

# بررسی سازگاری الکترومغناطیسی در محموله‌های مخابراتی فضایی

محمد دانایی فر<sup>۱</sup> لیلا محمدی<sup>۲</sup> پدرام حاجی پور<sup>۳</sup> مهدی ابراهیم زاده<sup>۴</sup> سمانه اسفندیارپور<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری- پژوهشگاه ارتباطات و فن آوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)- تهران- ایران

[danacifar@ee.kntu.ac.ir](mailto:danacifar@ee.kntu.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری- عضو هیئت علمی پژوهشگاه ارتباطات و فن آوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)- تهران- ایران

۳- دانشآموخته کارشناسی ارشد- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یادگار امام خمینی (ره)، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان- تهران- ایران

و (عضو هیئت علمی پژوهشگاه ارتباطات و فن آوری اطلاعات- تهران- ایران)

[Hajipour@itrc.ac.ir](mailto:Hajipour@itrc.ac.ir)

۴- دانشجوی دکتری- پژوهشگاه ارتباطات و فن آوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)- تهران- ایران

۵- دانشجوی دکتری- پژوهشگاه ارتباطات و فن آوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)- تهران- ایران

**چکیده:** در این مقاله سازگاری الکترومغناطیسی و نحوه ارزیابی آن در سیستم‌های گیرنده- فرستنده مخابراتی، برای بکارگیری در مخابرات‌های فضایی بررسی شده است. مسائلی که در ارتباط با سازگاری الکترومغناطیسی مطرح می‌شود در دو سطح سیستم و زیر سیستم قابل ارزیابی است، که در این مقاله در هر دو سطح، ساختار مورد نظر ارزیابی شده است. برای هر بخش و زیر سیستم conducted emission و radiated susceptibility conducted emission و radiated emission از اهمیت بیشتری برخوارد است، که در این مقاله با توجه به اهمیت تست radiated emission در محموله- مخابراتی، این تست بررسی شده است. در نهایت به عنوان یکی از موثر ترین شیوه‌های کنترل و حفاظت در مقابل تداخل الکترومغناطیسی، شیلدینگ ادوات ارائه شده است. در این مقاله عمدۀ مسائل مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی در یک محموله مخابراتی و نحوه تست آن در یک نمونه کاربردی با استناد به استانداردهای فضایی و شبیه سازی‌ها و اندازه گیری‌های انجام شده، ارائه می‌گردد.

**کلمات کلیدی:** سازگاری الکترومغناطیسی، محموله مخابراتی، مخابرات فضایی، شیلدینگ

---

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۱/۱۹

تاریخ پذیرش مشروط : ۱۳۹۲/۴/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۴/۲۴

نام نویسنده‌ی مسئول: پدرام حاجی پور

نشانی نویسنده‌ی مسئول : دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یادگار امام خمینی (ره)، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان- دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره)- تهران- ایران

## ۲- سازگاری الکترومغناطیسی ماهواره در

### سطح سیستم

بررسی سازگاری الکترومغناطیسی در سطح سیستم دارای ابعاد مختلفی است، از جمله، تأثیرات سیستم پرتاب، رعد و برق، سیم کشی در کل محموله و ... [۲]. در این بخش مهم‌ترین مسائلی در این سطح که شامل شارژینگ فضایپما، زمین کردن و اتصالات الکتریکی بررسی شده است.

### ۱-۲- شارژینگ فضایپما و اثرات آن

ایجاد شارژ سطحی فضایپما (مرتبط با محیط پلاسمای) در حالت کلی مضر نیست؛ اما دشارژهای اختنالی می‌تواند بر عملکرد ماهواره اثر نامطلوبی داشته باشد. بیشتر اثرات نامطلوب انواع شارژینگ مربوط به قوس دشارژ، و شامل آسیب فیزیکی مواد و تولید تداخل الکترومغناطیسی (و پالسهای گذراخ حاصل) است. در اوایل دهه ۱۹۷۰ مشکلات بسیاری در مورد این پدیده در ماهواره‌ها رخ می‌داد. در نتیجه، ماموریت‌های مختلفی برای مطالعه بر روی پدیده شارژینگ انجام شد. مهم‌ترین انواع شارژینگ فضایپما، شامل شارژینگ سطح و شارژینگ دی الکتریک داخلی است. منابع و روش کاهش خطرات برای این دو متفاوت است.

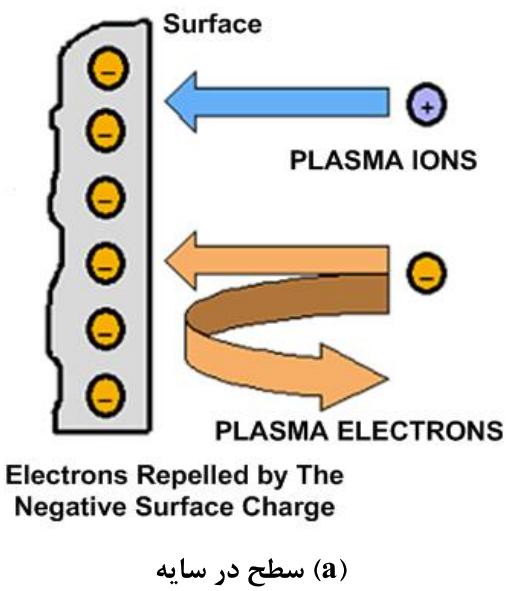
شارژینگ فضایپما بوسیله حرکت ذرات باردار به داخل و انتقال الکترون از محیط پلاسمای اطراف ایجاد می‌شود. این انرژی‌های پلاسمای در حدود چند الکترون ولت تا چند کیلو الکترون ولت هستند. شارژینگ تفاضلی سطح با انرژی‌های  $E \leq 50 \text{ keV}$  ایجاد می‌شود [۴،۵]، در حالیکه الکترون‌های با انرژی بیشتر از  $50 \text{ keV}$  می‌توانند با نفوذ از سطح فلزی فضایپما به داخل آن، شارژینگ دی الکتریک داخلی و در نتیجه دشارژ داخلی را ایجاد کنند [۶].

شارژینگ سطح از پلاسمای با انرژی کم و جریان‌های فتوالکتریک تشکیل می‌شود. از نیمه شب تا طلوع خورشید زمانی است که شارژینگ سطح می‌تواند رخ دهد. به شکل معمول، شارژینگ تفاضلی بعد از طوفان‌های گرانشی رخ می‌دهد، که نتیجه آن تزیریک الکترون‌هایی با انرژی در حدود چند کیلو الکترون ولت به درون مگنتوسفر است. در حالیکه در کسوف، فضایپما ممکن است به شکل منفی تا دهها کیلوولت شارژ شود. هنگامی که ماهواره در برابر نور خورشید قرار می‌گیرد، یک پتانسیل کافی برای دشارژ به سادگی ایجاد می‌شود، زیرا که نتیجه پرتوهای خورشید بر سطح، شارژ به شکل مثبت است.

