بررسی سازگاری الکترومغناطیسی در محموله‌های مخابراتی ماهواره‌های فضایی

محمد دانایی فر[1] لیلا محمدی[2] پدرام حاجی پور[3] مهدی ابراهیم زاده[4] سمانه اسفندیارپور[5]

۱- دانشجوی دکتری- پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)- تهران- ایران
danaeifar@ee.kntu.ac.ir
۲- دانشجوی دکتری- عضو هیئت علمی پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری 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 فن‌آوری اطلاعات- تهران- ایران)
Hajipour@itrc.ac.ir
۴- دانشجوی دکتری- پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)- تهران- ایران
۵- دانشجوی دکتری- پژوهشگاه ارتباطات و فن‌آوری 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 ماهواره‌های 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 یکی از چهار دسته تست: radiated emission، conducted emission، radiated susceptibility و conducted susceptibility، از اهمیت بیشتری برخوارد است، که در این مقاله با توجه به اهمیت تست radiated emission در محموله- های 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 عمده 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، ماهواره، الزامات 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

۱- مقدمه

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 رضایت بخش 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 الکترومغناطیسی (EMI) در سیستم‌ها است. مسائل EMC 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 مساله 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 چرخ-های هواپیما. در ماموریت‌های فضایی مساله EMC از دو جنبه اهمیت دارد. یک جنبه آن مربوط به محیط فضا و مسائلی است که برای فضاپیما 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 نهایتا ماموریت با شکست مواجه می‌شود. در نتیجه، EMC یکی از مهمترین مسائلی است که در یک ماموریت فضایی مورد توجه قرار می-گیرد. در این مقاله مسائل EMC در دو سطح سیستم و زیر سیستم بررسی شده است. از مهم ترین مسائل در بررسی سازگاری الکترومغناطیسی در سطح سیستم، شارژینگ فضاپیما، 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 30 MHz تا 18 GHz است. در بخش ۴ به عنوان راه کاری موثر در EMC مبحث شیلدینگ ارائه شده است.

۲- سازگاری الکترومغناطیسی ماهواره در سطح سیستم

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

۲-۱- شارژینگ فضاپیما و اثرات آن

ایجاد شارژ سطحی فضاپیما (مرتبط با محیط پلاسما) در حالت کلی مضر نیست؛ اما دشارژهای احتمالی 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 گذرای 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 فضاپیما، شامل شارژینگ سطح و شارژینگ دی الکتریک داخلی است. منابع و روش کاهش خطرات برای این دو متفاوت است.

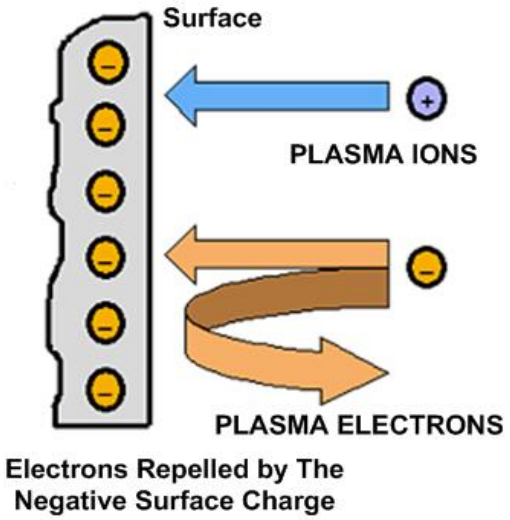
شارژینگ فضاپیما بوسیله حرکت ذرات باردار به داخل و انتقال الکترون از محیط پلاسمای اطراف ایجاد می‌شود. این انرژی‌های پلاسما در حدود چند الکترون ولت تا چند کیلو الکترون ولت هستند. شارژینگ تفاضلی سطح با انرژی‌های $E \leq 50$ keV ایجاد می‌شود [۴،۵]، در حالیکه الکترون‌های با انرژی بیشتر از 50 keV می‌توانند با نفوذ از سطح فلزی فضاپیما 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 تزریق الکترون‌هایی با انرژی در حدود چند کیلو الکترون ولت به درون مگنتوسفر است. در حالیکه در کسوف، فضاپیما 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.

