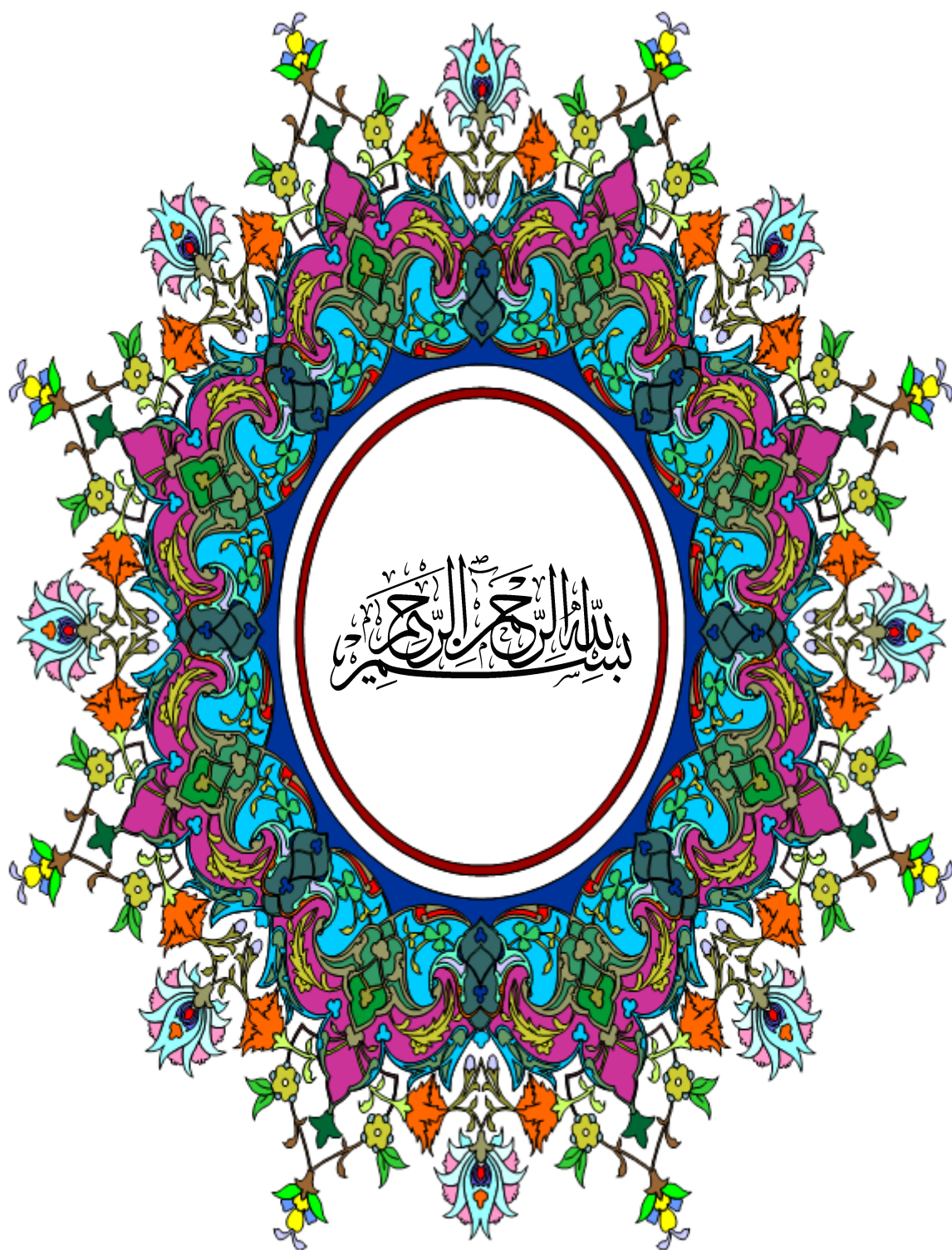






دانشکده برق و رباتیک

رشته‌ی مهندسی برق گرایش مخابرات میدان

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی میزان SAR ناشی از تلفن‌های همراه در مدل سر و ارائه راه کار مناسب

جهت کاهش آن

نگارنده: محمدرضا مهدی زاده

استاد راهنما:

دکتر جواد قالی بافان

مهرماه ۱۴۰۰

شهدا و آنانی که با علم و دانش،
امنیت کشورمان را تأمین می‌کنند تا
ما در کمال آرامش به کسب
تحصیل پردازیم و همچنین تمام
کسانی که به بنده علم آموختند و
همواره در پیمودن مسیرهای سخت
زندگی راهنما و پشتیبانم بوده‌اند.

سپاسگزاری

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و شنوندگان، حق او را گزاردن نتوانند، و سلام و درود بر محمد (ص) و خاندان پاک او، طاهران معصوم (ع)، هم آنها که وجودمان وامدار وجودشان است.

به مصداق (من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق) از کمک‌های علمی و فکری استاد راهنمای ارجمندم جناب آقای دکتر جواد قالی‌بافان که در طول این دوره با صبر و حوصله مرا راهنمایی کرده و همواره پشتیبان من بوده‌اند، بی‌شک بدون حمایت‌های ایشان انجام‌دادن این پروژه میسر نبود و از استادان داور گرامی، جناب آقای دکتر نیما آزادی طینت و جناب آقای دکتر ولی‌الله مشایخی به سبب قبول راهنمایی‌های این پایان‌نامه، کمال تشکر را دارم. از استادان محترم گروه مخابرات که زحمت علم‌آموزی و راهنمایی اینجانب برعهده ایشان بود، ممنون و سپاسگزارم.

همچنین از تمامی دوستان عزیزم که در این راه مرا یاری کردند، صمیمانه تشکر می‌کنم.

"تعهدنامه"

اینجانب **محمد رضا مهدی زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مخابرات میدان دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **بررسی میزان SAR ناشی از تلفن های همراه در مدل سر و ارائه راه کار مناسب جهت کاهش آن تحت راهنمایی دکتر جواد قالی بافان** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

این مطالعه باهدف نشان دادن امکان استفاده از فرامواد مبتنی بر SRRها، در کاهش جذب انرژی الکترومغناطیسی، در بافت سر انسان انجام می‌شود. در واقع در این پایان‌نامه از یک طرح فراموادی سطحی و کوچک برای کاهش میزان جذب امواج گوشی تلفن همراه در بافت سر، استفاده شده است. کاهش میزان SAR توسط دو نوع SRR با thin wire و بدون thin wire در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز برای آنتن هلیکس و در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز برای آنتن PIFA ارزیابی شد. میزان کاهش SAR ناشی از تلفن همراه دارای آنتن هلیکس، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز توسط SRR بدون thin wire، ۳۸/۴۹ درصد و توسط SRR با thin wire برابر ۲۶/۲۸ درصد می‌باشد. این در حالی است که ابعاد SRR با thin wire در مقایسه با SRR بدون thin wire ۴۶ درصد کوچک‌تر است. میزان کاهش SAR ناشی از تلفن همراه با آنتن PIFA توسط SRR بدون thin wire، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۵۵/۲۹ درصد و در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز ۶۴/۳۸ درصد می‌باشد. میزان کاهش SAR ناشی از تلفن همراه با آنتن PIFA توسط SRR با thin wire، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز به میزان ۲۳/۲۵ درصد و ۵۹/۲۵ درصد در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز می‌باشد. علاوه بر این ابعاد SRR با thin wire نسبت به ابعاد SRR بدون thin wire، در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به ترتیب ۵۴/۸۷ و ۴۸/۷۸ درصد کوچک‌تر است.

کلمات کلیدی: نرخ جذب ویژه (SAR)، فرامواد، تشدیدکننده‌های حلقوی شکاف‌دار (SRR)، مدل

سر، تلفن همراه

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

...

فصل اول:	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- امواج الکترومغناطیس ناشی از تلفن همراه	۴
۳-۱- اثرات بیولوژیکی حاصل از تشعشع امواج الکترومغناطیسی	۵
۴-۱- مکانیسم تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر روی بافت‌های بدن	۶
۴-۱-۱- آثار گرمایی	۶
۴-۱-۲- آثار رفتاری	۷
۴-۱-۳- آثار غیر گرمایی	۷
۵-۱- تعریف کمیّت SAR	۸
۶-۱- تعریف کمیّت SRF	۱۱
۷-۱- اثرات مخرب امواج الکترومغناطیسی بر انسان	۱۲
۷-۱-۱- تأثیرات امواج بر روی سر	۱۲
۷-۱-۲- اثرات بر روی گوش انسان	۱۲
۷-۱-۳- تأثیرات بر روی چشم انسان	۱۲
۷-۱-۴- تأثیرات روی دستگاه قلبی عروقی انسان	۱۳
۷-۱-۵- تأثیر بر غشاءهای سلولی	۱۳
۷-۱-۶- تأثیر بر ژن‌ها	۱۳

۱۴	۷-۷-۱- تأثیر بر ناباروری
۱۴	۸-۷-۱- تأثیرات عصبی
۱۵	۹-۷-۱- تغییر در نقش طبیعی مولکول‌های موجود در اندام‌های بدن
۱۵	۱۰-۷-۱- تأثیر بر پوست
۱۶	۸-۱- ساختار کلی پایان‌نامه
۱۷	فصل دوم:
۱۸	۱-۲- کاهش SAR با استفاده از صفحات فرّیتی
۲۰	۱-۱-۲- کاهش SAR بر اساس محل اتصال ورق فرّیت
۲۰	۲-۱-۲- کاهش SAR بر اساس اشکال مختلف ورق فرّیت
۲۱	۳-۱-۲- بررسی اندازه‌ی ورق فرّیت در کاهش SAR
۲۱	۴-۱-۲- کاهش SAR بر اساس افزایش ضخامت
۲۱	۵-۱-۲- کاهش SAR بر اساس نوع ورق فرّیت
۲۲	۶-۱-۲- تغییرات الگوی تابش پس از نصب محافظ فرّیتی
۲۲	۲-۲- کاهش SAR با استفاده از مواد رسانا
۲۶	۳-۲- کاهش SAR به وسیله‌ی ساختار EBG
۳۴	۴-۲- کاهش SAR با استفاده از ساختارهای AMC
۳۷	۵-۲- کاهش SAR توسط FSSها
۳۹	۶-۲- کاهش SAR با استفاده از فرامواد
۵۳	فصل سوم:

۵۴	۱-۳- مقدمه
۶۰	۲-۳- تحلیل و طراحی SRR
۶۶	۳-۳- مدل تلفن همراه
۶۷	۴-۳- مدل سر
۶۸	۵-۳- کاهش SAR تلفن همراه دارای آنتن هلیکس
۷۰	۱-۵-۳- کاهش SAR توسط SRR بدون thin wire
۷۲	۲-۵-۳- کاهش SAR توسط SRR با thin wire
۷۵	فصل چهارم:
۷۶	۱-۴- مدل تلفن همراه
۷۸	۲-۴- مدل سر
۷۹	۳-۴- تحلیل و طراحی SRR جهت کاهش SAR
۸۰	۱-۳-۴- طراحی SRR بدون thin wire
۸۵	۴-۴- طراحی SRR با thin wire
۸۵	۱-۴-۴- SRR با thin wire در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز
۸۷	۲-۴-۴- SRR با thin wire در فرکانس ۱۸۰۰
۸۹	۵-۴- کاهش مقادیر SAR یک گرم آنتن PIFA تلفن همراه
۹۱	۶-۴- کاهش SAR با SRR بدون thin wire
۱۰۰	۷-۴- کاهش SAR با SRR با thin wire
۱۰۹	فصل پنجم:

۱۱۰.....۵-۱- نتیجه گیری

۱۱۴.....۵-۲- پیشنهادات

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ هندسه‌ی آنتن و ورق فریتی [۱۳]..... ۱۹
- شکل ۲-۲ اشکال مختلف محافظ فریتی [۱۴]..... ۲۰
- شکل ۳-۲ موقعیت صفر برای تلفن‌های همراه مختلف [۱۵]..... ۲۳
- شکل ۴-۲ موقعیت اولیه قرارگیری ورق آلومینیوم [۱۶]..... ۲۴
- شکل ۵-۲ ساختار EBG [۱۹]..... ۲۸
- شکل ۶-۲ محل قرارگیری ساختار EBG [۲۰]..... ۳۰
- شکل ۷-۲ (A) ساختار EBG قارچی شکل و (B) ساختار EBG از نوع CROSS HAIR [۲۲]..... ۳۱
- شکل ۸-۲ ساختارهای EBG پیشنهادی [۲۴]..... ۳۳
- شکل ۹-۲ محافظ‌های مختلف تلفن همراه با EBG [۲۴]..... ۳۴
- شکل ۱۰-۲ نمای جلویی (a) و نمای پشتی (b) طرح AMC پیشنهادی [۲۶]..... ۳۶
- شکل ۱۱-۲ مدل آنتن به همراه فرامواد مربعی اتصالی [۳۱]..... ۴۰
- شکل ۱۲-۲ آنتن پیشنهادی با زمین فراموادی [۳۲]..... ۴۱
- شکل ۱۳-۲ ساختار SRR پیشنهادی [۳۳]..... ۴۲
- شکل ۱۴-۲ آرایه فراموادی چاپ شده بر روی کاغذ آغشته به روغن [۳۵]..... ۴۳
- شکل ۱۵-۲ ساختار خطوط پیچشی و رزوناتور حلقه‌ای شکاف دار بیضوی [۳۶]..... ۴۴
- شکل ۱۶-۲ ساختارهای مختلف SRR پیشنهادی [۳۸]..... ۴۸
- شکل ۱۷-۲ ساختار ELC (a) نمونه شبیه‌سازی شده و (b) نمونه ساخته شده [۳۹]..... ۴۸
- شکل ۱۸-۲ ساختار فراموادی طراحی شده جهت کاهش SAR [۴۰]..... ۵۰
- شکل ۱۹-۲ طرح فراموادی پیشنهادی [۴۱]..... ۵۲
- شکل ۱-۳ حالت های مختلف علامت‌های ϵ و μ نسبت به یکدیگر [۴۳]..... ۵۷
- شکل ۲-۳ ساختارهایی جهت تحقق (الف) ϵ منفی و (ب) تولید μ منفی [۴۳]..... ۵۸

- شکل ۳-۳ ساختار کلی متامتریال‌های SRR [۴۳] ۵۹
- شکل ۴-۳ طراحی SRR بدون thin wire ۶۲
- شکل ۵-۳ شبیه سازی عددی سلول واحد فرامواد (SRR) ۶۳
- شکل ۶-۳ منحنی S_{21} شبیه‌سازی شده ساختار SRR بدون thin wire ۶۳
- شکل ۷-۳ استخراج مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r ۶۴
- شکل ۸-۳ (الف) نمای جلویی SRR با thin wire و (ب) نمای پشتی ۶۵
- شکل ۹-۳ منحنی S_{21} ساختار SRR با thin wire ۶۵
- شکل ۱۰-۳ استخراج مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r ۶۶
- شکل ۱۱-۳ مدل تلفن‌همراه با آنتن هلیکس ۶۶
- شکل ۱۲-۳ منحنی S_{11} آنتن هلیکس ۶۷
- شکل ۱۳-۳ مدل فانتوم سر، (الف) نمای جانبی و (ب) نمای جلویی ۶۸
- شکل ۱۴-۳ قرار گرفتن تلفن‌همراه در مقابل فانتوم سر ۶۹
- شکل ۱۵-۳ مقادیر SAR یک گرم قبل از اتصال SRR به تلفن‌همراه ۶۹
- شکل ۱۶-۳ موقعیت قرارگیری SRR بدون thin wire ۷۰
- شکل ۱۷-۳ مقادیر SAR یک گرم پس از اتصال SRR بدون thin wire ۷۱
- شکل ۱۸-۳ مقادیر S_{11} آنتن هلیکس پس از قرار گرفتن SRR در مقابل تلفن‌همراه ۷۲
- شکل ۱۹-۳ موقعیت قرارگیری SRR با thin wire ۷۲
- شکل ۲۰-۳ مقادیر SAR یک گرم پس از اتصال SRR با thin wire ۷۳
- شکل ۲۱-۳ مقادیر S_{11} آنتن هلیکس پس قرار گرفتن SRR در مقابل تلفن‌همراه ۷۳
- شکل ۲۲-۳ الگوی تابشی آنتن Helix (الف): در حالت اتصال SRR و (ب): بدون اتصال SRR ۷۴
- شکل ۱-۴ مدل آنتن PIFA در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۷۶
- شکل ۲-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۷۷

- شکل ۳-۴ مدل آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ ۷۷
- شکل ۴-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز ۷۸
- شکل ۵-۴ (الف) نمایش فاصله تلفن همراه تا سر و (ب) نمای جلویی ۷۸
- شکل ۶-۴ مدل SRR بدون thin wire ۸۱
- شکل ۷-۴ شبیه سازی عددی SRR ۸۲
- شکل ۸-۴ منحنی S_{21} ساختار SRR بدون thin wire ۸۲
- شکل ۹-۴ استخراج مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r ۸۳
- شکل ۱۰-۴ توزیع میدان الکتریکی: در فرکانس های (الف) ۹۷۰ و (ب) ۱۸۰۰، توزیع میدان مغناطیسی: در فرکانس های (پ) ۹۷۰ و (ت) ۱۸۰۰ ۸۴
- شکل ۱۱-۴ نمای جلویی و پشتی SRR با thin wire در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۸۶
- شکل ۱۲-۴ منحنی S_{21} ساختار SRR در بازه ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز ۸۷
- شکل ۱۳-۴ مقادیر ϵ_r و μ_r ساختار SRR در بازه ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز ۸۷
- شکل ۱۴-۴ نمای جلویی و پشتی SRR با thin wire در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز ۸۸
- شکل ۱۵-۴ منحنی S_{21} ساختار SRR در بازه ی فرکانسی ۱۷۲۰ تا ۱۹۵۰ مگاهرتز ۸۸
- شکل ۱۶-۴ مقادیر ϵ_r و μ_r ساختار SRR در بازه ی فرکانسی ۱۷۲۰ تا ۱۹۵۰ مگاهرتز ۸۹
- شکل ۱۷-۴ مقادیر SAR بدون SRR اتصالی در فرکانس (الف) ۹۰۰ و (ب) ۱۸۰۰ ۹۰
- شکل ۱۸-۴ محل قراگیری SRR در پشت تلفن همراه ۹۱
- شکل ۱۹-۴ نحوه ی قرارگیری اولیه SRR در پشت تلفن همراه ۹۲
- شکل ۲۰-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز پس از نصب SRR ۹۴
- شکل ۲۱-۴ جریان سطحی روی آنتن PIFA در فرکانس (الف) ۹۴۲ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز ۹۴
- شکل ۲۲-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز ۹۷
- شکل ۲۳-۴ جریان سطحی روی SRR در فرکانس (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز ۹۸

شکل ۲۴-۴ (الف) مقادیر S_{11} و (ب) مقادیر SAR در حالت قرارگیری SRR روی صفحه‌نمایش

۹۹.....

شکل ۲۵-۴ مقادیر SAR در حالت چرخش ۹۰ درجه‌ی SRR در فرکانس (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰

مگاهرتز ۱۰۰.....

شکل ۲۶-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۱۰۱.....

شکل ۲۷-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز ۱۰۱.....

شکل ۲۸-۴ جریان سطحی روی SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز (الف) نمای جلویی و (ب) نمای

پشتی ۱۰۲.....

شکل ۲۹-۴ جریان سطحی روی SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز (الف) نمای جلویی و (ب) نمای

پشتی ۱۰۲.....

شکل ۳۰-۴ محل قرارگیری SRR با thin wire درون تلفن همراه ۱۰۵.....

شکل ۳۱-۴ میزان SAR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز در حالت قرارگیری SRR درون تلفن همراه

۱۰۵.....

شکل ۳۲-۴ پارامتر S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز برای حالت قرارگیری SRR درون

تلفن همراه ۱۰۶.....

شکل ۳۳-۴ الگوی تابشی آنتن PIFA بدون SRR اتصال در فرکانس‌های (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰

مگاهرتز ۱۰۷.....

شکل ۳۴-۴ الگوی تابشی آنتن PIFA در حالت اتصال SRR بدون thin wire در پشت تلفن همراه

برای موقعیت و چرخش بهینه SRR از نظر کاهش SAR در فرکانس‌های (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰

مگاهرتز ۱۰۸.....

شکل ۳۵-۴ الگوی تابشی آنتن PIFA در حالت اتصال SRR با thin wire در پشت تلفن همراه برای

موقعیت و چرخش بهینه SRR از نظر کاهش SAR در فرکانس‌های (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

١٠٨

فهرست جداول

جدول ۱-۳ مقایسه‌ی کاهش SAR و درصد کوچک‌سازی SRR با thin wire نسبت به SRR بدون	
thin wire	۷۴
جدول ۱-۴ مقادیر SAR برای چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز	۹۳
جدول ۲-۴ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز	۹۵
جدول ۳-۴ مقادیر SAR برای چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز	۹۶
جدول ۴-۴ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز	۹۸
جدول ۵-۴ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز	۱۰۳
جدول ۶-۴ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز	۱۰۳
جدول ۷-۴ نتایج کاهش SAR و درصد کوچک‌سازی در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز	۱۰۴
جدول ۸-۴ نتایج کاهش SAR و درصد کوچک‌سازی در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز	۱۰۴
جدول ۹-۴ مقایسه‌ی کاهش SAR و ابعاد ساختار پیشنهادی با سایر ساختارها در فرکانس ۹۰۰	
مگاهرتز	۱۰۷
جدول ۱۰-۴ مقایسه‌ی کاهش SAR و ابعاد ساختار پیشنهادی با سایر ساختارها در فرکانس ۱۸۰۰	
مگاهرتز	۱۰۷

فصل اوّل

مقدمه

۱-۱- مقدمه

امروزه، استفاده از دستگاه‌های الکترونیکی یک نیاز جهانی است. دستگاه‌های الکترونیکی به‌عنوان یکی از عناصر اساسی زندگی روزمره شناخته می‌شوند و علاقه به تلفن‌های همراه به طور قابل توجهی افزایش یافته است. تلاش گسترده تحقیقاتی در مورد خطرات تابش امواج الکترومغناطیسی ناشی از دستگاه‌های بی‌سیم، بر روی سلامتی انسان انجام می‌شود. امواج الکترومغناطیسی ایجاد شده توسط سیستم‌های مختلف بی‌سیم مانند سیستم‌های تلفن همراه، سیستم‌های ماهواره‌ای، سیستم‌های ماکروویو و غیره ارتباطات ما را در سراسر جهان تسهیل می‌کند. این امواج تأثیرات زیادی بر بدن انسان و همچنین زندگی روزمره ما دارند.

از آنجا که استفاده از دستگاه‌های ارتباطی قابل حمل، هر ساله در حال افزایش است، تابش امواج الکترومغناطیسی به یک مسئله هشداردهنده، در سراسر جهان تبدیل شده است. انتشار امواج الکترومغناطیسی از قرن بیستم آغاز شده است که برای دوره‌های کوتاه‌مدت یا بلندمدت تأثیرات زیادی بر سلامت انسان می‌گذارد. سازمان بهداشت جهانی، تأثیر تابش الکترومغناطیسی بر روی سلامتی انسان مانند سردرد، تومور مغزی، اختلالات خواب، فشارخون غیرنرمال و بیماری‌های قلبی را بررسی می‌کند. این امواج تأثیرات منفی زیادی بر بدن انسان، محیط زیست و همچنین زندگی روزمره ما دارند. اثرات امواج الکترومغناطیسی باعث ایجاد مشکلات و بیماری‌های زیادی در بدن انسان مانند سرطان می‌شود. امروزه انواع سرطان ناشی از این امواج افزایش یافته است، زیرا کاربران تلفن همراه افزایش یافته‌اند.

امواج الکترومغناطیس را می‌توان بر حسب میزان انرژی و در نتیجه نوع اثری که می‌تواند روی محیط‌های زنده داشته باشند، تقسیم‌بندی کرد. این تقسیم‌بندی در مرحله اول به صورت تشعشع یونیزه کننده و در مرحله دوم به صورت تشعشع غیر یونیزه کننده است که به فرکانس امواج الکترومغناطیس مربوط می‌شود.

اگر مقدار انرژی پرتو در حدی باشد که در حین عبور از هوا، توانایی یونیزه کردن اتم‌های هوا را داشته باشد و یا در صورت برخورد با بافت زیستی، توان آسیب به باندهای شیمیایی بافت را داشته باشد،

یون ساز محسوب می‌شود. در نتیجه پرتوهای یونیزه حاوی انرژی کافی الکترومغناطیسی، برای خارج کردن اتم‌ها و مولکول‌های موجود در بافت و تغییر واکنش‌های شیمیایی در بدن است که شامل پرتوهای ایکس، پرتوهای گاما و مواد رادیواکتیو پوستانه‌ی زمین که به صورت تشعشع ذره‌ای یا پرتوهای الکترومغناطیسی تابش می‌شوند، می‌باشد. از جمله اثرات جسمی پرتوهای یونیزان می‌توان به اختلالات جزئی و موقتی در بعضی از اعمال فیزیولوژیکی مانند کاهش عمر، کاهش مقاومت در مقابل بیماری‌ها، کاهش قدرت تولیدمثل، سرطان خون و یا انواع دیگر سرطان، آسیب به جنین در حال رشد، اشاره کرد. گونه‌ای از پرتوها را که انرژی کافی به منظور یونیزاسیون مواد را ندارند، پرتوهای غیر یونیزه کننده یا غیر یونساز می‌نامند. این پرتوها با جذب شدن در ماده، در شرایط عادی تغییری در ساختار تشکیلاتی اتم‌های آن ماده، ایجاد نمی‌کنند.

در سه دهه گذشته، استفاده از پرتوهای غیر یونساز در امور پزشکی، صنعت، مخابرات؛ آموزش و پژوهش و غیره بسیار افزایش یافته است و در نتیجه تعداد افرادی که همه‌روزه در محل کار و زندگی خود در معرض تابش این گونه پرتوها قرار می‌گیرند، رو به افزایش است.

پرتوهای غیر یونساز، پرتوهای الکترومغناطیسی با طول موج بیشتر از ۱۰۰ نانومتر هستند. انرژی فوتون این پرتوها کمتر از آن است که بتوانند در محیط بیولوژیکی یونسازی کنند و کمتر از انرژی فوتون پرتوهای ایکس و گاما می‌باشد. این امر به دلیل کمتر بودن فرکانس پرتوهای غیر یونساز است. پرتوهای غیر یونساز به سه محدوده اصلی پرتوهای نوری، شامل پرتوهای فرابنفش، نور مرئی، پرتوهای فروسرخ و میدان‌های الکترومغناطیسی شامل میدان‌های رادیویی، ماکروویو، میدان الکترومغناطیسی با فرکانس‌های کم، میدان‌های مغناطیسی ثابت و امواج الکترومغناطیسی ناشی از تلفن همراه، تقسیم می‌شوند. جذب پرتوهای الکترومغناطیسی غیر یونساز توسط بافت‌های زنده، در آنها گرما ایجاد می‌کند که اغلب اثرات بیولوژیکی حاصل از پرتوگیری با این پرتوها، نتیجه همین پدیده می‌باشد لازم به ذکر است، اثراتی نیز مشاهده شده‌اند که نمی‌توان آنها را نتیجه گرمای ایجاد شده در بافت، به شمار آورد. برخی از این اثرات ناشی از واکنش‌های شیمیایی هستند و سازوکار برخی دیگر هنوز شناخته نشده

است. این موضوع در حال حاضر یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در دنیا بوده و به زمان نسبتاً طولانی برای نتیجه‌گیری نیاز دارد.

این دسته از امواج نیز در اثر مواجهه با انسان بسته به ماهیتشان بر بافت‌های مختلف اثرات مخربی خواهند داشت، مانند امواج مادون قرمز که در صورت برخورد با چشم غیرمسلح سبب ایجاد آب مروارید و یا حتی نابینایی می‌شود. امروزه وسایل الکترونیکی که در صنعت به کار گرفته می‌شوند و یا وسایل الکتریکی که مصارف خانگی دارند، مولد امواج غیریونیزان محسوب می‌شوند.

۱-۲- امواج الکترومغناطیسی ناشی از تلفن همراه

فناوری تلفن همراه در قرن بیست و یکم معرفی شده و متعاقباً در سراسر جهان رو به پیشرفت است. به گونه‌ای که در دهه‌ی گذشته، مشترکان تلفن همراه در سراسر جهان به‌طور چشمگیری افزایش یافته‌اند. گسترش استفاده از تلفن‌های همراه و اینترنت تردیدهای زیادی را درباره اثرات تابشی امواج RF^1 بر سلامت انسان ایجاد نموده است. نگرانی گروه‌های تحقیقاتی به‌ویژه سازمان بهداشت جهانی مبتنی بر این واقعیت است که در اثر استفاده از تلفن‌های همراه، بعضی از آثار سوء آن، یک مشکل جهانی را در آینده به وجود خواهد آورد. در سال‌های اخیر، آگاهی عمومی نسبت به تأثیرات استفاده از تلفن‌های همراه مدرن بر سلامتی انسان افزایش یافته است. این آگاهی با محاسبه این واقعیت که تابش امواج الکترومغناطیسی هنگامی که تلفن همراه در نزدیکی کاربر است، می‌تواند توسط اعضای حیاتی بدن مانند مغز، گوش، چشم و پوست جذب شود، شکوفا شده است.

استفاده از تلفن‌های همراه نزدیک به بدن، به دلیل قرار گرفتن در معرض امواج EM^2 و اثرات حرارتی آن در فرکانس‌های خاص، آن را نسبت به سایر دستگاه‌های الکترومغناطیسی (EM) خطرناک‌تر می‌کند و همواره این دغدغه برای کاربران تلفن‌های همراه وجود دارد که استفاده از این دستگاه‌ها چقدر می‌تواند برای سلامتی آنها مضر باشد. از آنجاکه هر تلفن همراه سطحی کم از انرژی الکترومغناطیسی با فرکانس

¹ Radio Frequency

² Electromagnetic

رادیویی را منتقل می‌کند، جذب امواج الکترومغناطیسی بر سلامت انسان تأثیر می‌گذارد که به دلیل تأثیرات ناشی از گرم شدن بدن، می‌توانند آسیب‌های بیولوژیکی به سلول‌های بدن وارد کنند. تأثیر تابش امواج الکترومغناطیسی ناشی از تلفن‌های همراه، به سن انسان بستگی دارد، به این صورت که تأثیر آن بر روی کودکان بیشتر از نوجوانان و تأثیر آن بر روی نوجوانان بیشتر از بزرگسالان است.

اکثر مردم گزارش داده‌اند که اگر بیش از ۲۰ دقیقه از تلفن‌های همراه استفاده کنند، لوب گوش آن‌ها گرم می‌شود. این به دلیل گرم شدن خون توسط انرژی ماکروویو، تلفن‌های همراه است. مشکل با درد گوش شروع می‌شود که به تدریج به وزوز گوش می‌رسد و در نهایت منجر به کم‌شنوایی و تومور گوش می‌شود. علاوه بر این، استفاده بیش از حد از تلفن‌های همراه، منجر به خشک شدن پوست و مایع موجود در چشم‌ها، اختلال خواب، عدم تمرکز، کاهش حافظه و حتی سرطان می‌شود [۱].

۱-۳- اثرات بیولوژیکی حاصل از تشعشع امواج الکترومغناطیسی

وقتی بافت‌های بیولوژیکی در معرض تابش امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند، انرژی الکترومغناطیسی تابش شده از هر تلفن همراه یا منابع دیگر را جذب می‌کنند. در نتیجه، این انرژی جذب شده به گرما تبدیل می‌شود. بنابراین؛ دمای بافت‌های بیولوژیکی، فراتر از مقدار متوسط دما برای بافت‌های بیولوژیکی می‌شود که این اثرات بیولوژیکی حاصل از گرم شدن بافت توسط انرژی RF اغلب به اثرات گرمایی معروف هستند. با این حال، علّت واقعی اثرات بیولوژیکی افزایش دما در بافت‌های بیولوژیکی، به دلیل جذب مداوم انرژی الکترومغناطیسی تابش شده، ناشی از تلفن‌های همراه یا سایر منابع تابشی الکترومغناطیسی، توسط بافت‌های سر یا بافت‌های بیولوژیکی است.

تخریب بافت‌های بدن انسان تحت تأثیر تابش امواج الکترومغناطیسی با شدت بالا می‌تواند، ناشی از عدم توانایی بدن در دفع یا تلف کردن گرمای زیاد تولید شده در بافت‌ها باشد. گسترش این گرما بستگی به عوامل متعددی نظیر فرکانس تشعشع، اندازه و شکل جسم تحت اثر تابش، مدت زمان تابش، شرایط محیطی و راندمان تلف کردن حرارت توسط بافت را دارد.

۱-۴- مکانیسم تأثیر امواج الکترومغناطیسی بر روی بافت‌های بدن

تأثیر امواج الکترومغناطیسی در سه حالت آثار گرمایی، رفتاری و آثار غیرگرمایی می‌توان بررسی کرد.

۱-۴-۱- آثار گرمایی

امروزه تحقیقات فراوانی در زمینه تأثیر تشعشع امواج الکترومغناطیسی بر روی بافت‌های زنده و تأثیر آن بر زندگی انسان انجام شده است. تابش‌های الکترومغناطیسی فرکانس‌های رادیویی (RF)، از طریق سه مکانیسم اساسی زیر در محیط‌های بیولوژیکی تأثیر می‌گذارند.

۱. جابه‌جایی بارهای آزاد

۲. قطبش اتم‌ها و مولکول‌ها

۳. قطبش دوقطبی‌ها مانند آب

مایعات بدن به مشابه الکترولیت‌ها عمل می‌کنند. وقتی که یک میدان الکتریکی متغیر با زمان از یک الکترولیت می‌گذرد، منجر به حرکت رفت و برگشت یون‌ها، در ابتدا به یک جهت و سپس در جهت مخالف می‌شود. بنابراین؛ پیش از آنکه ذرات باردار فرصت حرکت پیدا کنند، جهت میدان مرتباً تغییر کرده و موجب ارتعاش یون‌ها در محل خودشان می‌شود. این فرایند تولید گرما در بدن می‌کند. الکترولیت‌ها شامل دوقطبی‌ها هستند و علاوه بر ارتعاش یون‌ها، چرخش مداوم دوقطبی‌ها هم رخ می‌دهد که این امر نیز به تولید گرما در داخل بافت‌هایی که تحت اثر تابش الکترومغناطیس هستند، کمک می‌کند.

جذب انرژی امواج الکترومغناطیسی توسط بافت‌های مختلف بدن، افزایش حرارت بافت را به دنبال دارد. این حرارت ایجاد شده توسط جریان خون، به سایر نقاط بدن انتقال می‌یابد.

ایجاد گرما در بافت باعث تخریب و آسیب آن می‌شود، اندام‌های حساس بدن به طور عمده عدسی چشم، دستگاه عصبی مرکزی و بیضه‌ها در مردان هستند که در این میان چشم‌ها و بیضه‌ها را

می‌توان به‌عنوان بیشترین مناطق آسیب‌پذیر حرارتی بدن نام برد زیرا از جریان خون پایینی برخوردار هستند. از عوارض دیگر نظیر سردرد، تحریکات عصبی، خستگی، عرق کردن، کم‌اشتهایی، ریزش آب از چشم، ریزش مو، ضعف شنوایی و در زنان بی‌نظمی‌های عادت ماهیانه می‌باشد. آثار گرمایی تشعشع امواج الکترومغناطیسی در شرایط یکسان تشعشع، با بالاتر رفتن فرکانس شدیدتر می‌شود و این آثار بیشتر مربوطه به بازه فرکانسی امواج رادیویی و ماکروویو می‌باشد. بالارفتن دمای بدن، پس از تحریک اعصاب، عکس‌العمل‌های فیزیکی بدن را برای برگشت به دمای نرمال، از قبیل بالارفتن سرعت گردش خون و به راه‌افتادن سیستم عروق بدن به همراه خواهد داشت [۲]. همچنین بالارفتن دمای بدن تأثیرات برگشت‌ناپذیری از جمله از بین رفتن سلول‌ها، از بین رفتن فعالیت آنزیم‌ها، به‌هم‌خوردن ساختار پروتئین‌ها، تبخیر شدن آب سلول‌ها را به دنبال دارد.

۱-۴-۲- آثار رفتاری

از دیگر آثار گرمایی تشعشع امواج الکترومغناطیسی بر بدن انسان، تغییر در آثار رفتاری فرد است. اثر رفتاری هنگامی اتفاق می‌افتد که مقدار کافی از انرژی جذب شده باشد، اما کنترل‌کننده‌های گرمایی بدن اجازه ندهد که این انرژی دمای بدن را افزایش دهد.

آثار رفتاری زیرمجموعه‌ای از آثار گرمایی امواج الکترومغناطیس هستند. مهم‌ترین اثر رفتاری کم‌اشتهایی است که برای انسان در مقدار انرژی الکتریکی جذب‌شده‌ی حدود ۴ وات بر کیلوگرم (w/kg) اتفاق می‌افتد [۲]. همچنین آثار رفتاری در شرایط خاص که از شرایط یک انسان عادی تقریباً به‌دور است، می‌تواند باعث کور شدن چشم و بروز آب‌مروراید گردد.

۱-۴-۳- آثار غیرگرمایی

در اثرات غیرگرمایی میدان به‌طور مستقیم، بافت‌های بیولوژیک بدن را بدون آنکه گرمای قابل‌توجهی ایجاد کند، تحت تأثیر قرار می‌دهد. تابش میدان‌های الکترومغناطیسی بر یک جسم با رسانایی محدود (مانند بافت بیولوژیک بدن)، باعث القای میدان‌های الکتریکی و تولید جریان‌های

الکتریکی حلقه‌ای در آن بافت می‌شود که با جریان‌ها و ولتاژهای درون‌زای مربوط به سلول‌ها رقابت کرده و باعث به هم خوردن تعادل فیزیولوژیکی آن بافت می‌شود.

از جمله اثرات غیر گرمایی امواج الکترومغناطیسی می‌توان به اختلال در سیستم‌های عصبی، افزایش ضربان قلب، تپش قلب و تشدید جریان خون، خستگی و تار شدن دید چشم، آب‌مروارید، تغییر شکل پروتئین‌های خون و افزایش قندخون، اثرات بیوشیمی، تغییر در DNA سلول‌ها و به وجود آمدن سلول‌های سرطانی اشاره کرد.

۵-۱- تعریف کمیّت SAR

سازمان‌های عمومی مختلف در سراسر جهان، مانند مؤسسه مهندسان برق و الکترونیک^۱ (IEEE) و کمیسیون بین‌المللی محافظت در برابر تشعشعات غیر یونیزه^۲ (ISNIRP)، دستورالعمل‌ها و استانداردهای ایمنی مربوط به جذب امواج الکترومغناطیسی را تعیین کرده‌اند. بر اساس این دستورالعمل‌ها، سطح انرژی مجاز که از فرکانس‌های رادیویی به عموم مردم می‌رسد باید در محدوده‌ی خاصی باشد. این دستورالعمل‌ها بر پایه‌ی استانداردهایی صادر شده‌اند که توسط سازمان‌های علمی غیر وابسته، طی انجام مشاهدات دوره‌ای و مطالعات علمی تعیین شده‌اند. استاندارد قرارگرفتن در معرض تابش امواج الکترومغناطیسی ناشی از دستگاه‌های بی‌سیم با واحدی به نام نرخ جذب ویژه^۳ (SAR) اندازه‌گیری می‌شود. SAR تنها استاندارد است که می‌تواند برای محاسبه جذب تابش الکترومغناطیسی بافت‌های بیولوژیکی بدن، استفاده شود. این توصیه‌ها یا معیارها که بر اساس حداکثر میزان جذب ویژه بنا شده‌اند، به منظور محدود کردن تابش امواج الکترومغناطیسی است.

SAR بیانگر میزان زمان جذب انرژی تابش غیر یونیزه، در یک مکان مشخص در داخل بافت است که با وات بر کیلوگرم (W/kg) اندازه‌گیری می‌شود و انرژی الکترومغناطیسی مصرف شده توسط بافت را ارزیابی می‌کند، به عبارتی دیگر نرخ جذب ویژه بیانگر مشتق زمانی انرژی جذب شده در واحد جرم از

¹ Electrical and Electronic Engineers Institution

² International Commission for Non-Ionising Radiation Protection

³ Specific Absorption Rate

یک جسم یا بافت می‌باشد و معمولاً در حجم کوچکی از بافت به‌اندازه ۱ یا ۱۰ گرم محاسبه می‌شود که با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌گردد [۳]:

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{\rho dv} \right) \quad (1-1)$$

V حجم برحسب m^3 ، ρ چگالی برحسب $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ ، m جرم برحسب Kg و w انرژی برحسب J است.

نرخ جذب ویژه کمیّتی مهم در تعیین استانداردهای گرمایی تشعشع امواج، در بازه فرکانسی ۱۰ کیلوهرتز تا ۱۰۰ گیگاهرتز می‌باشد که شامل دستگاه‌های الکترونیکی و ارتباطی مانند لپ‌تاپ‌ها، تلفن‌های همراه هوشمند و روترهای Wi-Fi است. حد بالای فرکانس تا جایی است، که عمق نفوذ موج در بافت، حدود ۱ سانتی‌متر یا بیشتر باشد. در فرکانس‌های بالاتر از این بازه فرکانسی، انرژی الکترومغناطیسی در سطح جسم جذب می‌شود و در استانداردها به‌جای اعمال محدودیت بر مقدار SAR، محدودیت بر دامنه شدت میدان تابشی اعمال می‌شود. در فرکانس‌های پایین‌تر نیز چگالی جریان‌های القایی مهم هستند [۲]. رابطه‌ی SAR با میدان الکتریکی عبارت است از [۴]:

$$SAR = \frac{\sigma E^2}{\rho} \quad (2-1)$$

که در آن E اندازه ماکزیمم دامنه میدان الکتریکی در داخل بافت برحسب $\frac{V}{m}$ ، σ رسانایی الکتریکی

بافت برحسب $\frac{S}{m}$ و ρ چگالی جرمی بافت برحسب $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$ می‌باشد. معادله دیگر که مقدار SAR را

نتیجه می‌دهد و به تغییرات دمایی بافت بستگی دارد، در زیر آورده شده است.

$$SAR = C \frac{\Delta T}{\Delta r} \quad (3-1)$$

C ضریب گرمایی ویژه بافت، ΔT میزان دما و Δr مدت‌زمان تابش است. در هر حال به‌منظور استفاده

از تکنیک‌های دمایی، بایستی توان‌های نسبتاً بالایی در مدت‌زمان خیلی کوتاه روی بافت تابیده شود، به‌طوری که بتوان از خطاهای انتقال حرارت صرف‌نظر نمود.

نرخ تغییرات دما (T) در هر نقطه از یک بافت زنده را می‌توان مطابق رابطه زیر از روی SAR محاسبه

کرد.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR + P_m - P_c - P_b}{c} \quad (۴-۱)$$

C ظرفیت گرمایی مخصوص دی الکتریک، P_m نرخ گرم شدن مربوط به سوخت و ساز بدن، P_c نرخ تلفات گرمایی در واحد حجم ناشی از هدایت گرمایی و P_b نرخ تلفات گرمایی در واحد حجم ناشی از گردش خون است.