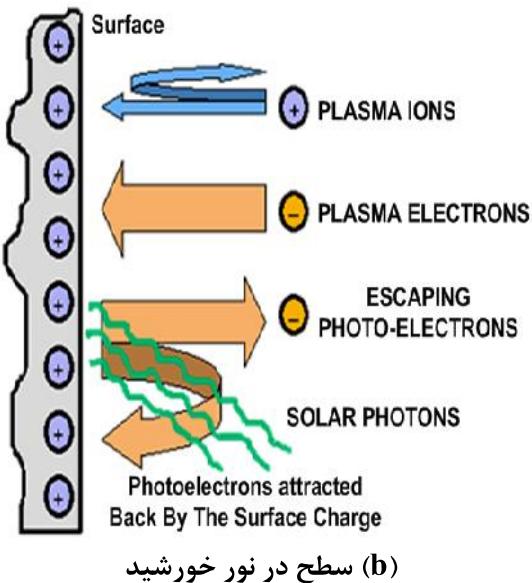
سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) شاخه‌ایی از علوم مرتبط با مهندسی برق است که به مطالعه تولید، انتشار و دریافت ناخواسته انرژی الکترومغناطیسی از منبعی با اثرات ناخواسته می‌پردازد. سازگاری الکترومغناطیسی عبارتست از توانایی یک بخش یا یک سیستم در داشتن عملکرد رضایت‌بخش در محیط الکترومغناطیسی بدون القای غیر قابل تحمل تداخل به هر آنچه که در محیط قرار دارد. بخش اول این تعریف به حساسیت و بخش دوم به انتشار در بحث EMC بر می‌گردد. به تعبیر دیگر، EMC بررسی راهکارهای جلوگیری از بروز تداخل EMC الکترومغناطیسی (EMI) در سیستم‌ها است. مسائل انتظامی یکپارچه برای جلوگیری از اثرات نامطلوب EMI است [۱]. اهمیت EMC در دنیای امروز بسیار زیاد است، زیرا با افزایش استفاده از وسایل الکتریکی و الکترونیکی، مواردی که مسائله EMC در آنها اهمیت پیدا می‌کند روز به روز افزایش می‌یابد. مشکلاتی که به واسطه EMI شکل می‌گیرد، طیف وسیعی را شامل می‌شود، از اختلال در سیگنال رسانی در تلفن همراه و رادیو تا مشکلات اساسی مانند باز نشدن به موقع چرخ‌های هواپیما. در ماموریت‌های فضایی مسائله EMC از دو جنبه اهمیت دارد. یک جنبه آن مربوط به محیط فضا و مسائلی است که برای فضایپما به واسطه قرار گرفتن آن در فضا پیش می‌آید و دیگری مربوط به قابلیت اطمینان و اهمیت کارایی تک تک قطعات و زیر سیستمهاست. در یک ماهواره به دلیل عدم دسترسی در حین ماموریت، عدم کارایی یک قطعه یا زیر سیستم منجر به اختلال در کار کل سیستم شده و نهایتاً ماموریت با شکست مواجه می‌شود. در نتیجه، EMC یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در یک ماموریت فضایی مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله مسائل EMC در دو سطح سیستم و زیر سیستم بررسی شده است. از مهم‌ترین مسائل در بررسی سازگاری الکترومغناطیسی در سطح سیستم، شارژینگ فضایپما، زمین کردن و اتصالات الکتریکی است که در بخش ۲ به آن پرداخته می‌شود. در بخش ۳ مسائل مربوطه در سطح زیر سیستم بررسی شده است، که شامل شرایط تست EMC، انواع تست‌های EMC و بررسی تست انتشار تشعشعی در فرکانس ۱۸ GHz تا 30 MHz است. در بخش ۴ به عنوان راه کاری موثر در EMC مبحث شیلدینگ ارائه شده است.



شارژینگ تفاضلی می‌تواند بوسیله سایه‌های خود ماهواره نیز ایجاد شود. راه حل اساسی برای شارژینگ تفاضلی قرار دادن زمینی مشترک برای کل سطح فضایپما (شامل ساختارهای داخلی) است. قرار گرفتن در شرایط شارژینگ تفاضلی برای فضایپما در مدار GEO محتمل‌تر است. هرچند، استفاده از سیستم توانی با ولتاژ بالا در یک ماهواره مدار پایین نیز می‌تواند اثرات محیطی مضر را افزایش دهد. شکل ۱ شارژینگ سطح در نور خورشید و سایه را نشان می‌دهد. محیط پلاسمای اساساً خنثی است، یعنی دارای تعداد برابری از الکترون‌ها و یون‌های با انرژی برابر است. اما به دلیل اینکه الکترون‌ها ذرات سبکتری هستند و بنابراین با سرعت بالاتری حرکت می‌کنند (طبق رابطه  $EK=1/2mv^2$ ، در نتیجه جریان الکترون منفی در سطح فضایپما بزرگ‌تر از جریان یون مثبت است و در تاریکی، یک سطح فضایپما دارای یار منفی خواهد شد [۷].



(a) سطح در سایه



(b) سطح در نور خورشید

شکل(۱): نمایش کیفی شارژینگ سطح بوسیله پلاسمما. عرض هر فلش متناسب با میزان شار هر نوع ذره است؛ تعادل در پتانسیل هنگامی حاصل خواهد شد که مجموع جریان های جمع شده و منتشر شده بوسیله یک المان سطح صفر باشد، (a) سطح در سایه: برای تعادل جریان نیاز است که جریان یون های پلاسمما و الکترون-های پلاسمای ریخته شده در سطح برابر باشند، (b) سطح در نور خورشید: تعادل هنگامی برقرار می شود که جریان فتوالکترون های آزاد شده با تفاوت میان جریان ورودی از الکترون ها و یون های پلاسمما برابر باشد [۸].

شارژینگ تفاضلی هنگامی رخ می‌دهد که بخشی از فضای پیمانه پتانسیلی مخالف با بخشی دیگر شارژ شود. شارژینگ مطلق در حدود چند میکرو ثانیه رخ می‌دهد. قوس‌های دشارژ هنگامی رخ می‌دهند که میدان‌های الکتریکی بوسیله شارژینگ تفاضلی از پتانسیل شکست عبور کنند. شاو و همکارانش نشان دادند که نرخ میانگین دشارژ ماهواره با افزایش فعالیتهای ژئومگنتیک افزایش می‌یابد [۹]. از عواقب مهم دشارژ، نویز در سیم کشی و ارسال اطلاعات، ایجاد قوس الکتریکی، ظاهر شدن انواع واکنش های شیمیایی ناخواسته و در نتیجه آسیب‌های فیزیکی است. شارژینگ دی الکتریک داخلی بوسیله نفوذ الکترون‌های پر انرژی به داخل مواد دی الکتریک (برای مثال بوردهای مدار چاپی) ایجاد می‌شود. این الکترون‌های پر انرژی اغلب در کمریند تشعشعی ون الن زمین یافت می‌شوند. به شکل نرمال، یک اثر گذاری ۱۰۱۰ تا ۱۰۱۱ الکترون بر سانتی متر مربع (در طی یک دوره نسبت به نرخ نشت دی الکتریک) شارژی کافی را برای قوس الکتریکی ایجاد خواهد کرد. برخی پژوهشگران اهمیت بیشتری برای شارژینگ دی الکتریک عمیق نسبت به شارژینگ سطح و آپست تک رخداد را نشان می‌دهند. استفاده از دی الکتریک‌های روزنه دار، زمین سازی و شیلدینگ مناسب می‌تواند برای کاهش احتمال شارژینگ داخلی مورد استفاده قرار گیرد.

