effect of mobile phone radiation on reproductive system and behavior using female albino mice. Alqalam Journal of Medical and Applied Science, 4(1), 31.
- [47] Balmori, A., 2009, Electromagnetic pollution from phone masts. Effects on wildlife. Pathophysiology, 16(2-3), 191.
- [48] Cucurachi, S., Tamis, W.L.M., Vijver, M.G., Peijnenburg, W.J.G.M., Bolte, J.F.B., de Snoo, G.R., 2013, A review of the ecological effects of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF). Environment International, 51, 116.
- [49] Lai, H., 2008, Biological effects of radiofrequency electromagnetic field. In: Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering. Bowlin, G.L., Wnek, G.E. (Editors), 2nd Edition, CRC Press.
- [50] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), 2021, Mobile phone base stations and health. (Available online: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/radiation-sources/more-radiation-sources/mobile-phone-base-stations>)
- [51] Federal Communications Commission (FCC), 2020, Human exposure to radiofrequency electromagnetic fields. Federal Register, 85(66).
- [52] Department of Environment IR Iran, 2025, Telecommunication tower installation rules and regulations, Urmia University of Medical Sciences. (Available online: <https://phc.umsu.ac.ir/>)
- fields and controls. Bioelectromagnetics, 36, 96.
- [35] Balmori, A., 2022, Evidence for a health risk by RF on humans living around mobile phone base stations: From radiofrequency sickness to cancer. Environmental Research, 214(Part 2), 113851.
- [36] Meo, S.A., Almahmoud, M., Alsultan, Q., Alotaibi, N., Alnajashi, I., Hajjar, W.M., 2019, Mobile phone base station tower settings adjacent to school buildings: Impact on students' cognitive health. American Journal of Men's Health, 13(1).
- [37] Repacholi, M.H., Lerchl, A., Rösli, M., Sienkiewicz, Z., Auvinen, A., Breckenkamp, J., d'Inzeo, G., Elliott, P., Frei, P., Heinrich, S., Lagroye, I., Lahkola, A., McCormick, D.L., Thomas, S., Vecchia, P., 2012, Systematic review of wireless phone use and brain cancer and other head tumors. Bioelectromagnetics, 33, 187.
- [38] Wiedemann, P., Schütz, H., 2011, Children's health and RF EMF exposure. Views from a risk assessment and risk communication perspective. Wiener Medizinische Wochenschrift, 161, 226.
- [39] Redmayne, M., 2016, International policy and advisory response regarding children's exposure to radio frequency electromagnetic fields (RF-EMF). Electromagnetic Biology and Medicine, 35, 176.
- [40] van Moorselaar, I., Slottje, P., Heller, P., van Strien, R., Kromhout, H., Murbach, M., Kuster, N., Vermeulen, R., Huss, A., 2017, Effects of personalised exposure on self-rated electromagnetic hypersensitivity and sensibility—a double-blind randomised controlled trial. Environment International, 99, 255.
- [41] Kumar, A., Singh, H.P., Batish, D.R., Kaur, S., Kohli, R.K., 2016, EMF radiations (1800 MHz)-inhibited early seedling growth of maize (*Zea mays*) involves alterations in starch and sucrose metabolism. Protoplasma, 253, 1043.
- [42] Levitt, B.B., Lai, H.C., Manville, A.M., 2022, Low-level EMF effects on wildlife and plants: What research tells us about an ecosystem approach. Frontiers in Public Health, 10, 1000840.
- [43] Tkalec, M., Malarić, K., Pevalek-Kozlina, B., 2005, Influence of 400, 900, and 1900 MHz

- [53] Iranian National Standardization Organization, 2016, Non-ionizing radiation exposure limits. INSO 8567, 2nd Revision.
- [54] Dhungel, A., Zmirou-Navier, D., van Deventer, E., 2015, Risk management policies and practices regarding radio frequency electromagnetic fields: Results from a WHO survey. *Radiation Protection Dosimetry*, 164(1-2), 22.
- [55] Medbo, J., Kyosti, P., Kusume, K., Raschkowski, L., Haneda, K., Jamsa, T., Nurmela, V., Roivainen, A., Meinila, J., 2016, Radio propagation modeling for 5G mobile and wireless communications. *IEEE Communications Magazine*, 54(6), 144.
- [56] Prados-Garzon, J., Ameigeiras, P., Ordonez-Lucena, J., Muñoz, P., Adamuz-Hinojosa, O., Camps-Mur, D., 2021, 5G non-public networks: Standardization, architectures and challenges. *IEEE Access*, 9, 153893.
- [57] Winzer, P.J., Neilson, D.T., Chraplyvy, A.R., 2018, Fiber-optic transmission and networking: The previous 20 and the next 20 years. *Optics Express*, 26(18), 24190.
- [58] Ismail, A., Din, N.M., Jamaludin, M.Z., Balasubramaniam, N., 2010, Mobile phone base station radiation study for addressing public concern. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3(1), 117.