SAR به صورت محلی یا متوسط گیری شده بیان می گردد که SAR متوسط گیری شده خود به دو صورت متوسط گیری شده در ۱ گرم بافت یا ۱۰ گرم بافت بیان می گردد.

طبق استانداردهای ایمنی جذب امواج الکترومغناطیسی که توسط کمیسیون بین المللی محافظت در برابر تشعشعات غیر یونیزه (ICNIRP) تعیین شده است، حد مجاز SAR برای ۱۰ گرم از بافت بدن ۲ وات بر کیلوگرم می باشد که کشورهایی از جمله استرالیا، ژاپن، و برزیل این مقررات را رعایت می کنند. همچنین میزان مجاز SAR که توسط کمیته ی ارتباطات فدرال آمریکا^۱ (FCC) تعیین شده، حداکثر مقدار ۱/۶ وات بر کیلوگرم برای هر گرم بافت واقعی در نظر گرفته شده است که این استاندارد توسط کشورهایی، همچون کانادا، آمریکا، بولیوی و تایوان پیروی می شود.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که برای تعیین SAR یک دستگاه، همواره شدیدترین حالت مصرف انرژی در نظر گرفته می شود. این یعنی سطح SAR هنگام استفاده ی عادی می تواند بسیار پایین تر از عدد عنوان شده باشد؛ زیرا گوشی های موبایل به گونه ای طراحی شده اند که بسته به میزان سیگنال موجود، انرژی مصرفی آنها کم و زیاد می شود تا برای اتصال به شبکه بهینه ترین میزان انرژی را مصرف کنند.

مشکل ارتباط امواج الکترومغناطیسی بین بافت های انسان و تلفن همراه طی دهه گذشته به طور جدی مورد بررسی قرار گرفته است تا اهمیت ایمنی تابش در سیستم های ارتباطی تلفن همراه، گسترش یابد.

¹ Federal Communications Commission

آزمایش‌های SAR تنها برای ۶ دقیقه استفاده از تلفن همراه انجام می‌شود، اما عملاً مطالعات نشان داده‌اند که افراد بیشتر از ساعت‌ها از تلفن‌های همراه استفاده می‌کنند.

باگذشت سال‌ها، به دلیل پیچیدگی و مقیاس زیاد درگیری در این نوع مشکلات، توجه زیادی به تجزیه و تحلیل SAR در سر انسان شده است. اخیراً، انواع تحقیقات برای کاهش اوج SAR در سر انسان، برای کاربردهای تلفن همراه اختصاص داده شده است؛ لذا محققان در پی یافتن راهی برای کاهش SAR ناشی از تلفن‌های همراه برآمدند که در این میان می‌توان به استفاده از صفحات فرّیتی، فراموادها و رساناها به صورت اتصال یک محافظ به تلفن همراه اشاره کرد. این مواد محافظ باید به گونه‌ای انتخاب شوند که ضمن حفظ کیفیت مناسب انتقال و دریافت سیگنال از تلفن همراه، امواج الکترومغناطیسی تابشی به سمت کاربر را کاهش دهند.

۱-۶- تعریف کمیّت SRF

میزان کاهش SAR را می‌توان با کمیّتی به نام SRF^1 نشان داد. هرچه مقدار کمیّت SRF بزرگ‌تر باشد بیانگر این است که با کاهش میزان SAR بیشتری روبه‌رو هستیم و آن را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد [۱۴]:

$$SRF_{1g}(\%) = \frac{SAR_{1g} - SAR_{1g,s}}{SAR_{1g}} \times 100 \quad (۵-۱)$$

$$SRF_{10g}(\%) = \frac{SAR_{10g} - SAR_{10g,s}}{SAR_{10g}} \times 100 \quad (۶-۱)$$

که در آن SRF_{1g} حداکثر میزان کاهش SAR در یک گرم بافت، SRF_{10g} حداکثر میزان کاهش SAR در ده گرم بافت، SAR_{1g} بیانگر میزان SAR یک گرم بدون محافظ اتصالی جهت کاهش SAR، SAR_{10g} میزان SAR ده گرم بدون محافظ اتصالی، $SAR_{1g,s}$ میزان SAR یک گرم با محافظ اتصالی و $SAR_{10g,s}$ میزان SAR ده گرم با محافظ اتصالی می‌باشد.

¹ SAR Reduction Factor

۱-۷- اثرات مخرب امواج الکترومغناطیسی بر انسان

۱-۷-۱- تأثیرات امواج بر روی سر

وقتی که فردی از تلفن همراه استفاده می‌کند، بیشتر اثرات گرمایشی در اطراف سطح سر او به وجود می‌آیند و باعث می‌شود که دمای سر حدود کسری از درجه افزایش پیدا کند. این دما کمتر از گرمایی است که در اثر تابش مستقیم خورشید به وجود می‌آید. در این هنگام، جریان انتقال خون مغز قادر است با بیشتر کردن جریان خون در آن قسمت گرما را به جاهای دیگر منتشر کند. این مورد می‌تواند باعث بروز مشکلاتی از جمله سرطان مغز، کاهش عمر و شماره‌ی سلول‌های جنسی، آلزایمر، سردردهای مزمن، خستگی و خون دماغ شود.

۱-۷-۲- اثرات بر روی گوش انسان

آزمایش‌ها نشان می‌دهد که گوش انسان به فرکانس‌های محدوده‌ی ۲۰۰ مگاهرتز تا ۳ گیگاهرتز پاسخ می‌دهد. انرژی فرکانس رادیویی باعث انبساط بافت‌های مغز می‌شود که ناشی از تغییرات حرارتی کوچک اما سریع بافت‌ها است. این امر باعث ایجاد امواجی می‌شود که از طریق مجسمه به گوش درونی فرستاده می‌شود، جایی که گیرنده‌های حساس صوتی در آنجا قرار دارند. اما افزایش دمایی که باعث ایجاد امواج می‌شود کمتر از ۱۰ به توان منفی ۵ درجه سانتیگراد است

۱-۷-۳- تأثیرات بر روی چشم انسان

از جمله یافته‌های علمی در مورد چشم انسان، این است که تشعشعات سطح بالا به مدت حداقل یک ساعت باعث تشکیل آب‌مروارید می‌شود. فرکانس مربوط به این تشعشعات بین ۱ تا ۱۰ گیگاهرتز است. در این محدوده انرژی بالایی توسط بدن انسان جذب می‌شود که در این وضعیت درجه حرارت داخل چشم بسیار بالا و در حدود ۴۳ درجه سانتیگراد می‌باشد.

۱-۷-۴- تأثیرات روی دستگاه قلبی عروقی انسان

قلب یکی از حساس‌ترین عضوهای بدن هنگام قرار گرفتن در معرض امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. تأثیر بر روی گیرنده‌های وابسته به شریان بدن محتمل است، لذا محققان نتیجه گرفته‌اند که تأثیرات روی فشارخون به دلیل انقباض زیاد عروق باشد همچنین اثرات ناشی از سطوح بالای فرکانسی نیز مربوط به تأثیرات حرارتی روی قلب و عروق است.

۱-۷-۵- تأثیر بر غشاءهای سلولی

بعضی از اثرات امواج فرکانس رادیویی بر پروتئین‌های غشاء و حرکت یون‌ها در میان غشاءها هنگامی در سلول ظاهر می‌شود که شدت این امواج باعث تولید حرارت قابل توجهی شود. به طوری که درجه حرارت بدن بیش از حدّ نرمال (۳۷ درجه سانتیگراد) شود. برخی شواهد نشان می‌دهد که تشعشعات فرکانس رادیویی در سطوحی که توسط تلفن همراه تولید می‌شود، بر روی کانال‌های یونی و پروتئین‌های غشاء نوروها در مغز، تحت شرایط نرمال نیز اثر می‌گذارد. این تأثیرات ممکن است باعث تغییرات ظریفی در عملکرد سلول شود، اما میزان اهمیت این تأثیرات در سلامت انسان هنوز مبهم است.

۱-۷-۶- تأثیر بر ژن‌ها

بسیاری از بیماری‌ها مرتبط به آسیب ژن‌ها و یا DNAها می‌باشد. هنگامی که یک DNA دچار تغییر شود، در اولین گام دوباره خودش را تولید می‌کند و این گام نخست سرطان است. موج‌های فرکانس پایین و امواج رادیویی با سیستم‌های ارتباطی تلفن‌های همراه تداخل کرده و موجب افزایش احتمال رشد سرطان می‌شود. حتی در بعضی شرایط آسیب به رشته‌های DNA، موجب ازدست رفتن ویژگی‌های وراثتی می‌شود. هنوز تضادهایی بین دانشمندان مختلف در رابطه با تأثیر این امواج بر ژن‌ها و فیزیولوژی سلول وجود دارد. آسیب رسیدن به DNA ممکن است باعث بیماری سرطان و کاهش قدرت باروری شده و حتی از طریق وراثت به نسل‌های بعد منتقل شود. با توجه به اینکه هر بیماری منشأ ژنتیکی دارد ممکن است، علت بسیاری از بیماری‌های روانی و افسردگی که در سال‌های اخیر بسیار فراگیر شده

است، در اثر اختلالات ایجاد شده در ژنتیک انسان، ناشی از امواج الکترومغناطیسی باشد. میدان‌های الکترومغناطیسی ضعیف باعث آزاد شدن کلسیم از پوسته سلول می‌شود، کمبود کلسیم در پوسته سلول باعث سوراخ شدن پوسته می‌شود که این حفره‌های ایجاد شده در پوسته سلول به DNA آسیب می‌رساند [۵].

۱-۷-۷- تأثیر بر ناباروری

افزایش ارتعاشات الکترومغناطیسی بر کیفیت اسپرم و تخمک مؤثر بوده و موجب ناباروری می‌شود. حدود پنج درصد از مردان از مشکل ناباروری مربوط به خود رنج می‌برند که این امر منجر به حدود ۵۰ درصد از موارد ناباروری در زوجها گردیده است. علاوه بر شمارش، تحرک اسپرم از جمله ویژگی‌هایی است که به‌شدت بر روی امکان باروری تأثیر می‌گذارد. به‌گونه‌ای که تصور می‌شود حداقل بایستی بیش از ۶۰ درصد اسپرم‌ها دارای تحرک طبیعی باشند تا امکان باروری وجود داشته باشد. گروهی از محققین آمریکایی ادعا نموده‌اند که مواجهه کوتاه‌مدت اسپرم انسان با پرتوهای ناشی از اتصال کامپیوتر با اینترنت از طریق بی‌سیم، موجب کاهش تحرک اسپرم‌ها می‌شود [۶].

۱-۷-۸- تأثیرات عصبی

در صورتی که در معرض امواج الکترومغناطیسی قرار بگیریم مرگ نورون‌ها در مغز رخ می‌دهد. یک پروتئین به نام ملاتونین^۱ وجود دارد که در مغز تولید می‌شود و از مغز در برابر بسیاری از بیماری‌ها مانند آلزایمر محافظت می‌کند. قرار گرفتن در معرض امواج با فرکانس پایین، موجب کاهش سطح تولید ملاتونین می‌شود. از این رو سیستم ایمنی در برابر این‌چنین بیماری‌ها، از بین می‌رود. در این صورت نه تنها سطح کلسیم سلول‌های مغز کاهش پیدا می‌کند، بلکه موجب کاهش بیشتر سطح اکسیژن می‌شود که ممکن است موجب ایجاد حالت کما در فرد شود. همچنین ممکن است بعضی سم‌ها در سلول‌های عصبی مغز ایجاد شود که موجب بلوکه شدن نورون‌ها و گاهی مرگ فرد شود. این امواج همچنین موجب

¹ Melatonin

ایجاد اختلال در جریان‌های الکتریکی ایجاد شده در مغز، برای کنترل کلی بدن می‌شود که می‌تواند بدن را فلج کند [۶].

۱-۷-۹- تغییر در نقش طبیعی مولکول‌های موجود در اندام‌های بدن

بروز تغییراتی در فعالیت مغز شامل کند شدن فرایند آگاهی، کندی واکنش و تغییر در اعمال قلب از جمله کند شدن ضربان قلب به این پرتوها نسبت داده شده است. از سوی دیگر، تحقیقات روی زنان بارداری که در مواجهه با این میدان‌ها قرار دارند، نشان‌دهنده افزایش سقط جنین و ناقص‌الخلقگی در کودکان آن‌ها است. برخی تغییرات زیستی ایجاد شده با پرتوهای رادیو فرکانسی می‌تواند، منجر به ایجاد سرطان در اندام‌های بدن شود. به عبارت دیگر این پرتوها خطر سرطان‌زایی دارند [۷].

۱-۷-۱۰- تأثیر بر پوست

استفاده از تلفن‌های همراه با افزایش خفیف مشکلات پوستی همراه است. قرارگرفتن در معرض تابش امواج تلفن همراه در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، برون‌ریزی سلول‌های پوستی را ایجاد می‌کند، علاوه بر این واکنش‌های پوستی در گوش و اطراف آن شایع‌ترین علائمی است که در طی یک تماس تلفنی در میان کاربران تلفن همراه، گزارش شده است [۸].

با افزایش نرخ کاربران تلفن همراه در سراسر جهان، درماتیت تماسی مرتبط با تلفن همراه در حال افزایش است. به منظور کنترل حساسیت‌های پوستی در تلفن همراه، بسیاری از تلفن‌ها دارای فلزاتی مانند نیکل می‌باشند که برای التهاب‌های پوستی کافی می‌باشد. از این رو، بیماران مبتلا به درماتیت^۱ صورت، گردن، دست‌ها، پستان‌ها، باید از نظر قرارگرفتن در معرض امواج موبایل معاینه شوند. همچنین در بیماران مبتلا به تعریق زیاد، شرایط مستعد ایجاد می‌شود و نفوذ نیکل به پوست باعث افزایش درماتیت تماسی می‌شود [۹].

¹ Dermatitis

۱-۸- ساختار کلی پایان نامه

ساختار کلی پایان نامه به این صورت است که در فصل اول به بیان مشکلات به وجود آمده برای انسان، ناشی از تابش امواج الکترومغناطیسی تحت عنوان کمیّت SAR و بررسی عواقب زیان بار آن می پردازیم.

در فصل دوم راه حل های پیشنهادی که تاکنون توسط محققان جهت کاهش میزان SAR ارائه شده است، مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم به بررسی میزان کاهش SAR تلفن همراه دارای آنتن هلیکس در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، زمانی که در مجاورت مدل سر قرار می گیرد، توسط قراردادن دو نوع SRR^1 طراحی شده ی بدون thin wire و با thin wire در نزدیکی آنتن تلفن همراه، پرداخته شده است.

فصل چهارم نیز بیانگر مقادیر کاهش SAR تلفن همراه مدرن با آنتن PIFA، توسط دو نوع SRR طراحی شده با thin wire و بدون thin wire پس از قرارگیری در مجاورت تلفن همراه و بررسی محل مناسب جهت نصب SRR در عمل می باشد.

در فصل پنجم خلاصه ی نتایج نهایی مربوط به فصول سوم و چهارم آورده شده است و سرانجام نتیجه گیری نهایی انجام می شود و پیشنهادهایی جهت کارهایی که در آینده می تواند انجام شود ارائه می شود.

¹ Split Ring Resonator

فصل دوّم

بررسی روش‌های کاهش

میزان **SAR** تلفن همراه

۲-۱- کاهش SAR با استفاده از صفحات فرّیتی

فرّیت‌ها مواد سرامیکی با فرمول شیمیایی عمومی MOFE2O3 هستند. به‌طور کلی فرّیت به آن دسته از مواد مغناطیسی اطلاق می‌شود که جزء اصلی تشکیل‌دهنده آن‌ها اکسید آهن است و دارای خاصیت فرّی مغناطیس می‌باشند (خاصیت فرّی مغناطیس نوعی از آرایش فرومغناطیس است) و پارامترهای مغناطیسی مطلوبی نظیر ضریب نفوذپذیری مغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی بالا (در حدود ۱۰۱۲ اهم) از جمله اصلی‌ترین خصیصه‌های آنها، به‌شمار می‌رود که کاربردهای بسیار وسیعی را در زمینه صنایع برق، الکترونیک، مخابرات، کامپیوتر و غیره را به خود اختصاص داده‌اند.

واقعیت این است که فرّیت‌ها مقاومت بیشتری نسبت به سایر مواد فرو مغناطیسی ایجاد می‌کنند که در هنگام استفاده، جریان القایی بسیار کمتری در مواد ایجاد می‌شود. همچنین در فرّیت‌ها هدایت الکتریکی کم می‌باشد.

در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار کاهش SAR با صفحات فرّیتی، توسط فوجی‌وارا و همکاران مطرح شد [۱۰]. یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش SAR، نصب یک‌لایه‌ی فرّیت بر روی تلفن‌همراه، بین آنتن و سر می‌باشد، این کاهش SAR باید به‌گونه‌ای باشد که بر عملکرد آنتن تأثیر مخرب کمتری داشته باشد.

سازوکار کاهش SAR به این دلیل است که از جریان‌های سطحی در قسمت جلو محفظه تلفن‌همراه، جلوگیری می‌شود. به همین دلیل محافظ ساخته شده از مواد فرومغناطیسی، برای فرونشاندن جریان‌های سطحی در قسمت جلو تلفن‌های همراه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌عبارتی دیگر ورق‌های فرّیتی، امواج الکترومغناطیسی را در قسمت جلو تلفن‌همراه جذب و تلف کرده که این باعث کاهش میزان جذب امواج الکترومغناطیسی، توسط سر انسان می‌شود. هنگامی که یک موج الکترومغناطیسی در فضای آزاد حرکت می‌کند، با رسانه‌های مختلفی روبه‌رو می‌شود که می‌تواند به‌صورت انتقال داده‌شده، بازتابیده شده و یا جذب شده باشد.

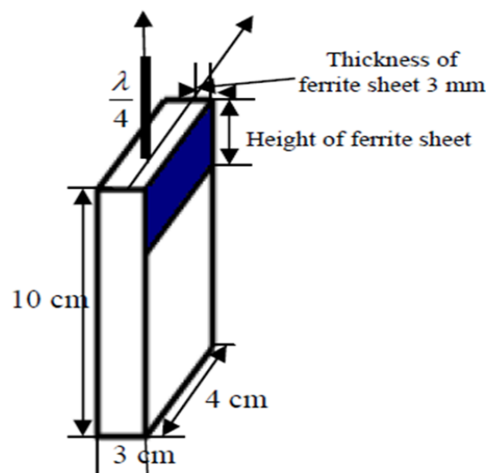
مواد جاذب انرژی امواج الکترومغناطیسی را جذب و آن را تلف می‌کنند و در پایان این انرژی به گرما

تبدیل می‌شود. [۱۰ و ۱۱].

در حالت کلی SAR بر اساس انواع مختلفی از پارامترها، مانند نوع و اندازه آنتن، موقعیت آنتن، قدرت تابش، ساختار گوشی، فاصله و زاویه از بدن انسان، منطقه جذب مواد در صورت استفاده و غیره تحت تأثیر قرار می‌گیرد که بیشتر مطالعات در این زمینه برای ارزیابی مقادیر SAR بر اساس این پارامترها، انجام شده است.

اثرات ورق فریت بر روی SAR، قدرت جذب و الگوی تابش برای اندازه و ضخامت‌های مختلف ورق فریت، در فرکانس‌های مختلف به صورت عددی تجزیه و تحلیل شده است که این نتایج یک راهنمایی برای انتخاب انواع مواد مختلف با حداکثر اثر کاهش SAR برای تلفن همراه را نشان می‌دهد [۱۲ و ۱۳]. برای بررسی کاهش SAR توسط ورق فریت، اثرات محل اتصال ورق فریت، شکل ورق فریت، اندازه‌ی ورق فریت، ضخامت ورق فریت، تغییر زاویه‌ی تلفن نسبت به سر و خواص مواد ورق فریت در نظر گرفته می‌شود.

جهت انجام شبیه‌سازی، تلفن همراه به عنوان یک جعبه‌ی هادی الکتریکی کامل، مدل شده و آنتن مونوپل استوانه‌ای که در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز کار می‌کند، در بالای این جعبه نصب شده است. جعبه رسانا نیز به عنوان بخشی از آنتن عمل می‌کند و آنتن در محل اتصال به جعبه، تغذیه می‌شود [۱۳].



شکل ۱-۲ هندسه‌ی آنتن و ورق فریتی [۱۳].

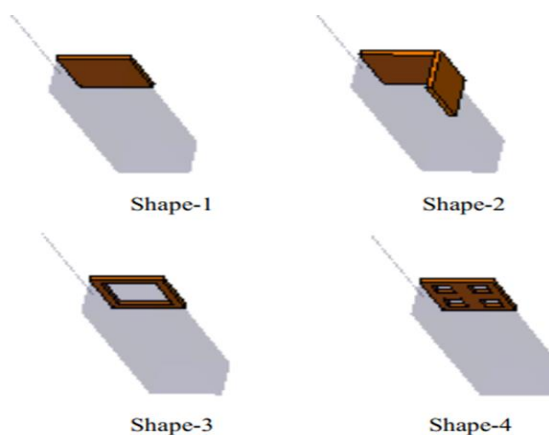
۲-۱-۱- کاهش SAR بر اساس محل اتصال ورق فریت

تنظیم ورق فریت به محلی است که حداکثر جریان سطح اتفاق می‌افتد و منجر به حداکثر اثر کاهش SAR می‌شود. برای تعیین محلی که حداکثر کاهش SAR ممکن وجود دارد، چهار محل در نظر گرفته می‌شود. محل A همان‌طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده محافظ فریتی با ضخامت ۳ میلی‌متر، عرض ۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰ میلی‌متر از ۰ تا ۳ میلی‌متر (از بالا) متصل شده است. به همین ترتیب، محل B از ۳ تا ۶ میلی‌متر، محل C از ۶ تا ۹ میلی‌متر و محل D از ۹ تا ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که محل اتصال B دارای بیشترین اثر کاهش SAR می‌باشد. این نتایج حاکی از آن است که فرونشاندن حداکثر جریان در قسمت جلو جعبه رسانا به اندازه کافی به کاهش SAR کمک می‌کند [۱۴].

۲-۱-۲- کاهش SAR بر اساس اشکال مختلف ورق فریت

اشکال مختلف ساختار ورق فریت برای کاهش SAR تجزیه و تحلیل می‌شود. به طور طبیعی با اتصال ورق فریت، مقدار SAR کاهش می‌یابد اما باید به این موضوع توجه داشت که این ورق فریت در توان تشعشعی آنتن نیز، تأثیر نامطلوب نگذارد.

در شکل ۲-۲ برای ساختار فریتی ۴ شکل مختلف در نظر گرفته شده است که برای این اشکال، عملکرد ورق فریت در نظر گرفته می‌شود. فاصله‌ی تلفن همراه تا گوش ۶ میلی‌متر، زاویه‌ی بین گوشی و سر ۳۰ درجه و ضخامت ورق فریتی ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۲ اشکال مختلف محافظ فریتی [۱۴].

در شکل اول طول ورق فریت ۴ سانتی متر می باشد که در این حالت میزان کاهش SAR برابر ۴۵ درصد است. در شکل دوم و شکل سوم با طول ۴ سانتی متر، میزان کاهش SAR به ترتیب ۳۵ و ۲۵ درصد می باشد. در شکل چهارم با طول ۴ سانتی متر، میزان کاهش SAR برابر ۶۵ درصد می باشد در نتیجه مقادیر SAR در شکل چهارم، در میان تمامی اشکال برای SAR یک گرم و برای SAR ده گرم کمترین می باشد که بیشترین مقدار SRF را موجب می شود. [۱۴].

۳-۱-۲- بررسی اندازه‌ی ورق فریت در کاهش SAR

پارامتر دیگری که برای کاهش SAR مورد بررسی قرار می گیرد، اندازه‌ی ورق فریت است. برای این کار، عرض ورق فریت ۴ سانتی متر در نظر گرفته می شود و طول آن از یک تا پنج سانتی متر در حال تغییر است. میزان کاهش SAR برای حالت های مختلف بررسی می شود که حداکثر میزان کاهش SAR در اندازه‌ی 4×4 سانتی متر مربع، رخ می دهد [۱۱].

۴-۱-۲- کاهش SAR بر اساس افزایش ضخامت

با افزایش ضخامت ورق فریت می توان امواج بیشتری از تلفن همراه را جذب و تلف کرد. اما این افزایش ضخامت، تا حدی می تواند باعث کاهش SAR شود. با افزایش ضخامت ورق فریت از سه میلی متر به پنج میلی متر، بیشترین میزان کاهش SAR را داریم، اما به ازای افزایش ضخامت های بیشتر از پنج میلی متر میزان SAR کمی افزایش می یابد.

۵-۱-۲- کاهش SAR بر اساس نوع ورق فریت

ماده فریت دارای امپدانس سطح الکترومغناطیسی بالایی است که قادر به سرکوب جریان های سطحی می باشد و به عنوان رسانای الکترومغناطیسی کامل، در محدوده فرکانسی خاصی، عمل می کند. همچنین ماده فریت می تواند امواج سطحی را که موج EM نسبت به سر انسان ایجاد می کنند. کاهش دهد. در نتیجه مواد محافظی که دارای تلفات الکتریکی و مغناطیسی بالایی هستند، در شبیه سازی ها استفاده

می‌شود. هر چه ضریب نفوذپذیری افزایش یابد، تانژانت تلفات نیز افزایش می‌یابد که این کاهش میزان SAR بیشتر را به دنبال خواهد داشت. در نتیجه برای به‌دست‌آوردن حداکثر کاهش SAR، باید از یک محافظ فریت با تانژانت تلفات بزرگ استفاده شود که در این میان، فریت منگنز و فریت‌روی جزء فریت‌هایی هستند که دارای بالاترین ضریب نفوذپذیری می‌باشند [۱۱].

۲-۱-۶- تغییرات الگوی تابش پس از نصب محافظ فریتی

اتصال محافظ فریتی به تلفن‌همراه علاوه بر اینکه میزان SAR را کاهش می‌دهد، می‌تواند بر الگوی تابشی آنتن تلفن‌همراه، تأثیر مخربی نیز داشته باشد. از نتایج مشخص می‌شود که استفاده از محافظ فریتی تأثیر مخرب کمی، بر الگوی تابشی آنتن دارد. از این‌رو ماده فریت می‌تواند به‌عنوان یکی از روش‌های کاهش SAR مورد استفاده قرار گیرد [۱۳ و ۱۴].

۲-۲- کاهش SAR با استفاده از مواد رسانا

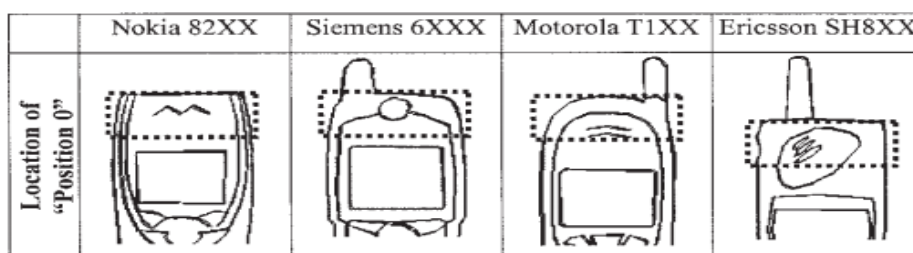
استفاده از ماده رسانا برای کاهش SAR، به طور تجربی در [۱۵] مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مقاله یک مطالعه تجربی در مورد اثربخشی کاهش SAR، با اتصال مواد رسانا به تلفن‌های همراه و اثرات مربوط به عملکرد آنتن تلفن‌های همراه ارائه شده است.

یکی از مواد رسانای پر کاربرد و قابل استفاده در زمینه‌های مختلف از جمله کاهش SAR، آلومینیوم است. لذا در این مقاله از یک ماده رسانا، از جنس آلومینیوم که به راحتی قابل دستیابی، کم‌هزینه و دارای هدایت زیاد است، به‌عنوان ماده محافظ جهت کاهش SAR استفاده شده است. چهار تلفن‌همراه از تولیدکنندگان مختلف، برای این مطالعه انتخاب شده است. آنتن همه مدل‌های تلفن‌همراه انتخاب شده، به جز مدل نوکیا XX82 از نوع خارجی هستند.

اندازه‌ی ماده‌ی محافظ اتصالی 2×5 سانتی‌متر است. توان انتقال جهت اندازه‌گیری مقادیر SAR روی 2 W که حداکثر توان برای باند فرکانسی GSM 900 است و بدترین حالت در آنالیز SAR را نشان

می‌دهد، تنظیم شده است. سه فرکانس انتقال مختلف (۸۹۰، ۹۰۲ و ۹۱۵ مگاهرتز) که به ترتیب کانال‌های انتقال فرکانسی پایین، میانی و فوقانی باند انتقال تلفن همراه در GSM 900 هستند، بررسی می‌شوند.

اثر کاهش SAR، برای مواد محافظ در موقعیت‌های مختلف اتصالی و اثر ماده محافظ بر روی الگوی تابش آنتن بررسی شد. ماده محافظ برای اولین بار به مرکز هدفون تلفن همراه منتخب، متصل شده است که موقعیت آن به عنوان موقعیت صفر نام‌گذاری می‌شود. موقعیت ۱ و ۲ به موقعیت مواد محافظ در حال جابه‌جایی، به ترتیب یک و دو سانتی‌متر به سمت بالا، نسبت به موقعیت صفر اشاره دارد. همچنین موقعیت ۱- و ۲- به موقعیت مواد محافظ در حال جابه‌جایی، به ترتیب یک و دو سانتی‌متر به سمت پایین، نسبت به موقعیت صفر اشاره دارد. شکل ۲-۳ مکان‌های مربوط به موقعیت صفر را برای ۴ تلفن همراه انتخاب شده، نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ موقعیت صفر برای تلفن‌های همراه مختلف [۱۵].

نتایج حداکثر اثر کاهش SAR را برای تلفن همراه Siemens 6XXX، به میزان ۶۳ درصد نشان می‌دهد، درحالی‌که حدود ۲۰ درصد کاهش SAR برای مدل‌های دیگر مشاهده شد. همچنین برخلاف انتظار در موارد خاص، مقدار SAR با مواد محافظ متصل شده، در برخی از موقعیت‌ها افزایش می‌یابد. این مطالعه همچنین نشان داده است که برای تلفن‌های همراه با ماده محافظ اتصالی، پهنای بیم الگوی تابش آنتن فقط چند درجه تغییر کرده و مقدار توان دریافتی کمتر از 2 dB کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که موقعیت اتصال ماده‌ی محافظ، یک عامل مهم برای دستیابی

میزان کاهش SAR بالا است که به موجب آن باید نقطه داغ توزیع SAR تلفن همراه به خوبی پوشانده شود، تا به خوبی میزان SAR را کاهش دهد. در حالی که موقعیت اتصال نامناسب، منجر به افزایش مقادیر SAR تلفن‌های همراه می‌شود.

در یک مطالعه دیگر در سال ۲۰۱۱ آقای حنفی و همکاران، به بررسی کاهش SAR تلفن همراه دارای آنتن هلیکس، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز پرداختند [۱۶]. توان خروجی آنتن هلیکس جهت محاسبه SAR برابر 0.5 W و پارامتر S_{11} در باند فرکانسی موردنظر، کمتر از 10 dB- می‌باشد. ورق آلومینیوم با ابعاد 40×20 میلی‌متر به تلفن همراه متصل شده است. نتایج اثربخشی کاهش SAR برای مواد محافظ رسانا، در موقعیت‌های مختلف اتصالی، ضخامت و ارتفاع‌های مختلف و همچنین تأثیر مواد محافظ بر الگوی تابش آنتن، بررسی شده است.

ورق آلومینیوم ابتدا در موقعیتی قرار دارد که در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است. آن موقعیت را موقعیت صفر می‌نامند. موقعیت‌های ۱ و ۲ به ترتیب به موقعیت‌های ورق آلومینیوم در حال جابه‌جایی، به میزان ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر به سمت بالا، نسبت به موقعیت صفر اشاره دارد در حالی که موقعیت ۱- و ۲- به موقعیت‌های ورق آلومینیوم در حال انتقال به ترتیب ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر به سمت پایین، نسبت به موقعیت اولیه اشاره دارد.

پس از انجام شبیه‌سازی‌ها توسط نرم‌افزار CST¹، حداکثر کاهش SAR حدود ۲۶/۴ درصد از موقعیت دوم به دست می‌آید. در حالی که حداکثر میزان کاهش SAR در موقعیت اولیه، ۲/۳ درصد می‌باشد.



شکل ۲-۴ موقعیت اولیه قرارگیری ورق آلومینیوم [۱۶].

¹ computer simulation technology

ضخامت ورق آلومینیوم بین ۱ تا ۳ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین ارتفاع ورق آلومینیوم از ۲۰ تا ۷۰ میلی‌متر، متغیر است. نتایج گویای این واقعیت است که افزایش ضخامت و ارتفاع ورق آلومینیوم، مقادیر SAR را کاهش می‌دهد. همچنین تأثیر ناچیزی بر روی الگوی تابش آنتن دارد [۱۶]. در [۱۷] یک پوشش تلفن همراه با یک ورق اضافی برای کاهش حداکثر SAR در سر انسان، پیشنهاد شده است. آنتن مورد استفاده جهت شبیه‌سازی، یک آنتن PIFA دو بانده برای کار در باند فرکانسی GSM 900 و ۱۹۰۰ مگاهرتز، به عنوان یک آنتن داخلی گوشی می‌باشد. میزان جذب خاص در سر انسان و کل توان جذب شده توسط کاربر تلفن همراه به همراه عملکرد آنتن محاسبه می‌شود.

در مرحله اولیّه تحقیق، مقادیر SAR و توان جذب شده به همراه عملکرد آنتن پیشنهادی بدون استفاده از ورق‌های اضافی اتصالی به پوشش بیرونی تلفن همراه، تعیین می‌شود. سپس با اتصال ورق‌های تک‌لایه آلومینیوم، سیلیکون و رسانای الکتریکی کامل^۱ (PEC) به پوشش بیرونی تلفن همراه، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نتایج تحقیقات مربوط به پوشش تلفن همراه با ورق‌های اضافی، به دو دسته‌ی پیکربندی ورق اضافی تک‌لایه و پیکربندی ورق اضافی دولایه طبقه‌بندی شده است.

برای ورق تک‌لایه سیلیکون، نتایج نشان می‌دهد که پوشش موبایل با ضخامت ۱ میلی‌متر ورق اضافی سیلیکون، ۲۲/۵ درصد کاهش SAR در ۹۰۰ مگاهرتز و ۳۵ درصد کاهش SAR در ۱۹۰۰ مگاهرتز را در مقایسه با حالت پوشش بدون اتصال ورق سیلیکون، فراهم می‌کند. به همین ترتیب، ورق آلومینیوم با ضخامت ۱ میلی‌متر منجر به کاهش ۳۵/۹ درصد SAR در باند فرکانس پایین (۹۰۰ مگاهرتز) و ۱۸/۱ درصد در باند فرکانس فوقانی (۱۹۰۰ مگاهرتز) می‌شود. همچنین ورق PEC با ضخامت ۱ میلی‌متر ۳۹/۵ درصد کاهش SAR در ۹۰۰ و ۱۷/۳ درصد در ۱۹۰۰ مگاهرتز را به همراه دارد.

ورق سیلیکون اضافی با ضخامت ۲ میلی‌متر، ۲۴/۱ درصد کاهش SAR در ۹۰۰ مگاهرتز و ۳۶/۵

¹Perfect Electric Conductor

درصد در ۱۹۰۰ مگاهرتز به همراه دارد. بنابراین؛ ورق سیلیکون با ضخامت ۲ میلی‌متر در مقایسه با ورق سیلیکون با ضخامت ۱ میلی‌متر به ترتیب $1/6$ و $1/3$ درصد کاهش بیشتر مقادیر SAR را در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به همراه دارد.

از نتایج شبیه‌سازی‌شده‌ی ورق تک‌لایه اضافی مشخص می‌شود که پوشش تلفن‌همراه با ورق اضافی سیلیکون و آلومینیوم در باند فرکانسی ۹۰۰ مگاهرتز و ورق PEC در باند فرکانسی ۱۹۰۰ مگاهرتز SAR را به طور قابل‌توجهی کاهش می‌دهد. در نتیجه پوشش تلفن‌همراه با ورق اضافی دولایه‌ی سیلیکون و PEC می‌تواند مقادیر SAR را برای هر دو باند فرکانسی تحت تأثیر قرار دهد.

مشخص شده است که مقادیر SAR در مدل سر به دلیل طراحی پوشش بیرونی تلفن‌همراه با ورق اضافی دولایه سیلیکون و PEC پیشنهادی، به طور قابل‌توجهی برای هر دو باند فرکانس پایین و بالا کاهش می‌یابد. در نهایت پوشش جدید تلفن‌همراه با ابعاد 42×102 میلی‌متر، $48/2$ درصد کاهش SAR در ۹۰۰ مگاهرتز و $44/8$ درصد کاهش SAR در ۱۹۰۰ مگاهرتز ایجاد می‌کند. علاوه بر این، پوشش پیشنهادی بازده تابش را به ترتیب ۶ و ۷ درصد در مقایسه با پیکربندی بدون پوشش جدید، در باند فرکانسی ۹۰۰ و ۱۹۰۰ مگاهرتز بهبود می‌بخشد [۱۷].

۲-۳- کاهش SAR به وسیله‌ی ساختار EBG

ساختار EBG^1 متشکل از یک پچ تشعشعی، زیرلایه، زمین و وایا^۲ می‌باشد. این ساختارها دارای امپدانس سطح الکترومغناطیسی بالایی هستند که قادر به سرکوب انتشار جریان‌های سطحی می‌باشند و می‌توانند به‌عنوان هادی مغناطیسی کامل، در یک محدوده فرکانسی خاص عمل کنند. علاوه بر این می‌توانند الگوی تابش آنتن را کنترل کنند.

ساختار EBG در فرکانس‌های پایین دارای امپدانس القایی است و از امواج سطحی TM پشتیبانی می‌کند. در فرکانس‌های بالا خازنی می‌شود و از امواج سطح TE پشتیبانی می‌شود. نزدیک فرکانس

¹ electromagnetic bandgap

² via

رزونانس امپدانس بالایی به دست می‌آید و EBG هیچ موجی را از سطح خود عبور نمی‌دهد، در نتیجه یک شکاف در باند فرکانس ایجاد می‌کند. امپدانس سطح بالا همچنین تضمین می‌کند که موج سطحی منعکس شده، نباید دارای فاز معکوس باشد. این مورد در یک PEC رخ می‌دهد. از خاصیت امپدانس سطحی بالای ساختار EBG می‌توان برای کاهش تابش به سمت کاربر، در فرکانس رزونانس تلفن همراه استفاده کرد که این کاهش تابش به سمت بدن انسان باعث افزایش تابش در خلاف جهت موقعیت بدن انسان می‌شود. بنابراین؛ SAR جذب شده در بافت‌های بدن انسان کاهش می‌یابد [۱۸].

در نتیجه اگر ساختار EBG بر روی صفحه اصلی تلفن همراه اعمال شود، امواج الکترومغناطیسی که از آنتن تلفن همراه منتشر می‌شود، سرکوب شده و می‌تواند بدون این که بر روی بازده آنتن اثر بگذارد، مانع بروز ناخواسته‌ی امواج الکترومغناطیسی شود. از جمله ویژگی‌های این ساختار نسبت به ساختارهای دیگر هزینه‌ی کم و اجرای آسان می‌باشد. همچنین معایب این ساختار پیچیده بودن و پهنای باند فرکانسی محدود آن است [۱۹].

در [۱۸] یک آنتن مونوپل تلفن همراه با ساختار خطوط پیچشی طراحی شده است. به‌طوری‌که صفحه‌ی زمین آنتن هم سطح با عناصر تابشی انتخاب می‌شود. بنابراین؛ هیچ صفحه زمینی در سمت پایین زیرلایه وجود ندارد. همچنین یک ساختار (EBG) در پشت ساختار آنتن، طراحی و اجرا شد. ابعاد آنتن مونوپل 6×18 میلی‌متر است و روی زیرلایه‌ی FR4 با ضخامت 0.8 میلی‌متر ساخته شده است. ساختار EBG نیز به شکل مارپیچ در زیر زیرلایه ساخته می‌شود.

آنتن پیشنهادی با ساختار EBG از استانداردهای ISM، WLAN، بلوتوث و Wi-MAX پشتیبانی می‌کند. همچنین دارای ویژگی‌های خاصی از جمله اندازه جمع‌وجور، عملکرد چند بانده به‌ویژه باندهای فرکانسی پایین و SAR کم می‌باشد.

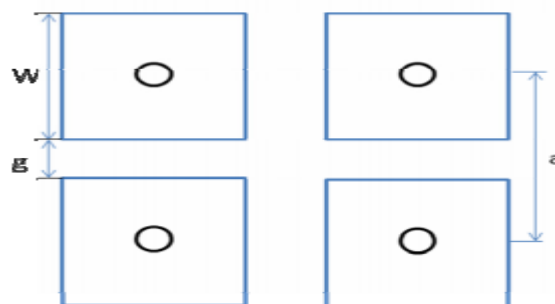
از الگوی تابشی مشخص است که لوب پشتی تقریباً حذف شده است. این بدان معنی است که تابش کمتری توسط سر انسان جذب می‌شود و در نتیجه می‌توان مقادیر SAR را کاهش داد. مقادیر SAR برای فرکانس عملیاتی $1/0.18$ گیگاهرتز برابر 0.8 W/Kg است که این مقدار SAR بسیار کمتر از

استاندارد تعیین شده است [۱۸].

در [۱۹] یک ساختار EBG که در باند فرکانس GSM کار می‌کند، پیشنهاد می‌شود. فرکانس مرکزی ساختار معرفی شده در حدود ۱۸۰۰ مگاهرتز است. این ساختار برای کاهش SAR تلفن همراه که در فرکانس ۱۸۰۰ کار می‌کند، استفاده می‌شود. آنتن مورد استفاده نیز از نوع آنتن PIFA می‌باشد. برای بررسی عملکرد ساختار، میزان SAR ابتدا بدون اتصال EBG محاسبه می‌شود. در مرحله‌ی بعد EBG طراحی شده، به تلفن همراه متصل شده و میزان SAR محاسبه می‌گردد.

ابعاد EBG مورد استفاده 9×9 میلی‌متر و بر روی زیرلایه Taconic CER-10 ساخته شده است. شعاع وایا و فاصله‌ی بین دو پیچ 0.5 میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. برخورد امواج الکترومغناطیسی به سطح EBG جریان‌هایی را در پیچ فلزی القا می‌کند. علاوه بر این بارهای الکتریکی در اطراف لبه‌ی پیچ جمع می‌شوند، سپس پتانسیل پیچ‌های مجاور ظاهر می‌شود که می‌تواند معادل یک ساختار خازنی باشد. پیچ و وایا نیز یک میدان مغناطیسی تولید می‌کنند که معادل اندوکتانس ساختار است.

