مقاله علمی-ترویجی

بررسی راه‌کارهای فنی کاهش سطح پرتوگیری در شبکه‌های تلفن همراه

لادن اسمعیلی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، l.esmaeeli@itrc.ac.ir

مهسا رضایی، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، ma.rezaei@itrc.ac.ir

نرگس نوری*، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات، nnoori@itrc.ac. ir

(* نویسنده مسئول)

چکیده

امروزه به‌دلیل توسعه استفاده از تلفن همراه و رویکردهای جهانی در پیاده‌سازی شبکه‌های 5G، سطح قرارگیری عموم افراد در معرض تابش امواج الکترومغناطیسی افزایش زیادی پیدا کرده است. این مساله نگرانی‌هایی را در مورد عوارض سلامتی ناشی از قرار گرفتن در معرض این امواج ایجاد می‌کند. روش‌های مختلفی مانند کنترل توان، شکل‌دهی پرتو و MIMO انبوه برای کاهش سطح تشعشعات الکترومغناطیسی در سیستم‌های تلفن همراه پیشنهاد می‌شوند. همچنین مواردی مانند توپولوژی شبکه و مدت زمان قرارگیری در معرض تابش میدان الکترومغناطیسی نیز می‌تواند در کاهش سطح پرتوگیری مؤثر باشد. در این مقاله، ابتدا تعریف پرتوگیری الکترومغناطیسی، معیارها، اثرات و قوانین آن مورد اشاره قرار می‌گیرد. سپس، معماری شبکه‌های ارتباطات سیار و اثر آن بر پرتوگیری الکترومغناطیسی بررسی می‌شود. در بخش بعد، راه‌کارهای فنی کاهش سطح تشعشعات الکترومغناطیسی در بخش اپراتوری شبکه‌های تلفن همراه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز راه‌کارهای فنی مورد استفاده در تجهیزات کاربران تلفن همراه برای کاهش سطح تشعشعات الکترومغناطیسی ارایه می‌شوند.

کلمات کلیدی: پرتوگیری الکترومغناطیسی، راه‌کارهای فنی، کاهش پرتوگیری، شبکه‌های تلفن همراه.

Technical solutions to reduce exposure in mobile communication networks

Ladan Esmaeeli,Iran Telecommunication Research Center, l.esmaeeli@itrc.ac.ir

Mahsa Rezaei,Iran Telecommunication Research Center, ma.rezaei@itrc.ac.ir

Narges Noori*,Iran Telecommunication Research Center, nnoori@itrc.ac.ir

*Corresponding Author

Abstract

Nowadays, due to different applications of cell phones and global approaches in the implementation of 5G networks, the level of public exposure to electromagnetic radiation has increased significantly. This increases concerns about the health effects of these exposures. Various methods such as power control, beamforming and massive MIMO are proposed to reduce the level of electromagnetic radiation in mobile networks. Furthermore, network topology and duration of exposure can be effective in reducing the level of exposure. In this paper, first,

the definition of electromagnetic radiation, its criteria, effects and rules are mentioned. Then, the architecture of mobile communication networks and its effect on electromagnetic radiation are investigated. Afterwards, some technical solutions that can be used by network operator to reduce the level of electromagnetic radiation in the network are examined. Finally, some technical solutions are presented that can be used in cell phones to reduce the level of electromagnetic radiation of these devices.

Keywords: Electromagnetic Exposure, Mobile communication Networks, Technical Solutions.

۱- مقدمه

طی چند دهه گذشته سیستم‌های ارتباطات سیار پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند به‌طوری‌که نرخ داده از ۵۰ kbps در سیستم‌های نسل دوم (2G) تلفن همراه به ۱۰۰ Mbps در سیستم‌های فعلی 4G افزایش یافته است. با توجه به اینکه انتظار می‌رود سیستم‌های 5G نرخ داده را تا 10 Gbps افزایش دهند[۱] و [۲]، برای پشتیبانی از افزایش تقاضای کاربران موبایل، نیاز به استقرار و توسعه ایستگاه‌های پایه بیشتری می‌باشد. محبوبیت و همه‌گیر بودن وسایل ارتباطی موبایل و همچنین معرفی فناوری‌های جدیدی مانند اینترنت اشیاء (IoT)[۱] و توسعه ناهمگون[۲] ایستگاه‌های پایه، میزان و سطح پرتوگیری افراد واقع در معرض تشعشعات الکترومغناطیسی را افزایش داده است. این مسأله نگرانی‌های زیادی را در زمینه اثرات احتمالی پرتوگیری الکترومغناطیسی از شبکه‌های موبایل بر سلامتی افراد ایجاد کرده است. بیشتر نگرانی‌ها درباره پرتوگیری الکترومغناطیسی ناشی از تشعشعات در لینک‌های فروسو[۳](تشعشع از سمت ایستگاه پایه) است، در حالی‌که ممکن است انتشار تشعشعات الکترومغناطیسی در لینک‌های فراسو[۴](تشعشع از سمت گوشی) به دلیل نزدیک‌تر بودن آنتن‌های دستگاه‌های کاربران به بدن انسان، مضرتر باشد. علاوه بر این، با تکامل فناوری تلفن‌های همراه به سمت دستگاه‌های هوشمند داده محور و رشد استفاده از چنین دستگاه‌هایی برای انجام امور روزمره زندگی، نگرانی‌ها افزایش می‌یابند.