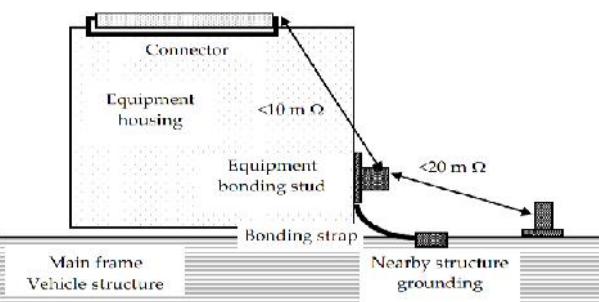
## ۲-۲- زمین کردن و اتصالات الکتریکی

در سیستم‌های فضایی طرحی جامع برای زمین سازی تعریف می‌شود. در این طرح زمین سازی، المان‌های ساختاری، زمین-های مرجع RF و آنتن، مسیر بازگشت سیگنال و توان، شیلدینگ و شیلدۀای کابل و زمین‌های امن در نظر گرفته می-شوند. با توجه به این طرح، یک دیاگرام زمین کردن در سطح سیستم باید ایجاد شود و بر طبق آن یک مرجع زمین برای هر المان یا گیرنده توان یا سیگنال شناسایی می‌شود. در این کار مقدار بالای ولتاژ مشخص می‌شود [۲].

اتصالات الکتریکی در واقع مقدمات رسیدن به زمین سازی مناسب هستند، در واقع با شبکه مناسبی از اتصالات الکتریکی در ساختار می‌توان به زمین سازی مطلوبی رسید. نقطه اتصال بخش به ساختار خودرو باید به عنوان یک نقطه مرجع زمین در سطح سیستم و یک پایه اتصال تجهیزات متصل شده به محفظه باید به عنوان یک مرجع زمین در سطح تجهیزات در نظر گرفته شوند. هر محفظه واحد به نزدیک ترین ساختار فضایپما نسبت به پایه اتصال تجهیزات متصل می‌شود. بر طبق استاندارد ECSS مقاومت DC و اندوکتانس بین پایه اتصال تجهیزات و نزدیک ترین نقطه ساختار فضایپما باید کمتر از  $2.5 \text{ m}\Omega$  و  $30\text{nH}$  باشد. برای یافتن این اندوکتانس می‌توان از رابطه (۱) برای محاسبه معمول اندوکتانس باند اتصال استفاده کرد.

$$(1) L = 200 a [\log_e(2a/b) + 0.5 + 0.22b/a]$$

که  $L$  اندوکتانس در واحد  $\text{nH}$  طول باند اتصال در واحد  $\text{m}$  و  $a$  عرض به علاوه ضخامت باند اتصال در واحد  $\text{m}$  است. مقاومت DC بین محفظه واحد و نقطه پیوست اتصال خودرو نیز کمتر از  $20 \text{ m}\Omega$  در نظر گرفته می‌شود. شمای کلی طرح اتصالات الکتریکی میان تجهیزات و زمین ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل (۲): شمای کلی طرح اتصالات الکتریکی میان تجهیزات و زمین ساختار

## ۳- سازگاری الکترومغناطیسی ماهواره در سطح

### زیر سیستم

تمام بخش‌ها و زیر سیستم‌ها با توجه به نوع و کارایی شان باید تحت تست EMC قرار گیرند. با توجه به اهمیت این تست در پروژه‌های فضایی، تست EMC برای ماهواره باید تحت شرایط ویژه‌ای انجام شود و الزامات مضاعفی در مورد شرایط این تست اعمال گردد. در ادامه به بخشی از این شرایط ویژه اشاره خواهد شد. در هر تستی اندازه گیری و محاسبه با درصد خطای خاصی مورد تائید می‌باشد. در تست EMC برای ماهواره این میزان خطا طبق جدول ۱ برای هر کمیت بیان شده است.

تمام بخش‌ها و زیر سیستم‌ها با توجه به نوع و کارایی شان باید تحت تست EMC قرار گیرند. با توجه به اهمیت این تست در پروژه‌های فضایی، تست EMC برای ماهواره باید تحت شرایط ویژه‌ای انجام شود و الزامات مضاعفی در مورد شرایط این تست اعمال گردد. در ادامه به بخشی از این شرایط ویژه اشاره خواهد شد. در هر تستی اندازه گیری و محاسبه با درصد خطای خاصی مورد تائید می‌باشد. در تست EMC برای ماهواره این میزان خطا طبق جدول ۱ برای هر کمیت بیان شده است. در ارتباط با مکان تست، محفظه‌های شیلد شده یا سایتهاشی شیلد شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. محفظه‌های شیلد شده از آبودگی اندازه-گیری‌های انتشار ناشی از سیگنال‌های محیط خارجی و از تداخل سیگنال‌های تست حساسیت با آیتم‌های الکتریکی و الکترونیکی نزدیک به تاسیسات تست جلوگیری می‌کنند. در سایتهاشی شیلد شده، تستها در زمان و شرایطی انجام می‌شود که تاثیرات الکترومغناطیسی در کمترین سطح خود باشد.

اگر از محفظه‌های شیلد شده استفاده می‌شود، محفظه‌ها باید چنان بزرگ باشند که الزامات موقعیت یا آنتن برای انواع تست-های EMC تأمین شود. در این محفظه‌ها، از مواد جاذب RF برای کاهش انعکاس‌های انرژی الکترومغناطیسی و برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان، استفاده می‌شود (مثالی از مواد جاذب RF فومهای هرمی شکل آخشته به کربن و کاشی فریت است). این مواد جاذب RF، همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، باید بالا، پشت سر، و در دو طرف دستگاه تحت آزمایش، و پشت آنتن-های تشعشع کننده و گیرنده قرار گیرند. در هر چیدمان تست به یک منبع توان نیاز است. این منبع توان از طریق یک شبکه تثبیت امپدانس وارد چیدمان می‌گردد. امپدانس منابع توان که

باید به نحوه قرار گرفتن اجزاء تست که در شکل نشان داده شده است توجه شود. در ارتباط با شرایط تست مسائلی دیگری مثل، نحوه نمونه برداری، کالیبراسیون تجهیزات، خصوصیات صفحه زمین، شناسایی و اندازه گیری انتشار، اسکن فرانکنسی و ... نیز مطرح می‌گردد.

#### ۴- انواع تست‌های EMC

با توجه به نوع قطعه و زیر سیستم و نقشی که به عنوان یک جزء در کل سیستم دارد، در ارتباط با EMC چهار دسته تست اصلی مطرح می‌گردد:

**(RE) Radiated emission**: به مولفه‌های میدان القایی و تشعشعی در فضا مربوط می‌شود و از یک یا چند آنتن برای اندازه گیری میزان تشعشعات یک دستگاه استفاده می‌شود. این میزان باید زیر محدوده مجاز باشد.

**(CE) Conducted emission**: مربوط به انرژی الکترومغناطیسی مطلوب یا غیر مطلوبی است که در طول یک کانکتور منتشر می‌شود، در واقع مشابه radiated emission است با این تفاوت که سیگنال‌ها در خطوط توان اندازه گیری می‌شوند.