در نهایت با اعمال ساختار آرایه‌ی EBG با ابعاد 27×63 میلی‌متر، حداکثر مقادیر SAR از ۰.۵۵ W/Kg به ۰.۴۵ W/Kg تغییر می‌یابد که این ۱۸/۳ درصد کاهش مقادیر SAR را نشان می‌دهد. بنابراین؛ ساختار EBG ارائه شده در این مقاله، روشی مؤثر برای کاهش حداکثر میزان SAR در ضمن حفظ توان کل تابشی آنتن^۱ (TRP) است.



شکل ۵-۲ ساختار EBG [۱۹].

¹ Total radiated power

در سال ۲۰۱۱ آقای سانگ و همکاران جهت کاهش SAR، یک آنتن PIFA چندلایه با ساختار EBG پیشنهاد کردند [۲۰]. برای بهینه‌سازی ساختار چندلایه آنتن PIFA جهت کاهش SAR، ابتدا ساختار EBG بین صفحه مدارچاپی و زیرلایه‌ی آنتن طراحی شده است. در این مقاله ساختار چندلایه از یک PCB ساده، ساختار EBG و آنتن تشکیل شده است.

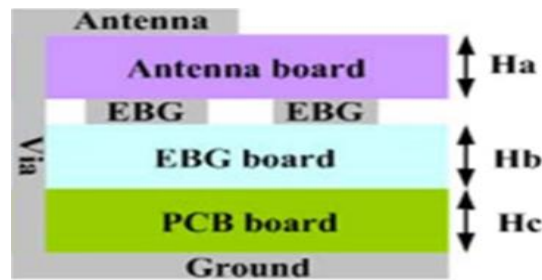
از آنجاکه ساختار EBG به‌عنوان هادی‌الکتریکی کامل^۱ (PMC) عمل کرده و عملکرد آنتن را تقویت می‌کند، اگر ساختار EBG در صفحه‌ی زمین تلفن‌همراه اعمال شود، می‌توان از امواج نامطلوب EM جلوگیری کرد.

یک مطالعه پارامتری در مورد تعداد سلول‌های EBG، ارتفاع و محل آنتن PIFA با ساختار EBG، انجام می‌شود. به دلیل این که فضای یک تلفن‌همراه محدود است، سلول‌های EBG در ناحیه کوچک زیرلایه دی‌الکتریک طراحی می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. محل ساختار EBG بین PCB و آنتن PIFA می‌باشد.

اندازه‌ی سلول واحد $3 \times 16/7$ میلی‌متر و اندازه‌ی شکاف $0/5$ میلی‌متر است. همچنین آنتن PIFA با EBG در باند PCS (۱.۸۵ تا ۱.۹۱ گیگاهرتز) طراحی شده است و حداکثر توان تلفن‌همراه 25 dB می‌باشد. برای بررسی عملکرد آنتن PIFA با EBG، یک آنتن PIFA معمولی برای باند PCS طراحی شده است. PIFA معمولی طراحی شده دارای همان زیرلایه‌ها به جز سلول‌های EBG که برداشته می‌شود، است. همان‌طور که در شکل ۲-۶ ارائه شده است.

فاصله بین فانتوم سر و تلفن‌همراه ۳ میلی‌متر است و آنتن پیشنهادی در نزدیکی گوش سمت راست مدل سر قرار دارد. پس از انجام شبیه‌سازی‌های مربوط، با استفاده از نرم‌افزار CST برای آنتن PIFA با EBG و آنتن PIFA معمولی، نتایج حاکی از آن است که با استفاده از ساختار EBG در طراحی آنتن، بهره را می‌توان افزایش داد. همچنین مقادیر SAR آنتن PIFA پیشنهادی با استفاده از ساختار EBG در مقایسه با آنتن PIFA معمولی، به میزان ۳۱ درصد کاهش می‌یابد [۲۰].

¹ perfect magnetic conductor



شکل ۲-۶ محل قرارگیری ساختار EBG [۲۰].

در [۲۱] یک آنتن دایپل در بالای یک زیرلایه‌ی EBG و یک آنتن دایپل در بالای زیرلایه‌ی PEC جهت بررسی کاهش میزان SAR، در مدل سر مکعبی در باند ۳/۵ گیگاهرتز استفاده شده است. ساختار پیشنهادی دارای ۲۴ پچ EBG است. فاصله بین دایپل و زیرلایه در ۱/۵ میلی‌متری تنظیم شده است. بنابراین؛ ارتفاع کلی آنتن دایپل از صفحه زمین ۴/۵ میلی‌متر است. دو ساختار از نظر ارتفاع کلی یکسان هستند و توان آنتن دایپل جهت محاسبه مقادیر SAR در 1 W تنظیم شده است. حداکثر مقدار SAR برای آنتن با زیرلایه PEC، برابر با 5.15 w/kg می‌باشد. درحالی‌که برای آنتن با زیرلایه‌ی EBG به 0.84 W/Kg کاهش می‌یابد. در نتیجه حداکثر میزان کاهش SAR برای آنتن با زیرلایه‌ی EBG، در مقایسه با آنتن با زیرلایه PEC، برابر ۸۴ درصد می‌باشد که دلیل اصلی آن سرکوب امواج سطحی توسط ساختار EBG می‌باشد. همچنین راندمان تابش برای آنتن با زیرلایه EBG در مقایسه با آنتن با زیرلایه PEC، از ۸۲ به ۹۱ درصد بهبود یافته است. همچنین مقادیر SAR در موقعیت‌های مختلف برای آنتن با زیرلایه EBG بررسی شد که به میزان ۱۴ تا ۳۶ درصد کاهش می‌یابد [۲۱].

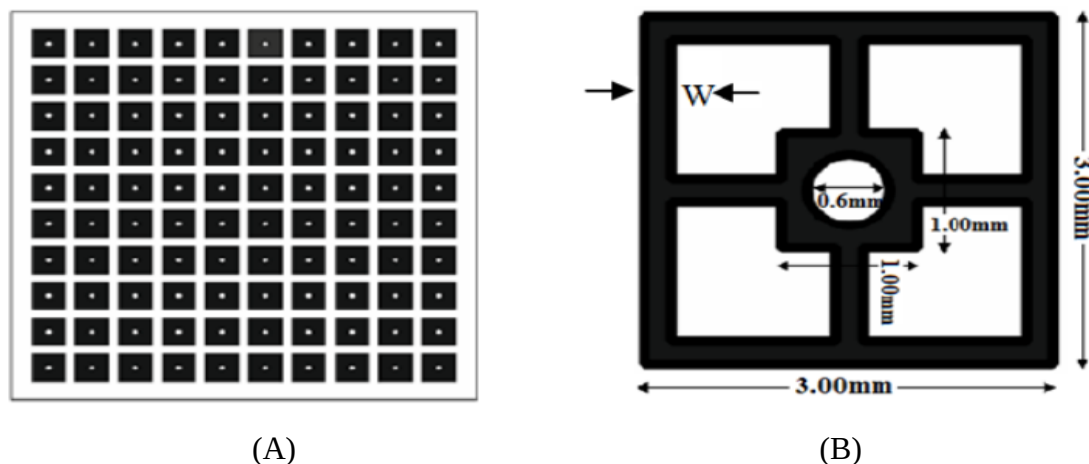
در مطالعه‌ای دو ساختار EBG با شکل‌های متفاوت و پهنای باند وسیع، جهت کاهش مقادیر SAR بررسی شد [۲۲].

ساختار اول از نوع قارچی شکل معمولی است که از یک پچ مربعی و وایاهای استوانه‌ای شکل ساخته شده است. ساختار EBG دوم از نوع CROSS HAIR است که با اصلاح EBG نوع قارچی شکل معمولی ساخته می‌شود و شامل چند خط میکرواستریپ و یک پچ است. این خطوط میکرواستریپ اندوکتانس بیشتری را ایجاد می‌کنند، به این صورت که با افزایش عرض خطوط میکرواستریپ استفاده شده، مقدار

اندوکتانس افزایش می‌یابد و فرکانس رزونانس به سمت مقادیر بالاتر تغییر می‌کند. چنین زمانی که فاصله بین عناصر کاهش می‌یابد، مقادیر خازنی افزایش یافته و فرکانس رزونانس به سمت فرکانس‌های پایین‌تر تغییر می‌کند.

زیرلایه‌ی استفاده شده برای EBG ها از نوع FR4 با $\epsilon_r = 4.4$ و EBG ها دارای ابعاد 3×3 میلی‌متر می‌باشند. EBG های استفاده شده در این مطالعه در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. این ساختارها بر روی یک آنتن T شکل به منظور کاهش SAR قرار می‌گیرد.

مقادیر SAR برای EBG قارچی شکل 0.93 W/Kg می‌باشد، درحالی‌که مقدار SAR برای EBG از نوع CROSS HAIR برابر 0.05 W/Kg می‌باشد که مقادیر SAR کمتری را دارد [۲۲].



شکل ۷-۲ (A) ساختار EBG قارچی شکل و (B) ساختار EBG از نوع CROSS HAIR [۲۲].

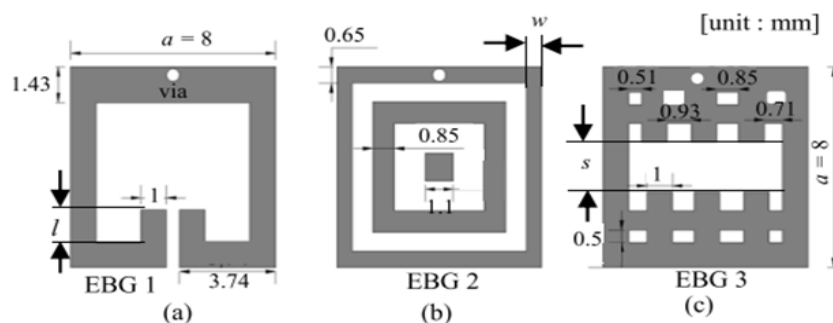
در [۲۳] یک ساختار EBG مسطح برای کاهش SAR جهت کاربردهای تبلت، طراحی شده است. ساختار موردنظر از طریق HFSS شبیه‌سازی می‌شود. فاصله بین آنتن و ساختار EBG بسیار مهم است و بر عملکرد آنتن بسیار تأثیر می‌گذارد. نتایج ثابت می‌کند که EBG مسطح پیشنهادی در کاهش SAR تبلت، تحت فرکانس‌های عملکرد WLAN (2400MHz-2483.5MHz) مفید است. همچنین آنتن می‌تواند به طور معمول در باند فرکانسی WLAN، در شرایط با و بدون EBG پیشنهادی در تبلت کار کند.

در [۲۴] یک محافظ تلفن همراه شامل مواد (EBG)، برای جدا کردن امواج الکترومغناطیسی (EM) از تلفن همراه و کاهش میزان SAR مورد مطالعه قرار گرفته است. یک آنتن حلقه‌ای برای ارتباطات شخصی، در باند فرکانسی ۱۹۰۰ مگاهرتز در نظر گرفته شده است. از سه محافظ مختلف تلفن همراه که ساختارهای EBG را با موقعیت‌های بهینه شده مرتبط می‌کند، برای بهبود کاهش SAR استفاده می‌شود. علاوه بر این، عملکرد آنتن با ساختار EBG با یک برنامه شبیه‌سازی EM برای تمام بدن، بررسی شده و تجزیه و تحلیل عملکرد فردی هر ساختار EBG، با استفاده از Ansoft HFSS انجام می‌شود. تلفن‌های هوشمند مدرن حاوی چندین آنتن از جمله 3G، 4G و Wi-Fi و بلوتوث هستند و اگر در داخل مدارهای تلفن‌های هوشمند قرار بگیرند، این آنتن‌ها می‌توانند در ساختار EBG تداخل ایجاد کنند. از آنجاکه امروزه اکثریت قریب به اتفاق مردم از کیف تلفن همراه برای محافظت یا تزئین تلفن‌های هوشمند با ارزش خود استفاده می‌کنند، در این مقاله، یک کیف تلفن با ساختار EBG، برای کاهش SAR پیشنهاد شده است. برای این منظور، سه ساختار EBG با وایاهای قرار داده شده در لبه، پیشنهاد و مورد بحث قرار گرفتند که انتقال وایا از مرکز به لبه باعث کاهش فرکانس رزونانس حدود ۲۰ درصد می‌شود و از بزرگ‌تر شدن پیچ در فرکانس‌های پایین‌تر، جلوگیری می‌کند. آنتن‌های تلفن‌های هوشمند کنونی معمولاً، از باند فرکانسی ۸۵۰، ۹۰۰، ۱۸۰۰، ۱۹۰۰ و ۲۶۰۰ مگاهرتز برای انتقال و دریافت داده استفاده می‌کنند. باندهای فرکانس پایین (مانند ۸۰۰ مگاهرتز) می‌توانند به راحتی در فواصل طولانی حرکت کنند، اما ظرفیت داده‌های باند فرکانس بالاتر را فراهم نمی‌کنند. باندهای ۱۸۰۰ یا ۱۹۰۰ مگاهرتز تعادل بین پوشش و ظرفیت را ایجاد می‌کنند که این ویژگی آنها را به یک باند فرکانسی مناسب، برای دستیابی به 4G در سراسر کشور تبدیل می‌کند. بنابراین؛ سرویس ارتباطات شخصی باند ۱۹۰۰ مگاهرتز برای این مقاله در نظر گرفته شده است. حق ثبت اختراع آنتن پیشنهادی در این مقاله توسط اپل پیشنهاد شده و در نسخه‌های آیفون ۴ و نسخه‌های بعد اجرا شده است.

خاصیت باند توقف هر EBG به ثابت دی‌الکتریک، ضخامت زیرلایه و هندسه ساختار بستگی دارد. یک ماده از جنس RT / duroid 6010.2 با $\epsilon_r = 10.2$ و تانژانت تلفات ۰/۰۲ با ضخامت ۰/۶۲۵ به عنوان

زیرلایه، برای طراحی EBG استفاده شده است. ضخامت زیرلایه باید کم باشد تا بتوان به راحتی آن را در محافظ تلفن همراه قرار داد. از طرفی دیگر ضخامت، اندوکتانس EBG را کنترل می کند. مواد EBG به دلیل ویژگی های بازتاب درون فاز (صفر درجه) در یک باند خاص فرکانسی، امکان ایجاد PMC را فراهم می کنند که این ویژگی ها حداکثر راندمان تابش را برای آنتن هایی که نزدیک EBG قرار گرفتند، فراهم می کند. مواد PMC که در طبیعت وجود ندارند، دارای یک فاز بازتاب صفر درجه هستند. پهنای باند کاری PMC به دلیل نازک بودن زیرلایه سلول واحد، بسیار باریک است و این پهنای باند باریک تضمین می کند که ساختارهای EBG با دیگر سیگنال های فرکانسی مانند بلوتوث یا Wifi تداخل نخواهند داشت.

سه نوع EBG مختلف برای انعکاس درون فازی و سرکوب موج EM پیشنهاد شده است که در شکل ۸-۲ نشان داده شده است. EBG اول شامل دو بازوی L مانند در پیچ می باشد و EBG دوم از یک حلقه ی مستطیلی متحدالمرکز ساخته شده است. EBG سوم نیز شامل شکاف های زیادی در پیچ است و می توان طول یا عرض این شکاف ها را تنظیم کرد، تا با فرکانس رزونانس مطابقت داشته باشد. پس از انجام شبیه سازی ها مشخص می شود که EBG اول دارای کم ترین بهره و EBG سوم دارای بیشترین بهره می باشد. در حالت کلی عملکرد EBG سوم نسبت به سایر EBG ها بهتر می باشد.



شکل ۸-۲ ساختارهای EBG پیشنهادی [۲۴].



شکل ۲-۹ محافظ‌های مختلف تلفن همراه با EBG [۲۴].

جهت بررسی تغییرات SAR، سه محافظ تلفن از جنس‌های ABS^1 با $\epsilon_r = 2.6$ که مشابه ثابت دی‌الکتریک پلاستیک است، پلی‌یورتان^۲ با $\epsilon_r = 6$ و سیلیکون^۳ با $\epsilon_r = 11.2$ انتخاب شده است. محافظ‌های نام‌برده شده در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. نکته‌ی قابل توجه در این جا این است که محافظ‌های تلفن همراه مبتنی بر ثابت دی‌الکتریک بالا، بر نتایج کاهش SAR تأثیر مثبت می‌گذارند. امپدانس سطح EBG سوم از دو EBG دیگر بالاتر است که این امپدانس بالاتر باعث می‌شود مهار موج سطحی بیشتری در EBG سوم (نوع شبکه‌ای)، نسبت به EBG اول و دوم رخ دهد و در نتیجه میزان کاهش SAR بیشتری رخ می‌دهد و بهره افزایش می‌یابد. در نهایت ثابت می‌شود که با استفاده از ساختار EBG نوع شبکه‌ای در محافظ سیلیکونی می‌توان مقادیر SAR یک گرم را به میزان ۲۴ درصد و بهره را ۱۹ درصد افزایش داد [۲۴].

۲-۴- کاهش SAR با استفاده از ساختارهای AMC

هادی‌های مغناطیسی مصنوعی AMC^4 به عنوان سطوح با امپدانس بالا شناخته می‌شوند که در فرکانس رزونانس می‌توانند موج برخوردی را به صورت کامل و با فاز بازتاب صفر درجه منعکس کنند، تا از انتشار انرژی الکترومغناطیسی به سمت کاربر جلوگیری شود. به همین منظور برای پایین آمدن مقادیر

¹ acrylonitrile butadiene styrene

² polyurethane

³ silicone

⁴ Artificial Magnetic Conductors

SAR در آنتن‌ها توسعه یافته‌اند.

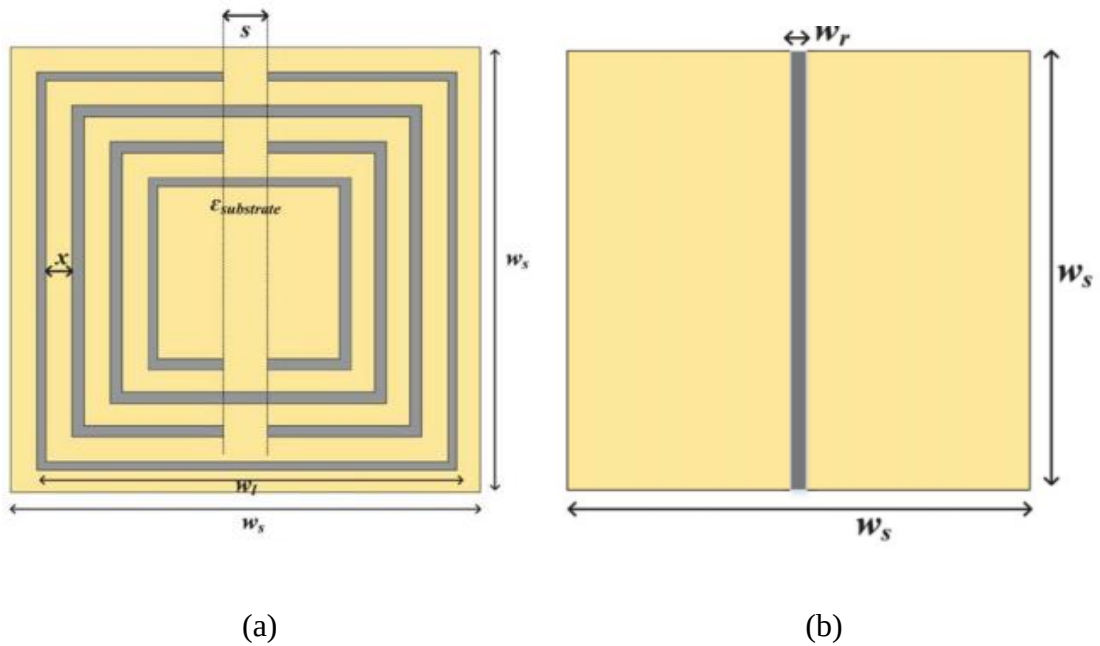
در [۲۵] از ساختار AMC به عنوان صفحه زمین برای به حداقل رساندن مقادیر SAR و عدم تطبیق امپدانس، ناشی از قرارگیری آنتن بر روی بدن برای کاربردهای بدن محور استفاده شده است. هدف از ساختار کاهش تابش به سمت بدن انسان است.

از مزایای صفحه زمینی AMC این است که ویژگی‌های آنتن را حفظ می‌کند و بر عملکرد آن تأثیر نمی‌گذارد. در نهایت با استفاده از ساختار AMC می‌توان تابش امواج الکترومغناطیسی به سمت بدن انسان را کاهش داد. میزان کوچک‌سازی آنتن با زمین AMC حدود $10/2$ درصد و افزایش پهنای باند 90 درصد، نسبت به آنتن مایکرواستریپ ساده به دست می‌آید. نتایج گویای این حقیقت است که حداکثر میزان کاهش سار آنتن مایکرواستریپ با زمین AMC نسبت به آنتن با زمین PEC برابر 91 درصد می‌باشد [۲۵].

در مقاله‌ای یک طرح AMC ارائه می‌شود، تا بتواند برای کاهش میزان SAR برای بخشی از طیف الکترومغناطیسی استفاده شود [۲۶].

طرح پیشنهادی که در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است، دارای پهنای باند $0/4609$ گیگاهرتز است و با استفاده از سه بافت مختلف بدن متشکل از مدل فانتوم مسطح، استوانه‌ای و مدل فانتوم سر استخراج شده از نرم‌افزار CST، ارزیابی می‌شود. با استفاده از ساختار AMC پیشنهادی کاهش قابل توجهی در مقادیر SAR به ویژه در مدل استوانه‌ای مشاهده می‌شود.

طرح پیشنهادی، دارای ویژگی AMC بین $2/8$ گیگاهرتز و $3/3$ گیگاهرتز است. همچنین مقادیر کاهش SAR در بافت انسانی مسطح 9 درصد، در بافت استوانه‌ای $58/9$ درصد و در مدل فانتوم سر CST، به میزان $18/4$ درصد در 3 گیگاهرتز می‌باشد. قابل ذکر است که در این ساختار هیچ گونه via یا pin وجود ندارد که باعث یک فرایند ساخت پیچیده شود [۲۶]. این ساختار یک رزوناتور شکافدار حلقه‌ای ساده با حلقه‌های رسانای مربعی است که برای خواص AMC در باند فرکانسی $2/8$ تا $3/3$ گیگاهرتز، اصلاح می‌شود.



شکل ۲-۱۰ نمای جلویی (a) و نمای پشتی (b) طرح AMC پیشنهادی [۲۶].

در [۲۷] یک مدل ساده تلفن همراه ارائه شده است که در آن یک آنتن مونوپل با سه ماده‌ی متفاوت EBG, AMC و سطوح امپدانس بالای RHIS همراه است. هدف ارزیابی بهترین ماده جهت کاهش SAR است. آنتن مونوپل جهت بررسی مقادیر SAR با و بدون مواد ساخته شده است. نتایج تجربی عملکرد ارائه شده توسط شبیه‌سازی را از نظر تطبیق امپدانس تأیید می‌کند.

این مواد توانایی این را دارند که به‌عنوان AMC، برای کاهش جریان‌های سطحی، به‌عنوان EBG جهت کاهش امواج سطحی و به‌عنوان RHIS جهت جذب جریان عمل کنند.

اولین مورد اساسی برای ارزیابی کاهش میزان قرارگرفتن در معرض امواج توسط موادهای نام‌برده‌شده، شامل یک مدل ساده از تلفن همراه است که توسط یک صفحه فلزی با آنتن مونوپل واقع در سه موقعیت مختلف (مرکز، وسط لبه و گوشه) مدل می‌شود که در نهایت جایی که آنتن در مرکز است آنالیز می‌شود.

در بار اول آنتن تک‌قطبی با یک صفحه زمین فلزی، بدون مواد فوق شبیه‌سازی و بهینه می‌شود. سپس آنتن تک‌قطبی با مواد ارزیابی می‌شود. هر سازه فرامواد شامل آرایه‌ای از پچ‌های مربعی‌شکل،

در بالای یک قطعه دی‌الکتریک زمین شده از جنس Arlon Diclad 880 است که ضخامت آن برابر با ۲/۳۶ میلی‌متر و ضریب گذردهی نسبی آن برابر ۲/۲ است.

به‌منظور تجزیه و تحلیل قرار گرفتن در معرض امواج، بهترین راه‌حل باید انتخاب شود که در آن صورت، راه‌حل EBG رد می‌شود زیرا عملکرد آنتن مرجع را اصلاح می‌کند. اما مواد AMC و RHIS تطبیق آنتن را حفظ می‌کنند و تابش آنتن مرجع را به میزان قابل‌توجهی تغییر نمی‌دهند.

نتایج حاکی از آن است که بهترین نتیجه زمانی به دست می‌آید که RHIS برای جذب امواج، در حالت برخورد مورب امواج بهینه شود. سرانجام SAR فقط برای بهترین راه‌حل، یعنی استفاده از RHIS بهینه شده، جهت کاهش SAR در برخورد مورب امواج (۸۵ درجه)، محاسبه می‌شود این باعث کاهش مقادیر SAR به میزان ۲۳ درصد با حفظ عملکرد مطلوب آنتن می‌شود [۲۷].

۲-۵- کاهش SAR توسط FSSها

سطوح انتخابی فرکانسی^۱ (FSS) سطوح متناوبی هستند که بسته به فرکانس رزونانس ساختار، می‌توانند میدان‌های الکترومغناطیسی یک باند فرکانسی انتخاب شده را منعکس یا جذب کنند. در [۲۸] عملکرد سطوح بازتابنده متناوب را جهت کاهش SAR آنتن تلفن همراه، بررسی می‌شود. یک مدل شش لایه سر انسان و یک آنتن (PIFA) معمولی برای کار در باند IMT-LTE (۱/۸ تا ۲/۳ گیگاهرتز) طراحی شده است. بازتابنده بین مدل سر انسان و آنتن قرار می‌گیرد تا میزان کاهش SAR را کاهش دهد. در ابتدا یک سطح انتخابی فرکانس تک‌لایه (FSS)، بر روی یک زیرلایه FR4 با مدل شده است که مقادیر SAR را ۶۷/۴ درصد کاهش می‌دهد.

چون FSSها از بازتاب‌های درون فاز پشتیبانی نمی‌کنند، برای بهترین کاهش SAR، فاصله ورق باید بهینه شود. از طرف دیگر، سطوح با امپدانس بالا (HIS) از بازتاب‌های درون فاز پشتیبانی می‌کنند. برای غلبه بر معایب این سطوح بازتابنده مرسوم (FSS)، یک سطح با امپدانس بالا (HIS) که مورد خاصی از FSS است، برای کاهش SAR طراحی شده است. HIS پیشنهادی در مقایسه با تلفن همراه معمولی،

¹ frequency selective surface

۸۵/۳ درصد کاهش SAR را به همراه دارد. علاوه بر این سطوح تناوبی پیشنهادی نیز مقرون به صرفه بوده و به راحتی قابل انجام است [۲۸].

در مقاله‌ای یک سطح انتخابی فرکانسی (FSS) با چند باند توقف، باندهای فرکانسی GSM، CDM 900، GSM-1800، LTE-2200، Wi-Fi و بلوتوث را برای برنامه‌های ارتباطی تلفن همراه پوشش می‌دهد که با استفاده از یک جفت حلقه مربعی متحدالمرکز به عنوان سلول واحد پیشنهاد شده است [۲۹].

FSSها اساساً آرایه‌های دوبعدی از پچ‌هایی بر روی یک قطعه دی‌الکتریک و یا روزنه‌هایی داخل یک صفحه فلزی هستند، تا عملیات فیلتراسیون موردنظر را انجام دهند. این مقاله نشان می‌دهد که یک FSS تک‌لایه یک‌طرفه، با یک جفت پچ حلقه مربعی متحدالمرکز به عنوان یک سلول واحد، قادر به نمایش ویژگی‌های چند باند توقف است.

حلقه مربعی بیرونی باند توقف ۰/۷ تا ۱/۰۷ گیگاهرتز را پوشش می‌دهد که شامل GSM-900 و CDMA می‌باشد و حلقه مربعی داخلی باند توقف ۱/۶۸ تا ۲/۷۹ گیگاهرتز را نشان می‌دهد که شامل باندهای GSM-1800، LTE-2200، Wi-Fi و بلوتوث می‌باشد. این طرح پیشنهادی همچنین عملکرد پایداری را در طیف وسیعی از زوایای برخوردی، نشان می‌دهد.

ابتدا قابلیت‌های پچ‌های حلقه‌ای نوع دایره‌ای FSS، بررسی می‌شود. در ادامه این طرح با یک نوع پچ حلقه‌ای مربعی فشرده تک‌لایه FSS، ارائه می‌شود. برای مقایسه عملکرد بین FSSها با پچ حلقه‌ای دایره‌ای و مربعی، یک پچ حلقه‌ای مربعی و دایره‌ای هم اندازه (70×70) میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. حلقه مربعی FSS، باند توقف را در اطراف رزونانس‌های پایین‌تر فراهم می‌کند. بنابراین؛ حلقه مربعی FSS، در کاربردهایی که اندازه FSS محدود شده است، جهت پوشش باندهای فرکانسی پایین، مؤثرتر است. نوع حلقه مربع FSS در مقایسه با حلقه دایره‌ای FSS، فشردگی ۵۸/۶۷ درصد را نشان می‌دهد. با افزایش عرض حلقه داخلی، می‌توان پهنای باند عملیاتی را افزایش داد، تا باندهای فرکانس تجاری

با فاصله‌ی نزدیک را در یک باند پوشش دهد. بدین ترتیب کوپلینگ^۱ متقابل بین رزوناتورها با فاصله‌ی نزدیک، برای چندین باند می‌تواند به حداقل برسد. طرح پیشنهادی به‌اندازه کافی انعطاف‌پذیر است که می‌تواند فرکانس رزونانس موردنظر را با تغییر طول رزوناتورها، جداگانه تنظیم کند. از این FSS ها می‌توان به‌عنوان یک قاب پشتی موبایل، برای محافظت از کاربران تلفن همراه، در برابر اشعه‌های مضر استفاده کرد [۲۹].

۲-۶- کاهش SAR با استفاده از فرامواد

فراموادها به موادی گفته می‌شود که به‌صورت مصنوعی ساخته شده و دارای خواص الکترومغناطیسی منحصر به فردی هستند و در طبیعت یافت نمی‌شوند.

فرامواد را می‌توان به‌عنوان ساختاری تعریف کرد که به‌صورت مصنوعی ایجاد شود تا خصوصیات نفوذپذیری منفی μ و گذردهی الکتریکی ϵ را به‌صورت جداگانه یا هم‌زمان نشان دهد.

این مواد بر اساس خصوصیات رزونانس ویژه‌ای هستند که توسط یک سلول واحد وجود دارد و توانایی نمایش ϵ یا μ منفی را دارند. همچنین این مواد را می‌توان توسط ساختارهای رزونانسی شکاف‌دار تحقق داد.

کاهش SAR توسط فرامواد برای اولین بار در سال ۲۰۰۶ توسط آقای هوانگ و همکاران مطرح شد. یک مدل آناتومی سر انسان و یک آنتن دوقطبی فرض شد. آنتن در باند GSM 900 استفاده شده است. در این مقاله جهت کاهش SAR از یک محیط با ϵ منفی استفاده می‌شود که این محیط توسط طراحی یک SRR تحقق می‌یابد [۳۰].

برای بررسی اثر کاهش SAR، مکان‌های مختلف، اندازه و پارامترهای محیطی منفی فراماده، تجزیه و تحلیل شده است. مقدار SAR در یک شبیه‌سازی ساده با حضور SRR، مورد مطالعه قرار گرفته است.

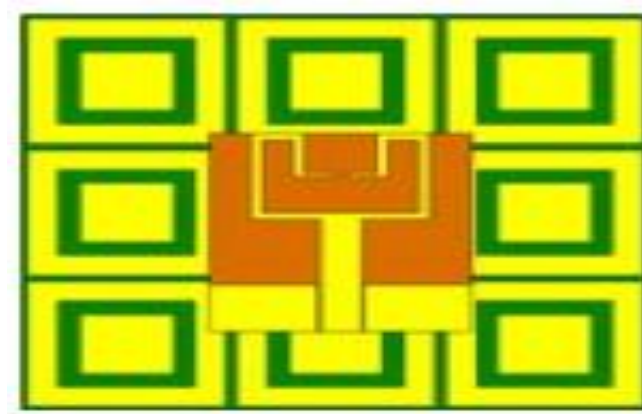
پس از انجام شبیه‌سازی‌های مختلف مشاهده می‌شود که مقدار SAR در مقایسه با حالت بدون

¹ coupling

فرامواد، $28/8$ درصد کاهش می‌یابد. همچنین میزان توان آنتن $8/78$ درصد کاهش یافته است. بنابراین؛ می‌توان نتیجه گرفت که قدرت تابشی آنتن در مقایسه با میزان کاهش SAR، کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۳۰].

در [۳۱] یک آنتن دو بانده انعطاف‌پذیر با ساختار فرامواد ارائه می‌شود. ماده پلی‌ماید^۱ که آنتن را نازک و انعطاف‌پذیر می‌کند، به‌عنوان زیرلایه آنتن استفاده می‌شود. هنگامی که ساختار فرامواد بین آنتن و جلوی بدن انسان قرار می‌گیرد، بهره آنتن 9.3 dB و 5.37 dB ، به ترتیب در فرکانس‌های $2/45$ و $5/8$ گیگاهرتز افزایش می‌یابد، و بازده تابش به ترتیب $48/4$ و $35/7$ درصد در $2/45$ و $5/8$ گیگاهرتز افزایش می‌یابد. مدل آنتن به همراه فرامواد اتصالی در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.

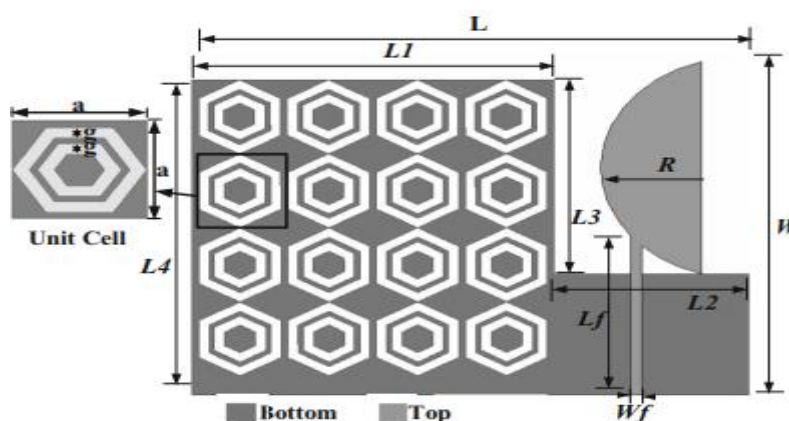
این مقاله نشان می‌دهد که با چاپ آنتن و فرامواد مربعی بر روی زیرلایه پلی‌ماید، خواصی به دست می‌آید که باعث افزایش بهره و کاهش SAR می‌شود و در نتیجه میزان SAR بیش از ۷۰ درصد کاهش می‌یابد [۳۱].



شکل ۲-۱۱ مدل آنتن به همراه فرامواد مربعی اتصالی [۳۱].

¹ Polyimide

در [۳۲] یک آنتن بی سیم^۱ چاپی با دو ضریب فرامواد $(DNG)^2$ منفی ارائه می شود که می تواند از اکثر کاربردهای موبایل مانند GSM، UMTS، بلوتوث و باند فرکانس WLAN پشتیبانی کند. آنتن از یک پچ نیمه دایره ای، یک خط تغذیه میکرواستریپ ۵۰ اهم و صفحه زمین فراموادی (فرامواد تعبیه شده در صفحه ی زمین) تشکیل شده است. تازگی محسوسی که در این آنتن پیشنهادی نشان داده شده، کاهش نرخ جذب خاص، با استفاده از صفحه زمین با ضرایب منفی فرامواد است. آنتن و سلول واحد فراموادی با CST شبیه سازی می شود و بر روی مواد زیرلایه ی ROGERS 4350B با ضخامت ۰/۵۰۸، ثابت دی الکتریک ۳/۴۸ و ضریب اتلاف ۰/۰۰۳۷ ساخته شده است. مدل آنتن پیشنهادی در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۲ آنتن پیشنهادی با زمین فراموادی [۳۲].

آنتن پیشنهادی به ترتیب ۷۲/۱۱ و ۷۵/۵۳ درصد میزان SAR را در ۱/۸ و ۲/۴ گیگاهرتز کاهش می دهد. از مزایای اصلی آنتن SAR کم، چند بانده و جمع و جور بودن می باشد [۳۲].

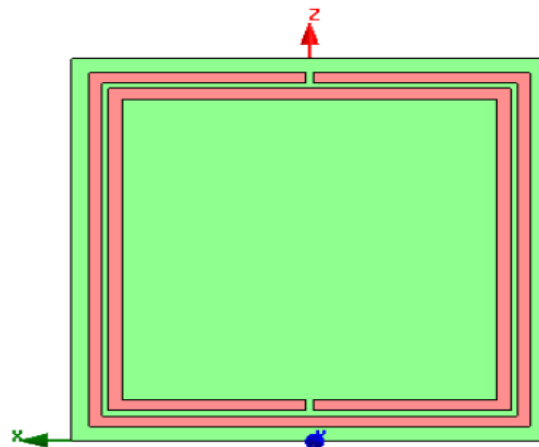
در [۳۳] یک مطالعه از کاهش حداکثر میزان SAR بر روی سر انسان برای گوشی های دارای آنتن مونوپل، در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز با استفاده از فرامواد انجام شده است.

تجزیه و تحلیل عملکرد آنتن و الگوی تابش با فرامواد، در فواصل مختلف با استفاده از نرم افزار HFSS

¹ wireless

² Double Negative medium

انجام می‌شود. نتایج خوبی برای قدرت تابش شده به سمت سر انسان که منجر به کاهش در مقادیر SAR می‌شود، به دست می‌آید.



شکل ۲-۱۳ ساختار SRR پیشنهادی [۳۳].

فرامواد موردنظر به وسیله‌ی یک SRR با ابعاد 55×55 میلی‌متر، بر روی یک زیرلایه با ضخامت ۲ میلی‌متر و $\epsilon_r = 5.7$ تحقق می‌یابد که در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است. توان کل کاهش‌یافته به سمت سر انسان، به ترتیب 2.326 dB و 6.124 dB در فواصل ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر است. درحالی‌که حداکثر SAR محلی از ۱/۱۹ در حالت بدون SRR، به ترتیب به ۰/۶ و ۰/۳ در حالت قراردادن SRR در فواصل ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در نتیجه قراردادن فرامواد بین آنتن و سر انسان، حداکثر مقادیر SAR را به ترتیب ۵۹/۷۸ درصد و ۷۹/۳ درصد در فاصله ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر کاهش می‌دهد [۳۳].

در پژوهشی یک رویکرد جدید از آنتن PIFA فراموادی، برای کاهش حداکثر SAR در سر انسان پیشنهاد شده است [۳۴]. آنتن PIFA دارای دو باند رزونانسی و برای کاربردهای GSM 900 و 1800 مگاهرتز طراحی شده است.

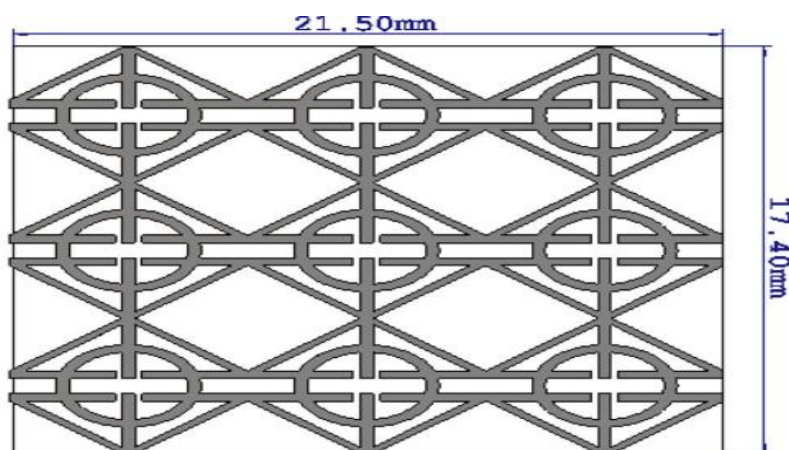
در مقاله‌ی موردبحث، زیرلایه PIFA معمولی با استفاده از یک آرایه فراموادی DNG اصلاح می‌شود، تا آنتن PIFA تعبیه‌شده‌ی فراموادی جدیدی را ایجاد کند. مقادیر SAR با در نظر گرفتن دو موقعیت مختلف عادی و شیب‌دار تلفن‌همراه، در مجاورت مدل سر، محاسبه می‌شود. توافق خوبی بین داده‌های

شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که فرامواد تعبیه شده با ابعاد 40×100 میلی‌متر در سطح زمین آنتن PIFA، در مقایسه با PIFA معمولی SAR پایین‌تری را در سر انسان، در باند فرکانسی ۱۸۰۰ مگاهرتز تولید می‌کند. این میزان کاهش SAR در حالت قرارگیری معمولی آنتن در مجاورت مدل سر، $42/3$ درصد و برای حالت شیب‌دار، $58/38$ درصد می‌باشد. علاوه بر این زیرلایه آنتن اصلاح شده منجر به بهبود جزئی عملکرد آنتن می‌شود [۳۴].

در [۳۵] فراموادی چاپی با ضرایب منفی جهت کاهش SAR، در آنتن‌های بی‌سیم قابل‌حمل مورد استفاده در تلفن همراه، ارائه شده است. تازگی محسوسی که در این مقاله به نمایش گذاشته شده، این است که کاهش جذب EM به سمت سر انسان با پیوست فرامواد کاغذی است. همان‌طور که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است، آرایه فراموادی با ابعاد $17/4 \times 21/5$ میلی‌متر بر روی کاغذ آغشته به روغن با ثابت دی‌الکتریک $3/87$ و ضخامت $0/177$ میلی‌متر ساخته شده است.

ساختار فراموادی پیشنهادی بدون کاهش عملکرد آنتن، کاهش جذب EM را نشان می‌دهد. میزان کاهش SAR به ترتیب $13/2$ و 6 درصد در فرکانس ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز کاهش یافته است [۳۵].



شکل ۲-۱۴ آرایه فراموادی چاپ شده بر روی کاغذ آغشته به روغن [۳۵].