در این مقاله، ابتدا، خلاصه‌ای بر پرتوگیری از میدان‌های الکترومغناطیسی در شبکه‌های تلفن همراه ارایه می‌شود. سپس، راه‌کارهای فنی قابل استفاده توسط اپراتورهای شبکه‌های تلفن همراه جهت کاهش پرتوگیری از شبکه معرفی می‌شوند. در انتها، راه‌کارهای فنی قابل پیاده‌سازی در تجهیزات کاربران به منظور کاهش سطح تشعشعات EMF[۵] مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲- محدوده طیف تشعشعات الکترومغناطیسی و معیارهای سنجش پرتوگیری

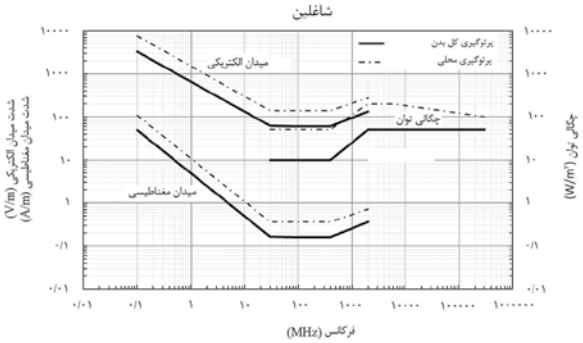
طیف الکترومغناطیسی میدان‌های فرکانس‌های پایین تا امواج نوری را در بر می‌گیرد. طیف[۶] RF از چند مگاهرتز تا چندین گیگاهرتز گسترش یافته است و برای همه‌پخشی[۷] و ارتباطات از راه دور استفاده می‌شود. سیستم‌های تلفن همراه 2G، 3G و 4G در فرکانس زیر ۶ گیگاهرتز و به طور خاص در محدوده فرکانسی از ۹۰۰ تا ۲،۶۰۰ مگاهرتز کار می‌کنند. 5G علاوه بر باندهای فرکانسی ۶ گیگاهرتز، از باندهای فرکانسی موج میلی‌متری (۲۸ گیگاهرتز و بالاتر) نیز استفاده خواهد کرد.

انرژی جذب شده از تشعشعات الکترومغناطیسی در بدن انسان برهم کنش‌های پیچیده‌ای با بافت‌های مختلف دارد که متناسب با فرکانس و خصوصیات فیزیکی بافت‌های بدن متفاوت می‌باشند. به‌طورکلی، تابش‌های الکترومغناطیسی به تابش‌های یون‌ساز و غیریون‌ساز طبقه‌بندی می‌شوند[۳]. تابش‌های یون‌ساز به تابش آن دسته از امواج الکترومغناطیسی گفته می‌شود که انرژی کافی را برای گسستن پیوندهای الکترون‌ها از مدار یک اتم داشته باشند. این اتفاق در بالاتر از فرکانس‌های نوری و در حدود امواج ماورای بنفش رخ می‌دهد. در حالی‌که، تابش غیر یون‌ساز انرژی کافی برای یونیزه کردن اتم‌ها را ندارد، اما آنها را به یک حالت انرژی بالاتر سوق می‌دهد. بازه فرکانسی ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۳۰۰ گیگاهرتز در محدوده تشعشعات غیر یون‌ساز قرار دارند[۴]. بنابراین، امواج RF مورد استفاده در شبکه‌های تلفن همراه در این گروه قرار می‌گیرند.

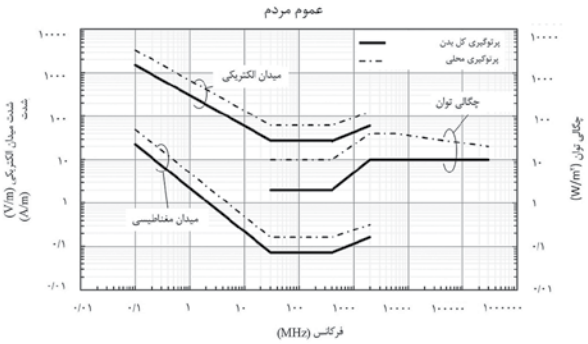
بر اساس فاصله از منبع تشعشع دو ناحیه با عنوان ناحیه میدان نزدیک و ناحیه میدان دور تعریف می‌شوند. مشخصه‌های میدان‌های الکترومغناطیسی در نواحی میدان نزدیک و میدان دور متفاوت می‌باشند[۱]. نرخ جذب ویژه[۸] (SAR)، که نرخ جذب انرژی در واحد زمان در واحد جرم بافت را نشان می‌دهد برای سنجش میزان پرتوگیری در میدان نزدیک در نظر گرفته می‌شود. از این پارامتر برای تعیین میزان پرتوگیری در میدان دور نیز استفاده می‌شود، اما به‌طور معمول پارامتر مورد استفاده برای تعیین میزان پرتوگیری در میدان دور چگالی توان است[۱].

۳- حدود مجاز پرتوگیری الکترومغناطیسی

کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر اشعه‌های غیریون‌ساز[۹] (ICNIRP) راهنمایی را برای محافظت مردم در مقابل آسیب‌های این اشعه‌ها ارایه داده است. در این راهنما، برای تعیین حدود مجاز تشعشع دو دسته‌بندی تعریف شده است. دسته نخست، حدود مجاز تشعشع برای کارکنان مشاغل است که در نزدیکی منابع تشعشعی فعالیت می‌کنند ولی از نحوه مراقبت از خود در مقابل این تشعشعات آگاهی دارند و همچنین در محیط شغلی آنها پروتکل‌های حفاظتی رعایت می‌گردد. دسته دوم، حدود مجاز تشعشع برای عموم مردم است که از نحوه حفاظت از خود در مقابل تشعشعات آگاهی ندارند و در واقع محیط برای آنها به نوعی کنترل نشده است. آگاهی نداشتن عموم مردم از نحوه مراقبت در برابر تشعشعات میدان‌های الکترومغناطیسی این نیاز را ایجاد می‌نماید تا حدود سختگیرانه‌تری برای این دسته (حدودی برابر یک پنجم حدود دسته مشاغل) وضع شود. در جدول (۱) محدودیت‌های اصلی تعریف شده برای SAR آمده است. در شکل‌های (۱) و (۲) سطوح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای متوسط زمان پرتوگیری مساوی یا بیشتر از ۶ دقیقه از میدان‌های الکترومغناطیسی از ۱۰۰ kHz تا ۳۰۰ GHz به



شکل ۱: سطوح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای متوسط زمان پرتوگیری مساوی یا بیشتر از ۶ دقیقه شاغلین از میدان‌های الکترومغناطیسی از ۱۰۰ kHz تا ۳۰۰ GHz [۴].