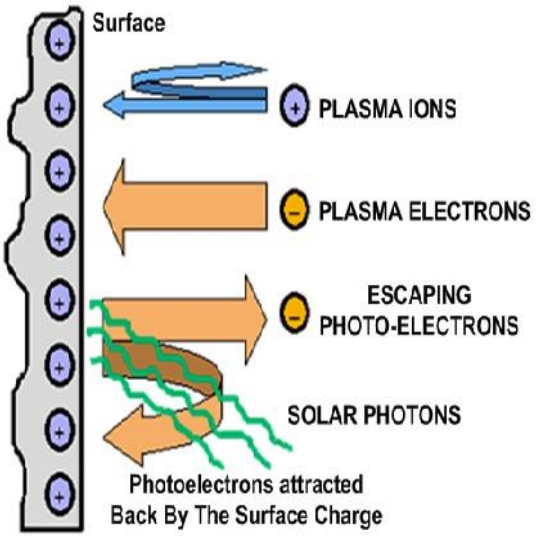
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

شارژینگ تفاضلی می‌تواند بوسیله سایه‌های خود ماهواره نیز ایجاد شود. راه حل اساسی برای شارژینگ تقاضلی قرار دادن زمینی مشترک برای کل سطح فضاپیما (شامل ساختارهای داخلی) است. قرار گرفتن در شرایط شارژینگ تفاضلی برای فضاپیما 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 پلاسما اساسا 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=1/2mv2)، در نتیجه جریان الکترون منفی در سطح فضاپیما بزرگتر از جریان یون مثبت است و در تاریکی، یک سطح فضاپیما دارای بار منفی خواهد شد [۷].

شارژینگ تفاضلی هنگامی رخ می‌دهد که بخشی از فضاپیما با 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 کمربند تشعشعی ون الن زمین یافت می‌شوند. به شکل نرمال، یک اثر گذاری 1010 تا 1011 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.



(a) سطح در سایه



(b) سطح در نور خورشید

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

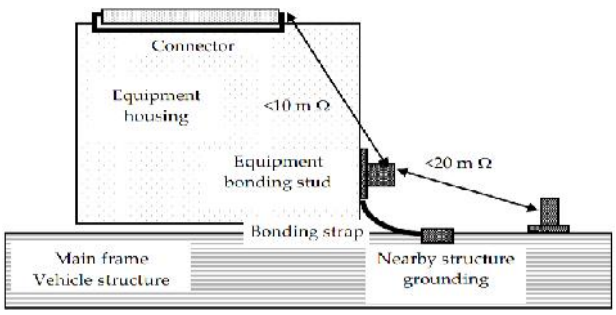
۲-۲- زمین کردن و اتصالات الکتریکی

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 شیلدهای 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 اتصلات 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 فضاپیما نسبت به پایه اتصال تجهیزات متصل می‌شود. بر طبق استاندارد ECSS مقاومت DC و اندوکتانس بین پایه اتصال تجهیزات و نزدیک ترین نقطه ساختار فضاپیما باید کمتر از 2.5 mΩ و 30nH باشد. برای یافتن این اندوکتانس می‌توان از رابطه (۱) برای محاسبه معمول اندوکتانس باند اتصال استفاده کرد.

$$L = 200\ a\ [\mathrm{Log_e}(2a/b) + 0.5 + 0.22b/a] \qquad (۱)$$

که L اندوکتانس در واحد nH، a طول باند اتصال در واحد m و b عرض به علاوه ضخامت باند اتصال در واحد m است. مقاومت DC بین محفظه واحد و نقطه پیوست اتصال خودرو نیز کمتر از 20 mΩ درنظر 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 ویژه‌ایی 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 می باشد. 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 کارآیی شان باید تحت تست EMC قرار گیرند. با توجه به اهمیت این تست در پروژه‌های فضایی، تست EMC برای ماهواره باید تحت شرایط ویژه‌ایی 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 می باشد. 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 سایت‌های شیلد نشده مورد استفاده قرار می‌گیرند. محفظه‌های شیلد شده از آلودگی 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 سایتهای شیلد نشده، تستها در زمان و شرایطی انجام می شود که تاثیرات الکترومغناطیسی در کمترین سطح خود باشد.