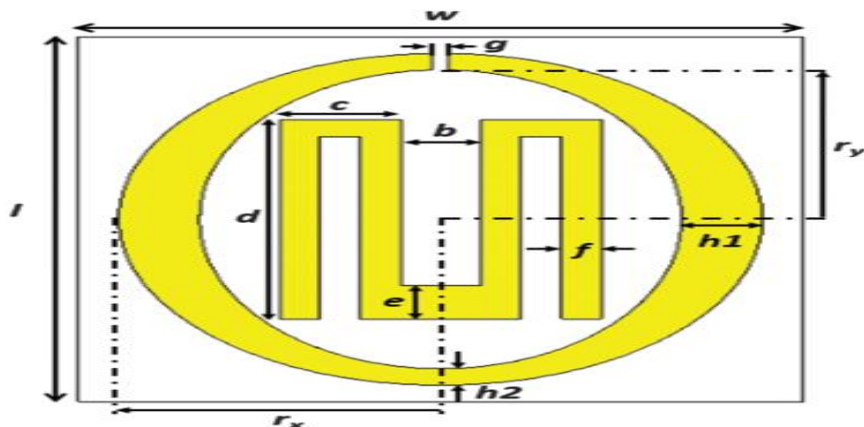
یک فرامواد کوچک ساخته شده از خط مارپیچ و تشدیدکننده حلقه‌ای شکاف‌دار بیضوی شکل، در

[۳۶] ارائه شده است که یک ضریب شکست منفی را ارائه می‌دهد.

روش استفاده از خط مارپیچ، اندازه سلول را کوچک می‌کند، جایی که تشدیدکننده حلقه‌ای شکاف‌دار بیضوی، نفوذپذیری موردنظر را ارائه می‌دهد. دو حالت DNG (گذردهی و نفوذپذیری منفی) وجود دارد. یکی در بازه‌ی فرکانسی ۲/۴۶ تا ۳/۳۱ گیگاهرتز با پهنای باند ۸۵۰ مگاهرتز و دیگری از ۳/۸۵ تا ۴ گیگاهرتز با پهنای باند ۱۵۰ مگاهرتز وجود دارد. خواص تشدیدکننده بیضوی با خط مارپیچ را می‌توان با تغییر ابعاد آن تحت کنترل قرار داد، به این صورت که با افزایش یا کاهش طول سیم‌های مسی می‌توان اندوکتانس ساختار را کم یا زیاد کرد.

ساختار خطوط پیچشی از فرکانس‌های بالا و پایین و رزوناتورهای حلقه‌ای شکاف‌دار بیضوی از فرکانس‌های پایینی پشتیبانی می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، این ساختار بر روی زیرلایه Rogers 3010 با ضخامت ۱/۲۷ میلی‌متر، ابعاد ۱۱×۹ میلی‌متر، گذردهی نسبی ۱۰/۲، نفوذپذیری نسبی ۱ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۲ چاپ شده است.

با استفاده از یک زیرلایه با گذردهی بالاتر، می‌توان اندازه سلول را کاهش داد. میزان SAR در فانتوم سر انسان تجزیه و تحلیل می‌شود. پس از قراردادن آرایه‌ی فرامواد طراحی شده با ابعاد ۴۴×۳۶ میلی‌متر در مدل تلفن همراه، مقدار SAR از ۲.۳۱ W/Kg به ۱.۴۸ W/Kg کاهش یافته است که کاهش ۳۵/۹۳ درصدی در مقادیر SAR در فرکانس ۲۱۰۰ مگاهرتز را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵ ساختار خطوط پیچشی و رزوناتور حلقه‌ای شکاف دار بیضوی [۳۶].

در نتیجه با استفاده از فرامواد با ضریب شکست منفی به عنوان سپر، بدن انسان می تواند در برابر تشعشعات الکترومغناطیسی محافظت شود. از جمله مزایای ساختار سادگی و اندازه جمع و جور آن می باشد که می توان آن را با آنتن های میکرواستریپ تعبیه کرد، تا SAR کم و تابش پایدار حاصل شود [۳۶].

در مطالعه ای کاهش SAR ناشی از آنتن دوقطبی^۱ ساده و آنتن PIFA در مدل سر، با استفاده از SRRهای مربعی شکل بررسی شد [۳۷].

در ابتدا آنتن دوقطبی ساده برای درک تأثیر یک لایه فراموادی (SRR) در فرکانس ۰/۹ گیگاهرتز، مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس یک آنتن PIFA به جای آنتن دوقطبی برای تحقق یک مورد واقعی تر گنجانده می شود. می توان مشاهده کرد که وجود یک عنصر جذب کننده نزدیک به آنتن بر فرکانس تشدید تأثیر دارد. این نتایج می تواند اطلاعات مفیدی را هنگام طراحی تجهیزات ایمنی موبایل فراهم کند. همچنین در حضور مدل سر الگوی تابش آنتن به طور قابل توجهی تغییر می کند و یک مدل پنج لایه سر، تقارن الگوی تابش را می تواند به شدت مختل کند.

نتایج عددی مربوط به مقادیر SAR در مدل چندلایه سر، در حضور تشدیدکننده هایی با یک یا سه SRR، مقادیر کاهش قابل توجه SAR را به میزان ۸۴/۳ درصد برای آنتن دایپل و ۲۳/۷ درصد برای آنتن PIFA نشان می دهد [۳۷].

در [۳۸] چارچوبی برای بررسی تلفن همراه و اثر متقابل بر روی سر انسان به منظور کاربردهای باند فرکانسی L و S ارائه شده است. طرح پیشنهادی فراموادی فشرده، به کاهش میزان SAR تلفن همراه که در معرض سر انسان است، کمک می کند.

از این رو یک طرح فرامواد مربعی چند شکافه (SRR)، بر روی یک زیرلایه دی الکتریک به ضخامت ۱/۶ میلی متر از جنس FR-4 توسعه یافته است.

¹ dipole

محدوده فرکانسی ۰/۳ تا ۴ گیگاهرتز در این شبیه‌سازی استفاده می‌شود، جایی که طرح پیشنهادی فرکانس‌های تشدید را دقیقاً در ۱/۸۱ (باند L) و ۳/۷۹ گیگاهرتز (باند S) ایجاد می‌کند.

خواص فرامواد متنوعی از جمله گذردهی الکتریکی (ϵ)، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) و ضریب شکست (n) با استفاده از داده‌های ضریب انتقال S_{21} و ضریب بازتاب S_{11} اندازه‌گیری شد. ویژگی چپ‌گردی فرامواد طراحی شده از ۱/۸۴ گیگاهرتز تا ۱/۹۱ گیگاهرتز در باند L شروع می‌شود. در این محدوده فرکانسی، درحالی‌که تمام پارامترهای مؤثر محیطی مقادیر منفی را نشان می‌دهند، فرامواد طراحی شده دارای رفتار چپ‌گرد است.

در باند S رفتار چپ‌گردی فرامواد در ۳/۸۵ تا ۴ گیگاهرتز اتفاق می‌افتد. این نتایج نشان می‌دهد که این طرح الزامات یک فرامواد چپ‌گرد که در آن پارامترهای مؤثر محیطی باید کمتر از صفر باشند، را برآورده می‌کند. این ساختار فراموادی دارای امیدانس بالای ۰/۴۶ اهم در ۲/۰۲ گیگاهرتز است. همچنین مقدار حقیقی امیدانس از ابتدا تا انتها بیش از صفر است.

مدل سر و گوشی تلفن همراه مورد استفاده در این مقاله، از کتابخانه CST گرفته شده است. چند مطالعه پارامتری برای ساختار فرامادی جهت تعیین پارامترها و تعیین محدودیت‌های طراحی تا زمان به‌دست‌آوردن نتایج رضایت‌بخش، انجام شده است. از جمله این مطالعات، انجام مطالعات پارامتریک با تغییر مواد زیرلایه، طراحی ساختار، ترتیب آرایه‌ای و فاصله‌ی تلفن همراه از سر انسان می‌باشد.

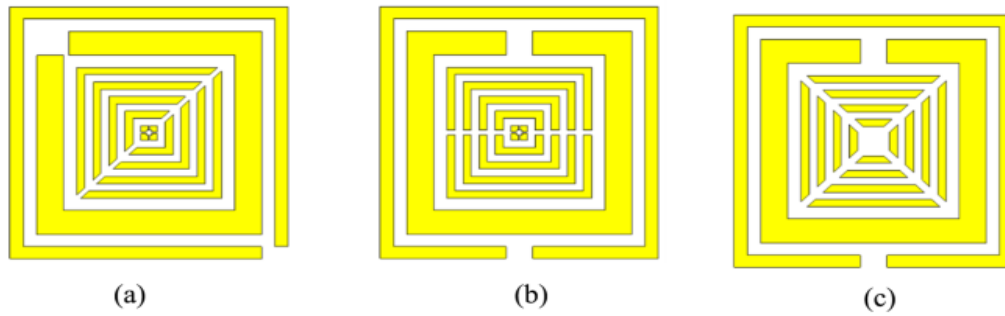
به‌طورکلی، تعیین تعداد حلقه‌های SRR با استفاده از روش آزمون و خطا انجام شد. این روش اساسی حل مسئله، با آزمایش‌های متنوعی مشخص می‌شود که تا زمان دستیابی به بهترین طراحی ادامه دارد. در اولین مطالعه پارامتریک، ساختار فراموادی پیشنهادی روی سه زیرلایه مختلف FR-4 با تانژانت تلفات ۰/۰۲۵ و ثابت دی‌الکتریک ۴/۳، Rogers RT5880 با تانژانت تلفات ۰/۰۰۰۹ و ثابت دی‌الکتریک ۲/۲ و Polyimide با تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۷ و ثابت دی‌الکتریک ۳/۵ قرار داده شده است. تمام ابعاد ساختار در این مطالعه ثابت مانده است. این نتایج نشان می‌دهد که محدودیت اصلی مطالعه

پارامتریک که به دست آوردن دو باند رزونانسی است، برای زیرلایه راجرز و Polyimide برآورده نشده است. به این صورت که زیرلایه FR-4 می تواند در باند L و S کار کند، درحالی که راجرز و Polyimide به ترتیب یک فرکانس تشدید در $2/3$ و $1/97$ گیگاهرتز از خود نشان می دهند. در همین حال، فرکانس رزونانس اول در سه زیرلایه با افزایش ثابت دی الکتریک به سمت فرکانس پایین تر منتقل می شود. به طور کلی، راجرز و Polyimide با توجه به هدف این مطالعه تحقیقاتی ناسازگار هستند. از این رو، تجزیه و تحلیل زیرلایه FR-4، صرفاً برای دستیابی به هدف این مقاله انتخاب شد.

در آزمایشی دیگر، به عنوان بخشی از مطالعه پارامتریک ۳ ساختار SRR متفاوت پیشنهاد شده است. همان طور که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده طرح a و b دارای ۵ حلقه ی مربعی داخلی می باشد، درحالی که طرح c فقط چهار حلقه مربع داخلی دارد. نتایج حاکی از آن است که طرح های (a) و (c) دارای فرکانس های کاری دو باند L و S هستند. در فرکانس رزونانس، تمام طرح ها دارای گذردهی منفی هستند و هر سه طرح ویژگی های چپ گردی را در باند L و S نشان می دهند. از نظر عملکرد هنگام در نظر گرفتن اهداف این مطالعه، طرح (c) قابل قبول تر است

سلول آرایه 2×1 با ابعاد 22×11 میلی متر دارای دو فرکانس تشدید است که شبیه به طرح فرامادی سلول واحد پیشنهادی است. همچنین سلول آرایه ای 2×1 به دلیل محدودیت کوچک سازی مناسب تر است.

نتایج اندازه گیری شده نشان می دهد که فرکانس های تشدید در $1/82$ و $3/72$ گیگاهرتز رخ داده است. مقدار SAR یک گرم، به میزان $36/87$ و $45/54$ درصد به ترتیب در باند L و S کاهش می یابد. درحالی که مقادیر SAR ده گرم در باند L و S به ترتیب $35/29$ و $48/36$ درصد کاهش یافته است. همچنین بیشترین مقدار کاهش SAR در فاصله ۱۵-۲۰ میلی متر با $78/75$ درصد اتفاق می افتد [۳۸].

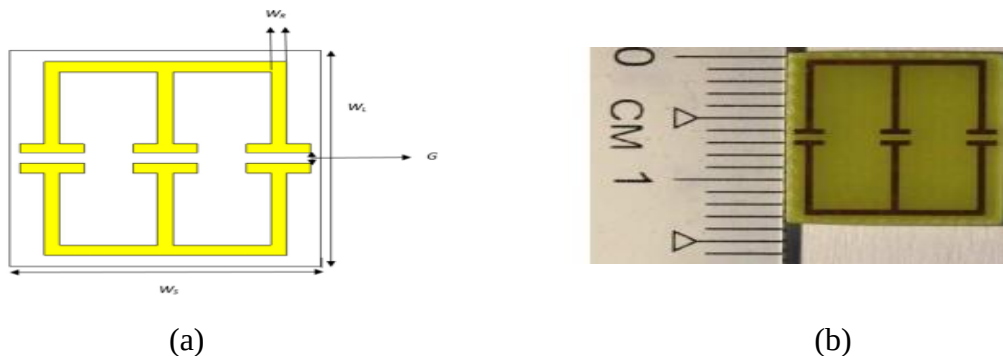


شکل ۲-۱۶ ساختارهای مختلف SRR پیشنهادی [۳۸].

در [۳۹] به بررسی تأثیر SAR در فواصل مختلف فضای آزاد، بین تلفن همراه و مدل سر پرداخته می‌شود و از یک فرامواد مبتنی بر تشدیدکننده (ELC) برای کاهش SAR استفاده شده است که این کاهش SAR برای فاصله‌های مختلف بین گوشی‌های هوشمند و اندام‌های مختلف سر، جهت کاربردهای مختلف نیز بررسی شده است. ساختار ELC پیشنهادی در شکل ۲-۱۷ نشان داده شده است.

برای محاسبه SAR، یک آنتن جدید PIFA در باند ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز طراحی می‌شود و در مرحله بعدی، یک فرامواد مبتنی بر تشدیدکننده ELC ساخته شده و در لایه میانی بین پچ تابشی و زیرلایه آنتن PIFA قرار گرفته است، تا میزان SAR آنتن را کاهش دهد. این تشدیدکننده منجر به کاهش SAR برای سه دسته کاربرد تماس صوتی، پیام‌رسانی و تماس تصویری می‌شود.

بیشترین میزان تابش جذب شده توسط سر هنگامی است که فرد از تلفن همراه برای برنامه تماس صوتی استفاده می‌کند. بر اساس نتایج، مشخص شد که برای کاربردهای تماس صوتی، هر بار گوش، پوست سر و اطراف گوش تحت تأثیر قرار می‌گیرند.



شکل ۲-۱۷ ساختار (a) ELC نمونه شبیه‌سازی شده و (b) نمونه ساخته شده [۳۹].

محاسبه‌ی مقادیر SAR تلفن همراه به منظور کاربردهای پیام‌رسانی برای فواصل معینی (۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر)، بین تلفن همراه و موقعیت بینی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای برنامه‌های پیام‌رسانی یا پیام کوتاه، بیشترین تأثیرپذیری در اعضای بدن، قسمت پایینی بینی و لب بالایی در فرکانس ۰/۹ گیگاهرتز می‌باشد، درحالی‌که در فرکانس ۱/۸ گیگاهرتز بیشترین تأثیر در لب پایینی، چانه و گلو مشاهده می‌شود.

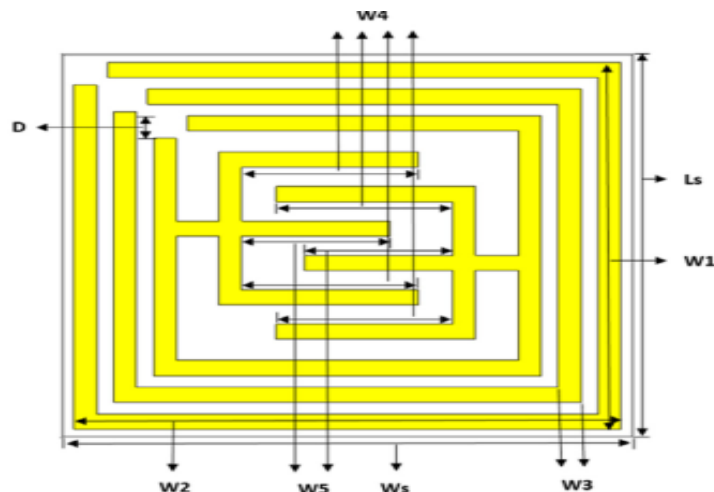
محاسبه SAR تلفن همراه برای کاربردهای تماس تصویری با فاصله‌های مختلف (۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متر) بین تلفن همراه و موقعیت چشم، توصیف می‌شود. در مورد برنامه‌های تماس تصویری، بیشترین تأثیر در قسمت بینی و نواحی اطراف آن مشاهده می‌شود.

در فرکانس ۰/۹ گیگاهرتز، قسمت فوقانی بینی بیشترین تأثیرپذیری را دارد و در فرکانس ۱/۸ گیگاهرتز، بیشترین تأثیر بر روی قسمت‌های تحتانی بینی مانند سوراخ بینی می‌باشد.

زمانی که تلفن همراه در فاصله‌ی ۳ میلی‌متری از مدل سر قرار دارد، حداکثر میزان کاهش SAR توسط آرایه‌ی 3×4 فراموادی به ابعاد 39×52 میلی‌متر، به ترتیب در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز برای کاربردهای تماس صوتی ۴۷ و ۷۰ درصد می‌باشد. همچنین در فاصله‌ی ۱۰۰ میلی‌متر حداکثر میزان کاهش SAR برای کاربردهای پیام‌رسانی، به ترتیب در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ برابر ۶۹ و ۷۱ درصد و برای کاربردهای تماس تصویری ۷۷ و ۶۵ درصد می‌باشد.

بر اساس خواص بافت، میزان جذب بافت با افزایش قدرت تابش شده افزایش می‌یابد، به‌ویژه هنگامی که فاصله بین سر و تلفن همراه کاهش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که فرامواد موردنظر می‌تواند مقدار قابل توجهی از SAR را کاهش دهد [۳۹].

در [۴۰] از یک شبیه‌ساز الکترومغناطیسی با فرکانس بالا، مبتنی بر یک ساختار تشدیدکننده E شکل دوگانه که در مقابل هم قرار دارند و توسط تشدیدکننده‌های حلقه‌ای شکافدار (SRR) احاطه شده‌اند، برای تجزیه و تحلیل عملکرد فرامواد و محاسبه SAR استفاده شده است که دارای چهار باند فرکانسی می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸ ساختار فرامواد طراحی شده جهت کاهش SAR [۴۰].

این ساختار تشدیدکننده از مس با ضخامت $0.35 \mu\text{m}$ میلی‌متر ساخته شده و بر روی سطح بالایی زیرلایه دی‌الکتریک FR4 انباشته شده است. جریان از طریق تشدیدکننده اصلی E شکل در فرکانس‌های پایین جریان می‌یابد، درحالی‌که در فرکانس‌های بالاتر جریان از گوشه SRRها عبور می‌کند که این منجر به رزونانس‌های الکتریکی قوی در فرکانس‌های پایین می‌شود. در مقابل، در فرکانس‌های بالاتر یعنی در $4/8$ و $5/89$ گیگاهرتز، جریان در SRRها بیشتر از تشدیدکننده E شکل عبور می‌کند که این منجر به تشدید مغناطیسی در فرکانس‌های بالاتر می‌شود. فراماده پیشنهادی دارای دامنه فرکانس کاری $1/62$ تا $1/79$ گیگاهرتز، $2/08$ تا $2/21$ گیگاهرتز، $4/39$ تا $4/99$ گیگاهرتز و $5/65$ تا $6/09$ گیگاهرتز است. همچنین توان خروجی 0.5 W برای محاسبه مقادیر SAR در نظر گرفته شده است.

آرایه‌ی 4×3 فراماده توسعه‌یافته با ابعاد $44/44 \times 33/33$ میلی‌متر و مدل فانتوم سر، برای محاسبه کاهش SAR در فرکانس ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز استفاده می‌شود. یک تلفن همراه دارای آنتن PIFA در دست قرار گرفته است و با مدل سر تماس دارد.

میزان کاهش SAR یک گرم و ده گرم به ترتیب ۴۴ و ۴۳ درصد در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز می‌باشد. در مقابل، میزان کاهش در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز تقریباً مشابه فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز است که ۴۳ درصد کاهش در SAR یک گرم و ۴۴ درصد کاهش در میزان SAR ده گرم را نشان می‌دهد [۴۰].

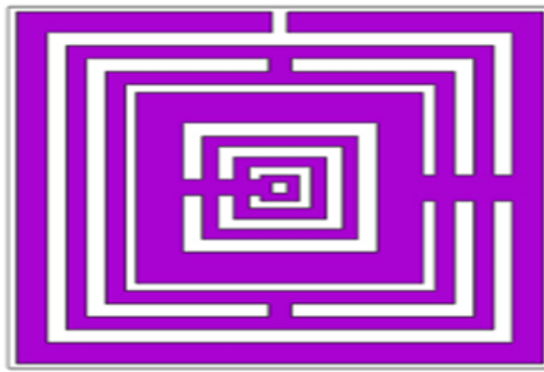
در [۴۱] تمرکز اولیه نشان دادن طراحی یک ساختار فرامواد مربعی شکل جدید، در اندازه جمع و جور است که دارای فرکانس‌های تشدید در چند باند و ویژگی‌های چپ‌گردی برای کاهش SAR است. ساختار فرامواد بهینه شده تا حدّ زیادی خصوصیات الکترومغناطیسی و مقادیر کاهش SAR را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین؛ در حالت اولیه، ساخت سلول واحد فرامواد نقش مهمی در به‌دست‌آوردن فرکانس‌های رزونانس موردنظر دارد.

به‌طورکلی، هفت حلقه مربعی با شکاف، بر روی مواد زیرلایه دی‌الکتریک ساخته شده و ضخامت 0.35 میلی‌متر برای طراحی مواد مسی بر روی سطح زیرلایه FR-4 انتخاب شده است. از شبیه‌سازی عددی طرح فرامواد معرفی شده، چهار فرکانس رزونانس در $1/246$ (باند L)، $3/052$ ، $3/794$ (باند S) و $4/858$ گیگاهرتز (باند C) به دست می‌آید.

تلفن‌همراه در سمت راست سر انسان با مدل دستی که آن را در حالت مکالمه نگه می‌دارد قرار گرفته است. سپس طرح فرامواد در داخل تلفن‌همراه قرار گرفت تا مقادیر کاهش SAR محاسبه شود. همچنین دامنه فرکانس بین 0 تا 5 گیگاهرتز است.

مقادیر نفوذپذیری نیز برای طرح فرامواد پیشنهادی دارای مقادیر منفی از 0 تا 5 گیگاهرتز است. همچنین طرح فرامواد پیشنهادی که در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است، ویژگی‌های چپ‌گردی را برای همه باندهای تشدید نشان می‌دهد.

سلول واحد معمولاً برای تولید خصوصیات الکترومغناطیسی خارق‌العاده به‌تنهایی برای کاربردهای صنعتی به کار نمی‌رود. برای کشف ساختار آرایه بهینه شده جهت کاربرد کاهش SAR، از روش آزمون و خطا استفاده شده است. در همین حال طراحی سلول فرامواد 2×1 با ابعاد 28×14 میلی‌متر در مقایسه با طراحی سلول واحد تقریباً کمتر از 5 درصد تناقض دارد که این اجازه را می‌دهد تا از اختلافات بین دو سلول غافل شد و به‌عنوان یک گزینه مناسب در نظر گرفته شود.



شکل ۲-۱۹ طرح فراموادی پیشنهادی [۴۱].

پس از انتخاب ساختار آرایه‌ی فراموادی بهینه شده، چند موقعیت استراتژیک طراحی فرامواد در داخل تلفن‌همراه، مورد بررسی قرار گرفت. مطالعه اولیه نشان می‌دهد که سلول آرایه لزوماً در کنار ساختار آنتن قرار نمی‌گیرد، تا عملکرد پیشرفته‌ای از خود نشان دهد. از روش آزمون و خطا برای تشخیص بهترین محل قرارگیری سلول آرایه استفاده شد.

اثر فواصل مختلف تلفن‌همراه از مدل سر انسان با محاسبه مقادیر SAR توسط ساختار فراموادی بررسی شد. فرض اساسی این است که رابطه بین تلفن‌همراه و مدل سر نیز تأثیرات قابل‌توجهی بر روی مقادیر SAR دارد.

بیشترین مقدار SAR در فاصله اولیه ۵ میلی‌متر در فرکانس ۴/۸۵۸ گیگاهرتز ثبت شد، درحالی‌که کمترین آن به ترتیب در ۳/۰۵۲ گیگاهرتز در فاصله‌ی ۲۰ میلی‌متر برای ۱ گرم و ۱۰ گرم حجم بافت رخ داده است. در نتیجه وقتی تلفن‌همراه از انسان دور باشد مقدار SAR کمتری به دست می‌آید.

نتایج کاهش SAR، با طراحی فراماده جمع‌وجور به دست آمد و برای کاربرد جذب و کاهش EM مناسب است. حداکثر مقادیر کاهش SAR در فرکانس ۳/۷۹۴ گیگاهرتز با ۶۱/۱۶ درصد و ۷۰/۳۳ درصد به ترتیب برای ۱ گرم و ۱۰ گرم حجم بافت گزارش شده است.

به‌طورکلی، نتایج به‌دست‌آمده اثرات کاهش SAR را نشان می‌دهد، و طراحی فرامواد پیشنهادشده جهت کاهش SAR می‌تواند مفید باشد [۴۱].

فصل سوم

کاهش میزان **SAR**

تلفن همراه با آنتن **Helix**

در سال‌های اخیر، فراموادها همواره به‌عنوان موضوعی داغ مطرح شده و علاقه‌ی شدید محققان را به تحقیقات در این زمینه به دنبال داشته است. این امر به دلیل خواص شگفت‌انگیز و برجسته فرامواد است که به‌جای وابستگی به ترکیب مواد وابستگی زیادی به شکل هندسی مولکول‌های فرامادی دارند. علاوه بر این، فراموادها پاسخ‌های الکتریکی و مغناطیسی قوی را برای کنترل طول موج، قطبش، دامنه، فاز و جهت امواج الکترومغناطیسی به نمایش گذاشته است.

به‌طورکلی، این مواد توسط انسان ساخته شده و در طبیعت یافت نمی‌شود، اما دارای خصوصیات الکترومغناطیسی منحصربه‌فردی است که در مواد معمولی این ویژگی‌ها یافت نمی‌شود. خصوصیات منحصربه‌فرد این مواد غیرمتعارف، محققان را قادر می‌سازد به دستاوردهای خارق‌العاده‌ای دست یابند. انتشار امواج وابسته به خواص انتشاری محیطی است که موج در آن منتشر می‌شود و این خواص مختص همان محیط است. دو پارامتر اساسی گذردهی الکتریکی^۱ (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی^۲ (μ) هر ماده می‌توانند چگونگی خواص انتشاری هر ماده را توصیف کنند. این دو پارامتر در حالت عادی و برای مواد موجود در طبیعت دارای مقداری مثبت می‌باشند، اما حالت غیرعادی زمانی رخ می‌دهد که یکی از این دو پارامتر یا هر دوی آن‌ها منفی شوند که به طور همزمان منفی بودن این دو مقدار ممکن است با برخی از خواص مواد موجود در طبیعت متناقض باشد.

در یک تعریف کلی، فرامواد ساختارهای مصنوعی و به طور مؤثر همگنی هستند که دو مشخصه گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی آنها مقداری خارج از محدوده مواد موجود در طبیعت را در برگیرد به همین دلیل دارای خواص غیرعادی و جالبی می‌باشند. منظور از همگن بودن در این تعریف ساختارهایی هستند که اندازه متوسط سلول‌های سازنده ساختار بسیار کوچک‌تر از طول موج هدایت شده است. از این‌رو اندازه میانگین سلول حداقل باید کوچک‌تر از ربع طول موج باشد.

¹ Permittivity

² Permeability

نظریه فراموادها به سال ۱۹۶۸ برمی گردد که در آن وسلاگو ادعا می کرد که چنین موادی برخلاف مواد عادی موجود در طبیعت، دارای خواص منحصر به فردی هستند [۴۲]. او نتیجه گرفت که از نظر معادلات ماکسول، مانعی برای تحقق عملی چنین محیطی وجود ندارد و رفتار موج مسطح منتشر شده در چنین محیطی را می توان با سه بردار شدت میدان الکتریکی (E)، شدت میدان مغناطیسی (H) و بردار موج (β) تحلیل کرد. وی اظهار داشت که وقتی بردار موج (K)، در جهت مخالف بردار پوینتینگ (S) قرار گیرد، گذردهی الکتریکی (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) منفی می شود. به بیان دیگر در محیط های معمولی دو بردار S و β هم جهت هم می باشند، ولی در محیط های با ϵ و μ منفی به صورت هم زمان بردار S و β در خلاف جهت یکدیگرند، زیرا β وابسته به گذردهی الکتریکی (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) محیط است و S مستقل از آنها می باشد.

نکته ای که در مورد تحقیقات وسلاگو قابل ذکر است این است که او موفق به ساخت این مواد نشد. زیرا وی در طبیعت به دنبال این مواد می گشت و غافل از اینکه این مواد مصنوعی می باشند و در طبیعت وجود ندارند [۴۲].

در یک تقسیم بندی کلی مواد از لحاظ علامت به چهار دسته تقسیم بندی می شوند. گروه اول شامل محیط هایی است که در آنها ϵ و μ مثبت است. چنین محیط هایی با دو شاخص مثبت را DPS^1 می نامند که اکثر مواد موجود در طبیعت در این گروه قرار می گیرند. از طرفی دیگر این محیط ها را راست گرد (RH)^۲ نیز می نامند، زیرا میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و بردار موج در چنین محیط هایی از قانون دست راست تبعیت می کنند [۴۳].

گروه دوم شامل محیط هایی می شود که در آنها ϵ منفی و μ مثبت است چنین محیط هایی را ENG^3 می نامند. پلاسماها در باندهای فرکانسی خاص، چنین حالتی دارند. به عنوان مثال فلز نقره و طلا در محدوده فرکانس فروسرخ و نور مرئی چنین حالتی را از خود نشان می دهند.

¹ Double positive medium

² Right-handed medium

³ Epsilon-negative medium

گروه دیگر شامل محیط‌هایی است که در آنها ϵ مثبت و μ منفی است که چنین محیط‌هایی را MNG^1 می‌نامند. مواد مصنوعی متعلق به هر یک از سه گروه نامبرده شده، به صورت عملی تحقق یافته است که به طور کلی ENG و MNG را محیط با یک پارامتر منفی یا SNG^2 می‌نامند.

گروه چهارم شامل محیط‌هایی است که در آن ϵ و μ به طور هم‌زمان منفی است. چنین محیط‌هایی را محیط با دو شاخص منفی یا DNG^3 می‌نامند که تحقق آنها تا به این زمان فقط به طور مصنوعی امکان پذیر بوده است. باتوجه به این که میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و بردار موج در چنین محیط‌هایی از قانون دست چپ پیروی می‌کنند، این محیط‌ها را محیط چپ‌گرد (LH)⁴ نیز می‌نامند. قابلیت انتشار امواج در هر یک از محیط‌های چهارگانه به علامت ϵ و μ بستگی دارد. همان‌طور که در شکل (۱-۳) نشان داده شده است، در محیط‌های راست‌گرد انتشار امواج روبه جلو است. همچنین سرعت فاز و گروه هم‌جهت با هم می‌باشد و در نتیجه ضریب شکست مثبت است. در محیط‌های چپ‌گرد انتشار امواج به صورت رو به عقب^۵ می‌باشد. در این محیط‌ها سرعت فاز و گروه در جهت‌های مخالف یکدیگر است. در واقع مواد چپ‌گرد دوگان مواد راست‌گرد می‌باشد. یکی از ویژگی‌های جالب مواد چپ‌گرد، در باند فرکانسی موردنظر این است که ضریب شکست منفی از خود نشان می‌دهند. یعنی قسمت حقیقی ضریب شکست، علامت منفی به خود می‌گیرد که این ویژگی کاربردهای زیادی در طراحی جاذب‌ها و لنزها دارد. محیط‌های چپ‌گرد به عنوان محیط با ضریب شکست منفی، محیط وسالگو، محیط موج معکوس و محیط با سرعت فاز منفی نیز شناخته می‌شوند [۴۳].

در محیط‌های SNG که علامت ϵ و μ مخالف یکدیگر می‌باشد، انتشار موجی نداریم. به عبارتی دیگر به دلیل مختلف‌العلامت بودن ϵ و μ ، بردار موج یک مقدار موهومی به خود می‌گیرد و لذا انتشار موج

¹ Mu-negative medium

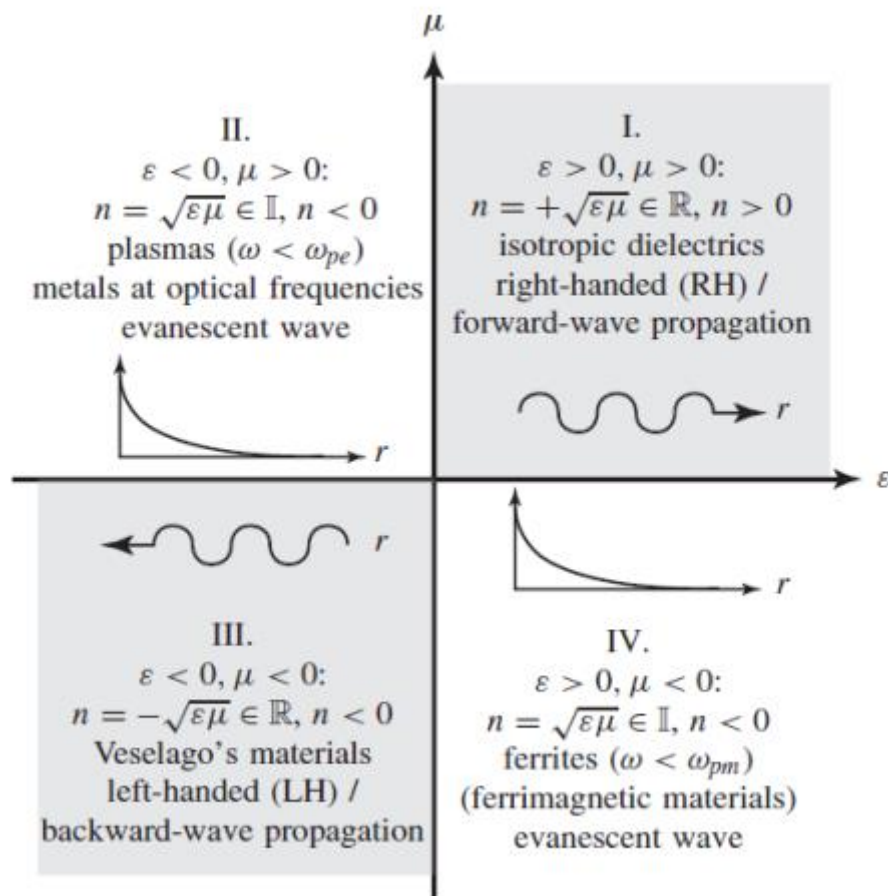
² Single Negative medium

³ Double Negative medium

⁴ Left-handed medium

⁵ Backward-Wave Propagation

وجود نخواهد داشت.



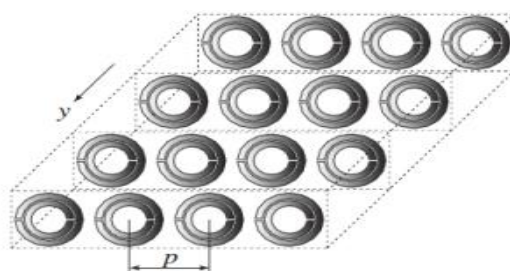
شکل ۱-۳ حالت های مختلف علامت های ϵ و μ نسبت به یکدیگر [۴۳].

در اواخر دهه ۱۹۹۰ تحقق عملی فرامواد در باند فرکانسی ماکروویو، از دو جنبه مورد بررسی قرار گرفت. نخست این که بتوان محیطی ایجاد کرد که در فرکانس ماکروویو ϵ منفی داشته باشد و دوم این که بتوان محیطی ایجاد کرد که در فرکانس ماکروویو μ منفی داشته باشد. این دو حالت با ساختارهای خاص شکل دهی شده ی فلزی، مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت محیطی با ضریب شکست منفی ایجاد شد [۴۳].

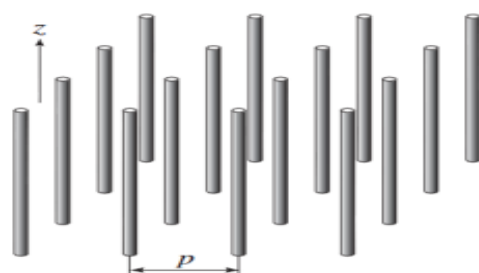
ایده ایجاد چنین محیطی برای اولین بار در سال ۱۹۹۶ توسط پندری مطرح شد. پندری پیشنهاد کرد که ساخت چنین محیط هایی با استفاده از ساختارهای ناهمگنی امکان پذیر است که در مقابل عبور

موج، مانند یک مدار LC عمل می‌کنند. پندری موفق به ساخت موادی با ϵ منفی و همچنین μ منفی به صورت جداگانه شده بود [۴۴]. او با کنار هم قراردادن میله‌های نازک^۱ محیطی با ϵ منفی ایجاد کرد و اثبات کرد که اگر میدان الکتریکی موازی با این میله‌های نازک به ساختار اعمال شود، ساختار خاصیت ϵ منفی از خود نشان می‌دهد. همچنین ثابت کرد که اگر به حلقه‌های دوتایی^۲ میدان مغناطیسی به صورت عمود بر صفحه وارد شود، کل ساختار مشابه μ منفی رفتار می‌کند [۴۴].

همان‌طور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است ساختارهای (الف) و (ب) در یک سری فرکانس‌های خاص ϵ و μ منفی تولید می‌کنند. نحوه‌ی تولید ϵ منفی در ساختار شکل (۲-۳) قسمت (الف) به این صورت است که اگر میدان الکتریکی در راستای سیم‌ها اعمال شود، آنگاه جریانی در طول سیم‌ها القا خواهد شد که این جریان خود تولید گشتاور دوقطبی الکتریکی و در نتیجه تولید میدان الکتریکی در خلاف جهت میدان الکتریکی اعمالی می‌کند. همچنین نحوه‌ی ایجاد μ منفی در قسمت (ب) به این صورت است که میدان مغناطیسی عمود بر صفحه حلقه‌ها اعمال می‌شود که این میدان مغناطیسی باعث ایجاد جریان در حلقه‌ها می‌شود. این جریان خود باعث تولید گشتاور دوقطبی مغناطیسی در حلقه‌ها می‌شود و در نتیجه یک میدان مغناطیسی در خلاف جهت با میدان مغناطیسی اعمالی تولید می‌کند که این باعث ایجاد μ منفی می‌شود.



(ب)



(الف)

شکل ۲-۳ ساختارهایی جهت تحقق (الف) ϵ منفی و (ب) تولید μ منفی [۴۳].

¹ Thin-Wire

² Split Ring

در سال ۲۰۰۰ اسمیت با تحقق اولین ساختار مواد چپ گرد توانست، پیشنهاد پندری را عملی سازد [۴۵]. این امر با ترکیب سیم‌های فلزی و SRRها تحقق یافت. این ساختارها دارای ابعاد میلی‌متری بودند و در نتیجه می‌توانستند طول موج‌های میکرومتر را آشکار کنند. برای به‌دست‌آوردن چنین شرایطی باید ابعاد این ساختارها بزرگ‌تر از طول موج وارد به این مواد نباشد، بنابراین؛ باید این ساختارها در مقیاس نانومتری تهیه شوند. پیش‌ازین، MTM^1 ها از برخی اشکالاتی مانند اندازه بزرگ‌تر، ساختارهای رزونانسی پیچیده تک بانده یا دو بانده رنج می‌برد، در نتیجه کاربردهای عملی آن را محدود می‌کرد. با این حال محققان با موفقیت، MTM های بسیار کوچک را تولید و اجرا کردند [۴۵].

ساختارهای فرامواد به دلیل خواص قابل کنترل و یکتای الکترومغناطیسی از جمله کوچک‌تر کردن قطعات که ناشی از سائز الکتریکی کوچک المان‌های این ساختارها است، عملکرد بهتری نسبت به سایر مواد موجود در طبیعت، از خود نشان می‌دهند که این ویژگی فرامواد را می‌توان به‌عنوان بیشترین اثر در این زمینه به حساب آورد [۴۵ و ۴۳].

به دلیل این ویژگی‌ها، فراموادها به طور گسترده‌ای در بخش‌های مختلفی مانند آنتن‌های دوقطبی الکتریکی و مغناطیسی کوچک، جاذب‌های فراموادی، طراحی فیلتر، کوپلر، پنهان‌سازی نوری، سوپرلنرها، آنتن‌های ماکروویو، کاربردهای ماهواره‌ای، کاهش SAR و سنسورها استفاده می‌شوند.



شکل ۳-۳ ساختار کلی متامتریال‌های SRR [۴۳].

¹ metamaterials

۳-۲- تحلیل و طراحی SRR

ساختارهای رزونانسی مبتنی بر رینگ‌های رزونانسی، انعطاف‌پذیری لازم برای دستیابی هم‌زمان به پاسخ فرکانسی کاملاً متقارن، پهنای باند قابل‌کنترل، ابعاد کوچک و تلفات کم را فراهم می‌آورند. در صورتی که در شیوه‌های متعارف دستیابی هم‌زمان به خصوصیات بالا بسیار دشوار است.

شکل اولیه SRRها از دو حلقه فلزی متحدالمرکز تشکیل شده است که روی یک دی‌الکتریک سوار می‌شوند. روی هر یک از این حلقه‌ها برش‌هایی وجود دارد که در خلاف جهت هم قرار گرفته‌اند و توسط میدان مغناطیسی خارجی متغیر با زمان که در راستای محور آن پلاریزه شده است تحریک می‌شود و جریان‌های الکتریکی روی هر یک از این حلقه‌ها ایجاد می‌شود. به دلیل وجود این برش‌ها روی حلقه‌ها، جریان‌های به وجود آمده در فاصله بین حلقه‌ها نشست کرده و از یک حلقه به حلقه دیگر جابه‌جا شده و در نهایت جریان جابه‌جایی بزرگی ایجاد می‌شود. این جابه‌جایی جریان بین حلقه‌ها، باعث ایجاد خاصیت خازنی می‌شود. در نتیجه فاصله بین دو شکاف در نقش خازن C و حلقه به‌عنوان یک القاگر عمل می‌کند و انرژی می‌تواند دچار اتلاف اهمی یا در فضای آزاد انتشار یابد که این اثر را می‌توانیم در غالب مقاومت مؤثر حلقه در نظر بگیریم.

در حالت کلی حلقه SRR به طور هم‌زمان، دوقطبی الکتریکی و دوقطبی مغناطیسی را دارا می‌باشد. به طور معمول گشتاور دوقطبی الکتریکی، به‌وسیله بارهای جدا شده در صفحات خازن و فاصله بین صفحات خازن حاصل می‌شود. از دیدگاه مدار معادل هر SRR، در پاسخ به میدان خارجی به‌عنوان یک مدار LC رفتار می‌کند. یک تخمین دقیق از القاگر معادل L و خازن C می‌تواند یک برآورد از فرکانس تشدید در یک SRR را به ما بدهد.