**(RS) Radiated susceptibility**: برای شناسایی میزان حساسیت ادوات نسبت به تشعشعات الکترومغناطیسی از این تست استفاده می‌شود. این تست شامل یک منبع توان بالای RF یا انرژی پالس EM و یک آنتن تشعشع کننده برای شناسایی استحکام دستگاه در مقابل تشعشع است.

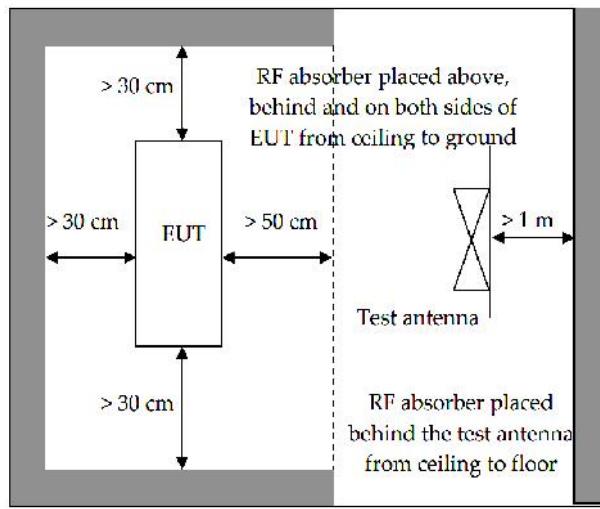
**(CS) Conducted susceptibility**: این تست شامل یک سیگنال توان بالا یا تولید کننده پالس و یک ترانسفورمر برای تزریق جریان است. و برای تعیین میزان حساسیت دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

برای هر بخش و یا زیر سیستم یکی از این تست‌های چهارگانه دارای اولویت بالاتری است. شرایط تست هر کدام از این چهار مورد با توجه به محدوده فرانکنسی و نوع المان متفاوت خواهد بود. انواع این تست‌ها در جدول ۲ ذکر شده است [۱۰].

توان ورودی به دستگاه تحت آزمایش را فراهم می‌کند. بوسیله شبکه‌های تثبیت امپدانس خط برای تمام اندازه گیری‌ها کنترل می‌شود. شکل ۴ مدار شبکه‌های تثبیت امپدانس خط را نشان می‌دهد. در این شکل، اندوکتانس‌های سری نشان دهنده اندوکتانس‌های سیم کشی است و مقاومت‌های سری نشان دهنده مقاومتهای سیم کشی و حفاظتهای مرکزی است.

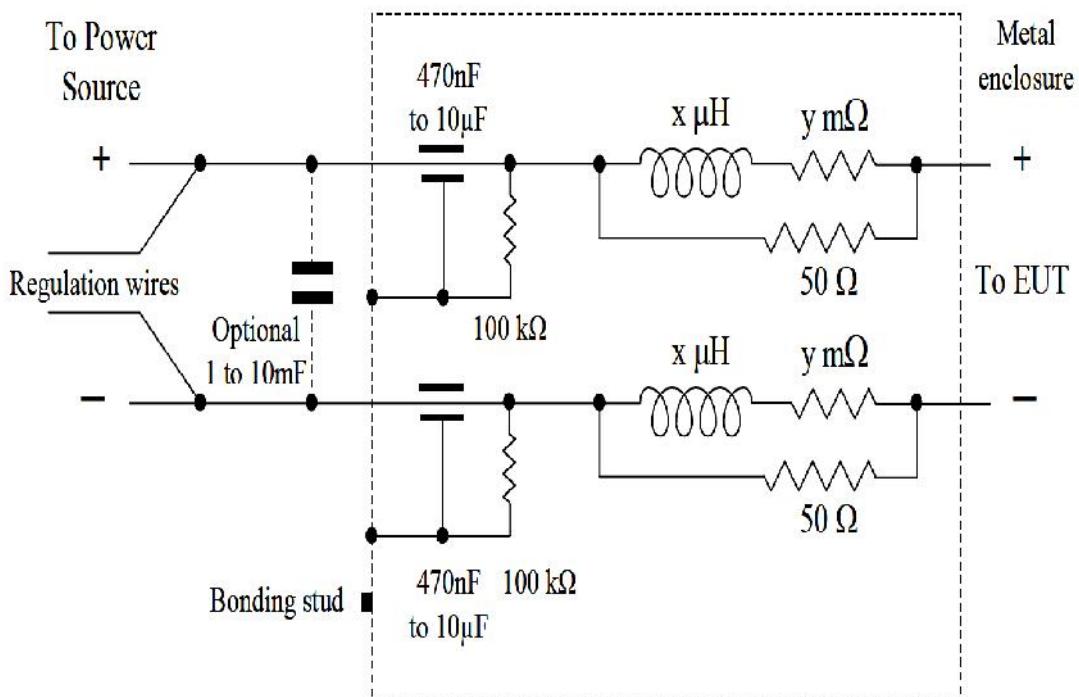
جدول (۱): میزان خطای مجاز برای هر کمیت در تست EMC

میزان خط	کمیت
$\pm 10\%$	فاصله :
$\pm 2\%$	فرکانس:
$\pm 2 \text{ dB}$	دامنه، گیرنده اندازه گیری:
$\pm 3 \text{ dB}$	دامنه، سیستم اندازه گیری (شامل گیرندهای اندازه گیری، مبدلها، کابلها، کانکتورها):
$\pm 10\%$	زمان (شکل موج):
$\pm 5\%$	مقاومت:
$\pm 20\%$	خازنها:

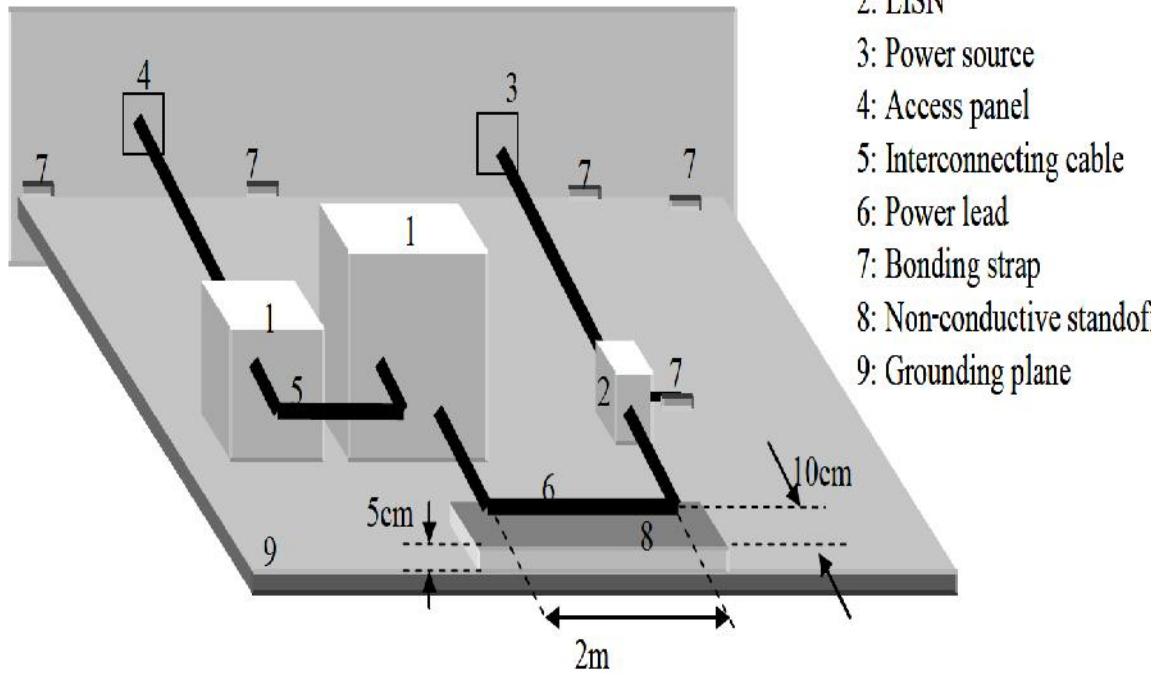


شکل (۳): دیاگرام بکارگیری جاذب RF در محفظه‌های شیلد شده

مقادیر X و Y، به ترتیب اندوکتانس و مقاومت جا زده شده در هر رابط هستند و اگر مقداری مشخص نشده باشد، باید  $x = 2 \mu\text{H}$  و  $\Omega = 0.1 = y$  درنظر گرفته شوند. هیچ تزویج مغناطیسی نباید بین سلف‌ها وجود داشته باشد. پیکره بندی کلی تست یک قطعه در شکل ۵ نشان داده شده است. برای اطمینان از صحت تست



شکل(۴): شماتیک شبکه‌ی تثبیت امپدانس خط



شکل(۵): چیدمان کلی تجهیزات تست EMC

تست، سیستم اندازه گیری بوسیله پیکره بندی تجهیزات تست مطابق شکل ۶ بررسی و تأیید می‌گردد.

برای مکان یابی آنتن EUT، نقاط مرجع فیزیکی بر آنتن‌های نشان داده شده در شکل ۷ (a) برای اندازه گیری ارتفاع آنتن‌ها و فاصله آنتن‌ها از مرز چیدمان تست در نظر گرفته می‌شوند. مکان آنتن‌ها در ۱ m از لبه جلویی مرز چیدمان تست برای تمام چیدمان‌ها است و هیچ بخشی از آنتن نزدیک تر از ۱ m از دیواره و ۰.۵ m از سقف محفظه شیلد شده نیست.

برای تست زیر ۲۰۰ MHz، برای چیدمان‌های با لبه سمت مرز ۳ m یا کمتر، مکان آنتن نسبت به لبه‌های سمت مرز در وسط قرار داده می‌شود و برای چیدمان‌های با لبه سمت مرز بزرگتر از (b) ۰.۳ m مکان آنتن در فضای نشان داده شده در شکل ۷ در نظر گرفته می‌شود. که N فاصله مرز لبه تا لبه (برحسب متر) تقسیم بر ۳ است (البته بالا برای رسیدن به عددی صحیح به سمت بالا روند می‌شود).

برای تست از بالای ۲۰۰ MHz تا 1 GHz، آنتن در تعداد مواضعی قرار می‌گیرد که کل عرض هر محفظه EUT و اولین ۳۵ cm از کابل‌ها و رابطه‌ها متصل به محفظه EUT، درون عرض بیم ۳ آنتن باشد.

برای تست در 1 GHz و بالاتر، آنتن در تعداد مواضعی قرار می‌گیرد که کل عرض هر محفظه EUT و اولین 7 cm از کابل‌ها و رابطه‌ها متصل به محفظه EUT، درون عرض بیم 3 آنتن باشد.

برای شروع فرآیندهای تست، تجهیزات اندازه گیری روش می‌شوند و بعد از رسیدن آنها به حالت پایدار تست آغاز می‌شود. قبل از تست، سیستم اندازه گیری با توجه به شکل ۶ بررسی می‌گردد. این ارزیابی شامل کل سیستم اندازه گیری، از آنتن تا دستگاه خروجی اطلاعات در بالاترین فرکانس اندازه گیری آنتن است. برای ارزیابی، یک سطح سیگنال کالیبره شده که حداقل 6 dB زیر محدوده (محدوه منهای فاکتور آنتن) باشد به کابل کواکسیال در نقطه اتصال آنتن اعمال می‌گردد، گیرنده اندازه گیری اسکن شده و اطلاعات در حدود  $3 \pm 3$  dB سطح سیگنال تزریق شده ذخیره می‌شوند. اگر مشخص شد که انحراف بیشتر از  $3 \pm 3$  dB است، منبع خطای شناسایی و عیب قبل از اقدام به تست تصحیح می‌شود. برای تأیید پیوستگی الکتریکی در سراسر آنتن از تشعشع یک سیگنال با استفاده از یک آنتن یا تشعشع کننده کوچک در بالاترین فرکانس اندازه گیری هر آنتن استفاده می‌شود و گیرنده اندازه گیری برای فرکانس سیگنال اعمال شده تنظیم

جدول (۲): تستهای چهارگانه EMC با توجه به حدود فرکانس و نوع المان

نوع تستهای EMC
CE، رابطه‌ای توان، مد دیفرانسیلی، 100 kHz تا 30 Hz
CE، رابطه‌ای توان، مد تفاضلی، 100 MHz تا 100 kHz
CE، رابطه‌ای توان، جریان هجومی
CE، رابطه‌ای سیگنال و توان، مد مشترک، 100 MHz تا 100 kHz
CE، پورت‌های آنتن
انتشار میدان مغناطیسی DC، میدان مغناطیسی
RE، میدان مغناطیسی فرکانس پایین
RE، میدان الکتریکی فرکانس پایین
RE، میدان الکتریکی، 18 GHz تا 30 MHz
CS، رابطه‌ای توان، 100 kHz تا 30 Hz
CS، تزریق کابل اپیاشته، 100 MHz تا 50 kHz
CS، رابطه‌ای توان، حالت گذرا
RS، میدان مغناطیسی، 100 kHz تا 30 Hz
RS، میدان الکتریکی، 18 GHz تا 100 MHz
حساسیت نسبت به دشارژهای الکترواستاتیکی

## ۵- تست RE، میدان الکتریکی، 18 GHz تا 30 MHz

این فرآیند تست برای تعیین میزان انتشارهای میدان الکتریکی از بخش یا زیر سیستم‌ها و کابل‌کشی همراهشان مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به خصوصیات این تست، تجهیزات زیر مورد نیاز است:

- (۱) گیرنده اندازه گیری،
  - (۲) دستگاه ضبط اطلاعات،
  - (۳) آنتن‌های پلاریزه شده خطی (معمولًا آنتن‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند):
- MHz 30 تا 200، دو مخروطی، فاصله نوک به نوک ۱۳۷ cm
- MHz 200 تا 1 GHz، هورن دو شیاری، 69 cm با دهنده ۹۴.۵ cm، یا تناوب لگاریتمی،
- GHz 18 تا 1 GHz، هورن دو شیاری، 24.2 cm با دهنده ۱۳.۶ cm
- (۴) مبدل‌های سیگنال،
  - (۵) تشعشع کننده‌های کوچک،
- پیکره بندی تست برای EUT مشابه شکل ۵ در نظر گرفته می‌شود. در این تست از LISN استفاده می‌شود. قبل از شروع

می‌گردد و برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب بصورت روابط (۲) و (۳) بیان می‌گردد:

$$SE(dB) = 20 \log \frac{E_b}{E_a} \quad (2)$$

$$SE(dB) = 20 \log \frac{H_b}{H_a} \quad (3)$$

که در روابط (۲) و (۳)،  $E_b$  شدت میدان الکتریکی قبل از قرار دادن شیلد،  $E_a$  شدت میدان الکتریکی بعد از قرار دادن شیلد،  $H_b$  شدت میدان مغناطیسی قبل از قرار دادن شیلد و  $H_a$  شدت میدان مغناطیسی بعد از قرار دادن شیلد می‌باشد. به عنوان ۹۹٪ مثل، ۲۰dB معادل ۹۰٪ تضعیف و ۴۰dB معادل ۹۹٪ تضعیف و ۶۰dB معادل ۹۹.۹٪ تضعیف می‌باشد.