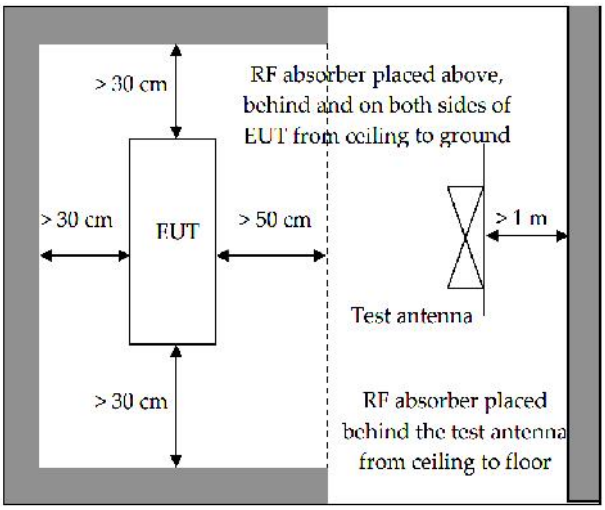
اگر از محفظه‌های شیلد شده استفاده می‌شود، محفظه‌ها باید چنان بزرگ باشند که الزامات موقعیت یابی آنتن برای انواع تست-های EMC تامین شود. در این محفظه‌ها، از مواد جاذب RF برای کاهش انعکاس‌های انرژی الکترومغناطیس و برای بهبود دقت و قابلیت اطمینان، استفاده می‌شود (مثالی از مواد جاذب RF فومهای هرمی شکل آغشته 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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

توان ورودی به دستگاه تحت آزمایش را فراهم می کند. بوسیله شبکه های تثبیت امپدانس خط برای تمام اندازه گیری ها کنترل می شود. . 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

کمیت	میزان خطا
فاصله :	±10%
فرکانس:	±2%
دامنه، گیرنده اندازه گیری:	±2 dB
دامنه، سیستم اندازه گیری (شامل گیرندههای اندازه گیری، مبدلها، کابلها، کانکتورها):	±3 dB
زمان (شکل موج):	±10%
مقاومت:	±5%
خازنها:	±20%



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 $x = 2\ \mu H$ و $y = 0.1\ \Omega$ 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 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 فرکانسی 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:

Radiated emission (RE): 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.

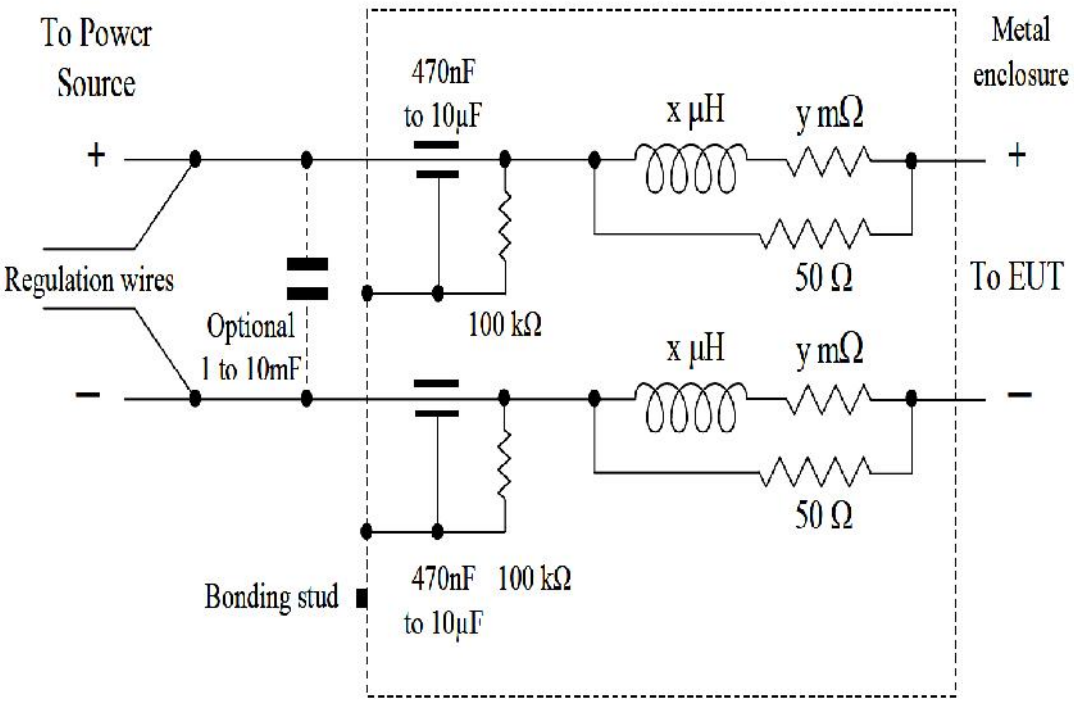
Conducted emission (CE): مربوط به انرژی الکترومغناطیسی مطلوب یا غیر مطلوبی است که در طول یک کانکتور منتشر می‌شود، در واقع مشابه radiated emission است با این تفاوت که سیگنال‌ها در خطوط توان اندازه گیری می‌شوند.