شکل ۲: سطوح مرجع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای متوسط زمان پرتوگیری مساوی یا بیشتر از ۶ دقیقه عموم مردم از میدان‌های الکترومغناطیسی از ۱۰۰ kHz تا ۳۰۰ GHz [۴].

ترتیب برای شاغلین و عموم مردم آمده است.

جدول ۱: محدودیت‌های اصلی SAR در راهنمای ICNIRP [۴].

SAR	عموم مردم	مشاغل
کل بدن (W/kg)	08/0	4/0
سر/بدن (W/kg)	2	10
دست و پا (W/kg)	4	20

۴- عوامل موثر بر پرتوگیری الکترومغناطیسی در ارتباطات سیار

شبکه‌های تلفن همراه به طور معمول از تعدادی ایستگاه پایه[۱](BS) تشکیل شده‌اند. منطقه‌ای که توسط هر BS سرویس داده می‌شود به‌عنوان یک سلول شناخته می‌شود که برد پوششی آن از چند متر تا چند کیلومتر متغیر است. سطح پوشش یک BS به آنتن مورد استفاده، توان ارسالی و تراکم ترافیک منطقه بستگی دارد. BS با دستگاه‌های تلفن همراه سلول خود به‌صورت بی‌سیم از طریق کانال RF ارتباط برقرار می‌کند. با افزایش تقاضای کاربران، به‌طور معمول شبکه توسعه یافته و BSهای بیشتری اضافه می‌شوند. توپولوژی چنین شبکه‌ای، مانند نحوه قرارگیری BSها، تعداد آنها و موقعیت مکانی کاربر می‌تواند بر میزان توان تشعشعی و در نتیجه، بر شدت پرتوگیری از EMF تاثیر بگذارد.

با توجه به اینکه تلفن‌های همراه به‌طور معمول بسیار نزدیک به بدن انسان کار می‌کنند (بدن در ناحیه میدان نزدیک آنها قرار می‌گیرد)، اما آنتن‌های BS در فاصله دورتر از بدن قرار دارند (بدن در ناحیه میدان دور آنها قرار می‌گیرد)، معیارهای SAR و چگالی توان به ترتیب برای مشخص نمودن میزان پرتوگیری الکترومغناطیسی در لینک‌های فراسو و فروسو در نظر گرفته می‌شوند [۵].

۵- راه‌کارهای فنی قابل انجام توسط اپراتورهای شبکه تلفن همراه برای کاهش سطح پرتوگیری EMF

از وظایف اپراتورها اندازه‌گیری مستمر میزان سطوح تشعشعات در شبکه تلفن همراه است تا مقدار آن از حدود مجاز تعریف شده توسط ICNIRP تجاوز نکند. در کنار آن، اپراتورها می‌توانند از روش‌های فنی مختلفی جهت کاهش میزان پرتوگیری در شبکه کمک بگیرند که در این بخش به ارایه این راه‌کارهای فنی می‌پردازیم.

۵-۱- روش‌های کاهش میزان قرارگیری انسان در معرض تشعشع EMF در مجاورت ایستگاه‌های ارتباطات رادیویی از دیدگاه ITU

توصیه‌نامه ITU-TK.70[۶] روش‌های کاهش میزان تشعشع را به منظور تطابق با سطوح استاندارد پرتوگیری بیان کرده است. راه‌کارهای اشاره شده در این توصیه‌نامه عبارتند از:

- **کاهش توان فرستنده**

ساده‌ترین روش برای کاهش سطوح تشعشع، کاهش توان فرستنده است. این روش منجر به کاهش ناحیه تحت پوشش شده و بهتر است تنها در شرایطی به کار گرفته شود که روش دیگری قابل اجرا نباشد.

- **افزایش ارتفاع آنتن**

با افزایش ارتفاع آنتن فاصله از تمامی نقاط تحت پوشش افزایش یافته و بنابراین سطح تشعشع در این نقاط کاهش می‌یابد. همچنین تغییر ارتفاع آنتن منجر به تغییر زوایای ارتفاعی آنتن و جابه‌جایی جهت تابش آن به مناطق دیگر می‌شود. بنابراین، پترن تشعشعی عمودی[۱۱] (VRP) آن تغییر می‌یابد. این مساله باعث کاهش میزان تشعشع در منطقه تحت پوشش آن سلول می‌شود و تنها در صورتی قابل اعمال است که امکان افزایش ارتفاع آنتن وجود داشته باشد.

- **تغییر زاویه شیب آنتن[۱۲]**

تغییر زاویه شیب پرتو اصلی در پترن تشعشعی عمودی آنتن‌های فرستنده به طورمعمول برای محدود نمودن منطقه پوشش به‌کار می‌رود. این کار باعث افزایش انرژی در پرتو اصلی و همچنین تغییر سطح تشعشع در دیگر جهات (لوب‌های فرعی و نول‌ها در VRP آنتن فرستنده) می‌گردد.