از آنجایی که در فرکانس‌های بالا و در مورد امواج با دامنه‌ها و فرکانس‌های مختلف، تعابیر ولتاژ و جریان معنی ندارد، محاسبه‌ی توان بهترین ابزار برای بررسی تأثیر شیلد است. لذا برای امواج صفحه‌ای می‌توان میزان موثر بودن شیلد را بصورت نسبت چگالی توان تابیده شده به چگالی توان عبور کرده از دیواره‌ی شیلد بیان نمود. که بصورت رابطه‌ی (۴) تعریف می‌شود

[۱۱]

$$SE(dB) = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{چگالی توان در یک نقطه بدون خضور شیلد}}{\text{چگالی توان در یک نقطه با خضور شیلد}} \right) \quad (4)$$

با توجه به مطالعه ارائه شده، می‌توان میزان موثر بودن شیلدینگ را برای یک صفحه‌ی فلزی سطح بطوری که میدان الکترومغناطیسی تابشی بصورت عمود به آن برخورد نماید، را به فرم رابطه‌ی (۵) تعریف کرد، که در آن  $A$  ضخامت شیلدینگ،  $R$  ضریب انتقال و  $C$  ثابت انتشار شیلد می‌باشد.

$$SE = 20 \log |e^{\gamma R}| + 20 \log \left| \frac{1}{\tau} \right| + 20 \log |1 - \tau e^{2\gamma R}| \quad (5)$$

همانطور که می‌دانیم سطح یک فلز در برابر موج الکترومغناطیسی به عنوان شیلد عمل می‌کند. در واقع بخشی از انرژی الکترومغناطیسی منعکس شده و بخشی از آن در فلز جذب می‌شود و باقیمانده آن از فلز عبور می‌کند. بنابراین می‌توان میزان موثر بودن شیلدینگ را با توجه به میزان تلفات و انعکاس ناشی از فلز (شیلد) بصورت رابطه‌ی (۶) بیان کرد.

$$SE = A + R + C \quad (6)$$

در فرمول (۶)  $A$  نشان دهنده میزان تلفات جذبی،  $R$  میزان تلفات انعکاسی و  $C$  فاکتور تصحیح برای در نظر گرفتن انعکاس

می‌گردد و اینکه سیگنال دریافت شده با دامنه مناسب وجود دارد، تأیید می‌شود. البته این ارزیابی می‌تواند نشانه‌ایی واضح باشد که آنتن عملکرد مناسبی دارد و نیاز نیست که سطح سیگنال به دقت اندازه گیری شود. حال با توجه به رنج فرکانسی مورد نظر، در چهارچوب پهنه‌ای باندها و زمان‌های اندازه گیری مورد نظر، گیرنده اندازه گیری اسکن می‌شود.

مشابه چنین روش تستی، برای دیگر موارد تست EMC (ذکر شده در جدول ۲) در فرکانس‌های مختلف در [۲] ارائه شده است.

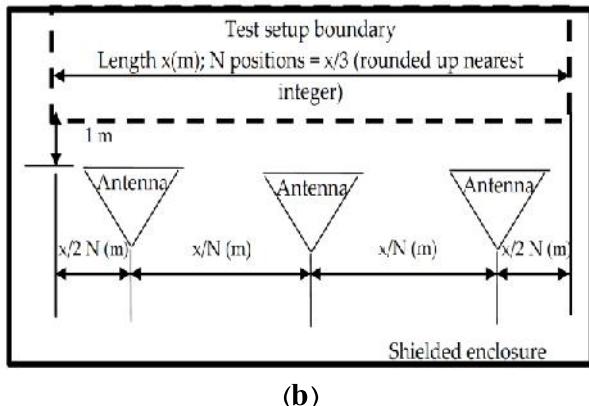
## ۵- شیلدینگ

شیلدینگ یکی از روش‌های اصلی جهت کاهش تداخل میدان‌های الکترومغناطیسی است. باید توجه نمود که جهت حفاظت کامل سیستم می‌باشد روش‌های دیگر حفاظت نظری زمین‌کردن، فیلترکردن اتصالات همراه با شیلدینگ لاحظ شود. استفاده از مواد هادی (شیلد) جهت جلوگیری از نفوذ میدان‌های الکترومغناطیسی به درون تجهیزات الکترونیکی یا الکتریکی را شیلدینگ الکترومغناطیسی می‌نامند. شیلدها عموماً از مواد فلزی تشکیل می‌شوند و اساس کار آن‌ها بر این است که با توجه به ضخامت شیلد و مواد سازنده‌ی آن، به هنگام برخورد میدان‌های الکترومغناطیسی با آن‌ها به واسطه‌ی انعکاس اولیه و انعکاسات مداوم موج درون شیلد، مقدار زیادی از انرژی موج به جریان‌های الکتریکی در شیلد تبدیل شده و مقداری از آن نیز به صورت حرارت جذب شیلد می‌گردد و عمل آنرژی بسیار اندکی از شیلد عبور می‌کند. اساس این روش این است که چنان‌چه یک سامانه‌ی الکترونیکی به وسیله‌ی پوششی استنار شده باشد این پوشش می‌تواند با جذب یا انعکاس میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (انرژی الکترومغناطیسی) و امواج صفحه‌ای، گیرنده را از تأثیر و تأثیرات ناخواسته‌ی این میدان‌ها محافظت کند.

### ۵-۱- میزان موثر بودن شیلد

در بحث مربوط به شیلدینگ سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی برای مشخص نمودن کارایی حفاظتی شیلدینگ در برابر منابع نویز الکترومغناطیسی پارامتری به نام میزان موثر بودن شیلد مطرح می‌گردد.

میزان موثر بودن شیلد کمیتی است که مقدار موثر بودن یک شیلد را در کاهش انرژی الکترومغناطیسی تابیده شده نشان



(b)

شکل (۷): (a) مکان یابی آنتن برای تست انتشار تشعشع میدان الکتریکی، (b) مکانهای آنتن چندگانه برای تست انتشار تشعشع میدان الکتریکی.