Radiated susceptibility (RS): برای شناسایی میزان حساسیت ادوات نسبت به تشعشعات الکترومغناطیسی از این تست استفاده می شود. 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.

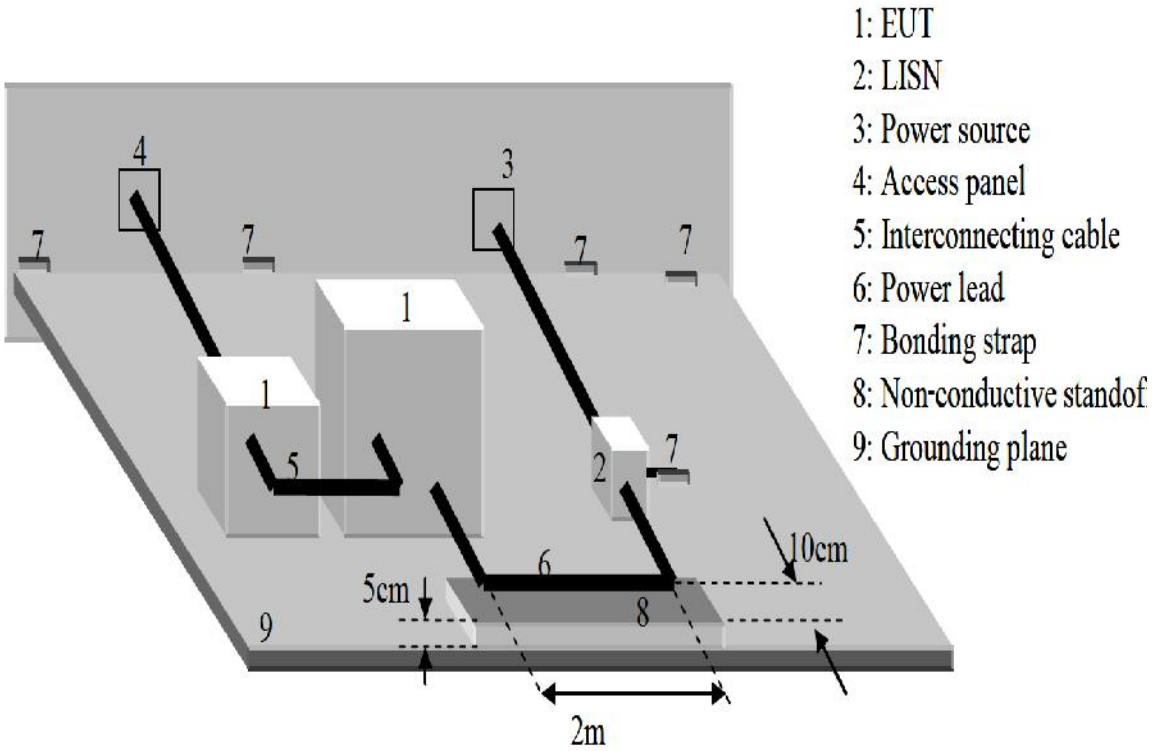
Conducted susceptibility (CS): این تست شامل یک سیگنال توان بالا یا تولید کننده پالس و یک ترانسفورمر برای تزریق جریان است. و برای تعیین میزان حساسیت دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲].

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 فرکانسی و نوع المان متفاوت خواهد بود. انواع این تستها در جدول ۲ ذکر شده است [۱۰].