- **افزایش بهره آنتن**

میزان بهره آنتن رابطه مستقیمی با میزان سمت‌گرایی[۱۳] آنتن یعنی میزان توانایی تشعشع آن در یک جهت مطلوب و محدود ساختن تشعشع در باقی جهات دارد. بهره آنتن (به طور دقیق‌تر جهت‌دهی آنتن) با VRP و پترن تشعشعی افقی[۱۴] (HRP) متناسب است. HRP آنتن فرستنده بر اساس نیازمندی‌های سرویس تعیین می‌شود. تغییرات در HRP آنتن فرستنده (به منظور حفاظت

انسان‌ها در برابر تشعشع) بر روی ناحیه تحت پوشش تاثیرگذار است. برای VRP آنتن فرستنده، بهره بالاتر منجر به باریک‌تر شدن عرض پرتو اصلی می‌شود.

● **تغییرات در پترن تشعشعی عمودی**

VRP تابعی از زاویه ارتفاع[۱۵] است و میزان شدت میدان را با احتساب فاصله و زاویه تشعشع از محور اصلی تشعشع آنتن تعیین می‌کند. توجه خاصی می‌بایست به زوایای ارتفاعی بالای VRP صورت گیرد، چرا که این بخش تاثیر زیادی بر انتشار در جهت تابش به افراد دارد.

● **تغییرات در پترن تشعشعی افقی**

امکان کاهش سطح تشعشع از طریق اعمال تغییرات در HRP بسیار کم و محدود است. برای ایستگاه‌های پایه سلولی، کاهش سطح انتشار از طریق جایگزین نمودن پنل‌هایی با پرتوی افقی پهن با نمونه‌هایی با پرتو افقی باریک‌تر، امکان‌پذیر است (این به معنای افزایش بهره می‌باشد). پنلی با بیم افقی باریک‌تر به توان ارسالی پایین‌تری نیاز دارد. به این ترتیب کاهش توان فرستنده منجر به کاهش سطح تشعشع در مناطق تحت پوشش می‌شود.

● **به کارگیری هم‌زمان چند روش**

برخی مواقع نیاز است که بیش از یک روش برای کاهش سطح تشعشع تا حد مطلوب اعمال گردد. تمامی روش‌های ذکر شده در بالا، مستقل بوده و در بسیاری مواقع به‌صورت هم‌زمان نیز قابل به‌کارگیری می‌باشند.

۵-۲- راه‌کارهای ارایه شده توسط اپراتورهای مطرح دنیا برای کاهش سطح پرتوگیری از شبکه تلفن همراه

● **پروژه** LEXNET

در سال ۲۰۱۲، تعدادی از اپراتور تلفن همراه اروپایی، فروشندگان تجهیزات شبکه، مراکز تحقیقاتی و دانشگاه‌ها با هدف کاهش سطح پرتوگیری از میدان‌هایEMF در شبکه‌های بی‌سیم، پروژه‌ای تحت عنوان LEXNET را راه‌اندازی کردند. هدف این پروژه توسعه مکانیزم‌های مؤثر بر کاهش ۵۰٪ پرتوگیری EMF برای عموم مردم بدون ایجاد مشکل در کیفیت خدمات (QoS)[۱۶] در شبکه بود[۷]. در این پروژه شاخص‌های تأثیرگذار بر انتخاب روش‌هایی به منظور کاهش سطح تشعشع BS و استراتژی‌های کلی در خصوص آن‌ها ارایه شده است. بهینه‌سازی EMF در شبکه شامل جمع‌آوری داده‌ها، ارزیابی پرتوگیری و انجام اقدامات لازم برای کاهش پرتوگیری است. ابزارهای موجود برای کاهش پرتوگیری شامل تغییرات توپولوژی، تکنیک‌های مدیریت شبکه و به‌کار بردن مؤلفه‌های رادیویی[۱۷] با EMF کم می‌باشد. خلاصه‌ای از راه‌کارهای ارایه شده در این پروژه به شرح زیر است:

- اصلی‌ترین استراتژی اپراتور برای کاهش EMF مربوط به انتخاب فناوری دسترسی مورد استفاده می‌باشد. در این روش، فن‌آوری‌های دسترسی موجود در مجاورت UE [۱۸] مورد شناسایی قرار می‌گیرند و بهترین دسترسی بین دسترسی‌های مبتنی بر 3GPP و غیر 3GPP (WiFi) از نقطه نظر کاهش EMF و بر اساس محتوای کاربر انتخاب می‌شوند.
- تخلیه بار[۱۹] به سلول‌های کوچکتر مانند شبکه‌های فمتو (و یا میکرو یا پیکو)[۲۰] یا شبکه‌های غیر 3GPP مانند (WiFi می‌تواند به کاهش سطح پرتوگیری کمک کند.
- اپراتور می‌تواند از ابزار برنامه‌ریزی پیکربندی خودکار[۲۱] شبکه برای شناسایی بهترین پیکربندی به منظور کاهش پرتوگیری در یک منطقه خاص استفاده کند و با توجه به ساعت‌های مختلف روز، بار و استراتژی‌ها، اولویت‌ها و سیاست‌های مختلفی را در شبکه اعمال کند.
- استقرار شبکه ناهمگون یعنی استقرار سلول‌های کوچک در کنار سلول‌های ماکرو، به‌عنوان یک عامل اصلی برای کاهش میزان پرتوگیری عمل می‌کند.
- استفاده از آنتن‌هایی با طراحی و الگوی تابشی مناسب در شبکه اپراتور می‌تواند نقشی اساسی در کاهش پرتوگیری داشته باشد.
- استفاده از مکانیسم‌های خواب و بیداری برای BS که با استفاده از آن‌ها ضمن حفظ QoS کاربر، از پرتوگیری EMF بی‌مورد جلوگیری می‌شود.
- استفاده از تکنیک‌های تخصیص منابع رادیویی در شبکه (با تمرکز ویژه بر کنترل توان و زمان‌بندی کاربر)، تاثیر قابل توجهی در کاهش پرتوگیری EMF کاربر دارند.
- حذف سرویس صوتیG2 و تخصیص منابع آن به سرویس صوتی 3G می‌تواند سطح پرتوگیری EMF را تا میزان ۳ برابر کاهش دهد. فناوری VoLTE نیز به‌عنوان سناریو ارزشمند دیگری برای این منظور مطرح است.