آنچه بیشتر مورد بررسی قرار می‌گیرد، خازن C است که می‌تواند از شکاف بین دو حلقه به وجود آید تجزیه و تحلیل شار جریان و بخش بار نشان می‌دهد که خطوط جریان تحریک شده به وسیله‌ی میدان مغناطیسی خارجی، از یک مسیر پیچیده پیروی می‌کند. این مسیر از یک حلقه تا حلقه دیگر در طول شکاف بین آنها، گسترده شده است.

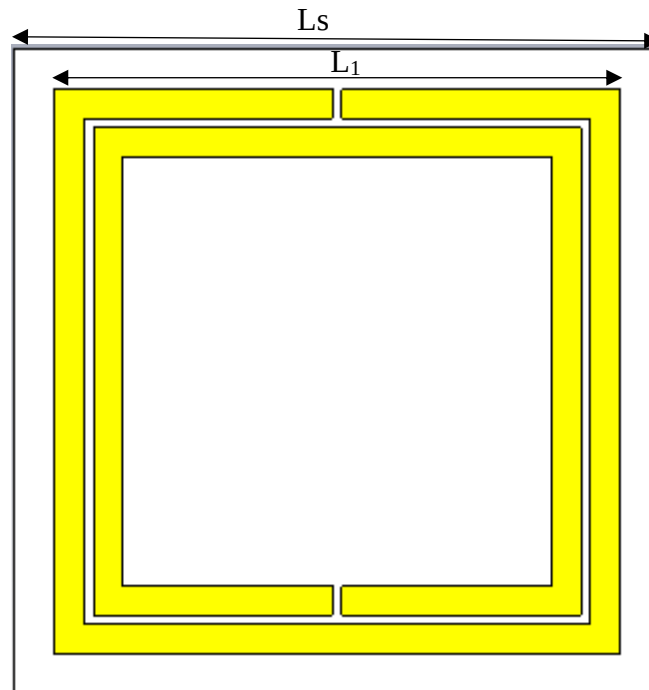
برای داشتن گذردهی الکتریکی (ϵ) بر حسب فرکانس، باید میدان الکتریکی موازی شکاف‌ها باشد. در این حالت نفوذپذیری مغناطیسی (μ)، مقدار عددی می‌شود و عدد موج برای فرکانس‌هایی که در آن گذردهی الکتریکی منفی است، می‌تواند موهومی باشد در نتیجه در فرکانس موردنظر، یک باند توقف داریم. برای رسیدن به نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس نیز باید میدان مغناطیسی عمود بر حلقه باشد. در این مورد گذردهی الکتریکی دارای مقداری عددی می‌باشد و برای فرکانس‌هایی که نفوذپذیری مغناطیسی منفی است، عدد موج مقداری موهومی خواهد داشت. در نتیجه یک باندتوقف در فرکانس موردنظر داریم.

در این فصل دو SRR یکی با thin wire و SRR دوم بدون thin wire جهت کاهش SAR تلفن‌همراهی که آنتن آن از نوع آنتن Helix می‌باشد، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز طراحی گردید. SRRها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که در فرکانس موردنظر با ایجاد یک ϵ منفی یک باند عدم عبور ایجاد می‌کنند. از طرفی زمانی که SRR بر روی گوشی نصب می‌شود، تأثیرات گوشی و سر انسان بر SRR باعث می‌شود که فرکانس رزونانس آن به سمت فرکانس‌های بالاتر، جابه‌جا شود؛ بنابراین، جهت کاهش حداکثر میزان SAR توسط SRR بدون thin wire، با استفاده از روش آزمون و خطا دریافتیم، زمانی که SRR بر روی گوشی نصب می‌شود، فرکانس رزونانس آن از بازه‌ی فرکانسی ۰/۸۹۳ تا ۰/۹۱۲ گیگاهرتز به بازه‌ی فرکانسی ۱/۰۴۰ تا ۱/۰۷۰ گیگاهرتز جابه‌جا می‌شود. در نتیجه SRR موردنظر در بازه‌ی فرکانسی ۱/۰۴۰ تا ۱/۰۷۰ گیگاهرتز طراحی می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است، ساختار SRR موردنظر به‌گونه‌ای طراحی شده که دو حلقه مربعی شکاف‌دار متحدالمرکز از جنس مس انیلد^۱ با ضخامت ۰/۰۱۷ میلی‌متر بر روی سطح بالایی زیرلایه دی‌الکتریک از جنس RogersRO3210 با گذردهی نسبی الکتریکی $\epsilon_r = 10.8$ ، نفوذپذیری نسبی مغناطیسی $\mu_r = 1$ ، تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۷ و ضخامت ۰/۵۰۸ میلی‌متر ساخته شده است. همچنین طول حلقه مسی بیرونی $L_1 = 35.15$ ، طول حلقه مسی داخلی $L_2 = 30.35$ ، فاصله‌ی

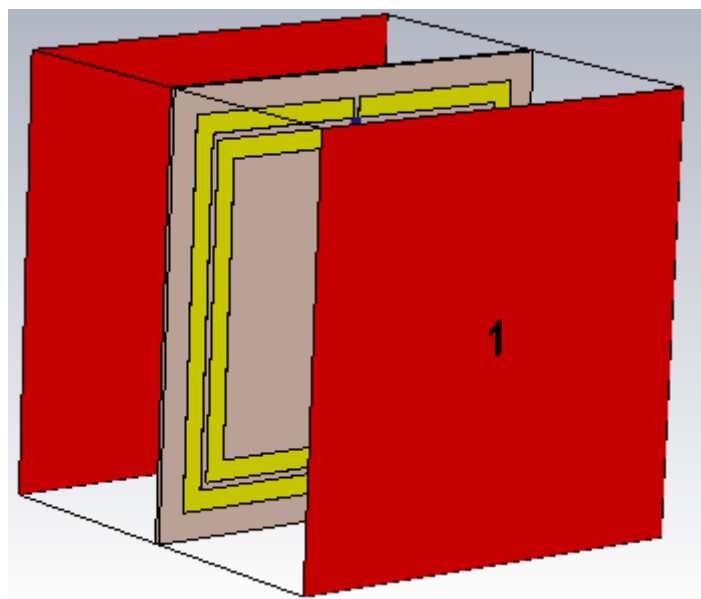
¹ Copper annealed

بین دو حلقه مسی $d = 0.6$ ، عرض حلقه‌های مسی $C = 1.8$ ، عرض شکاف حلقه‌ها $g = 0.6$ و طول زیرلایه دی‌الکتریک مربعی $L_s = 44.3$ میلی‌متر می‌باشد.



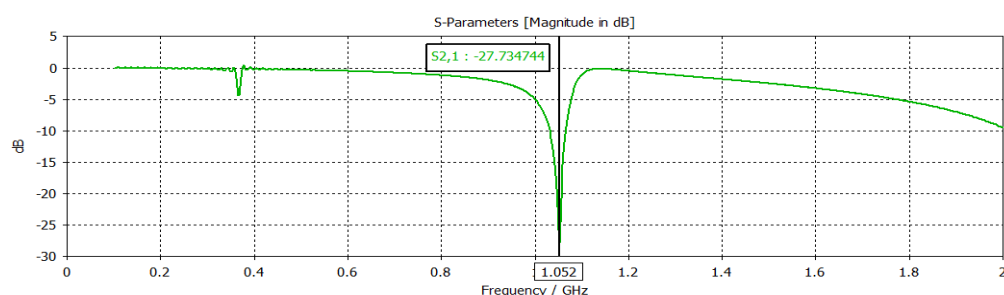
شکل ۳-۴ طراحی SRR بدون thin wire

تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌ساز الکترومغناطیسی پرکاربرد CST Microwave Studio انجام شده است. نرم‌افزار CST پاسخ سریع و دقیقی برای حل مسائل الکترومغناطیسی دارد. ساختار SRR بین پورت‌های موج‌بری اجرا می‌شود که در آن عملکرد تشدیدکننده، در میدان الکترومغناطیسی بررسی می‌شود. همان‌طور که در شکل ۳-۵ نشان داده شده است، موج الکترومغناطیسی بین پورت‌ها در محور Z اعمال می‌شود. دو درگاه موجبر در جلو و عقب ساختار SRR قرار داده شده است. پورت‌ها در محور Z مثبت و منفی تنظیم شده و از حالت موج الکترومغناطیسی عرضی (TEM) استفاده می‌شود. در همین حال، برای شرایط مرزی، محور x به‌عنوان PEC در نظر گرفته شده و محور y به‌عنوان PMC انتخاب می‌شود.

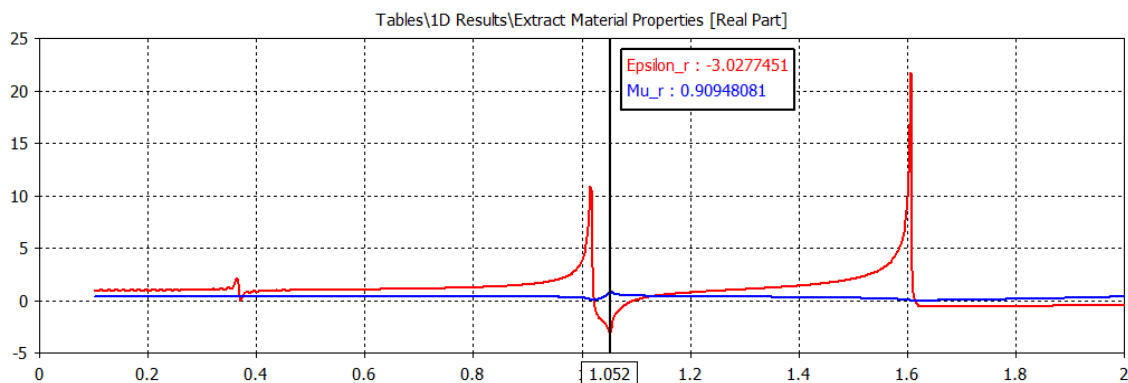


شکل ۳-۵ شبیه سازی عددی سلول واحد فراموادی (SRR)

در شکل ۳-۶ منحنی مشخصات انتقال شبیه سازی شده (S_{21}) ، SRR مورد نظر نشان داده شده است. باند عدم عبور در بازه ی فرکانسی ۱۰۴۰ تا ۱۰۷۰ مگاهرتز با در نظر گرفتن مقادیر پایین تر از -10 dB مشاهده می شود. همچنین منحنی گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی بر حسب فرکانس، در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. برای انجام شبیه سازی سلول واحد فراموادی، بازه ی فرکانسی از ۰/۱ گیگاهرتز تا ۲ گیگاهرتز در نظر گرفته شده است. همان طور که مشاهده می شود در بازه فرکانسی ۱/۰۲۳ تا ۱/۰۸۵ گیگاهرتز ϵ_r دارای مقداری منفی و μ_r مثبت می باشد که این باعث ایجاد یک باند عدم عبور در فرکانس مورد نظر می شود که به وسیله ی آن اهداف این پژوهش تحقق می یابد.

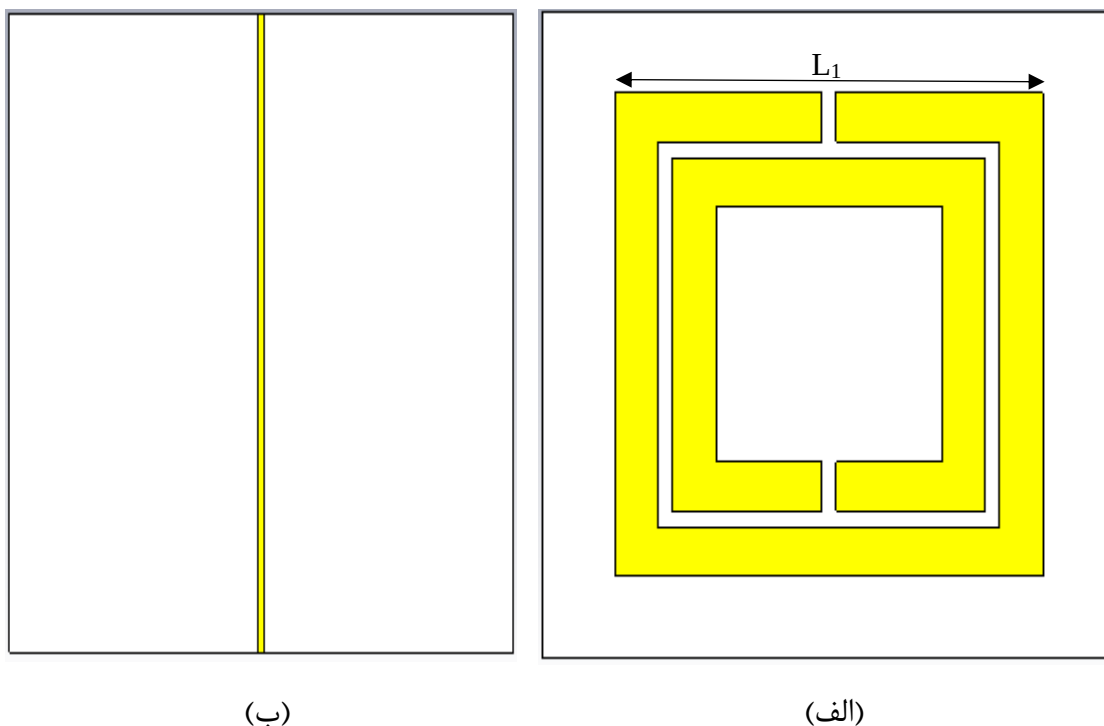


شکل ۳-۶ منحنی S_{21} شبیه سازی شده ساختار SRR بدون thin wire



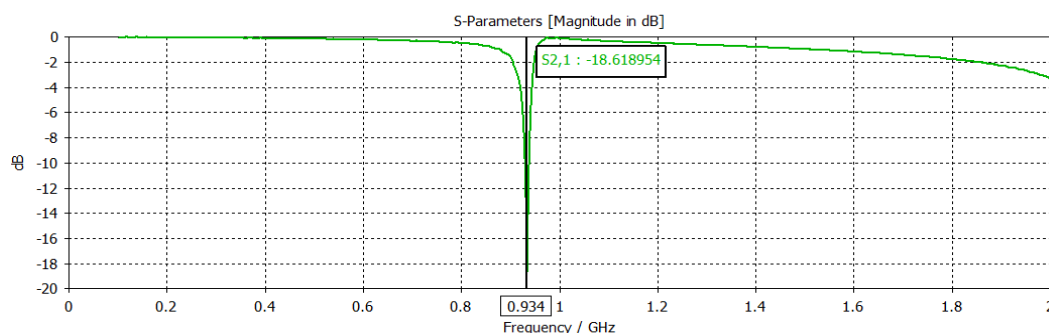
شکل ۳-۷ استخراج مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r

SRR با thin wire مشابه SRR بدون thin wire زمانی که بر روی گوشی نصب می‌شود، تأثیرات گوشی و سر انسان بر SRR باعث می‌شود که فرکانس رزونانس آن به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شود. با استفاده از روش آزمون و خطا ثابت می‌شود که این جابه‌جایی فرکانسی از بازه‌ی فرکانسی ۸۹۲ تا ۹۲۹ مگاهرتز، به بازه‌ی فرکانسی ۹۲۹ تا ۹۳۸ مگاهرتز می‌باشد. بنابراین؛ جهت حداکثر میزان کاهش SAR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، SRR موردنظر در بازه فرکانسی ۹۲۹ تا ۹۳۸ مگاهرتز طراحی می‌شود. به همین ترتیب SRR با thin wire، به وسیله‌ی حلقه‌های مربعی شکاف‌دار متحدالمرکزی از جنس مس با ضخامت ۰/۱۷ میلی‌متر که بر روی زیرلایه دی‌الکتریک از جنس Rogers RO3210 با گذردهی نسبی الکتریکی $\epsilon_r = 10.8$ ، نفوذپذیری نسبی مغناطیسی $\mu_r = 1$ ، تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۷ و ضخامت ۰/۵۰۸ میلی‌متر ساخته شده است، طراحی می‌گردد. با این تفاوت که یک‌لایه مسی به عرض ۰/۲۸ میلی‌متر و ضخامت ۰/۰۱۷ میلی‌متر به‌عنوان thin wire به پشت زیرلایه متصل می‌گردد، و باعث می‌شود ابعاد SRR با thin wire، در مقایسه با SRR بدون thin wire به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد. طول حلقه مسی بیرونی $L_1 = 17.8$ ، طول حلقه مسی داخلی $L_2 = 13$ ، طول زیرلایه دی‌الکتریک $L_s = 23.8$ ، فاصله‌ی بین دو حلقه مسی $d = 0.6$ ، عرض حلقه‌های مسی $C = 1.8$ و عرض شکاف حلقه‌ها $g = 0.6$ می‌باشد. نمای جلویی و پشتی SRR طراحی شده با thin wire در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.

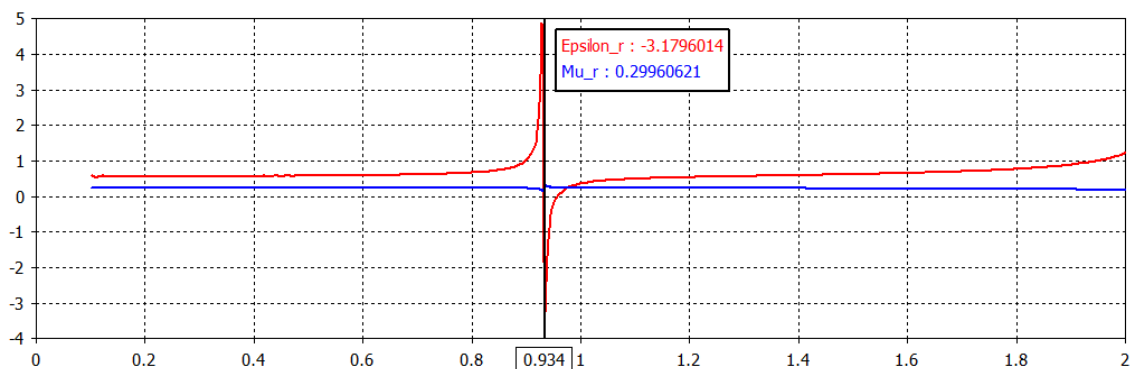


شکل ۳-۸ (الف) نمای جلویی SRR با thin wire و (ب) نمای پشتی

نحوه‌ی شبیه‌سازی SRR با thin wire مشابه SRR بدون thin wire می‌باشد. پارامتر انتقال (S_{21}) در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود SRR در بازه‌ی فرکانسی ۹۲۹ تا ۹۳۸ مگاهرتز رزونانس می‌کند و در فرکانس ۹۳۴ مگاهرتز S_{21} دارای پایین‌ترین مقدار می‌باشد. همچنین در شکل ۳-۱۰ مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r نشان داده شده است که در بازه‌ی فرکانسی موردنظر ϵ_r دارای مقداری منفی و μ_r دارای مقداری مثبت است و باعث ایجاد یک باند عدم عبور در فرکانس موردنظر می‌شود.



شکل ۳-۹ منحنی S_{21} ساختار SRR با thin wire



شکل ۳-۱۰ استخراج مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r

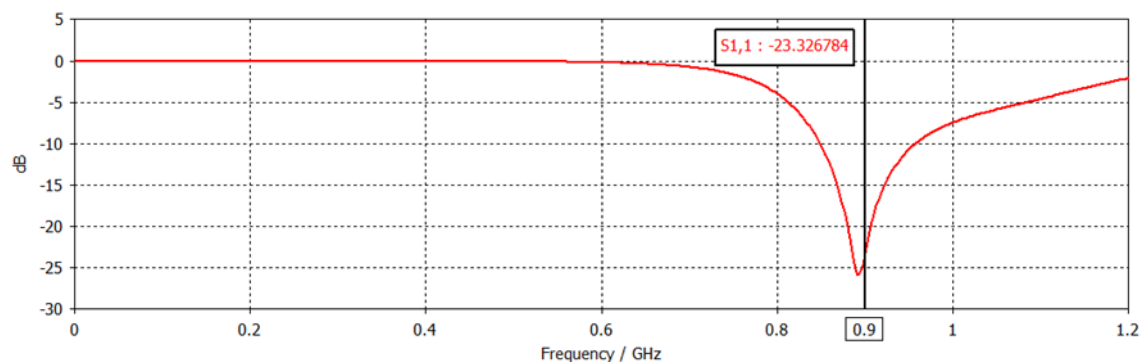
۳-۳- مدل تلفن همراه

تلفن همراه شامل یک بدنه‌ی مکعبی به ابعاد $18 \times 40 \times 10$ و از جنس رسانای الکتریکی کامل می‌باشد. یک آنتن هلیکس، در وجه بالایی بدنه مکعبی شکل نصب شده است. توان تشعشعی آنتن در 0.25 W تنظیم شده است.

آنتن موردنظر در فرکانس 900 مگاهرتز تشعشع می‌کند و با هادی الکتریکی کامل مدل شده و به‌گونه‌ای طراحی شده است که پاسخ S_{11} نسبت به باند فرکانس موردنظر کمتر از -10 dB باشد. پورت بین بدنه تلفن همراه و آنتن تعریف می‌شود و منبع تحریک از نوع Discrete port با امپدانس اهمی 50 در نرم‌افزار CST انتخاب شده است. منحنی تلفات بازگشتی آنتن در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود پهنای باند آنتن از 850 تا 950 مگاهرتز می‌باشد.



شکل ۳-۱۱ مدل تلفن همراه با آنتن هلیکس

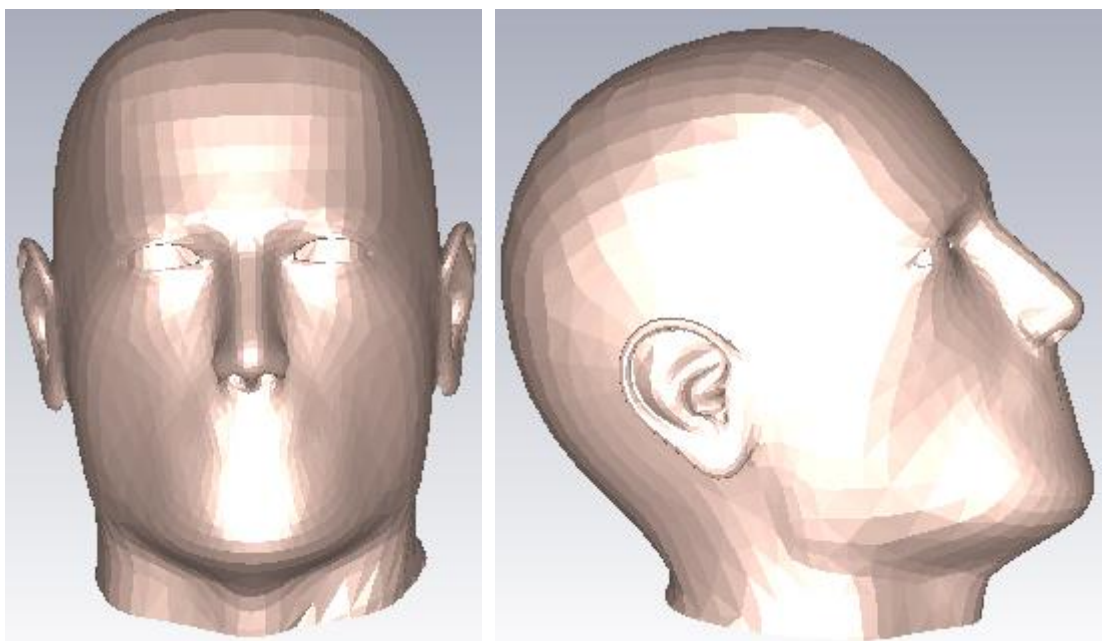


شکل ۳-۱۲ منحنی S_{11} آنتن هلیکس

۳-۴- مدل سر

در این کار پژوهشی از یک مدل سر انسان گونه استفاده شده است که توسط خود CST در قالب یک فایل نمونه ارائه می‌شود. این مدل شامل یک پوسته است که درون آن با مایعی پر شده و به این صورت خواص الکترومغناطیسی بافت‌های بدن را شبیه‌سازی می‌کند. به طور معمول، این مدل فانتوم ساده‌ی سر با مدل واقعی سر انسان یکنواخت است و از استانداردهای IEEE پیروی می‌کند. به‌طور کلی، این مدل بر اساس اندازه‌ی ۹۰ درصد از سر مردان به‌منظور استانداردسازی ساخته شده است.

خواص دی‌الکتریک مدل فانتوم سر از طریق خواص بافت‌های داخلی آناتومیک سر، به‌دست‌آمده است. بنابراین؛ پوسته بیرونی، دارای مقدار نفوذپذیری مستقل از فرکانس $3/7$ و رسانایی الکتریکی 0.0016 S/m است. از سویی دیگر، مایع شبیه‌ساز بافت دارای خواص دی‌الکتریک وابسته به فرکانس می‌باشد. با افزایش فرکانس، قسمت حقیقی گذردهی مختلط نسبی در بافت کاهش و رسانایی آن افزایش می‌یابد. میزان گذردهی الکتریکی نسبی مایع شبیه‌ساز بافت، در فرکانس 900 مگاهرتز $\epsilon_r = 42$ و میزان رسانایی الکتریکی 0.99 (S/m) می‌باشد. همچنین در فرکانس 1800 مگاهرتز میزان گذردهی الکتریکی مایع شبیه‌ساز بافت، $\epsilon_r = 40$ و رسانایی الکتریکی آن 1.4 (S/m) می‌باشد. مدل فانتوم سر استفاده‌شده، در شکل ۳-۱۳ نشان داده‌شده است.



(ب)

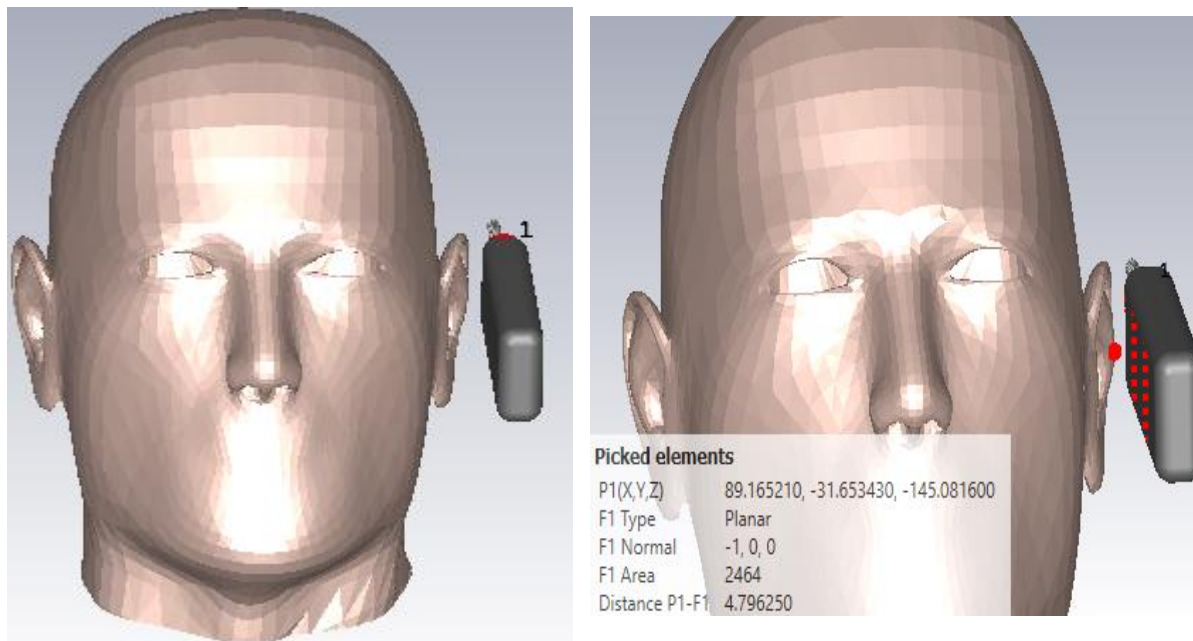
(الف)

شکل ۳-۱۳ مدل فانتوم سر، (الف) نمای جانبی و (ب) نمای جلویی

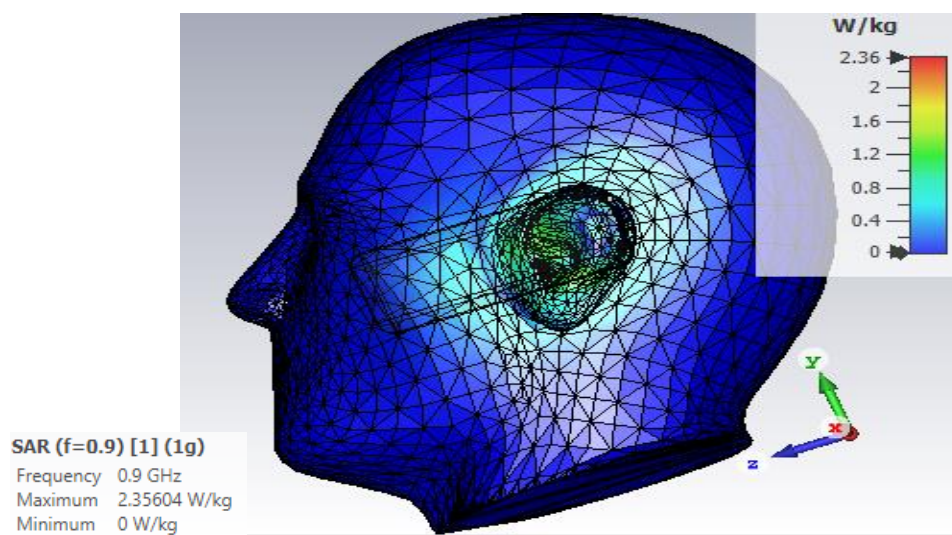
۳-۵- کاهش SAR تلفن همراه دارای آنتن هلیکس

برای بررسی میزان کاهش SAR، توسط سلول واحد فرامواد طراحی شده، ابتدا میزان SAR در حالتی که SRR هنوز به گوشی متصل نشده است، توسط نرم افزار CST و در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، به صورت عددی شبیه سازی می شود. فاصله ی بین تلفن همراه و مدل سر، تأثیرات قابل توجهی بر روی مقادیر SAR دارد. بر اساس خواص بافت، میزان SAR با افزایش توان تابشی آنتن تلفن همراه، به ویژه هنگامی که فاصله بین سر و تلفن همراه در حال کاهش است، افزایش می یابد و با افزایش فاصله تلفن همراه از مدل سر، میزان SAR کاهش می یابد. برای این پژوهش مطابق با استاندارد نرم افزار CST، تلفن همراه در فاصله ی ۴/۸ میلی متری از لبه ی بالایی گوش سمت چپ مدل فانتوم سر قرار می گیرد که میزان SAR در این حالت برابر ۲.۳۵۶۰۴ W/Kg است. در ادامه SRR با thin wire و SRR بدون thin wire به تلفن همراه متصل می شود و با مقایسه ی مقادیر SAR قبل و بعد از اتصال SRR میزان کاهش SAR مشخص می شود.

در شکل ۳-۱۴ نحوه‌ی قرارگرفتن تلفن همراه در مقابل فانتوم سر و در شکل ۳-۱۵ مقادیر SAR یک گرم قبل از اتصال SRR طراحی شده به تلفن همراه، نشان داده شده است.



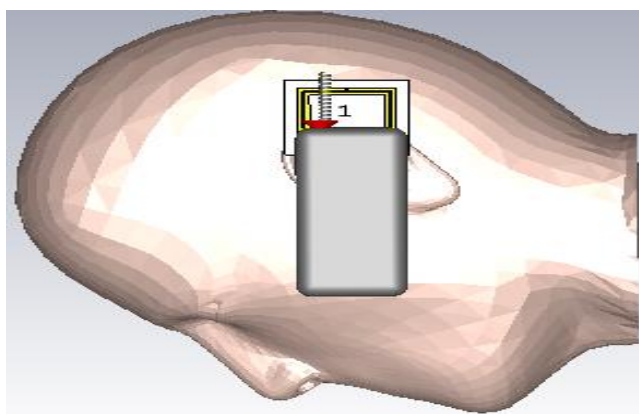
شکل ۳-۱۴ قرار گرفتن تلفن همراه در مقابل فانتوم سر



شکل ۳-۱۵ مقادیر SAR یک گرم قبل از اتصال SRR به تلفن همراه

۳-۵-۱- کاهش SAR توسط SRR بدون thin wire

به منظور کاهش SAR تلفن همراه، SRR طراحی شده بین تلفن همراه و مدل سر قرار می گیرد. در ابتدا با استفاده از روش آزمون و خطا، فاصله‌ای بین تلفن همراه و SRR مورد نظر که در آن بیشترین میزان کاهش SAR رخ می دهد تعیین می شود، به این صورت که در مرحله‌ی اول SRR مورد نظر کاملاً به تلفن همراه متصل می باشد و در مراحل بعدی به اندازه‌ی یک میلی متر از تلفن همراه فاصله می گیرد. لازم به ذکر است که کاهش SAR باید به گونه‌ای باشد که پس از قراردادن SRR در مقابل تلفن همراه، تلفات بازگشتی (S_{11}) آنتن هلیکس در فرکانس مورد نظر (۹۰۰ مگاهرتز)، کمتر از 10 dB- باشد و در حین استفاده از تلفن همراه، کیفیت مکالمات مطلوب باشد. زمانی که SRR کاملاً به تلفن همراه متصل است، مقادیر SAR کاهش می یابد، اما S_{11} دارای مقادیری بالاتر از 10 dB- می باشد که مطلوب نیست. سرانجام فاصله‌ی ۱/۸۵ میلی متر از تلفن همراه به عنوان فاصله‌ای که نسبت به سایر فواصل، تلفن همراه دارای مقادیر SAR کمتری می باشد و تلفات بازگشتی مقادیری کمتر از 10 dB- دارد، در نظر گرفته می شود. پس از انتخاب فاصله‌ی مناسب SRR تا تلفن همراه، موقعیت SRR قرار داده شده در مقابل تلفن همراه، مورد بررسی قرار می گیرد. برای این کار SRR در جهات مختلف جابه جا می شود، تا بهترین موقعیت از نظر میزان کاهش SAR با در نظر گرفتن تلفات بازگشتی کمتر از 10 dB- انتخاب شود. در نهایت موقعیت نشان داده شده در شکل ۳-۱۶ به عنوان بهترین موقعیت انتخاب می شود.

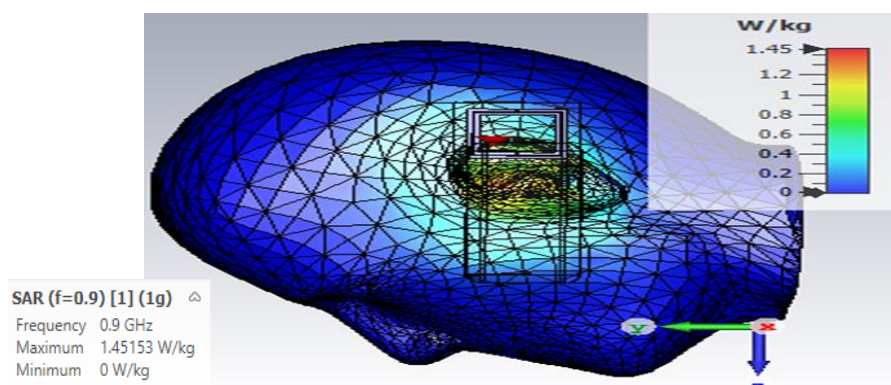


شکل ۳-۱۶ موقعیت قرارگیری SRR بدون thin wire

به‌طورکلی، در فرکانس رزونانس ۹۰۰ مگاهرتز، بیشترین درصد کاهش SAR در موقعیت نشان‌داده‌شده، نسبت به سایر موقعیت‌ها وجود دارد. در همین حال، موقعیت‌های دیگر میزان کاهش SAR کمتر و یا حتی ممکن است در برخی از موقعیت‌ها، میزان SAR افزایش یابد. این پدیده‌ها ممکن است به این دلیل رخ دهد که کل انرژی رادیو فرکانسی^۱ در برخی از موقعیت‌ها، قادر به جذب درون SRR پیشنهادی نیست. این امر باعث افزایش مقادیر SAR برای چندین موقعیت می‌شود.

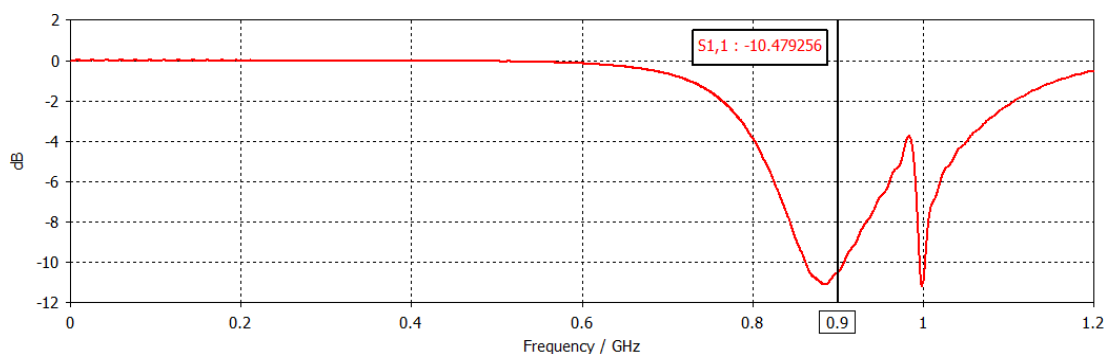
از این‌رو، در اینجا می‌توان نتیجه گرفت که موقعیت ساختار فرامادی مقادیر کاهش SAR را تحت تأثیر قرار می‌دهد و موقعیت ساختار تأثیر زیادی بر نتیجه دارد. بنابراین؛ از طریق روش آزمون و خطا، دریافتیم که موقعیت نشان‌داده‌شده، عملکرد بهتری را نسبت به سایر موقعیت‌ها نشان می‌دهد و ساختار SRR جهت کاهش حداکثر میزان SAR لزوماً نزدیک آنتن قرار نمی‌گیرد.

در نتیجه پس از به‌دست‌آوردن جابه‌جایی فرکانسی در مرحله‌ی طراحی SRR و برای زمانی که SRR در مقابل تلفن همراه قرار می‌گیرد، کاهش SAR در این پژوهش، صرفاً به موقعیت طراحی شده در مقابل تلفن همراه، نوع SRR طراحی شده و فاصله‌ی مناسب SRR تا تلفن همراه بستگی دارد. همان‌طور که در شکل ۳-۱۷ نشان‌داده‌شده است پس از قرارگیری SRR در فاصله و موقعیت به‌دست‌آمده میزان SAR برابر با 1.45153 W/Kg می‌باشد در نتیجه SRR بدون thin wire می‌تواند SAR را به میزان 38.49 % کاهش دهد.



شکل ۳-۱۷ مقادیر SAR یک گرم پس از اتصال SRR بدون thin wire

¹ radiofrequency energy

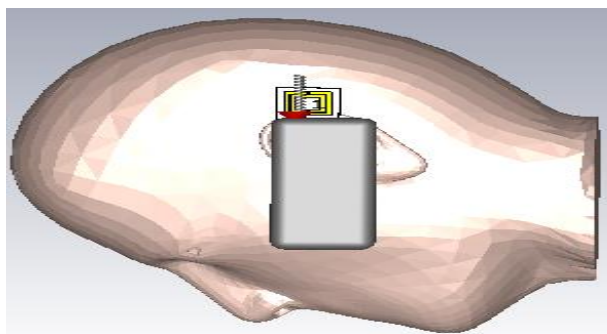


شکل ۳-۱۸ مقادیر S_{11} آنتن هلیکس پس از قرار گرفتن SRR در مقابل تلفن همراه

در شکل ۳-۱۸ مقادیر S_{11} آنتن تلفن همراه پس از قراردادن SRR در مقابل تلفن همراه را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز S_{11} دارای مقدار -10.47 dB می‌باشد که قابل قبول است و مکالمات دارای کیفیت مطلوبی می‌باشد.

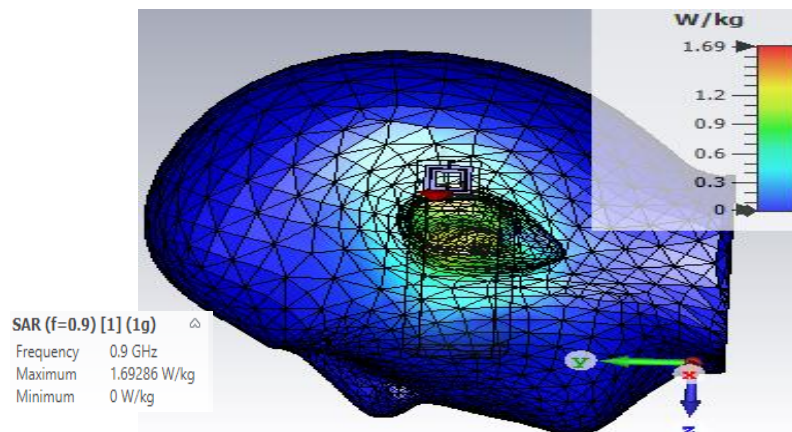
۳-۵-۲- کاهش SAR توسط SRR با thin wire

مشابه SRR بدون thin wire در ابتدا با استفاده از روش آزمون و خطا، فاصله‌ای بین تلفن همراه و SRR که در آن بیشترین میزان کاهش SAR رخ می‌دهد، تعیین می‌شود. بنابراین؛ فاصله‌ی ۱/۲ میلی‌متر از تلفن همراه، به عنوان فاصله‌ای که نسبت به سایر فواصل، تلفن همراه دارای مقدار SAR کمتری می‌باشد و تلفات بازگشتی آنتن، مقادیری کمتر از 10 dB دارد، در نظر گرفته می‌شود. سپس با جابه‌جایی میلی‌متری SRR در هر چهار طرف تلفن همراه، موقعیت مناسب از نظر کاهش حداکثر میزان SAR، با حفظ مقادیر کمتر از 10 dB به دست می‌آید که این موقعیت در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است.



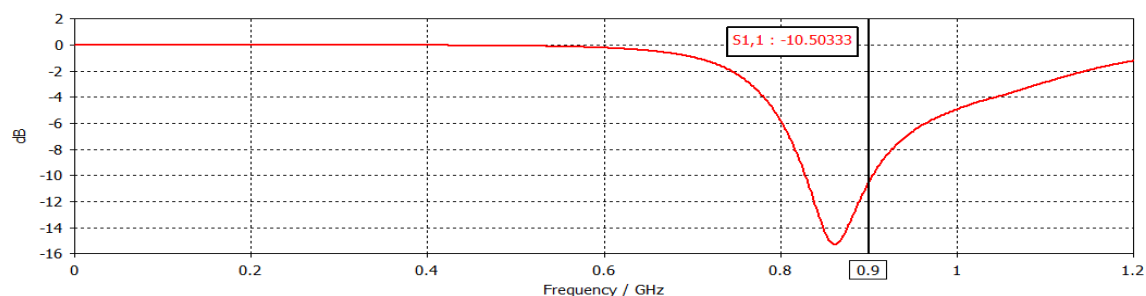
شکل ۳-۱۹ موقعیت قرارگیری SRR با thin wire

در شکل ۳-۲۰ میزان SAR ناشی از آنتن هلیکس تلفن همراه، زمانی که SRR با thin wire در موقعیت و فاصله‌ی بهینه از نظر میزان کاهش SAR و با حفظ مقادیر S_{11} کمتر از -10 dB مقابل تلفن همراه قرار گرفته است، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، میزان SAR در این حالت برابر 1.69286 W/Kg می باشد. در نتیجه با قراردادن SRR با thin wire می توانیم SAR را به میزان 28.26 % کاهش دهیم. در حالت استفاده از SRR با thin wire نسبت به SRR بدون thin wire با کاهش SAR کمتری مواجه می شویم، اما ابعاد SRR با thin wire در مقایسه با ابعاد SRR بدون thin wire، ۴۶ درصد کاهش می یابد.