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]



شکل(۴): شماتیک شبکه‌ی تثبیت امپدانس خط



شکل(۵): چیدمان کلی تجهیزات تست EMC

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

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

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

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

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 (معمولا آنتن‌های زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:
30 MHz تا 200 MHz، دو مخروطی، فاصله نوک به نوک 137 cm،
200 MHz تا 1 GHz، هورن دو شیاری، 69 cm با دهنه 94.5 cm، یا تناوب لگاریتمی،
1 GHz تا 18 GHz، هورن دو شیاری، 24.2 cm با دهنه 13.6 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 تست، سیستم اندازه گیری بوسیله پیکره بندی تجهیزات تست مطابق شکل ۶ بررسی و تائید 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 1 m لبه جلویی مرز چیدمان تست برای تمام چیدمان‌ها است و هیچ بخشی از آنتن نزدیک تر از 1 m از دیواره و 0.5 m از سقف محفظه شیلد شده نیست.

برای تست زیر 200 MHz، برای چیدمان‌های با لبه سمت مرز 3 m یا کمتر، مکان آنتن نسبت به لبه‌های سمت مرز در وسط قرار داده می‌شود و برای چیدمان‌های با لبه سمت مرز بزرگتر از 3 m، N مکان آنتن در فضای نشان داده شده در شکل ۷ (b) 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 200 MHz تا 1 GHz، آنتن در تعداد مواضعی قرار می‌گیرد که کل عرض هر محفظه EUT و اولین 35 cm از کابل‌ها و رابطها متصل به محفظه EUT، درون عرض بیم 3 dB 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 رابطها متصل به محفظه EUT، درون عرض بیم 3 dB آنتن باشد.

برای شروع فرآیندهای تست، تجهیزات اندازه گیری روشن 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 (محدوده منهای فاکتور آنتن) باشد به کابل کواکسیال در نقطه اتصال آنتن اعمال می‌گردد، گیرنده اندازه گیری اسکن شده و اطلاعات در حدود ±3 dB سطح سیگنال تزریق شده ذخیره می‌شوند. اگر مشخص شد که انحراف بیشتر از ±3 dB است، منبع خطا شناسایی و عیب قبل از اقدام به تست تصحیح می‌شود. برای تائید پیوستگی الکتریکی در سراسر آنتن از تشعشع یک سیگنال با استفاده از یک آنتن یا تشعشع کننده کوچک در بالاترین فرکانس اندازه‌گیری هر آنتن استفاده می‌شود و گیرنده اندازه‌گیری برای فرکانس سیگنال اعمال شده تنظیم

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

می‌گردد و اینکه سیگنال دریافت شده با دامنه مناسب وجود دارد، تائید 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 پهنای 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 می‌بایست روش‌های دیگر حفاظت نظیر زمین‌کردن، فیلترکردن اتصالات همراه با شیلدینگ لحاظ شود.

استفاده از مواد هادی (شیلدها) 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 عملاً انرژی بسیار اندکی از شیلد عبور می‌کند. اساس این روش این است که چنان‌چه یک سامانه‌ی الکترونیکی به‌وسیله‌ی پوششی استتار شده باشد این پوشش می‌تواند با جذب یا انعکاس میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی (انرژی الکترومغناطیسی) و امواج صفحه‌ای، گیرنده را از تأثیر و تأثرات 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 می‌دهد و برای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به ترتیب بصورت روابط (۲) و (۳) بیان می‌گردد:

$$SE(dB) = 20\log\frac{E_b}{E_a} \quad (۲)$$

$$SE(dB) = 20\log\frac{H_b}{H_a} \quad (۳)$$

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_bشدت میدان مغناطیسی قبل از قرار دادن شیلد و H_a شدت میدان مغناطیسی بعد از قرار دادن شیلد می‌باشد. به عنوان مثال، 20dB معادل 90% تضعیف و 40dB معادل 99% تضعیف و 60dB معادل 99.9% 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]

$$SE(dB) = 10\log_{10}\left(\frac{\text{چگالی توان در یک نقطه بدون حضور شیلد}}{\text{چگالی توان در یک نقطه با حضور شیلد}}\right) \quad (۴)$$

با توجه به مطالب ارائه شده، می‌توان میزان موثر بودن شیلدینگ را برای یک صفحه‌ی فلزی مسطح بطوری‌که میدان الکترومغناطیسی تابشی بصورت عمود به آن برخورد نماید، را به فرم رابطه‌ی (۵) تعریف کرد، که در آن l ضخامت شیلدینگ، τ ضریب انتقال و γ ثابت انتشار شیلد می‌باشد.