● **پروژه** MONICEM

پروژه تحقیقاتی MONICEM [۸] در سال ۲۰۱۱ در خصوص فعالیت‌های پایش و کنترل میدان‌های الکترومغناطیسی در محدوده فرکانس رادیویی در ایتالیا انجام شده و در آن روش‌هایی برای کمینه‌سازی سطوح انتشار EMF، با حفظ QoS، ارایه شده است. در این پروژه نیز همانند پروژه LEXNET بر تأثیر مشخصه‌های آنتن، استفاده از سلول‌های میکرو و پیکو، به‌کارگیری الگوریتم‌های تعدیل شدت سیگنال، کنترل توان فرستنده و به اشتراک‌گذاری منابع رادیویی برای کاهش سطح پرتوگیری از شبکه تلفن همراه تأکید شده است. خلاصه سایر راه‌کارهای ارایه شده در پروژه MONICEM به شرح زیر است:

- **تصویب محدودیت برای استقرار سایت‌های جدید:** تعیین کمترین فاصله از مکان‌های حساس و بررسی میزان افزایش شدت میدان تشعشعی[۲۲] (شکل ۳).
- **جایگزینی تجهیزات منسوخ شده:** جایگزینی تجهیزات منسوخ شده با سیستم‌های فناوری جدید که تشعشعات الکترومغناطیسی کمتری را برای همان سرویس تضمین شده فراهم می‌کند.
- **فعالیت‌های نظارتی:** نظارت سیستمی بر روی توان در محدوده تحت تشعشع باید به‌طور دقیق انجام شود و در صورت تشخیص سطوح تشعشعی بیش از حد مجاز، توان محدود یا ایستگاه پایه جمع‌آوری شود.

شکل ۳: رعایت محدودیت کمترین فاصله از مکان‌های حساس برای استقرار سایت‌های جدید.

۵-۳- بررسی سایر راه‌کارهای فنی به منظور طراحی و مدیریت شبکه تلفن همراه تحت قیود EMF

● ابزار محاسبه پرتوگیری و بهینه‌سازی توان در شبکه

در[۹] یک ابزار طراحی شبکه ارایه شده است که محاسبه پرتوگیری و بهینه‌سازی را در شبکه‌های بی‌سیم داخل ساختمان را که پوشش آنها توسط نقاط دسترسی Wi-Fi و فمتوسلول‌های LTE/WiFi تامین می‌شود، انجام می‌دهد. استفاده از این روش منجر به کاهش ۳ تا ۶ برابری سطوح EMF نسبت به پیاده‌سازی‌های سنتی سلول‌ها در ساختمان مورد نظر می‌شود.

● آنتن‌های توزیع شده[۲۴] (DAS)

سیستم‌های DAS شامل چندین آنتن می‌باشند که به منظور بهبود پوشش شبکه به‌صورت جدا از یکدیگر (از نظر مکانی) پیاده‌سازی شده‌اند، ولی همگی به یک BS یکسان در سلول متصل هستند. توزیع جداگانه فضایی آنتن‌ها در یک منطقه می‌تواند باعث کاهش محوشدگی مقیاس بزرگ[۲۵]، بهبود ظرفیت و کاهش فاصله دسترسی گردد. با توجه به این‌که توان ارسالی آنتن DAS کمتر از BS ماکرو معمولی است، سطح تشعشع EMF کاهش می‌یابد[۱].

● شبکه‌های ناهمگون[۲۶](HetNets)

HetNet متشکل از گره‌های کم توان یا ایستگاه‌های رله‌ای است که برای بهبود پوشش و افزایش ظرفیت در مناطق بسیار متراکم شبکه با میزان تقاضای داده بالاتر، بر روی ماکروسلول قرار داده شده‌اند. گره‌های کم توان مورد استفاده در HetNet بیشتر پیکوسلول‌ها، فمتوسلول‌ها و ایستگاه‌های رله هستند. با توجه به فاصله کم بین سلول‌های کوچک کم‌توان و کاربران تلفن همراه، پتانسیل قابل توجهی برای کاهش توان انتقال در هر دو جهت فراسو و فروسو وجود دارد[۱].

● شکل‌دهی پرتو[۲۷]

روش آنتن هوشمند/تطبیقی و استفاده از آرایه‌های آنتنی برای شکل‌دهی پرتو برای ارسال/دریافت به سمت کاربر تلفن همراه، با تمرکز پرتوهای آنتن در جهت مورد نظر، تداخل در شبکه و تشعشعات EM را در جهات نامطلوب کاهش می‌دهد (شکل ۴). همچنین این روش منجر به بهبود SINR و کاهش توان ارسالی می‌شود زیرا بیشتر انرژی سیگنال در یک جهت خاص متمرکز شده است و در نتیجه از میزان تشعشعات EM در سایر جهات کاسته می‌شود[۱] و[۱۰].

● MIMO انبوه[۲۸]

در MIMO انبوه تعداد زیادی (صدها) آنتن کوچک در BS قرار می‌گیرند که نسبت به BSهای کنونی، تعداد المان‌های آن بسیار بیشتر است. اما، با توجه به توان کمتر هر یک از این آنتن‌های کوچک، در هر منبع فرکانس-زمانی، به تعداد کاربران کمتری سرویس‌دهی می‌شود. این امر علاوه بر بهبود کارایی طیفی، بازده انرژی و کاهش توان انتقالی، منجر به کاهش میزان تشعشع EM در شبکه می‌شود[۱]و[۱۰].