شکل ۳-۲۰ مقادیر SAR یک گرم پس از اتصال SRR با thin wire

مقادیر S_{11} پس از قراردادن SRR در مقابل تلفن همراه در شکل ۳-۲۱ نشان داده است که بیانگر مقادیر کمتر از -10 dB در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز می باشد.

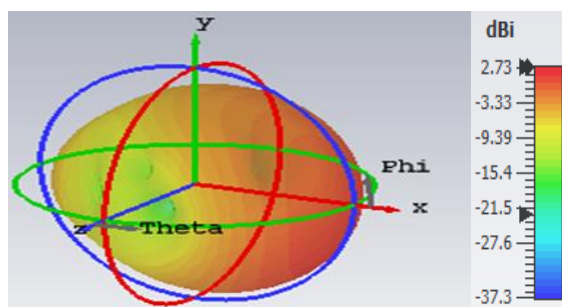


شکل ۳-۲۱ مقادیر S_{11} آنتن هلیکس پس قرار گرفتن SRR در مقابل تلفن همراه

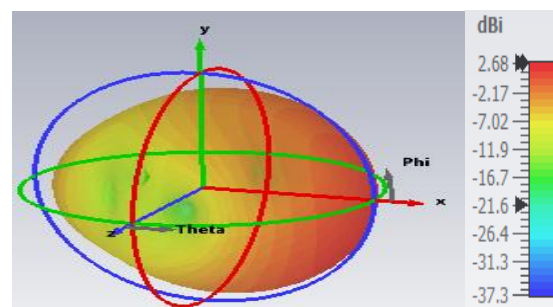
در جدول ۳-۱ میزان کاهش SAR توسط SRR بدون thin wire و SRR با thin wire، به همراه مقادیر S_{11} آنتن هلیکس پس از قرار دادن SRRها در مقابل تلفن همراه، ابعاد SRRها و درصد کوچک سازی SRR با thin wire، نسبت به SRR بدون thin wire ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود، با استفاده از SRR بدون thin wire می توان SAR را به میزان بیشتری، در حدود ۳۸ درصد کاهش داد، این در حالی است که با به کارگیری SRR با thin wire، ابعاد SRR نسبت به SRR بدون thin wire به میزان ۴۶/۲۷ درصد، کوچک تر می شود.

جدول ۳-۱ مقایسه ی کاهش SAR و درصد کوچک سازی SRR با thin wire نسبت به SRR بدون thin wire

	درصد کاهش SAR (1g)	S ₁₁	ابعاد	درصد کوچک سازی SRR
SRR with thin wire	28.26%	-10.5	23.8*23.8	46.27%
SRR without thin wire	38.49%	-10.479	44.3*44.3	-



(ب)



(الف)

شکل ۳-۲۲ الگوی تابشی آنتن Helix (الف): در حالت اتصال SRR و (ب): بدون اتصال SRR

فصل چهارم

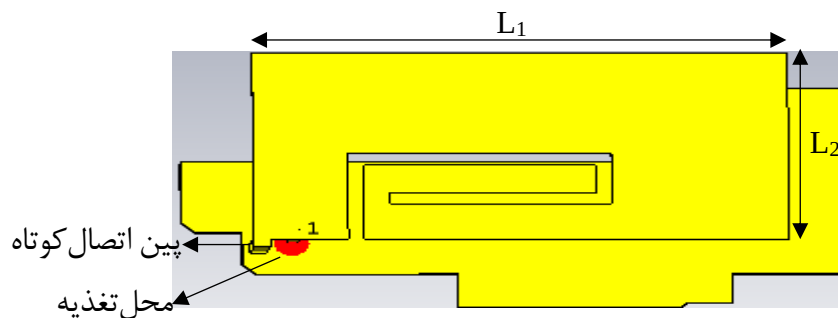
SAR کاهش میزان

PIFA تلفن همراه با آنتن

۴-۱- مدل تلفن همراه

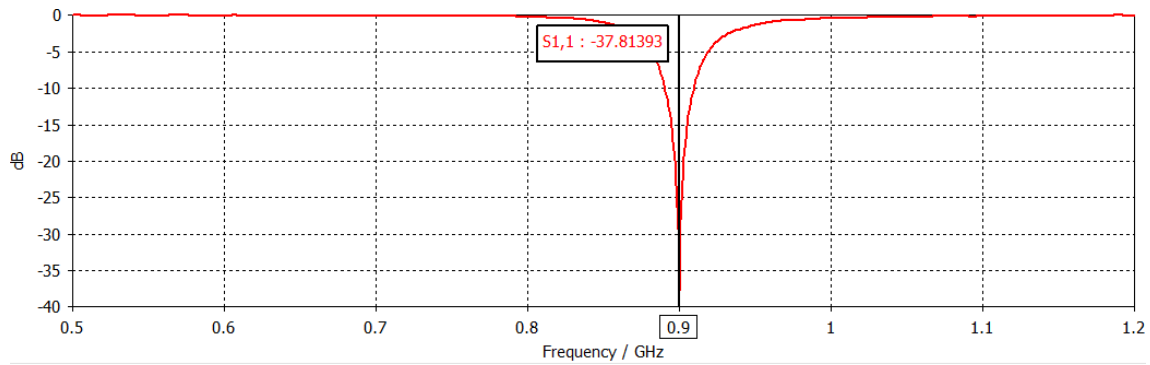
اجزای تلفن همراه شامل، صفحه‌ی نمایش، مدارات، برد (PCB)، باتری، کانکتور^۱، دوربین، آنتن و محفظه‌ی پلاستیکی با $\epsilon_r = 2.2$ می‌باشد. همچنین تلفن همراه دارای ابعاد $۶۹/۳۷ \times ۷/۸۸ \times ۱۳۶/۴۲$ می‌باشد. در این بخش از یک آنتن PIFA داخلی، به‌عنوان عنصر تابشی استفاده می‌شود. برای این منظور دو آنتن PIFA، برای رزونانس در باندهای ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز که نشان‌دهنده‌ی کاربردهای جهانی در ارتباطات تلفن همراه است، طراحی شده است. آنتن PIFA شامل پچ تشعشعی، زمین آنتن، زیرلایه دی‌الکتریک از جنس هوا با $\epsilon_r = 1$ و پین‌های اتصال کوتاه می‌باشد. به علت محدودیت فضا، در داخل تلفن همراه، آنتن PIFA به‌گونه‌ای طراحی شده که PCB تلفن همراه از جنس مس آنیل شده با ضخامت $۱/۱۲۲$ میلی‌متر، به‌عنوان زمین آنتن استفاده شده است. پچ تشعشعی آنتن توسط پین‌های اتصال کوتاه، در گوشه سمت راست PCB اتصال کوتاه شده است. پین اتصال کوتاه باعث القا امپدانس آنتن می‌شود که برای تعیین فرکانس تشدید بسیار مهم است. پورت از نوع Discrete Port با امپدانس ۵۰ اهم در فاصله‌ی بین پین‌های اتصال کوتاه و PCB قرار می‌گیرد.

آنتن طراحی شده در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. ضخامت پچ تشعشعی $۰/۰۵$ میلی‌متر و از جنس مس آنیل شده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابعاد پچ مستطیلی $L_1 = 40.864$ و $L_2 = 20.267$ میلی‌متر می‌باشد و چند شکاف مستطیلی متصل به هم به ضخامت $۲/۲۱$ میلی‌متر بر روی پچ ایجاد شده است. توان خروجی آنتن جهت محاسبه‌ی SAR در 0.5 W تنظیم شده است.



شکل ۴-۱ مدل آنتن PIFA در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

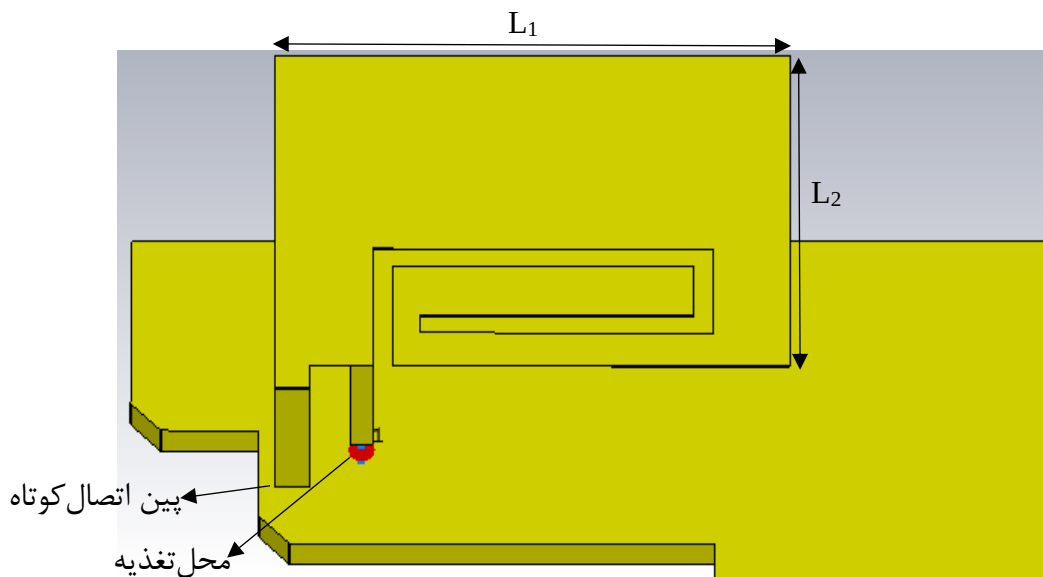
¹ Connector



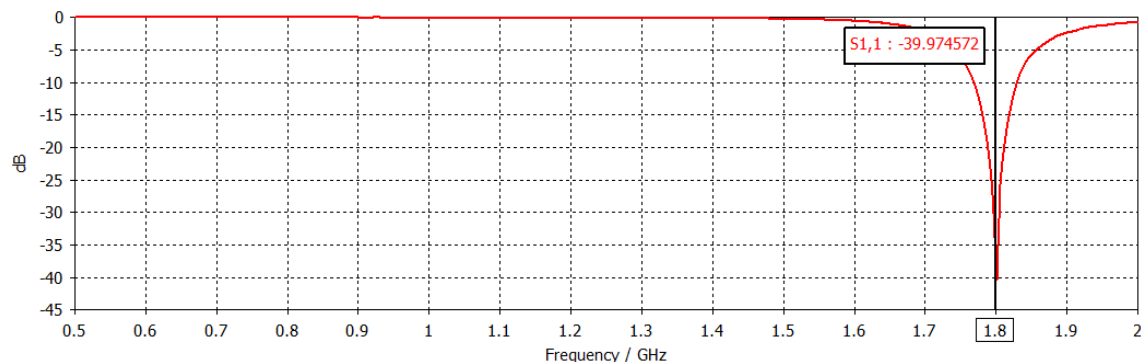
شکل ۲-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

پارامتر S_{11} آنتن طراحی شده در شکل ۲-۴ نشان داده شده است. آنتن به گونه‌ای طراحی شده است که پاسخ S_{11} نسبت به باند فرکانس موردنظر، کمتر از -10 dB باشد. پهنای باند آنتن از ۸۹۱ تا ۹۰۹ مگاهرتز و میزان S_{11} در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز برابر -37.81 dB می‌باشد.

در شکل ۳-۴ آنتن طراحی شده در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز مشاهده می‌شود. پچ مستطیلی دارای ابعاد $L_1 = 18.595$ و $L_2 = 12.57$ با ضخامت ۰/۰۵ میلی‌متر از جنس مس آنیل می‌باشد. چند شکاف مستطیلی متصل به هم به ضخامت ۰/۷۱ میلی‌متر بر روی پچ ایجاد شده است و توان خروجی آنتن جهت محاسبه‌ی SAR در 0.25 W تنظیم می‌شود.



شکل ۳-۴ مدل آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰

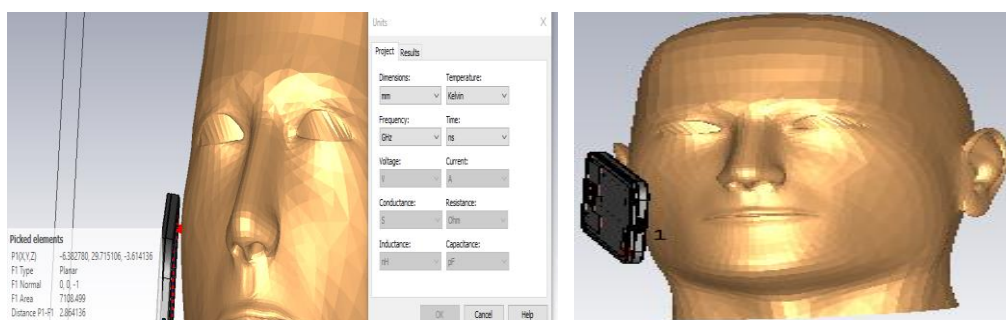


شکل ۴-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

پارامتر S_{11} آنتن طراحی شده در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. بازه‌ی فرکانسی شبیه‌سازی ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ مگاهرتز می‌باشد. پهنای باند آنتن از ۱۷۷۰ تا ۱۸۲۹ مگاهرتز و میزان S_{11} در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز -۳۹.۹۷ dB می‌باشد.

۴-۲- مدل سر

مدل سر استفاده شده در این فصل مشابه فصل سوم یک مدل سر انسان گونه است که توسط خود CST در قالب یک فایل نمونه ارائه شده است. این مدل شامل یک پوسته است که درون آن با مایعی پر شده که خواص الکترومغناطیسی بافت‌های بدن را شبیه‌سازی می‌کند و از استانداردهای IEEE پیروی می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است، آنتن در سمت راست مدل فانتوم سر قرار گرفته است. فاصله‌ی تلفن همراه تا مدل سر مطابق با استاندارد نرم‌افزار CST ۲/۸۶ میلی‌متر می‌باشد.



(الف)

(ب)

شکل ۴-۵ (الف) نمایش فاصله تلفن همراه تا سر و (ب) نمای جلویی

۴-۳- تحلیل و طراحی SRR جهت کاهش SAR

SRR استفاده شده در این فصل، مشابه فصل سوم از دو حلقه مربعی متحدالمرکز تشکیل شده است که روی یک دی الکتریک قرار گرفته اند. روی هر یک از این حلقه ها برش هایی وجود دارد که در خلاف جهت هم قرار گرفته اند.

در حالت کلی، SRRها منجر به تشدید الکتریکی و مغناطیسی قوی می شوند. این تشدیدها به دلیل کوپلینگ متقابل عناصر خازنی (شکافها) و عناصر القایی (نوارهای رزونانسی فلزی) رخ داده است. علاوه بر این، رزونانس الکتریکی و رزونانس مغناطیسی در نتیجه اعمال امواج الکترومغناطیسی به ساختار SRR به دست می آید.

SRR مربعی شکل دارای فرکانس رزونانس در باند پایین تر، نسبت به سایر ساختارها به ویژه در مقایسه با SRR دایره ای می باشد. این نتیجه جالب توجه در مورد این واقعیت است که SRR مربعی شکل، به طور کلی یک نیروی الکترومغناطیسی را در اطراف ساختار خود القا می کند.

این ساختار منجر می شود که جریان به کمک میدان های مغناطیسی خارجی، بین حلقه داخلی از بین یک حلقه به حلقه دیگر جریان یابد. علاوه بر این، فرامواد مبتنی بر SRR مربعی شکل، توزیع جریان بالاتری نسبت به سایر ساختارها دارد و اساساً فرکانس های تشدید را در باندهای پایین تر تولید می کند. قابل توجه است که این نوع ساختار ترکیبی، دارای یک کوپلینگ خازنی مکمل است که به نمایش رفتارهای منحصر به فرد قوی کمک می کند. مهم است که این واقعیت را برجسته کنیم که تعداد حلقه های مربعی به شدت نتایج پارامترهای پراکندگی^۱ را تحت تأثیر قرار می دهد.

مطالعه مقدماتی در مورد ضخامت مواد زیرلایه، نشان می دهد که طراحی ساختار با مواد زیرلایه دارای ضخامت پایین، فرکانس رزونانس را به سمت فرکانس های بالاتر جابه جا می کند. علاوه بر این، با یک جستجوی کلیدی مشخص می شود که مقادیر ϵ_r ساختار فراموادی SRR، سهم عمده ای برای دستیابی به نتایج مطلوب دارد. هر فرکانس رزونانسی که از شبیه سازی به دست می آید، تحت تأثیر

¹ scattering

مقادیر ϵ_r قرار می‌گیرد. به این صورت که با انتخاب زیرلایه با ϵ_r بالا، فرکانس‌های تشدید به طور قابل ملاحظه‌ای به باندهای پایین‌تر، منتقل می‌شوند و با کاهش ϵ_r زیرلایه، فرکانس رزونانس به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود.

افزایش ابعاد SRR نیز به طور مستقیم با کاهش فرکانس رزونانس در ارتباط است. به عبارتی دیگر با افزایش ابعاد SRR می‌توان فرکانس رزونانس را به سمت فرکانس‌های پایین‌تر جابه‌جا کرد. اما باید به این نکته توجه داشت که افزایش بیش از حد ابعاد SRR، جهت رزونانس در فرکانس‌های پایین‌تر (۹۰۰ مگاهرتز)، باتوجه به کاربرد SRR به منظور نصب در مقابل آنتن تلفن همراه نمی‌تواند مطلوب باشد. بنابراین؛ برای تحقق اهداف این پژوهش و طراحی SRR با ابعاد مناسب، در طراحی SRR از مواد زیرلایه با ϵ_r بالا استفاده می‌شود.

در این فصل دو نوع SRR، جهت کاهش SAR تلفن همراهی که آنتن آن از نوع آنتن PIFA می‌باشد، طراحی می‌شود. نوع اول SRR فاقد thin wire است که پس از نصب بر روی تلفن همراه، در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز رزونانس می‌کند

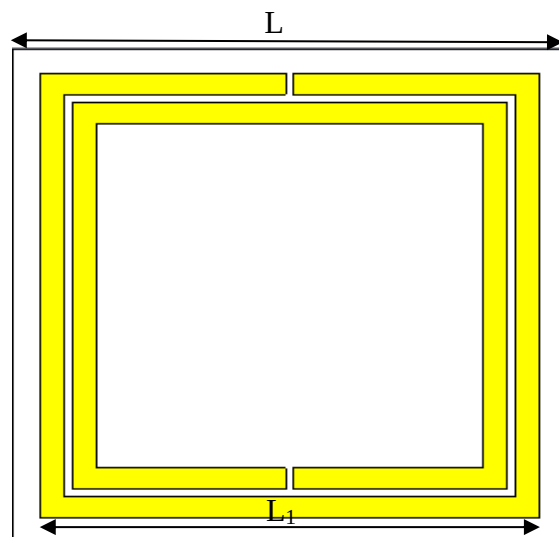
SRR نوع دوم با thin wire است. از این نوع دو SRR جهت کاهش SAR، در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز طراحی گردیده است. SRRها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در فرکانس‌های موردنظر با ایجاد یک ϵ منفی، یک باند عدم عبور ایجاد می‌کنند و به این وسیله SAR ناشی از آنتن PIFA، پس از قراردادن SRR در مقابل آنتن، در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز کاهش می‌یابد.

۴-۳-۱- طراحی SRR بدون thin wire

زمانی که SRR بر روی تلفن همراه نصب می‌شود، تأثیرات تلفن همراه بر SRR باعث می‌شود که فرکانس رزونانس آن به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شود. با استفاده از روش آزمون و خطا مشخص می‌شود که این جابه‌جایی فرکانسی از بازه‌ی فرکانسی ۸۷۰ تا ۹۲۹ مگاهرتز به بازه فرکانسی ۹۲۹ تا ۹۴۷ مگاهرتز می‌باشد. بنابراین؛ جهت کاهش حداکثر میزان SAR، توسط SRR بدون thin wire باید

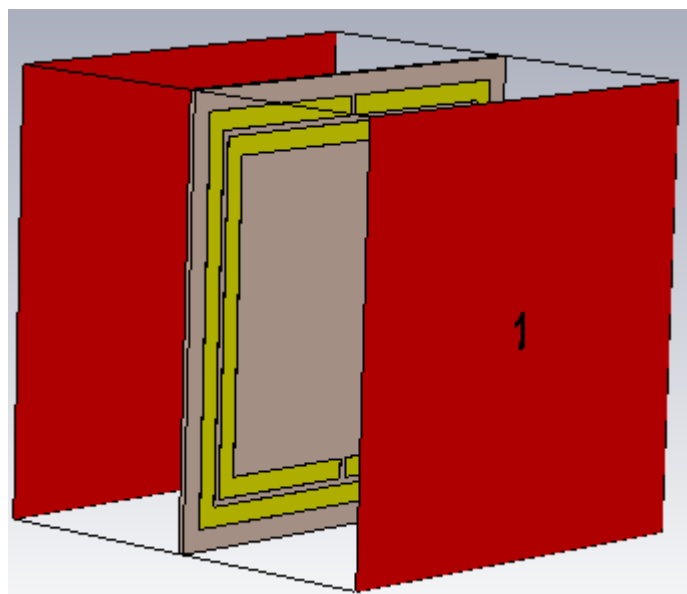
SRR مذکور به گونه‌ای طراحی شود که فرکانس رزونانس اول آن در بازه‌ی فرکانس ۹۲۹ تا ۹۴۷ مگاهرتز قرار گیرد. همان‌طور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است، حلقه‌های مسی مربعی شکل از جنس مس آنیل با ضخامت 0.017 میلی‌متر بر روی سطح بالایی زیرلایه دی‌الکتریک از جنس Rogers RO3210 با گذردهی نسبی الکتریکی $\epsilon_r = 10.8$ ، نفوذپذیری نسبی مغناطیسی $\mu_r = 1$ ، تانژانت تلفات 0.0027 و ضخامت 0.508 میلی‌متر ساخته شده است. طول حلقه مسی بیرونی $L_1 = 37$ ، طول حلقه مسی داخلی $L_2 = 32.2$ ، فاصله‌ی بین دو حلقه مسی $d = 0.6$ ، عرض حلقه‌های مسی $C = 1.8$ ، عرض شکاف حلقه‌ها $g = 0.6$ و طول زیرلایه دی‌الکتریک $L_s = 41$ میلی‌متر می‌باشد.

تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST Microwave Studio انجام شده است. شکل ۴-۷ نشان‌دهنده‌ی ترتیب شبیه‌سازی SRR، با استفاده از دو پورت موجبری در انتهای مثبت و منفی محور Z می‌باشد. همچنین موج الکترومغناطیسی بین پورت‌ها، گسترش می‌یابد. شرایط مرزی $^{1}PEMC$ برای شبیه‌سازی به کار رفته است، جایی که به ترتیب در محورهای x و y از PEC و PMC استفاده شده است.



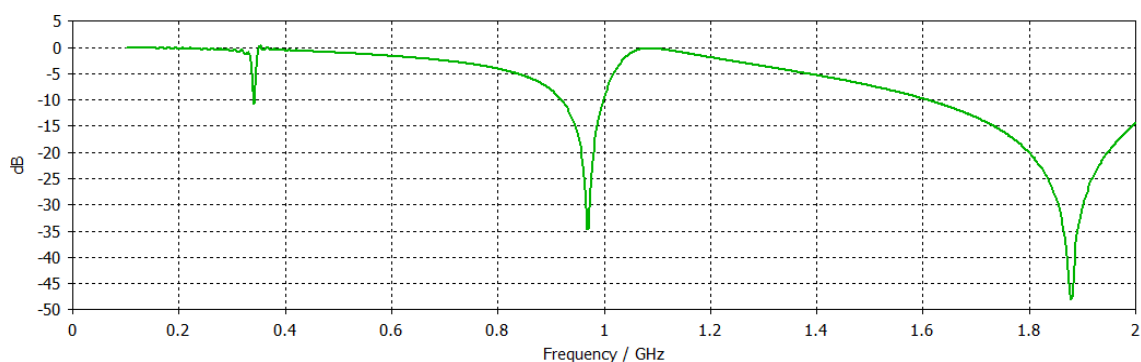
شکل ۴-۶ مدل SRR بدون thin wire

¹ Perfect Electric-Magnetic Conductor



شکل ۴-۷ شبیه سازی عددی SRR

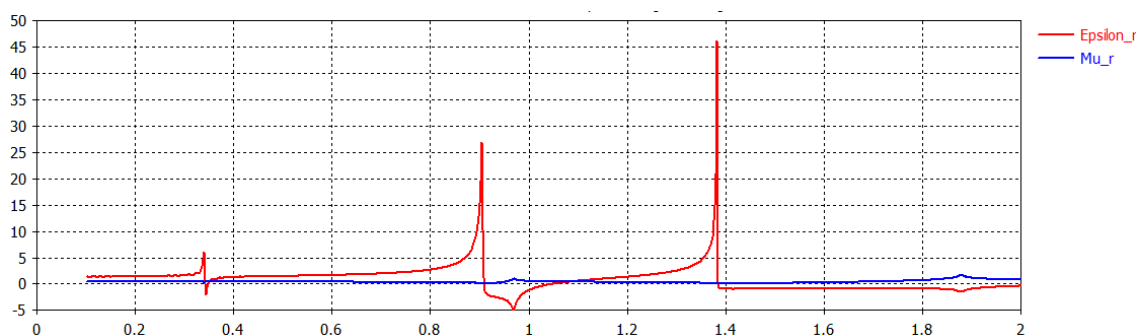
در شکل ۴-۸ منحنی S_{21} شبیه سازی شده SRR مورد نظر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، SRR مورد نظر در دو بازه ی فرکانسی رزونانس می کند. بازه ی فرکانسی اول از ۹۲۰ تا ۹۹۸ مگاهرتز می باشد که میزان جابه جایی فرکانسی SRR، بعد از قرار گرفتن در مقابل آنتن PIFA را شامل می شود. بازه ی فرکانسی دوم از ۱۶۱۰ تا ۲۰۰۰ مگاهرتز می باشد که این بیانگر یک رزونانس مناسب با پهنای باند ۳۹۰ مگاهرتز، در فرکانس های بالا می باشد که می تواند هر گونه جابه جایی فرکانسی SRR را پوشش دهد. لازم به ذکر است که در هر دو بازه فرکانسی، مقادیر S_{21} کمتر از -10 dB در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۸ منحنی S_{21} ساختار SRR بدون thin wire

پارامترهای مؤثر محیطی (ϵ_r و μ_r)، واکنش و پاسخ ساختار فراموادى هنگام مواجهه با میدان‌های الکترومغناطیسی خارجی متغیر با زمان را مشخص می‌کند. عموماً اکثر مواد تلفاتی باعث ایجاد نفوذپذیری و گذردهی پیچیده و وابسته به فرکانس می‌شوند که با کنترل علامت بخش حقیقی می‌توان به ویژگی‌های الکترومغناطیسی منحصر به فرد دست یافت.

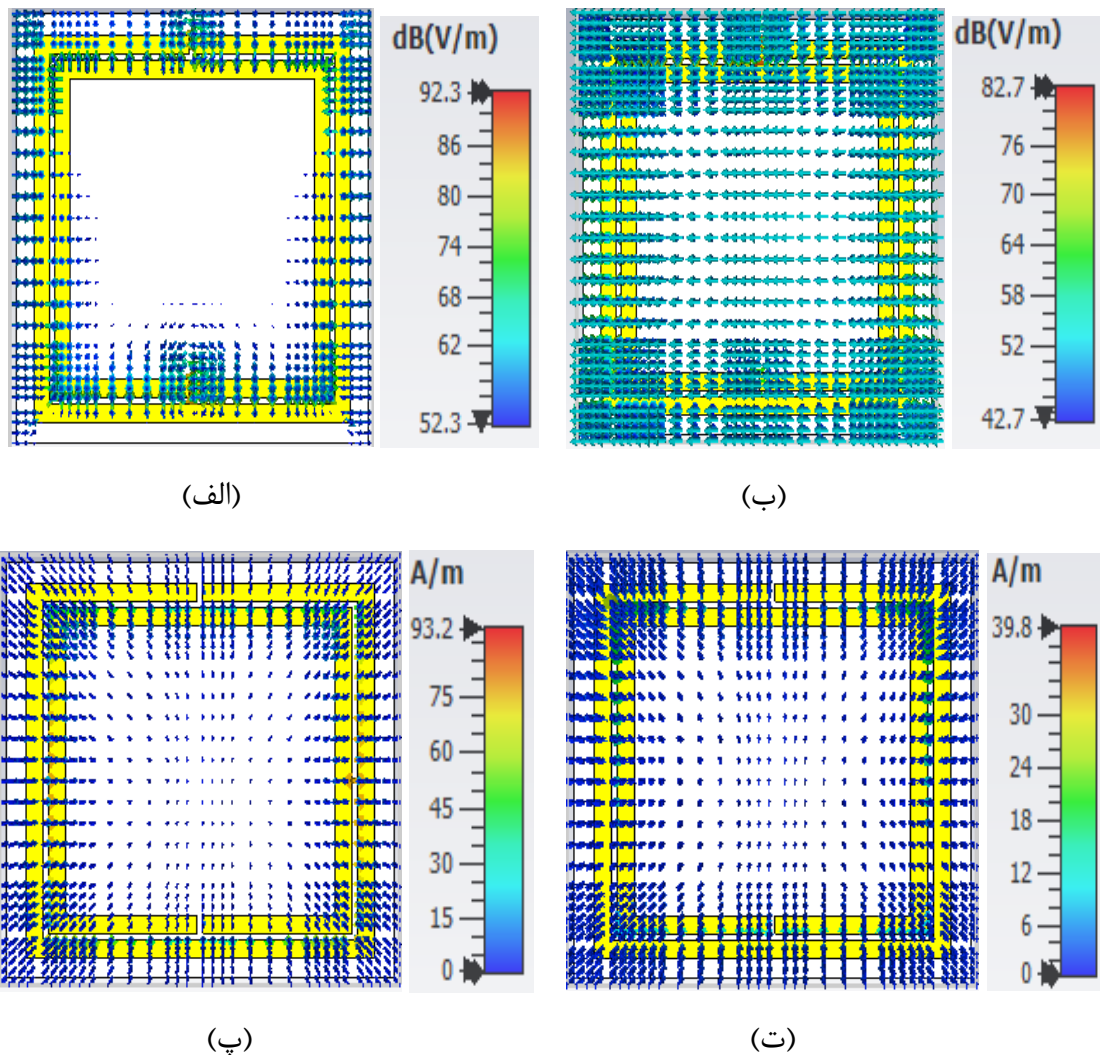
منحنی ϵ_r و μ_r بر حسب فرکانس در شکل ۳-۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در فرکانس‌های رزونانس SRR، ϵ_r دارای مقادیر منفی و μ_r مثبت می‌باشد که این باعث ایجاد باند عدم عبور در فرکانس‌های رزونانس SRR می‌شود و اهداف این پژوهش از طراحی SRR محقق می‌شود.



شکل ۴-۹ استخراج مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r

شکل ۴-۱۰ توزیع میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی ساختار فراموادى را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده، هر دو میدان الکتریکی و مغناطیسی میدان قدرتمندی را در باند فرکانسی دوم، با فرکانس مرکزی ۱۸۰۰ مگاهرتز نسبت به باند فرکانسی اول، با فرکانس مرکزی ۹۷۰ مگاهرتز تولید می‌کنند. در باند فرکانسی اول توزیع میدان الکتریکی بیشتر در بین حلقه‌های مربعی و نواحی کناری SRR ایجاد می‌شود، در حالی که در باند فرکانسی دوم توزیع میدان الکتریکی در تمامی نواحی SRR، به‌ویژه در قسمت بالا و پایین SRR، بین حلقه‌های مربعی و شکاف‌های موجود روی حلقه‌های مربعی، متمرکز شده است. علاوه بر این توزیع میدان مغناطیسی، در باند فرکانسی دوم نسبت به باند فرکانسی اول، از شدت بیشتری برخوردار است که شدت توزیع آن در هر دو باند فرکانسی، در چهار

گوشه‌ی SRR، نسبت به سایر نواحی SRR بیشتر می‌باشد.



شکل ۴-۱۰ توزیع میدان الکتریکی: در فرکانس‌های (الف) ۹۷۰ و (ب) ۱۸۰۰، توزیع میدان مغناطیسی: در فرکانس‌های (پ) ۹۷۰ و (ت) ۱۸۰۰

زیرلایه دی‌الکتریک برخلاف مواد ساخته شده از فلز، از لحاظ فیزیکی الکترون آزاد ندارد، اما همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زیرلایه دی‌الکتریک رخ داده است که دلیل اصلی آن می‌تواند این باشد که طراحی حلقه‌های فلزی مربعی شکل باعث می‌شود، نوسانات الکترون خروجی در حلقه‌های فلزی، محصور شود و در نتیجه توزیع میدان‌های الکتریکی و

مغناطیسی نه تنها در حلقه‌های مربعی شکل، بلکه در زیرلایه دیگر نیز اتفاق افتد.

۴-۴- طراحی SRR با thin wire

SRR طراحی شده با thin wire، همانند SRR بدون thin wire شامل دو حلقه‌ی مربعی متحدالمرکزی می‌باشد که روی هر حلقه یک شکاف مربعی ایجاد شده است. همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است. شکاف حلقه داخلی به سمت پایین و شکاف حلقه بیرونی به سمت بالا می‌باشد. جنس حلقه‌های مربعی از مس و ضخامت آن 0.17 میلی‌متر می‌باشد که بر روی زیرلایه دی‌الکتریک از جنس Rogers RO3210 با گذردهی نسبی الکتریکی $\epsilon_r = 10.8$ ، نفوذپذیری نسبی مغناطیسی $\mu_r = 1$ ، تانژانت تلفات 0.0027 و ضخامت 0.508 میلی‌متر ساخته شده است. تفاوت اصلی آن با SRR بدون thin wire در این است که، یک‌لایه مسی به عرض 0.28 میلی‌متر و ضخامت 0.17 میلی‌متر به‌عنوان thin wire، به پشت زیرلایه متصل می‌گردد و منجر به کاهش ابعاد SRR با thin wire در مقایسه با SRR بدون thin wire می‌شود.

۴-۴-۱- SRR با thin wire در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

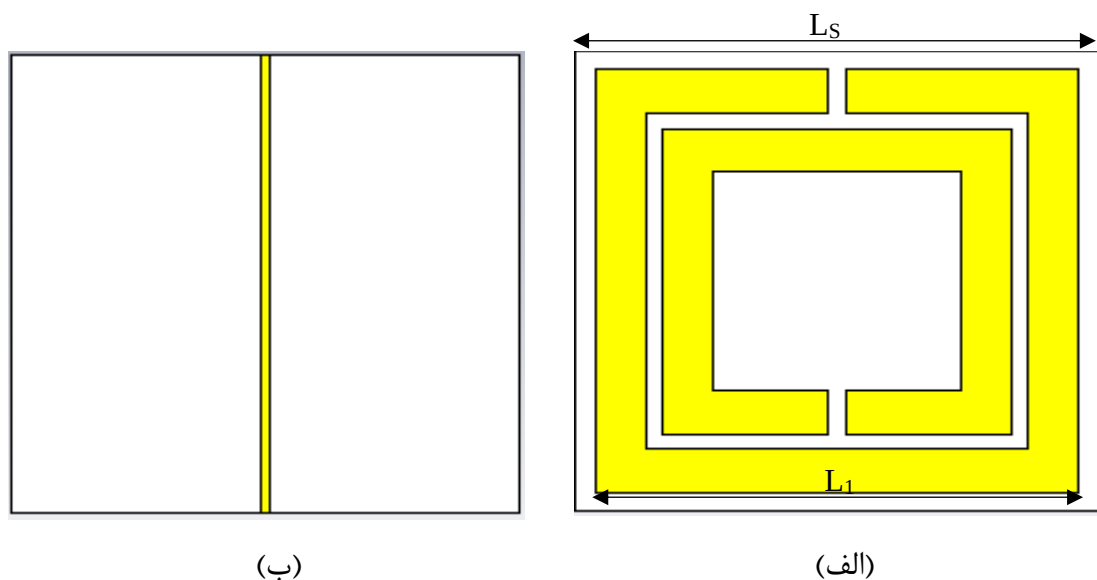
SRR با thin wire طراحی شده در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، زمانی که در مقابل آنتن PIFA قرار می‌گیرد، فرکانس رزونانس آن تحت تأثیرات آنتن تلفن‌همراه، به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا می‌شود که این جابه‌جایی فرکانسی از بازه‌ی فرکانسی ۸۹۲ تا ۹۲۹ مگاهرتز به بازه‌ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز می‌باشد، بنابراین؛ SRR موردنظر جهت کاهش حداکثر میزان SAR در بازه‌ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز طراحی می‌شود.

طول حلقه مسی بیرونی $L_1 = 17.35$ ، طول حلقه مسی داخلی $L_2 = 12.55$ ، طول زیرلایه دی‌الکتریک $L_s = 18.85$ ، فاصله‌ی بین دو حلقه مسی $d = 0.6$ ، عرض حلقه‌های مسی $C = 1.8$ ، عرض thin wire $L_w = 0.28$ و عرض شکاف حلقه‌ها $g = 0.6$ میلی‌متر می‌باشد. نمای جلویی و پشتی SRR طراحی شده با thin wire، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. همان‌طور که

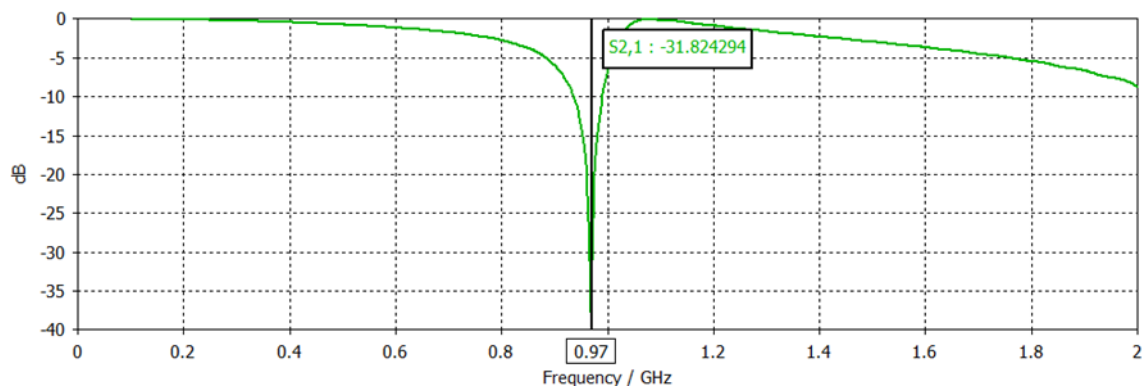
مشاهده می‌شود با اضافه‌شدن thin wire به SRR، ابعاد آن در مقایسه با SRR بدون thin wire به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

فرایند شبیه‌سازی نیز به این صورت است که SRR موردنظر بین دو پورت موجبری روی محور Z مثبت و منفی قرار می‌گیرد و توسط یک موج الکترومغناطیسی عرضی تحریک می‌شود. شرایط مرزی به این صورت در نظر گرفته می‌شود که محور X به‌عنوان PEC و محور Y به‌عنوان PMC تعریف می‌شود. تمامی شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار CST انجام می‌شود.

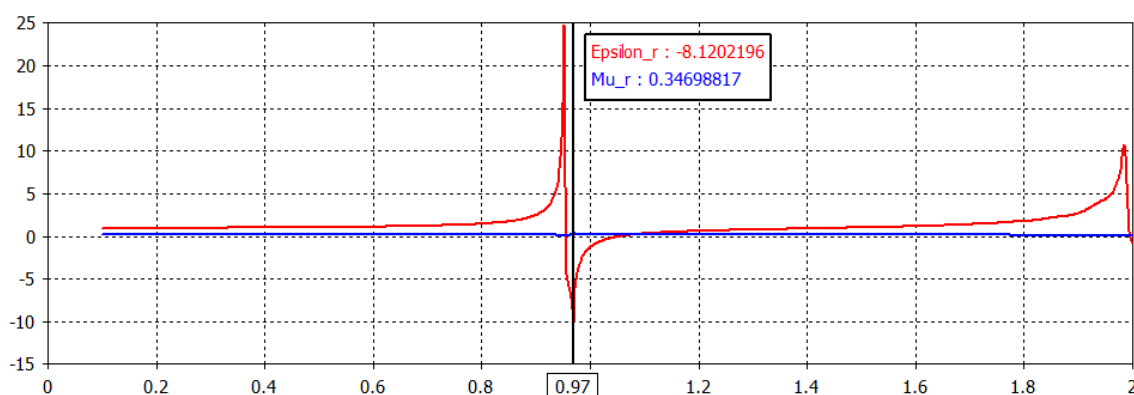
منحنی انتقال SRR (S_{21}) طراحی شده، در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، SRR در بازه‌ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز رزونانس می‌کند و در فرکانس ۹۷۰ مگاهرتز S_{21} دارای پایین‌ترین مقدار می‌باشد. همچنین در شکل ۴-۱۳ مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r نشان داده شده است. در بازه‌ی فرکانسی موردنظر ϵ_r دارای مقداری منفی و μ_r دارای مقداری مثبت است که باعث ایجاد یک باند توقف در فرکانس موردنظر می‌شود.