$$SE = 20\,log\left|e^{\gamma l}\right| + 20\,log\left|\frac{1}{\tau}\right| + 20\,log\left|1 - \tau e^{2\gamma l}\right| \quad (۵)$$

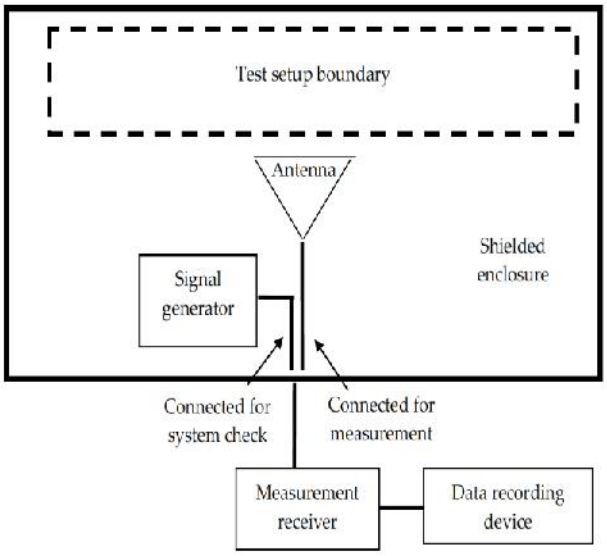
همانطور که می‌دانیم سطح یک فلز در برابر موج الکترومغناطیسی به عنوان شیلد عمل می‌کند. در واقع بخشی از انرژی الکترومغناطیسی منعکس شده و بخشی از آن در فلز جذب می‌شود و باقیمانده آن از فلز عبور می‌کند. بنابراین می‌توان میزان موثر بودن شیلدینگ را با توجه به میزان تلفات و انعکاس ناشی از فلز (شیلد) بصورت رابطه‌ی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

$$SE - A + R + C \quad (۶)$$

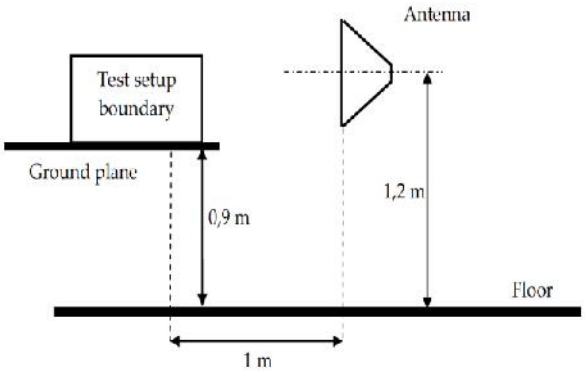
در فرمول (۶) A نشان دهنده‌ی میزان تلفات جذبی، R میزان تلفات انعکاسی و C فاکتور تصحیح برای در نظر گرفتن انعکاس

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

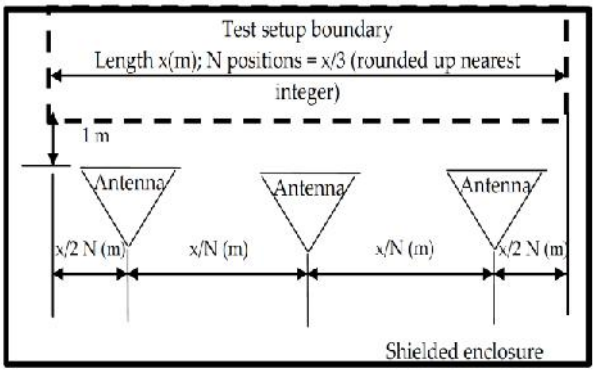
مضاعف است. در نتیجه با تعیین دقیق میزان تلفات جذبی، تلفات انعکاسی و فاکتور تصحیح، می‌توان مقدار موثر بودن شیلدینگ را بدست آورد. از آنجا که این کمیت‌ها تابعی از فرکانس موج تابشی، ضخامت لایه‌ی شیلدینگ، ضریب گذردهی مغناطیسی و ضریب رسانایی الکتریکی فلز (شیلد) است، تلفات انعکاسی و فاکتور تصحیح را برای موج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



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



(a)



(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 l از رابطه‌ی (۷) بدست می‌آید [11]

$$A = K_1\, l \sqrt[2]{f\, \mu_r\, g_r}\ dB \qquad (۷)$$

که اگر l برحسب متر باشد، داریم k_1=131.4.