● مجازی‌سازی

مجازی‌سازی استفاده از الگوهای نرم‌افزاری متناسب با طیف وسیع توابع مختلف شبکه است. تعریف بلوک‌های مجازی در معماری سلولی شبکه‌های 5G امکان استفاده از بخش‌های سخت‌افزاری مشترک را در بین اپراتورها فراهم می‌سازد. این ویژگی برای مناطق شهری بسیار قابل توجه است چرا که ممکن است در داخل هر سایت امکان نصب BSهای جدیدی نباشد. این راه‌کار، منجر به کاهش زیادی در سطح EMF می‌شود، چرا که به‌دلیل استفاده از سخت‌افزار مشترک، تعداد آنتن‌های فرستنده کاهش می‌یابد[۱]و[۱۰].

● محاسبات لبه‌ای[۲۹] (MEC)

ایده MEC که در شبکه‌های 5G پیاده‌سازی می‌شود در واقع نزدیک کردن منابع محاسبات ابری[۳۰] به کاربر نهایی با استفاده از قابلیت‌های محاسباتی موجود در سایت BS است. اپراتور با مدیریت درست محتوای ذخیره شده در پلتفرم‌های MEC کیفیت تجربه[۳۱] (QoE) کاربران را بهینه می‌کند که همین امر منجر به کاهش انتقال داده در محیط و در نتیجه کاهش سطوح EMF می‌شود. با این وجود، این وضعیت بستگی به نوع سرویسی دارد که توسط MEC ارایه می‌شود که برای مثال می‌تواند سرویس‌هایی با نرخ داده بالا مانند سرویس‌های واقعیت افزوده[۳۲] و ویدئوهایی با کیفیت بسیار بالا[۳۳] باشد. یکی دیگر از امکانات MEC، ارتباط دستگاه به دستگاه[۳۴] (D2D) است که می‌تواند توسط کاربران انجام شود. این ویژگی کاهش تبادل داده بین UE و BS را به‌همراه دارد و احتمالا باعث کاهش میزان سطوح EMF تولید شده توسط BS می‌شود[۱] و[۱۰].

● تخلیه شبکه‌های 2G/3G

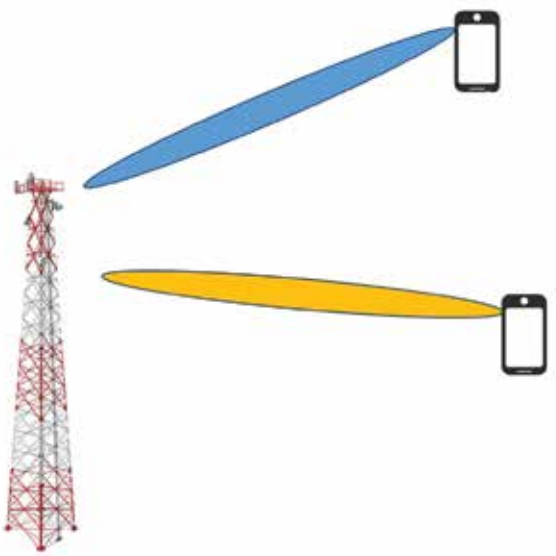
با استقرار شبکه‌های 5G می‌توان شبکه را از فناوری‌های 3G/2G موجود تخلیه نمود. این امر منجر به کاهش تعداد منابع تشعشع‌کننده و در نتیجه کاهش سطوح EMF در شبکه می‌شود [۱].

● استفاده از سطوح بازتابنده هوشمند[۳۵] (IRSها)

IRSها به‌عنوان پراکنده‌ساز هوشمند پسیو و قابل کنترل عمل می‌کنند و می‌توانند کانال بی‌سیم را با بازتاب امواج به جهت‌های مطلوب بهبود بخشند (شکل ۵). این سطوح پسیو هستند و بنابراین تعداد منابع RF را افزایش نمی‌دهند[۱۱].

● روش تخلیه بار به[۳۶] Li-Fi

یک تکنیک جدید برای تخلیه بار، انتقال ترافیک کاربر از سلول‌های ماکرو یا سلول‌های کوچک به سلول‌های Li-Fi است.



شکل ۴: شکل‌دهی پرتو ایستگاه پایه به سمت کاربران تلفن همراه.

Li-Fi یک سیستم شبکه‌ای کامل است که از لحاظ مفهومی شبیه Wi-Fi است، اما در باند فرکانس نور مرئی کار می‌کند، برخلاف Wi-Fi از باندهای RF استفاده می‌کند. در حالی‌که تخلیه بار از طریق Wi-Fi و سلول‌های کوچک، هیچ‌گونه امواج RF اضافی برای تخلیه بار داده در Li-Fi لازم نیست، در نتیجه این روش باعث کاهش EMF می‌شود.

۶- راه‌کارهای فنی قابل پیاده‌سازی در تجهیزات کاربران تلفن همراه به منظور کاهش سطح تشعشعات EMF

با رشد فناوری و استفاده چند کاربردی از گوشی تلفن همراه (از دوربین جیبی گرفته تا پخش‌کننده موسیقی، رادیو و تلویزیون قابل حمل و یک لپ‌تاپ کوچک با نرم‌افزارهای کاربردی فراوان) و بنابراین انتقال داده‌های ترافیکی با کیفیت بالا، نیاز به ایجاد آنتن‌های پیشرفته‌تری برای پشتیبانی از فرکانس‌های مختلف در کنار نیاز به تغییر شکل و اندازه گوشی‌های تلفن همراه احساس شد. از این رو، روش‌های جدید انتقال از جمله MIMO به کار گرفته شدند. این روش‌ها با کاهش میزان سیگنال به نویز لازم در گیرنده و انتقال داده با گذردهی مناسب، باعث کاهش توان مورد نیاز در مسیر فراسو شده و در نتیجه توان تشعشعی از گوشی تلفن‌همراه را کاهش می‌دهند (در سطح بیشینه ۲۵۰ میلی وات و در شرایط عادی بیرون ساختمان در حدود ۱۰۰ میلی وات و کمتر). در محیط داخل ساختمان، به‌دلیل تلفات بیشتر در مسیر بین گوشی تلفن‌همراه و ایستگاه پایه، توان ارسالی فراسوی بیشتری مورد نیاز است. به این ترتیب میزان پرتوگیری به‌طور مستقیم از محیطی که کاربر در آن واقع شده است، تاثیر می‌پذیرد.