## ۶- تلفات جذبی

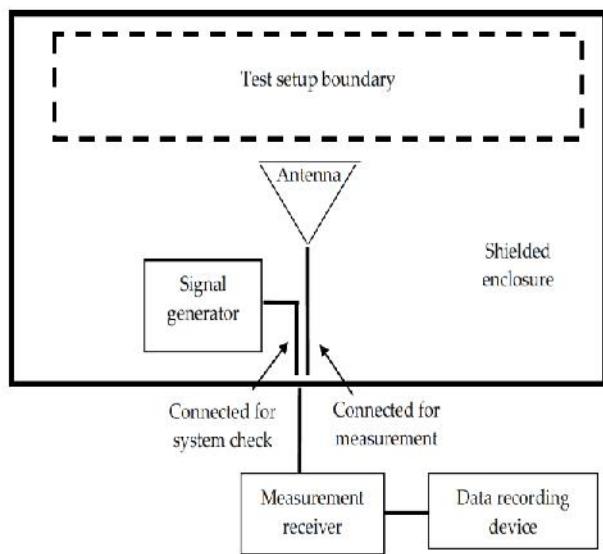
تلفات جذبی موج تابشی عبوری از شیلدینگی به ضخامت  $\ell$  از رابطه‌ی (۷) بدست می‌آید [11]

$$A = K_1 \ell^2 \sqrt{f \mu_r g_r} \text{ dB} \quad (7)$$

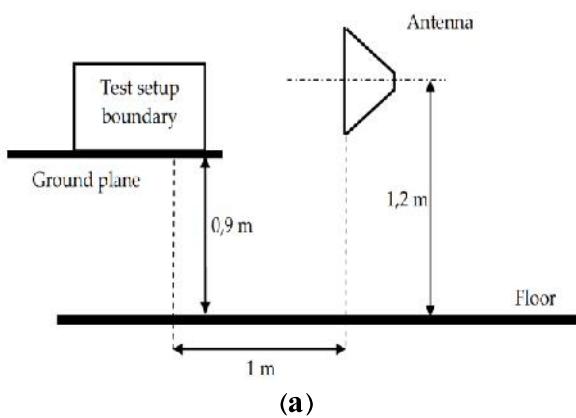
که اگر  $\ell$  بحسب متر باشد، داریم  $K_1 = 131.4$

در فرمول فوق  $\ell$  ضخامت شیلدینگ،  $f$  فرکانس موج تابشی بر حسب هertz،  $\mu_r$  ضریب گذردهی مغناطیسی ماده‌ی شیلد، و  $g_r$  ضریب هدایت الکتریکی ماده‌ی شیلد نسبت به مس می‌باشد. با توجه فرمول (۷) می‌توان گفت که میزان تلفات جذبی با ضخامت لایه‌ی شیلدینگ رابطه‌ی مستقیم داشته و همچنین با مجذور فرکانس موج تابشی نیز متناسب است. در جدول ۳ میزان تلفات جذبی برای سه جنس مختلف از شیلدینگ (آهن، مس و آلومینیوم) در فرکانس‌های مختلف ارائه شده است.

مضاعف است. در نتیجه با تعیین دقیق میزان تلفات جذبی، تلفات انعکاسی و فاکتور تصحیح، می‌توان مقدار موثر بودن شیلدینگ را بدست آورد. از آنجا که این کمیت‌ها تابعی از فرکانس موج تابشی، ضخامت لایه‌ی شیلدینگ، ضریب گذردهی مغناطیسی و ضریب رسانایی الکتریکی فلز (شیلد) است، تلفات انعکاسی و فاکتور تصحیح را برای موج الکترومغناطیسی با امپدانس پایین ( $Z \ll 377\Omega$ )، موج با امپدانس بالا ( $Z = 377\Omega$ ) و موج مسطح ( $Z \gg 377\Omega$ ) محاسبه می‌کنیم.



شکل (۶): انتشار تشعشع میدان الکتریکی. چیدمان تست پایه ای برای بررسی و تأیید سیستم اندازه گیری



جدول (۳): میزان تلفات جذبی برای آهن، مس و آلومینیوم به ضخامت یک میلی‌متر

آلومینیوم		مس		آهن		فرکانس
ضریب گزددهی مغناطیسی ( $\mu$ )	تلفات جذبی (dB)	ضریب گزددهی مغناطیسی ( $\mu$ )	تلفات جذبی (dB)	ضریب گزددهی مغناطیسی ( $\mu$ )	تلفات جذبی (dB)	
1	0.8	1	1	1000	13	60 Hz
1	3	1	4	1000	54	1 kHz
1	10	1	13	1000	171	10 kHz
1	40	1	56	1000	663	150 kHz
1	103	1	131	700	1430	1 MHz
1	178	1	228	600	2300	3 MHz
1	325	1	416	500	3830	10 MHz
1	397	1	509	400	4200	15 MHz
1	1030	1	1310	100	5420	100 MHz
1	3250	1	4160	50	12110	1 GHz
1	3970	1	5090	10	6640	1.5 GHz
1	10300	1	13140	1	5420	10 GHz

ضریب هدایت الکتریکی (g): آهن: ۰.۱۷، مس: ۰.۶۱ و آلومینیوم: ۰.۶۱

همین اساس ضریب تصحیح انعکاس مجدد می‌تواند اثرات ناشی از پدیده‌ی فوق را توضیح دهد. در کتاب‌های شیلدینگ مقدار ضریب تصحیح برای حالت‌های مختلف بصورت جداول جامعی آمده است. مقدار ضریب تصحیح وابسته به فرکانس و ضریب گزددهی مغناطیسی ماده‌ی شیلد و هدایت الکتریکی ماده‌ی شیلد است.

## ۷- تلفات انعکاسی

همانطور که پیش از این اشاره شده بود پارامتر دیگری که در میزان موثر بودن شیلدینگ موثر است مقدار تلفات انعکاسی است. این ضریب با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$R = -20 \log |\tau| \text{ dB} \quad (8)$$

در رابطه (۸)  $\tau$  ضریب انتقال برای شیلد است که وابسته به امپدانس موج، فرکانس موج تابشی و پارامترهای شیلدینگ ماده است.

برای محاسبه‌ی ضریب انعکاس سه نوع موج الکترومغناطیسی را بر اساس امپدانس موج در نظر می‌گیریم. از آنجا که امپدانس موج نسبت میدان الکتریکی به میدان مغناطیسی است در نتیجه برای میدان مغناطیسی قوی موج امپدانس پایین خواهد بود و برای موج با میدان الکتریکی بزرگ موج با امپدانس بالاخواهد بود. در نتیجه مقدار تلفات انعکاسی برای موج با امپدانس پایین، بالا و موج مسطح باید محاسبه شود.

## ۸- فاکتور تصحیح انعکاس مجدد

آخرین پارامتر تأثیرگذار روی میزان موثر بودن شیلدینگ فاکتور تصحیح انعکاس مجدد است. چنان‌چه میزان تلفات جذبی شیلدینگی به اندازه کافی بزرگ باشد (حداقل 10dB) میزان انرژی که به سطح دوم شیلد می‌رسد بسیار ناچیز خواهد بود، بطوری که می‌توان از محاسبه‌ی ضریب تصحیح خودداری کرد. اگر این تلفات به اندازه‌ی کافی بزرگ نباشد، میزان قابل توجهی از انرژی وارد بدنه‌ی شیلدینگ شده و پس از برخورد با سطح دوم شیلدینگ، انعکاس مجدد به درون شیلدینگ خواهد داشت. بر

## ۹- طبقه‌بندی شیلدینگ

در روش‌های متداول حفاظت در مقابل تداخل‌های الکترومغناطیسی از محفظه‌ی بسته فلزی (شیلد) یا اتاق شیلداستفاده می‌شود. این محفظه‌ی شیلد به همراه زمین شدن

که تغییر ابعاد در منطقه تحت حفاظت، کار چندان آسانی نیست اولین مرحله در طراحی شیلد آنها انتخاب فضای مورد نیاز برای حفاظت است. از این رو با توجه به نوع کاربرد می‌توان ابعاد محفظه را به ترتیب زیر طراحی کرد:

- فقط تجهیزات حساس را شیلد نمود.
- فقط بخش الکترونیکی سیستم را شیلد نمود و بقیه تأسیسات نظیر ژنراتورها، تهویه‌ها/اگرم کننده‌ها را در خارج شیلد قرار داد.
- کل سیستم را شیلد کرد.