شکل ۴-۱۱ نمای جلویی و پشتی SRR با thin wire در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز



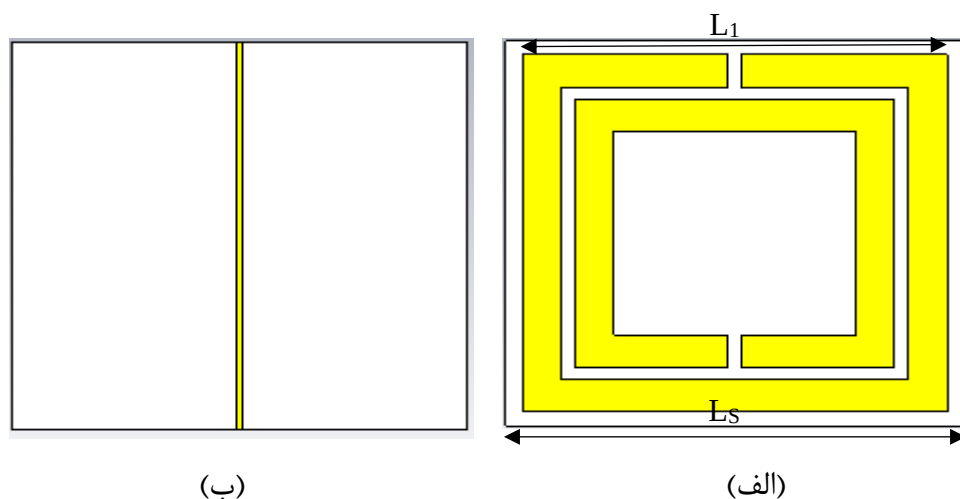
شکل ۴-۱۲ منحنی S_{21} ساختار SRR در بازه‌ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز



شکل ۴-۱۳ مقادیر ϵ_r و μ_r ساختار SRR در بازه‌ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز

۴-۲-۴ SRR با thin wire در فرکانس ۱۸۰۰

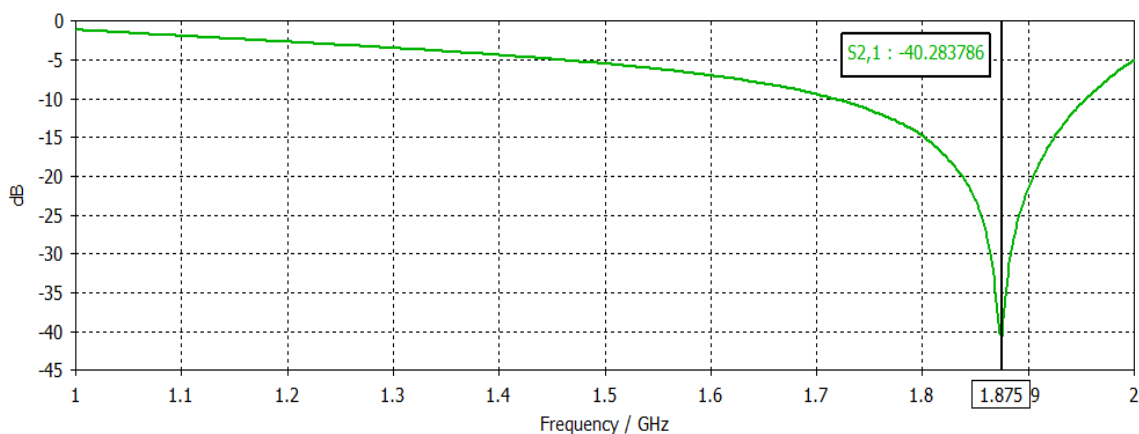
ابعاد SRR موردنظر که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است، به این شرح است: طول حلقه مسی بیرونی $L_1 = 19.5$ ، طول حلقه مسی داخلی $L_2 = 14.7$ ، طول زیرلایه دی‌الکتریک $L_s = 21$ ، فاصله‌ی بین دو حلقه مسی $d = 0.6$ ، عرض حلقه‌های مسی $C = 1.8$ ، عرض thin wire $L_w = 0.28$ و عرض شکاف حلقه‌ها $g = 0.6$ میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است که SRR طراحی شده در فرکانس ۱۸۰۰، دارای پهنای باند بالایی می‌باشد که می‌تواند میزان جابه‌جایی فرکانسی پس از قرارگیری در مقابل آنتن را پوشش دهد. همچنین روند شبیه‌سازی مشابه SRR طراحی شده در بازه‌ی فرکانسی ۹۳۸ تا ۹۹۰ مگاهرتز می‌باشد.



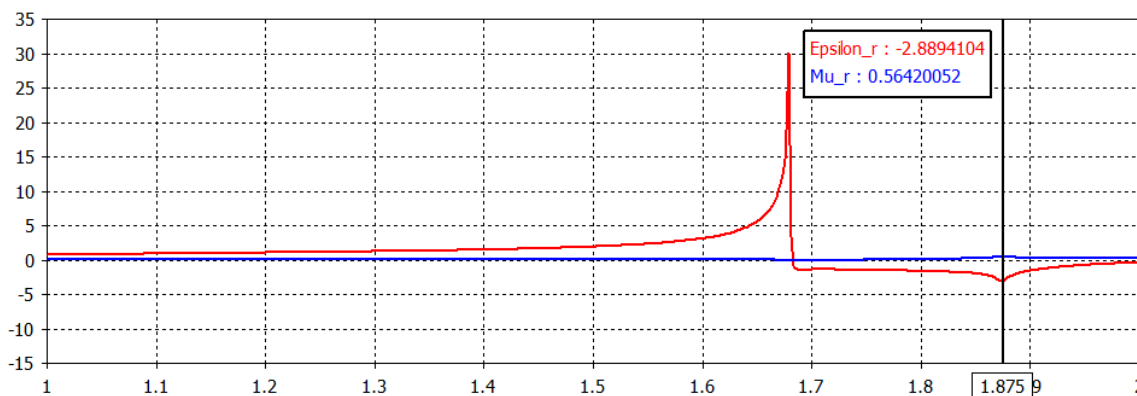
شکل ۴-۱۴ نمای جلویی و پشتی SRR با thin wire در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

منحنی انتقال S_{21} طراحی شده، در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، SRR در بازه‌ی فرکانسی ۱۷۲۰ تا ۱۹۵۰ مگاهرتز رزونانس می کند و در فرکانس مرکزی ۱۸۷۵ مگاهرتز S_{21} دارای پایین ترین مقدار می باشد.

در شکل ۴-۱۶ مقادیر حقیقی ϵ_r و μ_r نشان داده شده است. در بازه‌ی فرکانسی موردنظر ϵ_r دارای مقداری منفی و μ_r دارای مقداری مثبت است. در نتیجه یک باند توقف در فرکانس موردنظر داریم که متناسب با اهداف این پژوهش است.



شکل ۴-۱۵ منحنی S_{21} ساختار SRR در بازه‌ی فرکانسی ۱۷۲۰ تا ۱۹۵۰ مگاهرتز



شکل ۴-۱۶ مقادیر ϵ_r و μ_r ساختار SRR در بازه‌ی فرکانسی ۱۷۲۰ تا ۱۹۵۰ مگاهرتز

۴-۵- کاهش مقادیر SAR یک گرم آنتن PIFA تلفن‌همراه

به‌طور کلی، هنگامی که تلفن‌همراه در حالت کار است، انرژی امواج الکترومغناطیسی به محیط اطراف منتقل می‌شود. بنابراین؛ این انرژی می‌تواند به‌راحتی توسط سر یا هر قسمت از بدن انسان که نزدیک دستگاه است، جذب شود؛ لذا ضرورت دارد، در پی یافتن راهی، برای کاهش اثرات مخرب تلفن‌همراه باشیم که در این میان استفاده از SRR ها می‌تواند کمک شایانی، جهت کاهش SAR تلفن‌همراه داشته باشد.

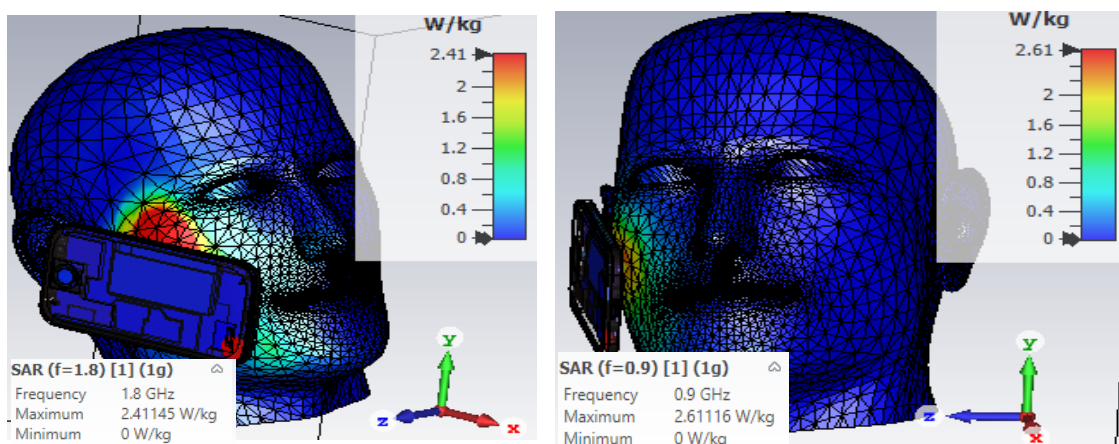
در این بخش با قراردادن SRR های طراحی شده، در مقابل آنتن PIFA تلفن‌همراه، مقادیر SAR یک گرم را کاهش می‌دهیم. برای این کار ابتدا مقادیر SAR یک گرم قبل از اتصال SRR، توسط نرم‌افزار CST محاسبه می‌شود. سپس SRR در موقعیت مناسب، از لحاظ حداکثر میزان کاهش SAR و با در نظر گرفتن مقادیر کمتر از 10 dB- برای پارامتر S_{11} آنتن PIFA، در فرکانس‌های رزونانس قرار می‌گیرد. در این مرحله نیز مقادیر SAR محاسبه می‌شود و با مقایسه‌ی مقادیر SAR قبل و بعد از قرار گرفتن SRR در مقابل آنتن PIFA تلفن‌همراه، درصد کاهش SAR مشخص می‌شود.

در شکل ۴-۱۷ مقادیر شبیه‌سازی شده SAR یک گرم قبل از قرار گرفتن SRR در مقابل آنتن PIFA، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز به‌ازای توان خروجی 0.5 W و در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز به‌ازای توان خروجی 0.25 W نشان داده شده است. میزان SAR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز 2.61116 W/Kg و میزان

SAR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز 2.41145 W/Kg می‌باشد.

شایان‌ذکر است، زمانی که توان آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز 0.5 W در نظر گرفته می‌شود، میزان SAR 4.8229 W/Kg می‌باشد. بنابراین؛ می‌توان نتیجه گرفت که افزایش توان خروجی و فرکانس رزونانس آنتن، نسبت مستقیمی با افزایش میزان SAR دارد.

بر اساس نتایج، مشخص شد که برای کاربردهای تماس صوتی، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز هر بار نواحی اطراف لب، گوش و گونه‌ی سمت راست سر، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. درحالی‌که در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، بیشترین تأثیرپذیری بر روی چانه، نواحی اطراف چشم و گونه‌ی سمت راست مدل سر، با شدت بیشتری نسبت به فرکانس ۱۸۰۰ می‌باشد. این نشان می‌دهد که در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، اعضای بیشتری از مدل سر تحت تأثیر قرار می‌گیرد که دلیل آن می‌تواند این باشد که سطح تابش الکترومغناطیسی، با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. وقتی دستگاه الکترونیکی با فرکانس بالاتر کار می‌کند، در مقایسه با دستگاه‌های فرکانس پایین، انرژی الکترومغناطیسی بیشتری را به فضا پخش می‌کند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ناحیه قرمز رنگ در مدل سر به دلیل جذب تابش تلفن همراه، منطقه بسیار متأثر را نشان می‌دهد.



(ب)

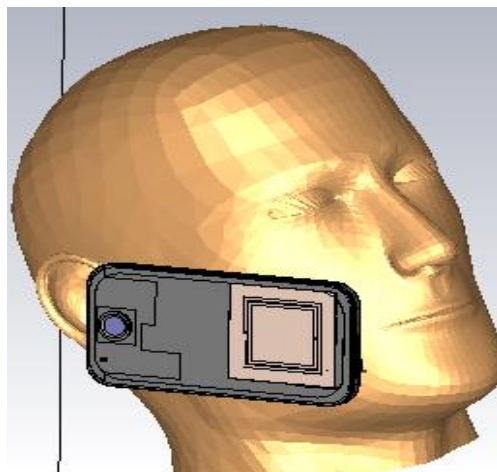
(الف)

شکل ۴-۱۷ مقادیر SAR بدون SRR اتصال در فرکانس (الف) ۹۰۰ و (ب) ۱۸۰۰

۴-۶- کاهش SAR با SRR بدون thin wire

جهت کاهش SAR ناشی از تلفن همراه در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز، SRR طراحی شده در مقابل آنتن PIFA تلفن همراه قرار می‌گیرد. موضوعی که باید در اینجا مورد توجه قرار گیرد، این است که SRR مورد نظر در چه محلی قرار گیرد که هم میزان کاهش SAR قابل قبولی، با در نظر گرفتن مقادیر S_{11} کمتر از -10 dB برای آنتن PIFA داشته باشد و هم از لحاظ کاربردهای عملی واقع بینانه و بر عملکرد تلفن همراه تأثیر مخربی نداشته باشد. با توجه به این که ابعاد SRR با thin wire بزرگ می‌باشد و نمی‌تواند درون تلفن همراه قرار گیرد، بهترین محل قرارگیری SRR در پشت تلفن همراه در مقابل آنتن PIFA است. SRR مورد نظر در عمل می‌تواند به محافظ تلفن همراه متصل شود بنابراین؛ فاصله‌ی SRR تا تلفن همراه بسیار ناچیز در حد ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود.

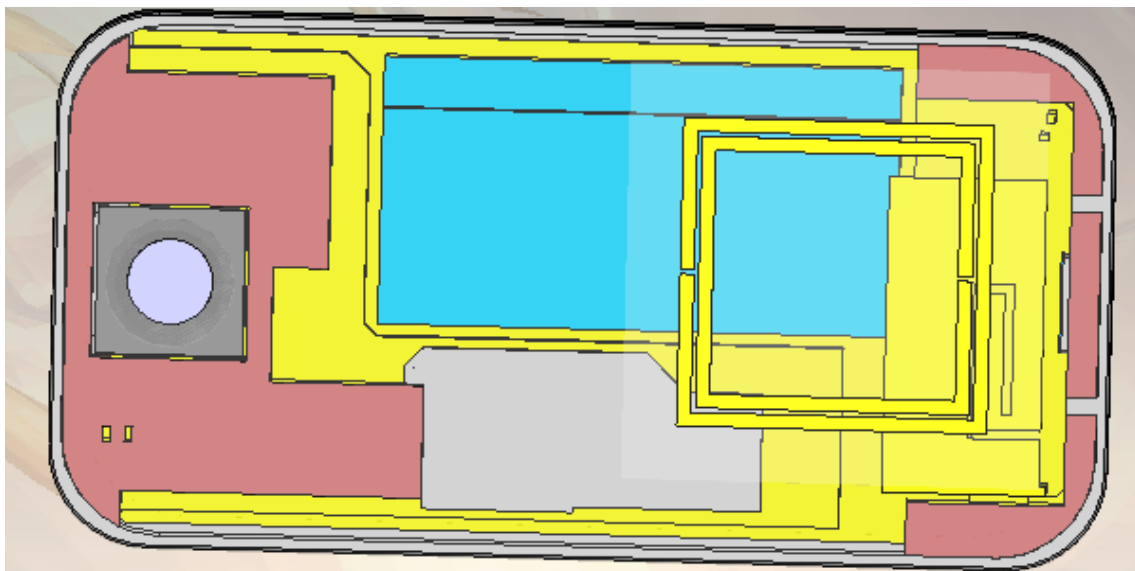
موقعیت ساختار SRR نقش بسیار مؤثری در کاهش مقادیر SAR دارد. به همین منظور پس از قرارگیری SRR در مقابل آنتن PIFA و در فاصله‌ی ۰/۱ میلی‌متری از تلفن همراه، SRR در چهار جهت تلفن همراه، به فاصله‌ی ۰/۱ میلی‌متر جابه‌جا می‌شود، تا موقعیت بهینه از نظر حداکثر میزان کاهش SAR با حفظ مقادیر کمتر از -10 dB برای آنتن تلفن همراه، به دست آید. محل قرارگیری SRR که در آن بیشترین مقدار کاهش SAR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز رخ می‌دهد، در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. میزان SAR در این حالت برابر 1.60292 W/Kg است.



شکل ۴-۱۸ محل قرارگیری SRR در پشت تلفن همراه

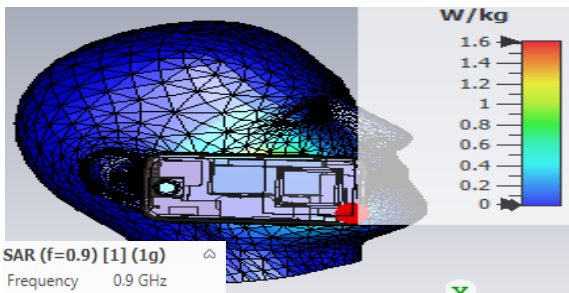
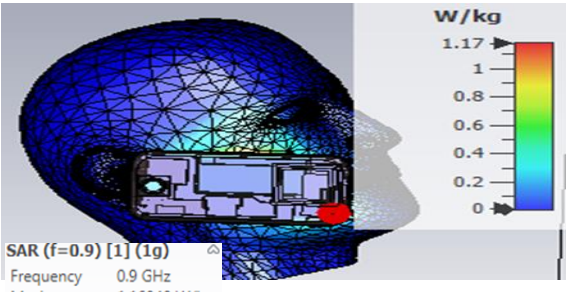
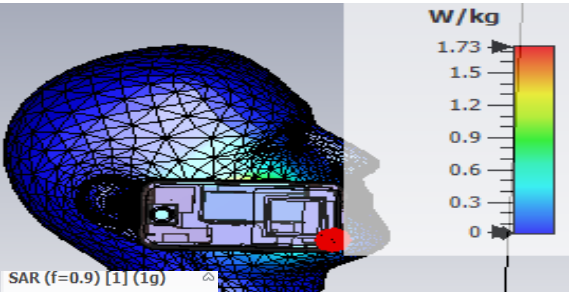
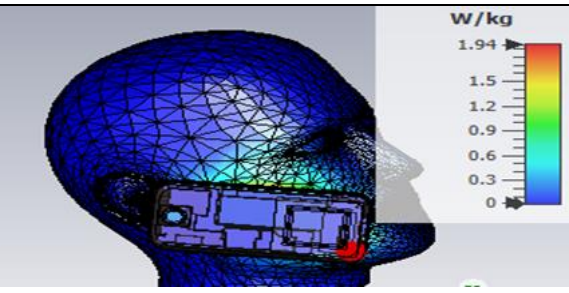
لازم به ذکر است که SRR به گونه‌ای در پشت تلفن همراه قرار گرفته است که شکاف موجود بر روی حلقه‌ی بیرونی، همان‌طور که در جدول ۴-۱ نشان داده شده است، به سمت بالای گوشی است. جهت نمایش بهتر زیرلایه و قاب پشتی تلفن همراه Hide شده است.

یکی دیگر از مواردی که جهت کاهش میزان SAR مورد بررسی قرار می‌گیرد چرخش SRR در پشت تلفن همراه است. به این صورت که SRR به میزان ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد و پس از چرخش مطابق حالت قبل، SRR در جهات مختلف تلفن همراه جابه‌جا و موقعیت بهینه از لحاظ میزان SAR، به دست می‌آید در نهایت حالتی که بیشترین میزان کاهش SAR در آن رخ می‌دهد، به عنوان مناسب‌ترین حالت جهت نصب SRR در پشت تلفن همراه در نظر گرفته می‌شود. شبیه‌سازی SAR در موقعیت بهینه‌ی چرخش‌های مختلف SRR در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداقل میزان SAR در چرخش ۹۰ درجه SRR برابر 1.16848 W/Kg ، چرخش ۱۸۰ درجه برابر 1.73044 W/Kg و چرخش ۲۷۰ درجه برابر 1.93702 W/Kg می‌باشد.



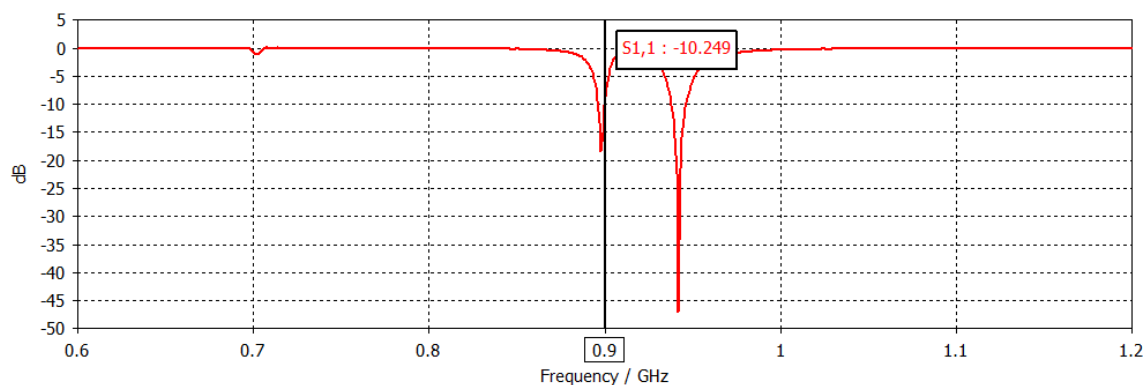
شکل ۴-۱۹ نحوه‌ی قرارگیری اولیه SRR در پشت تلفن همراه

جدول ۴-۱ مقادیر SAR برای چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

میزان چرخش	شبیه‌سازی SAR
0	 SAR (f=0.9) [1] (1g) Frequency 0.9 GHz Maximum 1.60292 W/kg Minimum 0 W/kg
90	 SAR (f=0.9) [1] (1g) Frequency 0.9 GHz Maximum 1.16848 W/kg Minimum 0 W/kg
180	 SAR (f=0.9) [1] (1g) Frequency 0.9 GHz Maximum 1.73044 W/kg Minimum 0 W/kg
270	 SAR (f=0.9) [1] (1g) Frequency 0.9 GHz Maximum 1.93702 W/kg Minimum 0 W/kg

در شکل ۴-۲۰ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در موقعیت بهینه، در حالت چرخش ۹۰ درجه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مقدار S_{11} در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز برابر 10.5 dB- می باشد که قابل قبول است. همچنین پس از قرارگیری SRR در مقابل آنتن تلفن همراه، علاوه بر کاهش SAR آنتن PIFA در فرکانس ۹۴۲ مگاهرتز نیز رزونانس می کند.

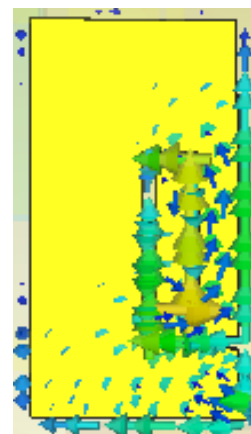
در شکل ۴-۲۱ توزیع جریان سطحی روی آنتن موردنظر در فرکانس ۹۰۰ و ۹۴۲ مگاهرتز نشان داده شده است. توزیع جریان سطحی در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز نسبت به فرکانس ۹۴۲ مگاهرتز از شدت بالایی برخوردار است که این نشان می دهد فرکانس رزونانس اصلی آنتن فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز می باشد.



شکل ۴-۲۰ منحنی S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز پس از نصب SRR



(ب)



(الف)

شکل ۴-۲۱ جریان سطحی روی آنتن PIFA در فرکانس (الف) ۹۴۲ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

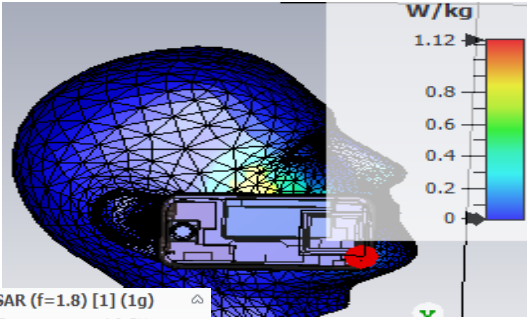
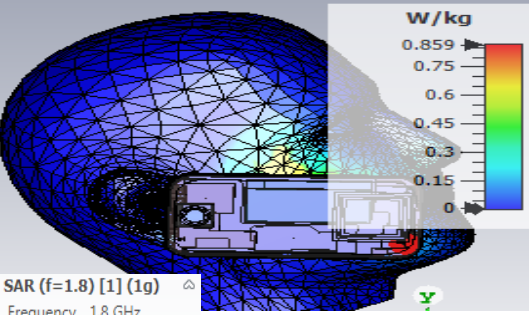
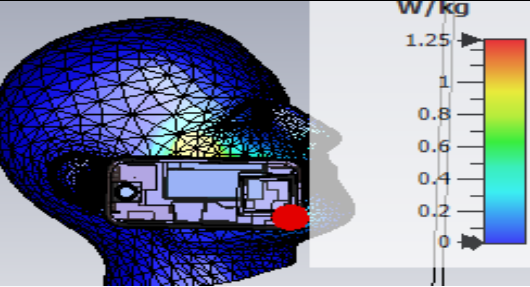
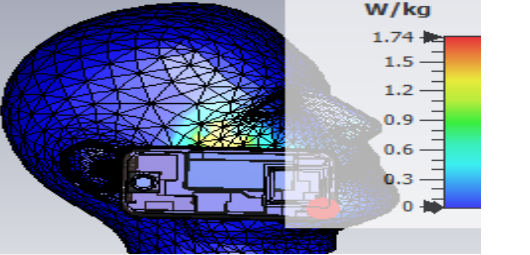
جدول ۲-۴ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

SRR	Rotate (0)	Rotate (90)	Rotate (180)	Rotate (270)
SAR 1g (w/kg)	1.60292	1.16848	1.73044	1.93702
S ₁₁ (dB)	-10.04	-10.5	-10.2	-12.18
SAR Reduction (w/kg)	1.00824	1.44388	0.88072	0.67414
SAR Reduction (%)	38.6 %	55.29 %	33.72 %	25.8 %

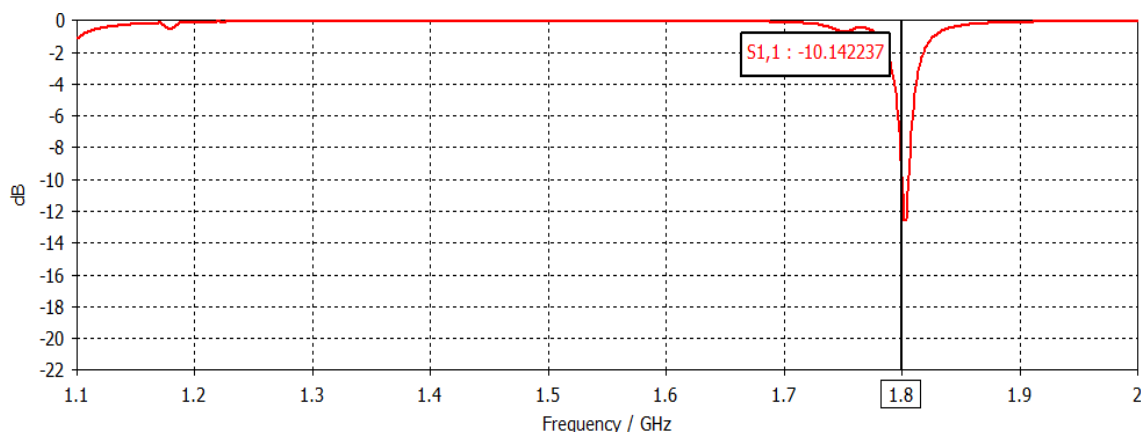
در جدول ۲-۴ مقادیر SAR، مقادیر S₁₁، مقادیر کاهش SAR بر حسب (W/Kg) و مقادیر کاهش SAR بر حسب درصد در چرخش‌های مختلف SRR، در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که SRR نسبت به حالت قرارگیری اولیه در پشت تلفن همراه، ۹۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخد، ۵۵/۲۹ درصد می‌توان SAR را کاهش داد که مناسب‌ترین حالت می‌باشد.

جهت کاهش SAR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، همانند فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز پس از قرارگیری SRR در پشت تلفن همراه، به میزان ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد و سپس با جابه‌جایی SRR در چهار طرف، موقعیت مناسب از نظر حداکثر میزان کاهش SAR تعیین می‌گردد. در جدول ۳-۴ مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی SAR در موقعیت بهینه، پس از چرخش SRR در جهت‌های مختلف نشان داده شده است. میزان SAR در حالت قرارگیری اولیه SRR برابر 1.11797 W/Kg می‌باشد. به همین ترتیب میزان SAR در چرخش ۹۰ درجه برابر 0.858969 W/Kg، چرخش ۱۸۰ درجه برابر 1.25149 W/Kg و در چرخش ۲۷۰ درجه برابر 1.73723 W/Kg می‌باشد.

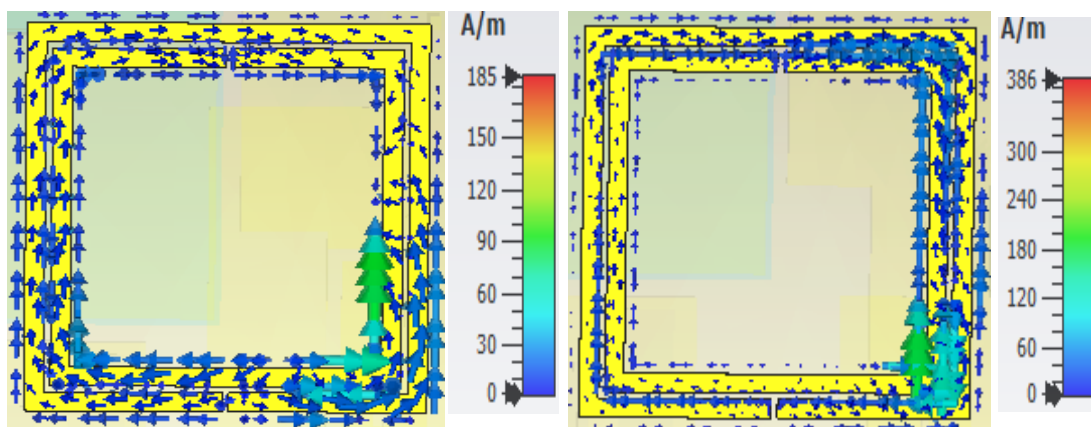
جدول ۳-۴ مقادیر SAR برای چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

میزان چرخش	شبیه‌سازی SAR
0	 SAR (f=1.8) [1] (1g) Frequency 1.8 GHz Maximum 1.11797 W/kg Minimum 0 W/kg
90	 SAR (f=1.8) [1] (1g) Frequency 1.8 GHz Maximum 0.858969 W/kg Minimum 0 W/kg
180	 SAR (f=1.8) [1] (1g) Frequency 1.8 GHz Maximum 1.25149 W/kg Minimum 0 W/kg
270	 SAR (f=1.8) [1] (1g) Frequency 1.8 GHz Maximum 1.73723 W/kg Minimum 0 W/kg

در شکل ۴-۲۲ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در موقعیت بهینه، در حالت چرخش ۹۰ درجه نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مقدار S_{11} در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز برابر ۱۰.۱۴ dB- می باشد که قابل قبول است. در شکل ۴-۲۳ توزیع جریان سطحی روی سطح SRR پس از نصب در پشت تلفن همراه، در حالت چرخش ۹۰ درجه ی SRR که در آن بیشترین کاهش SAR رخ می دهد، در فرکانس ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود توان تشعشعی آنتن PIFA پس از برخورد به SRR، باعث ایجاد جریانی در بین حلقه های SRR می شود. این جریان به کمک میدان های مغناطیسی خارجی، بین حلقه های SRR جابه جا می شود و جریان جابه جایی بزرگی ایجاد می شود. جابه جایی جریان بین حلقه ها، باعث ایجاد خاصیت خازنی می شود و انرژی می تواند دچار اتلاف اهمی شود که با تلف شدن انرژی تشعشعی آنتن به سمت مدل سر، SAR کاهش می یابد. نکته ی قابل توجه دیگری که در شکل مشاهده می شود این است که توزیع جریان سطحی در گوشه ی سمت راست SRR که به نقطه ی تغذیه آنتن نزدیک تر است، از شدت بیشتری برخوردار است.



شکل ۴-۲۲ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز



(ب)

(الف)

شکل ۴-۲۳ جریان سطحی روی SRR در فرکانس (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

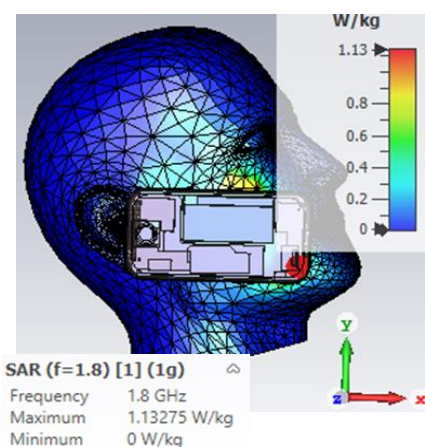
در جدول ۴-۴ مقادیر SAR، مقادیر S_{11} ، مقادیر کاهش SAR بر حسب (W/Kg) و مقادیر کاهش SAR بر حسب درصد در چرخش‌های مختلف SRR، در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود زمانی که SRR نسبت به حالت قرارگیری اولیه در پشت تلفن همراه، ۹۰ درجه در خلاف جهت عقربه‌های ساعت بچرخد، ۶۴/۳۸ درصد می‌توان SAR را کاهش داد که بهترین حالت از نظر حداکثر میزان کاهش SAR می‌باشد.

جدول ۴-۴ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

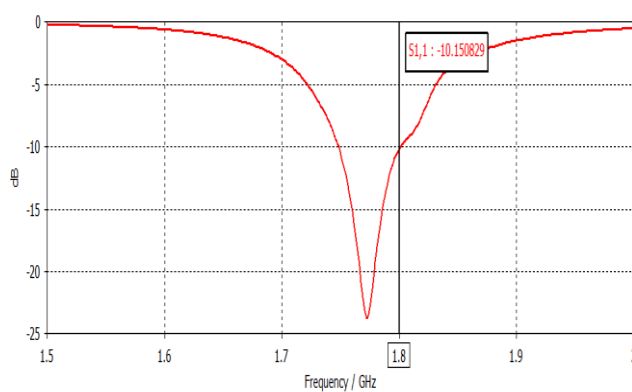
SRR	Rotate 0	Rotate 90	Rotate 180	Rotate 270
SAR 1g (w/kg)	1.11797	0.858969	1.25149	1.73723
S_{11} (dB)	-10.0075	-10.142	-10.251	-10.319
SAR Reduction (w/kg)	1.29348	1.552481	1.15996	0.67422
SAR Reduction (%)	53.63 %	64.38 %	48.1 %	27.95 %

در یک مطالعه موردی برای یک کاربرد غیرعملی، SRR موردنظر در مقابل صفحه‌نمایش تلفن همراه و در فاصله‌ی ۰/۳۵ میلی‌متری از صفحه‌نمایش قرار می‌گیرد. با جابه‌جایی SRR و محاسبه‌ی SAR در محل‌های مختلف، موقعیت مناسب SRR از نظر حداکثر میزان کاهش SAR، با حفظ مقادیر S_{11} کمتر از -10 dB در حالی که SRR ۹۰ درجه (نسبت به موقعیت اولیه‌ی قرارگیری در پشت تلفن همراه) چرخیده است، به دست می‌آید. در شکل ۴-۲۴ مقادیر SAR شبیه‌سازی شده در فرکانس ۱۸۰۰ به همراه مقادیر S_{11} آنتن نشان داده شده است. مقدار SAR در این حالت برابر 1.13275 W/Kg است.

در نتیجه با قراردادن SRR در مقابل صفحه‌نمایش می‌توان SAR را به میزان ۵۳ درصد کاهش داد که در مقایسه با زمانی که SRR در پشت تلفن همراه است، با کاهش SAR کمتری مواجه می‌شویم. علاوه بر این قراردادن SRR در مقابل صفحه‌نمایش تلفن همراه در عمل قابل تحقق نمی‌باشد پس بهترین گزینه جهت کاهش SAR تلفن همراه که در عمل قابل اجرا است، اتصال SRR به وسیله‌ی محافظ تلفن همراه، به پشت تلفن همراه می‌باشد.



(ب)

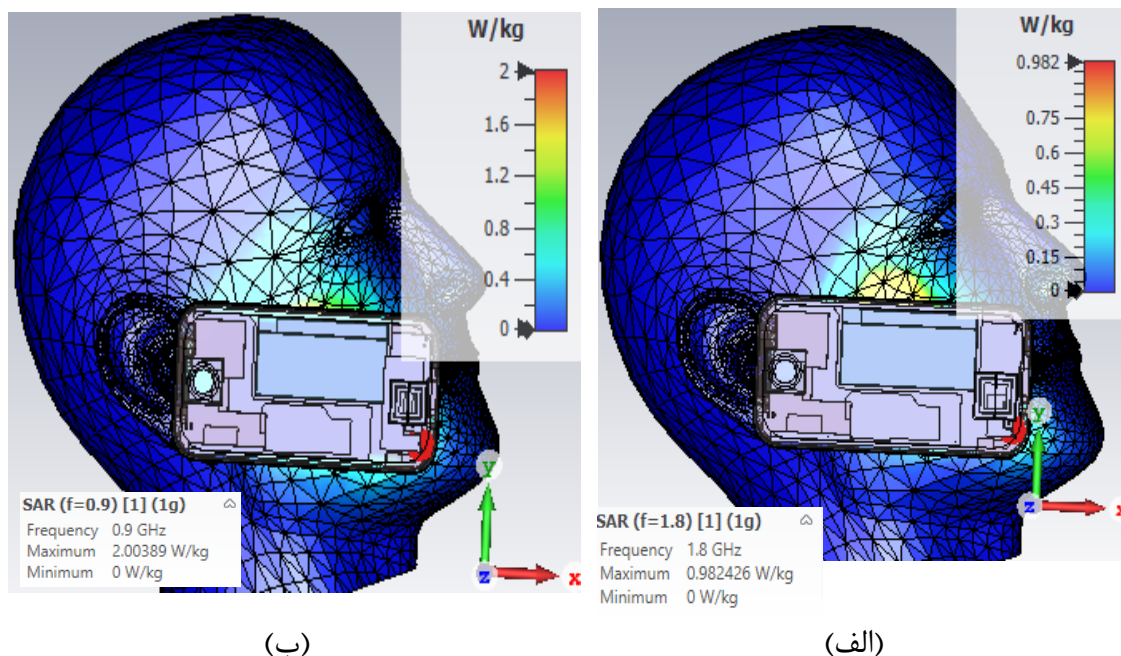


(الف)

شکل ۴-۲۴ (الف) مقادیر S_{11} و (ب) مقادیر SAR در حالت قرارگیری SRR روی صفحه‌نمایش

۷-۴- کاهش SAR با SRR با thin wire

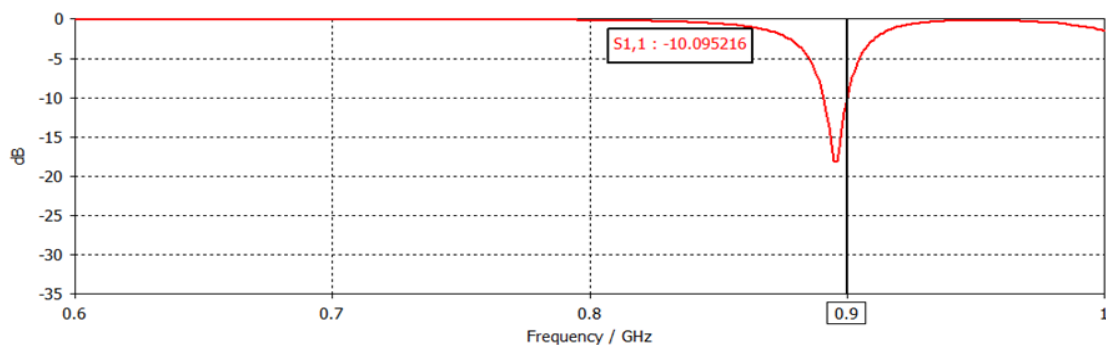
جهت کاهش SAR ناشی از تلفن همراه در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰، SRRهای طراحی شده در مقابل آنتن PIFA تلفن همراه، قرار می‌گیرد. روند شبیه‌سازی‌ها مشابه SRR بدون thin wire، ابتدا SRR موردنظر به گونه‌ای در پشت تلفن همراه قرار می‌گیرد که شکاف حلقه‌ی بیرونی به سمت بالای گوشی است. سپس با جابه‌جایی SRR در هر چهار طرف تلفن همراه، موقعیت مناسب از نظر حداکثر میزان کاهش SAR، با حفظ مقادیر کمتر از -10 dB برای S_{11} ، به دست می‌آید. به همین ترتیب SRR به میزان ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه می‌چرخد و همین روند طی می‌شود. در نهایت مشخص می‌شود، زمانی که SRR ۹۰ درجه نسبت به حالت اولیه خود می‌چرخد، بیشترین مقدار کاهش SAR را در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز به دست می‌آید. در شکل ۴-۲۵ مقادیر شبیه‌سازی شده‌ی SAR، در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ برای حالت چرخش ۹۰ درجه نشان داده شده است.



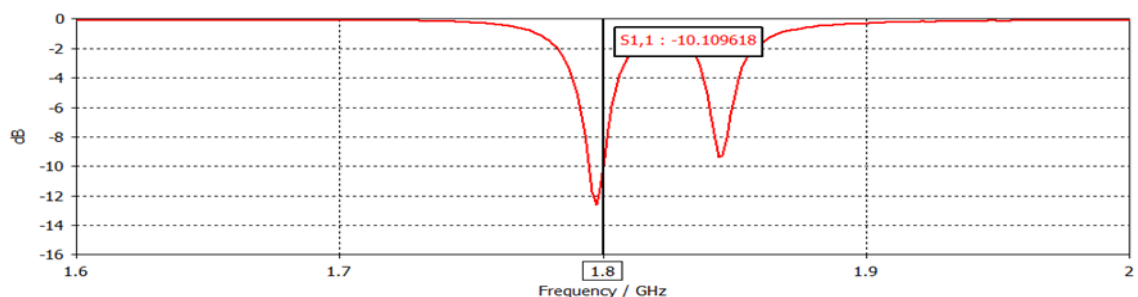
شکل ۴-۲۵ مقادیر SAR در حالت چرخش ۹۰ درجه‌ی SRR در فرکانس (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

در شکل ۲۶-۴ و ۲۷-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در موقعیت بهینه، در حالت چرخش ۹۰ درجه برای فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار S_{11} در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، برابر ۱۰.۱۰ dB- و در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز برابر ۱۰.۰۹ dB- می‌باشد.