نکات بالا این مفهوم را می‌رساند که آنتن‌ها می‌بایست هوشمندانه‌تر طراحی شوند و همچنین روش‌های انتقال داده می‌بایست نسبت به کانال و شرایط آن آگاه‌تر بوده تا بتوانند میزان پرتوگیری را کاهش دهند. عواملی که بر سطح و توزیع SAR ناشی از یک دستگاه کاربر تاثیر می‌گذارند، زیاد و متنوع هستند که از آن جمله می‌توان به طراحی دستگاه، پروفایل زمانی توان دستگاه، موقعیت و جهت‌گیری دستگاه نسبت به کاربر و مشخصات بدن کاربر اشاره کرد[۱۲].

طراحی UE آگاه از SAR از روش‌هایی است که می‌تواند سطح پرتوگیری کاربر را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. این نوع از طراحی از زمان ظهور ارتباطات سلولی مورد توجه بوده است. تکنیک‌های کاهش پرتوگیری اولیه به‌دلیل وجود منحصر به فرد ارتباطات صوتی، تنها بر قسمت سر بدن متمرکز بوده‌اند. اما، با توجه به این‌که گوشی‌های کنونی برای کاربردهای مختلفی (مانند تماس صوتی، تماس تصویری و ارسال پیام کوتاه) استفاده می‌شوند، لازم است که متناسب با کاربرد گوشی سطح SAR ناشی از آن کاهش یابد.

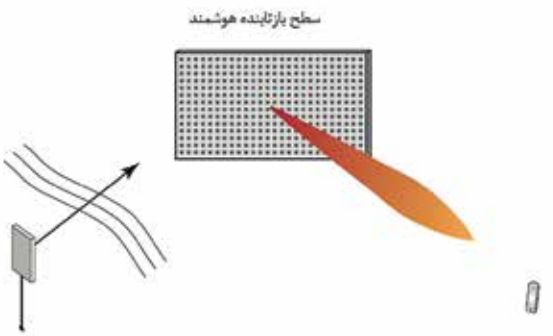
استفاده از شیلدهای فریتی، استفاده از مواد متامترال[۳۷] و استفاده از تشعشع‌کننده‌های پارازیتی[۳۸] از جمله روش‌های اصلی قابل پیاده‌سازی در تجهیزات کاربر به منظور کاهش سطح پرتوگیری می‌باشند. تکنیک‌های طراحی دیگری که به منظور کاهش SAR در تجهیزات کاربران 5G قابل پیاده‌سازی می‌باشند عبارتند از[۱۱]:

- **تنظیم الگو تشعشعی UE برای کاهش میزان پرتوگیری**

طراحی آرایه آنتن برای تجهیزات کاربران 5G با توجه به نوع استفاده کاربران (مانند تماس صوتی، تماس تصویری و ارسال پیام کوتاه) انجام می‌شود. در این روش، مجموعه‌ای از حسگرها بر روی گوشی‌های هوشمند به‌منظور درک موقعیت UE و جهت آن مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. سپس، اختلاف فاز بین المان‌های آنتن برای هدایت و کاهش پرتوگیری بخشی از بدن که با توجه به نوع کاربرد UE در معرض تشعشعات قرار گرفته است، طراحی می‌شود. این تکنیک در 5G بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند، زیرا همان‌طور که پیشتر اشاره شد، با توجه به کاربرد UE برای مجموعه‌ای از سرویس‌های متنوع، پرتوگیری در بخش‌های مختلف بدن و همچنین سطوح EMF متفاوتی ایجاد می‌شود.

- **یکپارچه‌سازی آرایه‌های آنتنی با عملکرد دوگانه**

در طراحی آگاه از SAR برای آنتن موج میلی‌متری آرایه‌ای با عملکرد دو گانه، بهبود بیشتری در کاهش پرتوگیری صورت می‌پذیرد. منظور از عملکرد دوگانه استفاده از دو زیر آرایه متمایز است که در بخش‌های مختلف UE قرار می‌گیرند و در نتیجه الگوهای مختلف پرتوگیری را ایجاد می‌کنند. زیر آرایه نخست در پوشش عقب قرار می‌گیرد و فقط در صورت استفاده کاربر از خدمات صوتی فعال می‌شود. از طرف دیگر، زیر آرایه دوم در فریم بالایی قرار می‌گیرد و فقط درصورتی‌که کاربر از سرویس‌های ویدیویی یا متنی استفاده کند، فعال می‌شود. با فعال‌سازی متناوب دو آرایه (بر اساس نوع سرویس‌های استفاده شده توسط کاربر)، بیشینه SAR برابر با ۰.۸۸ W/kg به‌دست می‌آید[۱۳] که در مقایسه با سایر راه‌کارهای بررسی شده (که هیچ زیر آرایه جداگانه‌ای به کار نمی‌گیرند)، مقدار بسیار کمتری می‌باشد. توجه به این نکته لازم است که به‌کارگیری گسترده رویکرد پیشنهادی در دستگاه‌های تجاری، به دلیل کمبود جا در گوشی و وجود اینترفیس‌های بی‌سیم متعدد مستقر در آن همچنان یک مسأله باز و چالشی می‌باشد.



شکل ۵:عملکرد سطوح بازتابنده هوشمند.