مقدار فضایی که باید شیلد شود به نوع سیستم و هدف از شیلدینگ آن بستگی دارد. با توجه به نوع سامانه‌ی حفاظتی می‌توان از محفظه‌های شیلد و یا اتاق شیلد استفاده نمود. محفظه‌ی شیلد معمولاً برای حفاظت یک سیستم الکترونیکی و یا مخابراتی به کار می‌رond و در ابعاد کوچک ساخته می‌شوند. اما در صورتی که حفاظت کل تجهیزات در یک سامانه مورد نظر باشد از اتاق‌های شیلد استفاده می‌کنند.

مناسب باعث حفاظت موثر می‌شود. با توجه به نوع سامانه‌ی تحت حفاظت، چند نوع شیلدینگ وجود دارد:

شیلدینگ سراسری: این شیلدینگ به معنی پوشش کامل تجهیزات مورد نظر است. در این حالت تمام هادی‌ها و روزنه‌ها پوشیده می‌شوند. این پوشش کل دیوارهای بیرونی، کف، سطوح تجهیزات را پوشش می‌دهد. در ماهواره می‌توان سازه‌ی خارجی ماهواره را به عنوان شیلدینگ سراسری مطرح کرد که در آن کلیه‌ی المان‌های ماهواره به گونه‌ای مناسب شیلد می‌شوند. البته کلیه‌ی محفظه‌های شیلد جزء این دسته هستند.

شیلد کابل فلزی یا هادی: این نوع شیلدینگ برای کابل‌هایی که از یک ناحیه‌ی حفاظتی به ناحیه‌ی حفاظتی دیگر می‌روند، به کار می‌رond، مثلاً سیگنال‌های RF آنتن که به طرف گیرنده جریان دارد. برای شیلدینگ کابل‌ها معمولاً از مواد شیلد بصورت توری فلزی استفاده می‌کنند.

شیلدینگ در محل ورودی: برای دسترسی به تجهیزات داخل محفظه‌ی شیلد و یا ارتباط تجهیزات با فضای بیرون، نصب در یا دریچه‌ی مناسب در اتاق یا محفظه‌ی شیلد ضروری است. از آنجا

جدول (۴): میزان موثر بودن شیلدینگ محاسبه شده‌ی کل، برای انواع میدان‌های تابشی از جنس آلومینیوم

فرکانس (Hz)	ضخامت (mm)	منبع	خصوصیات	R: تلفات انعکاسی (dB)	A: تلفات جذبی (dB)	C: فاکتور تصحیح (dB)	SE=A+R+C میزان موثر (dB)	بودن شیلد (dB)
1 M	0.254	L		62	26	0	88	
1 M	0.254	D		150	26	0	176	
15 M	0.254	L		79	100	0	179	
15 M	0.254	D		115	100	0	215	
100 M	0.254	L		82	260	0	342	
100 M	0.254	D		90	260	0	350	

L: میدان نزدیک حلقه یا دو قطبی مغناطیسی، در فاصله cm 30 از شیلد  
D: میدان نزدیک دو قطبی الکتریکی، در فاصله cm 30 از شیلد

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، بررسی سازگاری الکترومغناطیسی بخشی حیاتی برای اکثر پروژه‌هایی است که با سیگنال‌های الکتریکی و امواج الکترومغناطیس سر و کار دارند. سازگاری الکترومغناطیسی در محموله مخابراتی پروژه‌های فضایی در ماهواره‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله به مساله سازگاری الکترومغناطیسی در سطح سیستم پرداخته شد و در ارتباط با آن مباحث شارژینگ سطح، زمین کردن و اتصال الکتریکی در پروژه‌های فضایی مطرح شد. شرایط ویژه‌ایی که در ارتباط با تست در ماهواره باید رعایت شود و همچنین چهار دسته تست EMC در سطح زیر سیستم بررسی گردید و یکی از

## مراجع

- [1] Jinghui Qiu, Lingling Zhong, Bo Sun and Zhang Ning,"Research of Circular Disc Ultra Wideband Emc. Measuring Antenna", 18th Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2008). 8~12 September, Sevastopol, Crimea, Ukraine, 2008.
- [2] ECSS-E-ST-20-07C, Space engineering, Electromagnetic compatibility (31 July 2008).

حساسیت	Susceptibility
نونک به نونک	Tip to Tip
ون آلن	Van-Allen

- [3] James Colotti, EMC Design Fundamentals, Telephonics –Command Systems Division, 2005.
- [4] ECSS-E-ST-20-06C, Spacecraft charging, (31 July 2008).
- [5] S.E. DeForest, "Spacecraft charging at synchronous orbit," Journal of Geophysical Research, vol. 77, no. 4, pp. 651-659, Feb. 1972.
- [6] H.B. Garrett, "The charging of spacecraft surfaces," Reviews of Geophysics and Space Physics, vol. 19, no. 4, pp. 577-616, Nov. 1981.
- [7] R.D. Leach, M.B. Alexander, Failures and Anomalies Attributed to Spacecraft Charging, NASA RP-1375, Marshall Space Flight Center, AL, Aug. 1995.
- [8] R. Grard, K. Knott, Pedersen, "Spacecraft charging effects," Space Science Reviews, vol. 34, pp. 289-304, 1983.
- [9] R.R. Shae, J.E. Nanovicz, R.C. Adamo, "Observations of electrical discharges caused by differential satellite-charging," from the AIAA Symposium on "Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas" held in Washington, D.C., June 1975, Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 47, pp. 61-76, MIT Press, 1976.
- [10] MIL-STD-461E, Requirement for the Control of Electromagnetic Interference Characteristic of Subsystems and Equipment, Department of Defense Interface Standard, 20 August 1999.
- [11] J. Architectural Electromagnetic Shielding Handbook: A Design and Specification Guide, Leland H. Hemming.
- [12] P. Hajipour, M. Danaefar, M. Ebrahimzadeh, S. Radiom, "Space Environment and Evaluation of Typical High Altitude Satellite", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.10- No.2- Fall & Winter 2013.

## پیوست

معادل فارسی	لغات انگلیسی
عرض بیم	Beam width
دومخروطی	Biconical
قوس دشارژ	Discharge Arcing
هورن دوشیاری	Double Ridge Horn
انتشار	Emission
سازگاری الکترومغناطیسی	Electro Magnetic Compatibility (EMC)
تماکن الکترومغناطیسی	Electro Magnetic Interference (EMI)
شارژینگ دی الکتریک داخلی	Internal Dielectric Charging
مگنتوسفر	Magnetosphere
راپط	Lead
میزان موثر بودن شیلد	Shielding Effectiveness
آپ ست تک رخ داد	Single Event Upset(SEU)
طوفان	Sub storm
شارژینگ سطحی	Surface Charging