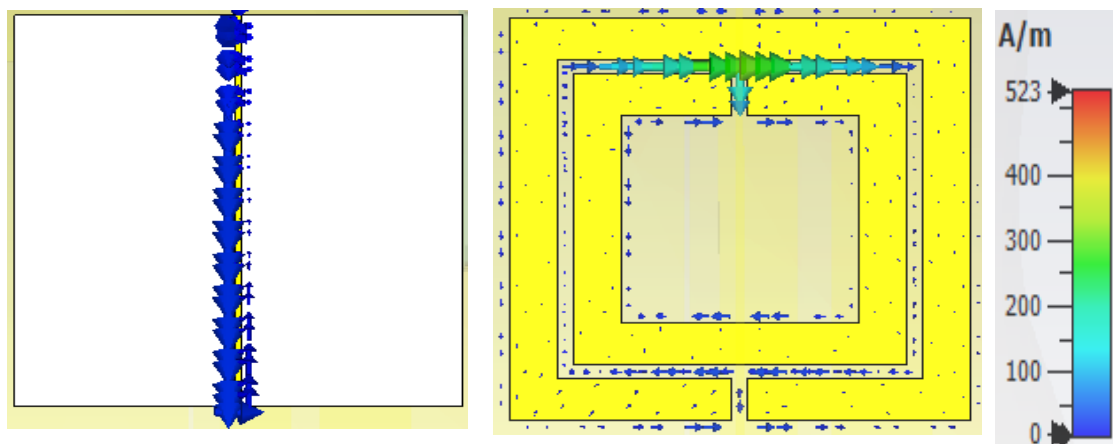
در شکل‌های ۲۸-۴ و ۲۹-۴ به ترتیب توزیع جریان سطحی روی سطح SRR پس از نصب در پشت تلفن همراه، در حالت چرخش ۹۰ درجه‌ی SRR که در آن بیشترین کاهش SAR رخ می‌دهد، در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان بین حلقه‌ها و در اطراف thin wire جابه‌جا می‌شود و تا حد زیادی منجر به ائتلاف انرژی تابشی آنتن، به سمت سر و در نتیجه کاهش SAR می‌شود. همچنین در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، نسبت به فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، توزیع جریان از شدت بالاتری برخوردار است که منجر به کاهش SAR بیشتری می‌شود.



شکل ۲۶-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز



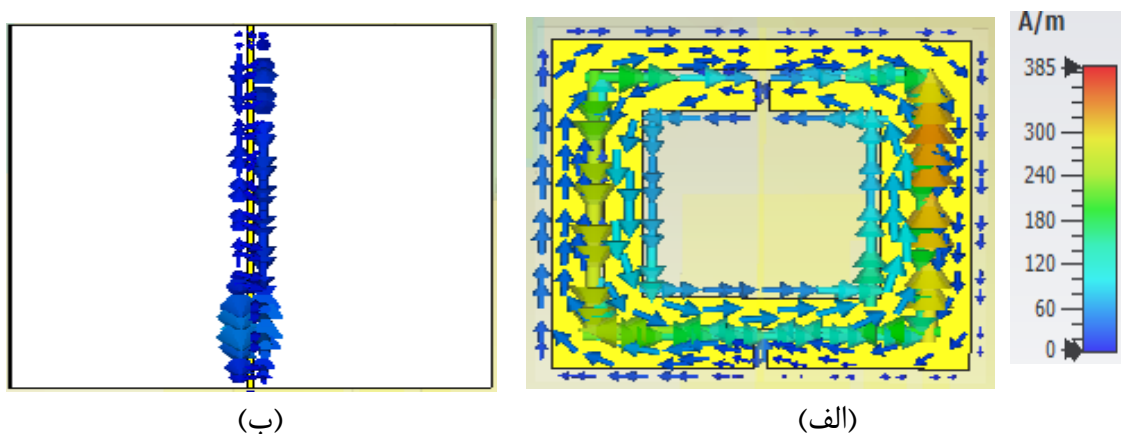
شکل ۲۷-۴ منحنی S_{11} آنتن PIFA پس از نصب SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز



(ب)

(الف)

شکل ۲۸-۴ جریان سطحی روی SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز (الف) نمای جلویی و (ب) نمای پشتی



(ب)

(الف)

شکل ۲۹-۴ جریان سطحی روی SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز (الف) نمای جلویی و (ب) نمای پشتی

در جدول ۴-۵ و ۴-۶ مقادیر S_{11} ، SAR و میزان کاهش SAR به ترتیب در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، زمانی بیشترین میزان کاهش SAR را داریم که SRR، نسبت به محل قرارگیری اولیه ۹۰ درجه چرخیده باشد که این میزان کاهش SAR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز ۲۳/۲۵ درصد و در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز ۵۹/۲۵ درصد می‌باشد.

جدول ۴-۵ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

SRR	Rotate 0	Rotate 90	Rotate 180	Rotate 270
SAR 1g (w/kg)	2.35517	2.00389	2.36579	2.01528
S ₁₁ (dB)	-10.04	-10.09	-10.10	-10.11
SAR Reduction (w/kg)	0.25545	0.60727	0.24537	0.59588
SAR Reduction (%)	9.78 %	23.25 %	9.39 %	22.82 %

جدول ۴-۶ میزان کاهش SAR در چرخش‌های مختلف SRR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

SRR	Rotate 0	Rotate 90	Rotate 180	Rotate 270
SAR 1g (w/kg)	1.56001	0.982426	1.57891	1.08284
S ₁₁ (dB)	-10.463	-10.109	-10.119	-11.751
SAR Reduction (w/kg)	0.85144	1.429024	0.83254	1.32861
SAR Reduction (%)	35.3 %	59.25 %	34.5 %	55.09%

همان‌طور که مشاهده می‌شود میزان کاهش SAR در حالت استفاده از SRR با thin wire، در مقایسه با SRR بدون thin wire کمتر است، اما ابعاد SRR با thin wire در مقایسه با SRR بدون thin wire، به‌طور قابل‌توجهی کاهش‌یافته است. در جدول‌های ۴-۷ و ۴-۸ میزان کاهش SAR و درصد کوچک‌سازی در هنگام استفاده از SRR با thin wire، به ترتیب در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. این درصد کوچک‌سازی ۵۴/۸۷ درصد در فرکانس ۹۰۰ و ۴۸/۷۸ درصد در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز می‌باشد.

جدول ۴-۷ نتایج کاهش SAR و درصد کوچک‌سازی در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

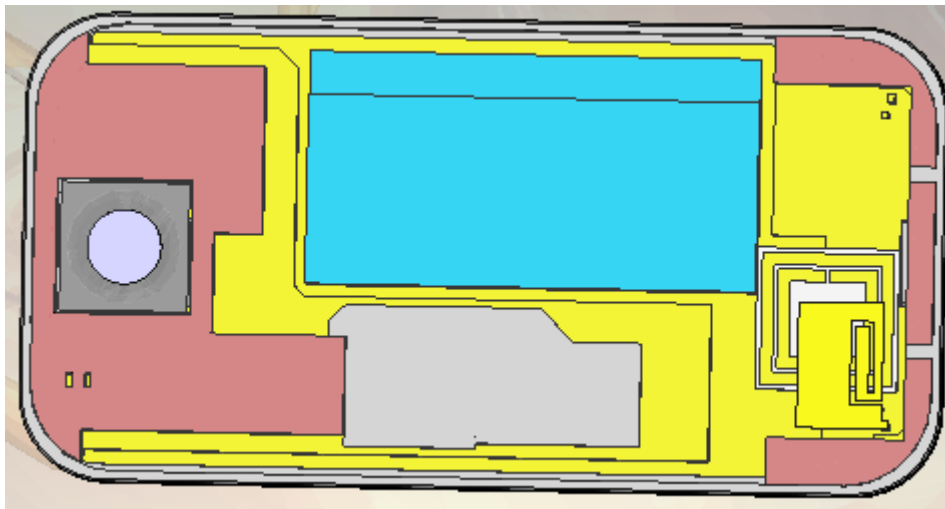
درصد کوچک‌سازی SRR	ابعاد	S_{11}	درصد کاهش SAR (1g)	
54.87 %	18.85×18.85	-10.0952	23.25 %	SRR with thin wire
-	41×41	-10.544	55.29 %	SRR without thin wire

جدول ۴-۸ نتایج کاهش SAR و درصد کوچک‌سازی در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

درصد کوچک‌سازی SRR	ابعاد	S_{11}	درصد کاهش SAR (1g)	
48.78 %	21×21	-10.109	59.25 %	SRR with thin wire
-	41×41	-10.142	64.38 %	SRR without thin wire

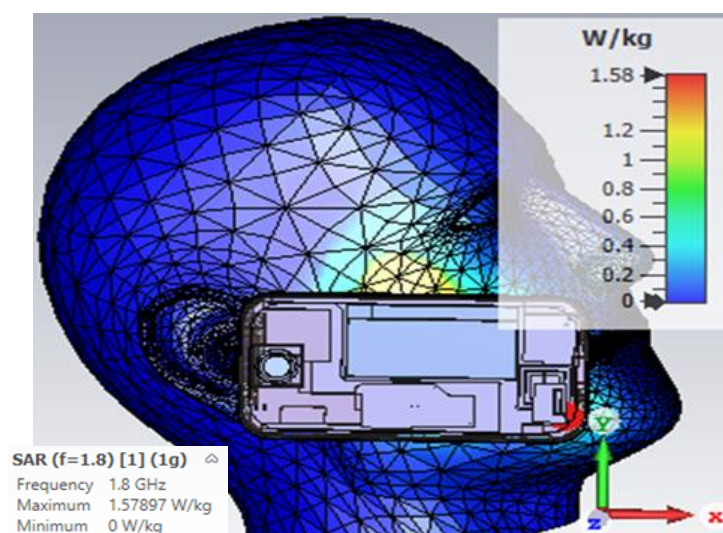
ابعاد SRR طراحی شده با thin wire در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، از نظر قرارگیری درون تلفن همراه مناسب می‌باشد، لذا جهت بررسی بیشتر SRR موردنظر درون تلفن همراه، بین پیچ تشعشی و PCB قرار می‌گیرد، تا مقادیر SAR کاهش یابد. SRR در چهار طرف فضای موجود جابه‌جا می‌شود، تا در نهایت محلی که بیشترین میزان کاهش SAR با در نظر گرفتن مقادیر کمتر از 10 dB- برای آنتن PIFA رخ می‌دهد، مشخص شود. موقعیت SRR موردنظر درون تلفن همراه، در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. همچنین میزان SAR شبیه‌سازی شده در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است که این میزان برابر 1.57897 W/Kg است. در نتیجه زمانی که SRR درون تلفن همراه قرار می‌گیرد مقادیر SAR، ۳۴.۵۲ درصد، کاهش می‌یابد که در مقایسه با زمانی که SRR در پشت تلفن همراه است،

میزان کاهش SAR کمتری حاصل می‌شود.

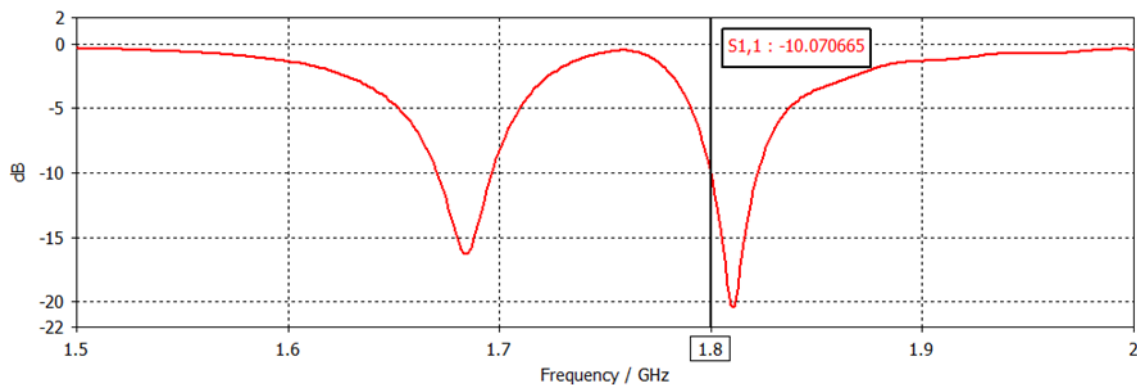


شکل ۳-۴ محل قرارگیری SRR با thin wire درون تلفن همراه

در شکل ۳-۴ پارامتر S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، زمانی که SRR درون تلفن همراه قرار می‌گیرد، نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان S_{11} در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز برابر -10.07 dB می‌باشد.



شکل ۳-۴ میزان SAR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز در حالت قراگیری SRR درون تلفن همراه



شکل ۴-۳۲ پارامتر S_{11} آنتن PIFA در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز برای حالت قرارگیری SRR درون تلفن همراه

در جدول ۴-۹ ساختار SRR بدون thin wire پیشنهادی، با چند ساختار فراموادی دیگر مورد استفاده در مراجع مختلف، از نظر میزان کاهش SAR ناشی از قرارگرفتن تلفن همراه دارای آنتن PIFA در مجاورت مدل سر، جهت کاربردهای تماس صوتی در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز و ابعاد ساختار، مقایسه و بررسی شده است. همان طور که مشاهده می شود ابعاد ساختار پیشنهادی ما از اکثر ساختارهای فراموادی استفاده شده در دیگر مقالات، کوچک تر می باشد. به علاوه ساختار پیشنهادی ما میزان کاهش SAR بیشتری را نسبت به سایر ساختارها ایجاد می کند که این نشان از برتری ساختار پیشنهادی ما نسبت به ساختارهای معرفی شده در مقالات دیگر می باشد.

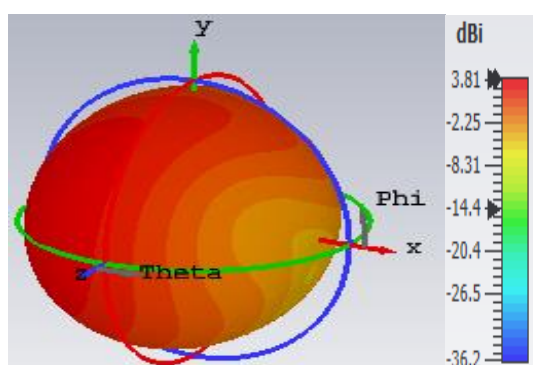
در جدول ۴-۱۰ نیز میزان کاهش SAR ناشی از تلفن همراه با آنتن PIFA و ابعاد ساختار فرامواد پیشنهادی (SRR)، در حالت بدون thin wire با سایر ساختارهای مورد استفاده در دیگر مقالات، در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود ساختار پیشنهادی ما نسبت به سایر ساختارها از نظر کاهش مقادیر SAR و ابعاد برتری محسوسی دارد.

جدول ۴-۹ مقایسه‌ی کاهش SAR و ابعاد ساختار پیشنهادی با سایر ساختارها در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز

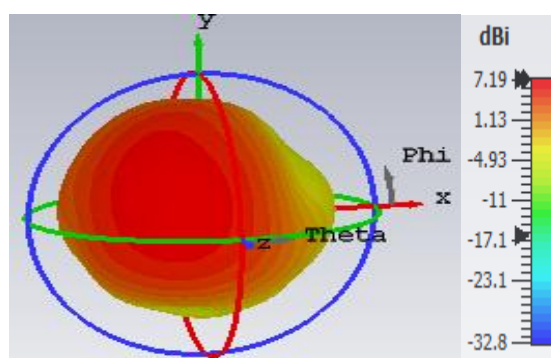
پیشنهادی طرح	[۱۷]	[۳۵]	[۳۹]	[۴۰]	SRR
۴۱ × ۴۱	۱۰۲ × ۴۲	۲۱/۵ × ۱۷/۴	۵۲ × ۳۹	۴۴/۴۴ × ۳۳/۳۳	ابعاد
٪ ۵۵/۲۹	٪ ۴۸/۲	٪ ۱۳/۲	٪ ۴۷	٪ ۴۴	میزان کاهش SAR (%)

جدول ۴-۱۰ مقایسه‌ی کاهش SAR و ابعاد ساختار پیشنهادی با سایر ساختارها در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز

پیشنهادی طرح	[۱۹]	[۳۳]	[۳۴]	[۳۵]	[۴۰]	SRR
۴۱ × ۴۱	۶۳ × ۲۷	۵۵ × ۵۵	۱۰۰ × ۴۰	۲۱/۵ × ۱۷/۴	۴۴/۴۴ × ۳۳/۳۳	ابعاد
٪ ۶۴/۳۸	٪ ۱۸/۳	٪ ۵۹/۷۸	٪ ۴۲/۳	٪ ۶	٪ ۴۳	میزان کاهش SAR (%)

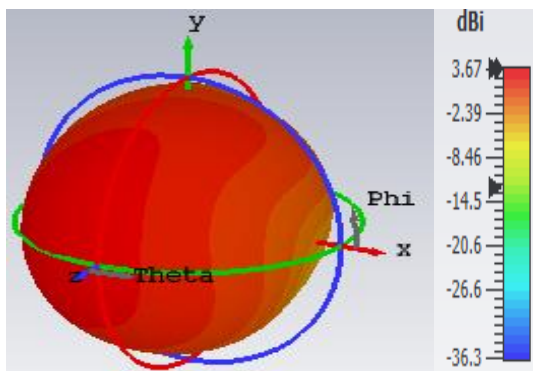


(ب)

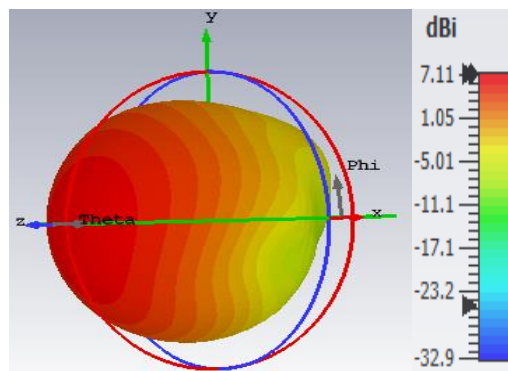


(الف)

شکل ۴-۲۳ الگوی تابشی آنتن PIFA بدون SRR اتصالی در فرکانس‌های (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

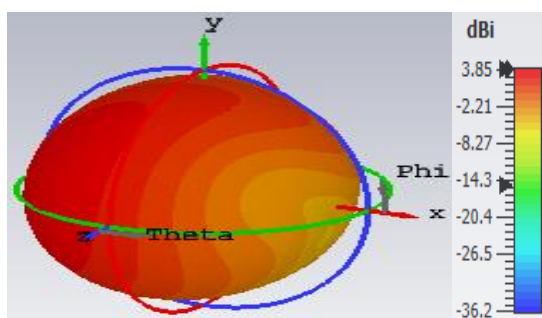


(ب)

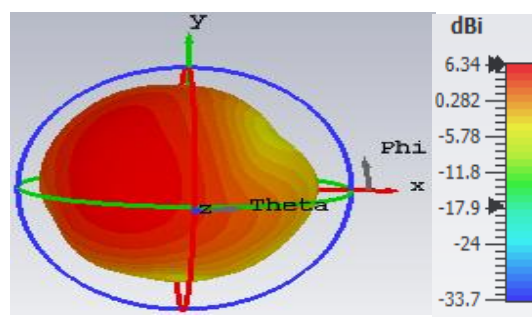


(الف)

شکل ۴-۳۴ الگوی تابشی آنتن PIFA در حالت اتصال SRR بدون thin wire در پشت تلفن همراه برای موقعیت و چرخش بهینه SRR از نظر کاهش SAR در فرکانس‌های (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز



(ب)



(الف)

شکل ۴-۳۵ الگوی تابشی آنتن PIFA در حالت اتصال SRR با thin wire در پشت تلفن همراه برای موقعیت و چرخش بهینه SRR از نظر کاهش SAR در فرکانس‌های (الف) ۱۸۰۰ و (ب) ۹۰۰ مگاهرتز

در شکل ۴-۳۳ الگوی تابشی آنتن PIFA قبل از اتصال SRR و در شکل ۴-۳۴ و ۴-۳۵ به ترتیب الگوی تابشی آنتن PIFA را با اتصال SRR بدون thin wire اتصال در موقعیت و چرخش مناسب در پشت تلفن همراه و SRR با thin wire در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز نشان داده شده است. این نتایج گویای این واقعیت است که SRR تأثیر بسیار ناچیزی بر الگوی تابشی آنتن دارد و حتی در بعضی موارد می‌تواند تأثیر مثبت بر الگوی تابش داشته باشد.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادهات

۵-۱- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر، با رشد سریع استفاده از وسایل ارتباطی بی‌سیم در بین مردم، نگرانی‌ها مربوط به قرارگرفتن انسان، در معرض امواج الکترومغناطیسی وسایل ارتباط از راه دور بی‌سیم، به‌ویژه تلفن همراه بسیار افزایش یافته است. به همین منظور در این پژوهش به بررسی تابش الکترومغناطیسی جذب شده توسط سر و ارائه راهکاری جهت کاهش آن، زمانی که یک تلفن همراه هوشمند دارای آنتن هلیکس در فرکانس کاری ۹۰۰ مگاهرتز و یک تلفن همراه هوشمند مدرن دارای آنتن PIFA در فرکانس‌های کاری ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز در مجاورت مدل سر قرار بگیرد، پرداخته شده است.

مدل فانتوم سر استفاده شده در این پژوهش جهت بررسی مقادیر SAR، معروف به مانکن ویژه‌ی آنتروپومورفیک^۱ از کتابخانه‌ی CST اقتباس شد. همچنین مدل تلفن همراه مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها، دارای تمامی تجهیزات و مطابق با تکنولوژی‌های روز دنیا می‌باشد.

روش پیشنهادی در این پژوهش جهت کاهش SAR، استفاده از یک SRR مربعی شکل در مقابل آنتن تلفن همراه است. SRR به‌گونه‌ای طراحی شده است که در فرکانس رزونانس دارای ϵ_r منفی و μ_r مثبت است که این عامل، منجر به ایجاد یک باند توقف در فرکانس رزونانس می‌شود.

فرایند کاهش SAR به این صورت است که توان تشعشعی از آنتن، باعث ایجاد جریانی در بین حلقه‌های SRR می‌شود و جابه‌جایی این جریان در بین حلقه‌ها، منجر به اتلاف توان تابشی به سمت سر و در نتیجه کاهش SAR می‌شود.

زمانی که SRR در مقابل تلفن همراه قرار می‌گیرد، تأثیرات تلفن همراه و مدل سر بر SRR باعث می‌شود که فرکانس رزونانس SRR به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا شود. به همین منظور، ضرورت دارد که این جابه‌جایی فرکانسی، پس از قرارگیری SRRهای طراحی شده در فرکانس‌های مختلف در مقابل تلفن همراه، با استفاده از روش آزمون و خطا مشخص شود و SRR با بیشترین میزان کاهش SAR، به‌عنوان SRR نهایی انتخاب می‌شود همچنین اختلاف فرکانس رزونانس آن با SRR طراحی شده در

¹ Specific Anthropomorphic Mannequin

فرکانس رزونانس آنتن، میزان جابه‌جایی فرکانسی را تعیین می‌کند.

شکل SRR در میزان کاهش SAR می‌تواند مؤثر باشد. به‌عنوان نمونه SRR مربعی شکل نسبت به SRR دایره‌ای شکل توزیع جریان بالاتری دارد که این عامل میزان کاهش SAR بیشتر را به دنبال دارد. یکی دیگر از پارامترهایی که در کاهش میزان SAR مؤثر است، جنس مواد زیرلایه است. به این صورت که هر چه زیرلایه دارای ϵ_r بالاتری باشد، می‌توانیم به میزان کاهش SAR بیشتری دست پیدا کنیم. علاوه بر این استفاده از زیرلایه با ϵ_r بالا نقش مؤثری در کاهش ابعاد SRR ایفا می‌کند. به همین منظور برای طراحی SRR در این پژوهش، زیرلایه Rogers RO3210 که قابلیت تحقق چند باند توقف را دارد، به کار گرفته شد.

فاصله‌ی SRR تا آنتن جهت تعیین مقادیر SAR حائز اهمیت است. در نتیجه پس از قرارگیری SRR در مقابل آنتن تلفن‌همراه، بهترین فاصله‌ی SRR تا آنتن از نظر میزان کاهش SAR و قابلیت پیاده‌سازی در عمل انتخاب می‌شود.

موقعیت قرارگیری SRR و فاصله‌ی SRR تا آنتن نقش مهمی در کاهش SAR دارد. بنابراین؛ جهت کاهش SAR، پس از قرارگیری SRR در مقابل آنتن در فاصله‌ی مناسب، SRR در چهار جهت جابه‌جا می‌شود، تا محل مناسب از نظر حداکثر میزان کاهش SAR تعیین شود.

جهت کاهش مقادیر SAR تلفن‌همراه با آنتن هلیکس در فرکانس ۹۰۰ مگاهرتز، دو نوع SRR بدون thin wire و با thin wire طراحی شد. حداکثر میزان کاهش SAR، زمانی که SRR بدون thin wire در موقعیت و فاصله‌ی مناسب، نسبت به آنتن هلیکس قرار می‌گیرد، برابر 38.49 % است. درحالی‌که حداکثر میزان کاهش SAR توسط SRR با thin wire، 28.26 % می‌باشد. لازم به ذکر است که حداقل میزان قابل قبول برای پارامتر S_{11} آنتن، برای تمامی حالات -10 dB در نظر گرفته می‌شود.

نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که ابعاد SRR با thin wire، نسبت به SRR بدون thin wire، ۴۶ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین؛ اگر ابعاد کوچک SRR نسبت به میزان کاهش SAR در اولویت باشد، از SRR بدون thin wire جهت کاهش SAR استفاده می‌شود.

به منظور کاهش SAR تلفن همراه دارای آنتن PIFA، دو نوع SRR بدون thin wire و با thin wire طراحی می شود، تا با قرارگیری در فاصله ی ۰/۱ میلی متری در پشت تلفن همراه، SAR را کاهش دهد. به علاوه جهت پیاده سازی در عمل پیشنهاد می شود که SRR به وسیله ی گارد محافظ تلفن همراه به پشت تلفن همراه متصل گردد.

SRR بدون thin wire دارای دو باند عدم عبور در بازه ی فرکانسی ۹۲۰ تا ۹۹۸ و ۱۶۱۰ تا ۲۰۰۰ مگاهرتز، جهت کاهش SAR در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز می باشد.

نکته ای که برای کاهش SAR آنتن PIFA، پس از قرارگیری SRR در پشت تلفن همراه مورد توجه قرار می گیرد، این است که SRR به میزان ۹۰، ۱۸۰ و ۲۷۰ درجه نسبت به حالت قرارگیری اولیه خود در پشت تلفن همراه می چرخد، تا حالتی که بیشترین کاهش SAR پس از تعیین محل قرارگیری مناسب، در پشت تلفن همراه رخ می دهد، مشخص شود. برای هر دو نوع SRR، در هر دو فرکانس ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز، بیشترین میزان کاهش SAR در حالت چرخش ۹۰ درجه SRR، در پشت تلفن همراه اتفاق می افتد. این میزان کاهش SAR برای SRR بدون thin wire به ترتیب، در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز ۵۵/۲۹ و ۶۴/۳۸ درصد می باشد.

در یک مطالعه ی موردی SRR بدون thin wire جهت کاهش SAR در فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، در مقابل صفحه نمایش تلفن همراه قرار گرفت که بیشترین مقدار کاهش SAR در بهترین حالت به ۵۳ درصد رسید. این کاهش SAR، در مقایسه با حالتی که SRR در پشت تلفن همراه قرار دارد، کمتر بوده و از لحاظ عملی نیز قابلیت پیاده سازی ندارد. این موارد حاکی از برتری حالتی است که SRR در پشت تلفن همراه قرار دارد.

دو نوع SRR با thin wire جهت کاهش SAR در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز، طراحی گردید که پس از قرارگیری در محل مناسب، در حالت چرخش ۹۰ درجه، SAR را به میزان ۲۳/۲۵ و ۵۹/۲۵ درصد به ترتیب در فرکانس های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز کاهش داد. این میزان کاهش SAR در مقایسه با SRR بدون thin wire کمتر می باشد. منتها با استفاده از SRR با thin wire، می توان ابعاد

SRR را به ترتیب در فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز ۵۴/۸۷ و ۴۸/۷۸ درصد کاهش داد.

با توجه به اندازه‌ی مناسب SRR با thin wire جهت قرارگیری درون تلفن همراه، SRR طراحی شده در فرکانس ۱۸۰۰ درون تلفن همراه، بین پچ تشعشعی و PCB قرار گرفت که در بهترین حالت میزان کاهش SAR ۳۴/۵۲ درصد می‌باشد. در مقایسه با حالتی که SRR در پشت تلفن همراه نصب می‌شود، میزان کاهش SAR کمتر است. بنابراین؛ حالتی که SRR در پشت تلفن همراه قرار می‌گیرد، مناسب‌ترین حالت جهت کاهش SAR و برای کاربردهای عملی مناسب می‌باشد.

در پایان میزان کاهش SAR و ابعاد ساختار پیشنهادی، با ساختارهای استفاده‌شده در مراجع دیگر، برای فرکانس‌های ۹۰۰ و ۱۸۰۰ مگاهرتز مقایسه شده است. نتایج حکایت از برتری ساختار پیشنهادی ما، نسبت به ساختارهای دیگر دارد.

از جمله ایده‌های جدیدی که در این پژوهش جهت کاهش میزان SAR بیشتر نسبت به سایر مقالات به کار برده شده، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. تعیین میزان جابه‌جایی فرکانسی SRR، پس از قرارگیری در مقابل آنتن تلفن همراه و طراحی SRR در فرکانس جابه‌جا شده.

۲. انتخاب مناسب‌ترین موقعیت و فاصله‌ی SRR تا تلفن همراه که در عمل قابل تحقق می‌باشد.

۳. استفاده از زیرلایه مناسب جهت طراحی SRR که علاوه بر کاهش SAR بیشتر، منجر به کاهش ابعاد SRR و تحقق چند فرکانس رزونانس می‌شود.

۴. استفاده از دو نوع SRR با thin wire و بدون thin wire، جهت کاهش SAR و مقایسه‌ی عملکرد آن‌ها

۵. بررسی چرخش‌های مختلف SRR در کاهش مقادیر SAR ناشی از تلفن همراه دارای آنتن

PIFA و انتخاب مناسب‌ترین حالت

۶. بررسی میزان کاهش SAR با اتصال SRR در پشت تلفن همراه، روی صفحه‌نمایش و داخل

۷. قابل استفاده در عمل

۸. بهره‌بردن از تلفن همراه به همراه تمامی تجهیزات داخلی، مطابق با آخرین استانداردها و

تکنولوژی‌های روز دنیا

به طور خلاصه، ساختار SRR پیشنهادی با کاهش موفقیت‌آمیز و قابل توجه مقادیر SAR ما را به

اهداف این کار تحقیقاتی رسانده است.

۵-۲- پیشنهادات

۱. بررسی میزان کاهش تلفن همراه برای کاربردهای 5G

۲. بررسی میزان کاهش SAR برای کاربردهای پیام‌رسانی، تماس تصویری و استفاده از اینترنت

۳. بررسی میزان کاهش SAR بر روی مدل دست

۴. کاهش SAR توسط SRR و CSRR جدید

۵. بررسی کاهش SAR توسط آرایه‌ی SRR

۶. کاهش SAR توسط طراحی EBG

۷. کاهش SAR توسط FSSها

۸. کاهش SAR توسط طراحی AMC جدید

۹. کاهش SAR توسط طراحی آنتن جدید با SAR کم

۱۰. بررسی کاهش SAR سایر تجهیزات الکترونیکی از جمله ساعت‌های مچی هوشمند

- [1] V. B. Kumar, "Evaluation of Electromagnetic Absorption in Human Head from Mobile Phones," *IOSR J. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 44–49, 2014, doi: 10.9790/3021-04464449.
- [2] E. R. Adair and R. C. Petersen, "Biological effects of radio-frequency/microwave radiation," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 953–962, 2002, doi: 10.1109/22.989978.
- [3] J. M. Osepchuk and R. C. Petersen, "Safety standards," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 2, no. 2, pp. 57–69, 2001, doi: 10.1109/6668.924919.
- [4] M. R. I. Faruque, M. T. Islam, and M. A. M. Ali, "A new design of metamaterials for SAR reduction," *Meas. Sci. Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 70–74, 2013, doi: 10.2478/msr-2013-0011.
- [5] R. J. Aitken, L. E. Bennetts, D. Sawyer, A. M. Wiklendt, and B. V. King, "Impact of radio frequency electromagnetic radiation on DNA integrity in the male germline," *Int. J. Androl.*, vol. 28, no. 3, pp. 171–179, 2005, doi: 10.1111/j.1365-2605.2005.00531.x.
- [6] Scenihhr, "Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health," *Sci. Comm. Emerg. New. Identified Heal. Risks*, no. March, pp. 1–64, 2007, [Online]. Available: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/en/electromagnetic-fields07/l-2/1-electromagnetic-fields.htm.
- [7] European Commisison, "EU-funded research into the impact of electromagnetic fields and mobile telephones on health," *Heal. Electromagn. fields*, vol. 1994, pp. 1–4, 2006, [Online]. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08870440701520973>.
- [8] G. Oftedal, J. Wilén, M. Sandström, and K. H. Mild, "Symptoms experienced in connection with mobile phone use," *Occup. Med. (Chic. Ill).*, vol. 50, no. 4, pp. 237–245, 2000, doi: 10.1093/occmed/50.4.237.
- [9] C. Richardson, C. R. Hamann, D. Hamann, and J. P. Thyssen, "Mobile phone dermatitis in children and adults: A review of the literature," *Pediatr. Allergy, Immunol. Pulmonol.*, vol. 27, no. 2, pp. 60–69, 2014, doi: 10.1089/ped.2013.0308.

- [10] J. Wang and O. Fujiwara, "Reduction of electromagnetic absorption in the human head for portable telephones by a ferrite sheet attachment," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 80, no. 12, pp. 1810–1815, 1997.
- [11] J. Wang, O. Fujiwarat, and T. Takagi, "Effects of ferrite sheet attachment to portable telephone in reducing electromagnetic absorption in human head," *IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat.*, vol. 2, pp. 822–825, 1999, doi: 10.1109/ISEMC.1999.810126.
- [12] M. T. Islam, M. R. I. Faruque, and N. Misran, "Design analysis of ferrite sheet attachment for sar reduction in human head," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 98, pp. 191–205, 2009, doi: 10.2528/PIER09082902.
- [13] M. R. I. Faruque, N. Misran, and M. T. Islam, "EM absorption reduction of helix with shielding material for mobile phone applications," *InECCE 2011 - Int. Conf. Electr. Control Comput. Eng.*, no. 2, pp. 17–21, 2011, doi: 10.1109/INECCE.2011.5953842.
- [14] L. K. Ragha and M. S. Bhatia, "Evaluation of SAR Reduction for Mobile Phones Using RF Shields.," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 1, no. 13, pp. 81–87, 2010, doi: 10.5120/277-437.
- [15] K. H. Chan, K. M. Chow, L. C. Fung, and S. W. Leung, "Effects of using conductive materials for SAR reduction in mobile phones," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 44, no. 2, pp. 140–144, 2005, doi: 10.1002/mop.20569.
- [16] N. H. M. Hanafi, M. T. Islam, N. Misran, and M. R. I. Faruque, "Numerical analysis of aluminium sheet for SAR reduction," *2011 IEEE Int. Conf. Sp. Sci. Commun. "Towards Explor. Equatorial Phenomena", Iconsp. 2011 - Proc.*, no. July, pp. 281–285, 2011, doi: 10.1109/IConSpace.2011.6015901.
- [17] M. I. Hossain, M. R. I. Faruque, M. T. Islam, and H. Arshad, "Design and analysis of mobile phone casing for the reduction of em absorption," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 49, no. 3, pp. 395–403, 2015, doi: 10.3233/JAE-150045.
- [18] B. Anoob, C. Unni, and S. S. Babu, "Investigation on specific absorption rate for handset antenna with electromagnetic band gap structure background," *Int. J. Eng. Sci. Innov. Technol.*, vol. 3, no. 4, 2014.
- [19] D. Shi, Y. Gao, and X. Lu, "SAR reduction on a GSM terminal with EBG structure," *Proc. - 2012 6th Asia-Pacific Conf. Environ. Electromagn. CEEM 2012*, pp. 333–336, 2012, doi: 10.1109/CEEM.2012.6410636.
- [20] S. Il Kwak, D. U. Sim, and J. H. Kwon, "Design of optimized multilayer PIFA

with the EBG structure for SAR reduction in mobile applications,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 53, no. 2, pp. 325–331, 2011, doi: 10.1109/TEMPC.2011.2134101.

[21] R. Ikeuchi and A. Hirata, “Dipole antenna above EBG substrate for local SAR reduction,” *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, no. 46, pp. 904–906, 2011, doi: 10.1109/LAWP.2011.2167119.

[22] V. Hariharan, S. Maheshwaran, S. Selvam, and N. Gunavathi, “Comparison of electromagnetic band gap (EBG) structures for specific absorption rate (SAR) reduction,” *12th IEEE Int. Conf. Electron. Energy, Environ. Commun. Comput. Control (E3-C3), INDICON 2015*, pp. 4–7, 2016, doi: 10.1109/INDICON.2015.7443616.

[23] C. Y. Wang and D. B. Lin, “Planar EBG structure in application of SAR reduction of tablet PC,” *ISAP 2014 - 2014 Int. Symp. Antennas Propagation, Conf. Proc.*, pp. 77–78, 2015, doi: 10.1109/ISANP.2014.7026538.

[24] R. Das and H. Yoo, “Application of a Compact Electromagnetic Bandgap Array in a Phone Case for Suppression of Mobile Phone Radiation Exposure,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 66, no. 5, pp. 2363–2372, 2018, doi: 10.1109/TMTT.2017.2786287.

[25] S. Bhattacharjee, M. Mitra, and S. R. B. Chaudhuri, “Improved matching and SAR reduction with little angular instable AMC based ground plane,” in *2016 IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, 2016, pp. 1–4.

[26] S. Can and A. E. Yilmaz, “Reduction of specific absorption rate with artificial magnetic conductors,” *Int. J. RF Microw. Comput. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 349–354, 2016, doi: 10.1002/mmce.20974.

[27] Y. Pinto and X. Begaud, “Monopole antenna with metamaterials to reduce the exposure,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 120, no. 3, pp. 917–925, 2015, doi: 10.1007/s00339-015-9230-0.

[28] R. A. Mellita, D. S. Chandu, and S. S. Karthikeyan, “Novel approach for enhanced reduction of SAR in a mobile phone antenna using high impedance fss,” *SPCOM 2018 - 12th Int. Conf. Signal Process. Commun.*, pp. 110–114, 2018, doi: 10.1109/SPCOM.2018.8724446.

[29] G. S. Paul, K. Mandal, J. Acharjee, and P. P. Sarkar, “Reduction of mobile phone radiation exposure using multi-stopband frequency selective surface,” *Prog. Electromagn. Res. M*, vol. 83, no. July, pp. 9–18, 2019, doi: 10.2528/PIERM19041401.

[30] J. Hwang, and F. Chen, "Reduction of the peak SAR in the human head with metamaterials," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 12, pp. 3763–3770, 2006, doi: 10.1109/TAP.2006.886501.

[31] M. Wang *et al.*, "Investigation of SAR Reduction Using Flexible Antenna With Metamaterial Structure in Wireless Body Area Network," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 6, pp. 3076–3086, 2018, doi: 10.1109/TAP.2018.2820733.

[32] T. Alam, M. R. I. Faruque, and M. T. Islam, "Specific absorption rate analysis of broadband mobile antenna with negative index metamaterial," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 122, no. 3, pp. 2–7, 2016, doi: 10.1007/s00339-016-9692-8.

[33] A. Al-Zoubi, A. Alshamali, and S. Ababneh, "Reduction of the Peak SAR in the Human Head for Mobile Phones with Metamaterials."

[34] M. R. I. Faruque, M. I. Hossain, N. Misran, M. Singh, and M. T. Islam, "Metamaterial-embedded low SAR PIFA for cellular phone," *PLoS One*, vol. 10, no. 11, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0142663.

[35] T. Alam, M. T. Islam, S. Kibria, M. Cho, and M. R. I. Faruque, "EM absorption reduction in wireless mobile antenna using printed paper-based metamaterial," *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, vol. 123, no. 1, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1007/s00339-016-0631-5.

[36] F. Bin Ashraf, T. Alam, S. Kibria, and M. T. Islam, "A compact meander line elliptic split ring resonator based metamaterial for electromagnetic shielding," *Mater. Express*, vol. 8, no. 2, pp. 133–140, 2018, doi: 10.1166/mex.2018.1419.

[37] H. Messaoudi and T. Aguilu, "Use of a Split Ring Resonators with Dipole and PIFA Antenna to Reduce the SAR in a Spherical Multilayered Head Model," in *International Conference on Multimedia Computing and Systems -Proceedings*, 2018, vol. 2018-May, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICMCS.2018.8525926.

[38] T. Ramachandran, M. R. I. Faruque, E. Ahamed, and S. Abdullah, "Specific absorption rate reduction of multi split square ring metamaterial for L- and S-band application," *Results Phys.*, vol. 15, no. September, p. 102668, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102668.

[39] A. M. Tamim, M. R. I. Faruque, M. U. Khandaker, M. T. Islam, and D. A. Bradley, "Electromagnetic radiation reduction using novel metamaterial for cellular applications," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 178, p. 108976, 2021, doi: 10.1016/j.radphyschem.2020.108976.

- [40] A. M. Tamim, M. R. I. Faruque, E. Ahamed, and M. T. Islam, “Electromagnetic absorption of SRR based double-inverse E-Shaped metamaterial for DCS, EESC, 5G, and WiMAX applications,” *Chinese J. Phys.*, vol. 66, no. June, pp. 349–361, 2020, doi: 10.1016/j.cjph.2020.03.036.
- [41] T. Ramachandran, M. R. I. Faruque, A. M. Siddiky, and M. T. Islam, “Reduction of 5G cellular network radiation in wireless mobile phone using an asymmetric square shaped passive metamaterial design,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–23, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-82105-7.
- [42] V. G. Veselago, “The Electrodynamics of Substances with Simultaneous Negative Values of ϵ and μ ,” *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [43] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications: The Engineering Approach*. John Wiley & Sons, 2005.
- [44] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Robbins, and W. J. Stewart, “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075–2084, 1999, doi: 10.1109/22.798002.
- [45] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.84.4184.

Abstract

This study aimed to demonstrate the possibility of using SRR-based metamaterials to reduce the absorption of electromagnetic energy in human head tissue. In fact, in this dissertation, a small and superficial metamaterial design has been used to reduce the absorption of mobile phone waves in the head tissue.

The reduction of SAR was evaluated by two types of SRR with thin wire and without thin wire at 900 MHz frequency for Helix antenna and PIFA antenna at 900 and 1800 MHz frequencies. The reduction in SAR due to a mobile phone with a helix antenna at a frequency of 900 MHz by SRR without thin wire is 38.49% and by SRR with thin wire is 26.28%. However, the dimensions of SRR with thin wire are 46% smaller than SRR without thin wire.

The reduction rate of SAR due to telephone with PIFA antenna by SRR without thin wire, at the frequency of 900 MHz is 55.29% and at the frequency of 1800 MHz is 64.38%.

The reduction rate of SAR due to telephone with PIFA antenna by SRR with thin wire, at the frequency of 900 MHz is 23.25% and at the frequency of 1800 MHz is 59.25%. In addition, the dimensions of SRR with thin wire are smaller than 54.87% and 48.78% at 900 and 1800 MHz, respectively, than the dimensions of SRR without thin wire.

Keywords: Specific Absorption Rate (SAR), Metamaterials, Split-ring resonator (SRR), Head Model, Mobile Phone



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical and Robotics Engineering

M.Sc. Thesis in Communication Engineering

**Evaluation of SAR rate due to mobile phones in head model
and providing a suitable solution to reduce it**

By:

Mohammad reza Mahdizadeh

Supervisor:

Dr. Javad Ghalibafan

September 2021