۷-نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی روش‌های قابل به‌کارگیری توسط اپراتورها و سازندگان تجهیزات بخش کاربر به‌منظور کاهش سطح پرتوگیری از تشعشعات شبکه تلفن همراه پرداختیم. در بخش شبکه روش‌های مختلفی از جمله سیستم DAS، شکل‌دهی پرتو، موج میلی‌متری، الگوریتم‌های مدیریت منابع و ابزار طراحی شبکه معرفی شده‌اند. همچنین در بخش تجهیزات کاربر نیز روش‌های مختلفی ارایه شدند که از آن جمله می‌توان به ساخت آنتن‌ها با میزان SAR پایین با تغییر دادن شکل آن‌ها، استفاده از آنتن‌های آگاه از محتوا، موج میلی‌متری و غیره اشاره کرد. پیاده‌سازی این روش‌ها از سوی اپراتورها و سازندگان تجهیزات می‌تواند نقش مؤثری در کاهش

پرتوگیری کاربران از شبکه داشته باشد.

پی‌نوشت‌ها

1 Internet of Things
2 heterogeneous
3 Downlinks
4 Uplinks
5 Electromagnetic fields
6 Radio Frequency
7 Broadcasting
8 Specific Absorption Rate
9 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
10 Base Station
11 Vertical Radiation Pattern
12 tilt
13 directivity
14 Harizontal Radiation Pattern
15 Elevation angle
16 Quality of Service
17 radio components
18 User Equipment
19 offloading

۲۰ اندازه سلول بر اساس توان ارسالی BS، ارتفاع و مشخصات آنتن، ساختار و ویژگی‌های منطقه تحت پوشش، نوع سرویس و شرایط ترافیکی تعیین می‌شود. هرچه بار ترافیکی بر روی سلول بیشتر باشد، سلول کوچک‌تر می‌شود. شعاع پوشش میکروسلول‌ها در حدود ۲ کیلومتر، پیکوسلول‌ها چند صدمتر و فمتوسلول‌ها چند ده متر می‌باشد. میکروسلول‌ها اغلب برای افزایش میزان ظرفیت شبکه در مناطقی با چگالی جمعیت بالا نصب می‌شوند. پیکوسلول‌ها معمولاً برای پوشش‌دهی پاساژها، ادارات، قطارها یا هواپیماها استفاده می‌شوند. فمتوسلول‌ها در داخل خانه‌ها نصب می‌شوند و سیگنال‌دهی خوبی را برای محیط داخل ساختمان فراهم می‌کنند. سطوح توان میکروسلول‌ها چند وات، پیکوسلول‌ها تا ۲ وات، و فمتوسلول‌ها تا ۲۰۰ میلی‌وات می‌باشد.

21 Auto Configuration Planning

۲۲ حداقل فاصله نصب سایت برای مکان‌های حساس (به عنوان مثال مدارس، مهدهای کودک و بیمارستان‌ها) باید در نظر گرفته شود تا سایت مستقر شده در فواصلی کمتر از حدود ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر قرار نگیرد و از سوی دیگر ایستگاه پایه جدید افزایش میدانی بیش از ۰.۵ تا ۰.۶ ولت بر متر را ایجاد نکند.

23 Distributed Antenna System
24 Distributed Antenna System
25 large scale shadowing
26 Heteregeneous networks
27 Beamforming
28 Massive MIMO
29 Mobile Edge Computing
30 Cloud Computing
31 Quality of Experience
32 Augmented reality
33 very high definition videos
34 Device-to-Device
35 Inteligent Reflecting Surface (IRS)
36 light-fidelity
37 metamaterials
38 parasitic radiators

مراجع

[1]M. A. Imran, F. Héliot and Y. A .Sambo ,Low, Electromagnetic Emission Wireless Network Technologies5 G and beyond, IET, 2019.

[2]Mobile Phone Use and Brain Tumour Risk: Early Warnings Early Actions. European Environmental Agency; 2013. Available at: http://www.eea.europa.eu/publications/latelessons-2

[3]Ervin B. Podgorsak, Radiation Physics for Medical Physicists, Springer, 2010.

[4]ICNIRP
Guidelines on LimitingExposure to Electromagnetic Fields are for the protection of humans exposed to radiofrequency electromagnetic fields (RF) in the range 100 kHz to 300 GHz, 2020.

[5]H. Abdulla and R. E. Badra, "Head Exposure to Cellular Telephones: A System-Level Study", in Proc. IEEE Latin-American Conference on Commun. (LATINCOM), Bogota, Colombia, Sept. 2010.

[6]ITU-T K.70: Mitigation techniques to limit human exposure to EMFs in the vicinity of radiocommunication stations, 2018, available at: https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=K.

[7]http://www.lexnet.fr/"Monitoring and control of radio frequency electromagnetic fields", Higher Institute for Environmental Protection and Research Physical Agents Service, 2011. Available at: https://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00010200/10204-r134-monicemweb.pdf.

[8]D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, and L. Martens, "Exposure optimization in indoor wireless networks by heuristic network planning," Progress In Electromagnetics Research, vol. 139, pp. 445–478, 2013.

[9]Luca Chiaraviglio et al. "Planning 5G Networks under EMF Constraints: State of the Art and Vision," IEEE Access, vol. 6, pp. 51021–51037, Sep. 2018.

[10]L. Chiaraviglio, A. Elzanaty, and M.-S. Alouini, "Health Risks Associated with 5G Exposure: A View from the Communications Engineering Perspective, Chiaraviglio, Available at: https://arxiv.org/abs/2006.00944.

[11]K Suppl. 13: Radiofrequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure levels from mobile and portable devices during different conditions of use, 2018, available at: https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=K.

[12]J. Bang and J. Choi, "A SAR Reduced MM-Wave Beam-Steerable Array Antenna with Dual-Mode Operation for Fully Metal-Covered 5G Cellular Handsets," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 17, no. 6, pp. 1118-1122, 2018.

***