در فرمول فوق l ضخامت شیلدینگ، f فرکانس موج تابشی بر حسب هرتز، μ ضریب گذردهی مغناطیسی ماده‌ی شیلد، و g 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.

با توجه به نمودار، می‌توان گفت که آهن توانایی جذب بالاتری نسبت به مس و آلومینیوم دارد. به عبارت دیگر آهن در فرکانس‌های پایین نسبت به مس و آلومینیوم از تلفات جذبی بیشتری برخوردار است. همچنین شیب نمودار مربوط به آهن نسبت به مس و آلومینیوم بیشتر است. نکته‌ای که می‌بایست به آن توجه شود این است که جدول ۳ برای شیلدینگی به ضخامت واحد (یک میلی‌متر) است و به سادگی می‌توان با ضرب مقادیر آن‌ها، مقدار جذب را برای ضخامت‌های گوناگون بدست آورد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

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

فرکانس	آهن		مس		آلومینیم	
	تلفات جذبی (dB)	ضریب گذردهی مغناطیسی (μ)	تلفات جذبی (dB)	ضریب گذردهی مغناطیسی (μ)	تلفات جذبی (dB)	ضریب گذردهی مغناطیسی (μ)
60 Hz	13	1000	1	1	0.8	1
1 kHz	54	1000	4	1	3	1
10 kHz	171	1000	13	1	10	1
150 kHz	663	1000	56	1	40	1
1 MHz	1430	700	131	1	103	1
3 MHz	2300	600	228	1	178	1
10 MHz	3830	500	416	1	325	1
15 MHz	4200	400	509	1	397	1
100 MHz	5420	100	1310	1	1030	1
1 GHz	12110	50	4160	1	3250	1
1.5 GHz	6640	10	5090	1	3970	1
10 GHz	5420	1	13140	1	10300	1
ضریب هدایت الکتریکی (g): آهن: 0.17، مس: 1 و آلومینیم: 0.61						

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 رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌شود.

$$R = -20log|\tau|\ dB \quad (۸)$$

در رابطه (۸) τ 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.

۸-۱- 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، بطوری‌که می‌توان از محاسبه‌ی ضریب تصحیح خودداری کرد. اگر این تلفات به اندازه‌ی کافی بزرگ نباشد، میزان قابل‌توجهی از انرژی وارد بدنه‌ی شیلدینگ شده و پس از برخورد با سطح دوم شیلدینگ، انعکاس مجدد به درون شیلدینگ خواهد داشت. بر 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 گذردهی مغناطیسی ماده‌ی شیلد و هدایت الکتریکی ماده‌ی شیلد است.

۸- میزان موثر بودن شیلدینگ کل

با درنظر گرفتن تأثیر پارامترهای تلفات جذبی، تلفات انعکاسی و ضریب تصحیح می‌توان نمودار میزان موثر بودن شیلدینگ را برای جنس آلومینیوم بر حسب فرکانس و برای ضخامت‌های گوناگون محاسبه کرد.

جدول ۴ میزان موثر بودن شیلدینگ محاسبه شده برای انواع میدان‌های تابشی برای شیلدینگ از جنس آلومینیوم را نشان می‌دهد.

می‌توان مقدار موثر بودن شیلدینگ را با توجه به مقادیر جداول در فرکانس‌های مختلف با توجه به نوع موج (منبع) تخمین زد. در مرجع [۱۱] جداول جامعی جهت تعیین مقدار شیلدینگ ارائه شده است. این نمودارها جهت تعیین میزان موثر شیلدینگ بسیار مفیداند.

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

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 می‌روند، 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 که تغییر ابعاد در منطقه‌ی 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/گرم‌کننده‌ها 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 می‌روند و در ابعاد کوچک ساخته می‌شوند. اما در صورتی که حفاظت کل تجهیزات در یک سامانه مورد نظر باشد از اتاق‌های شیلد استفاده می‌کنند.

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

ضخامت (mm)	فرکانس (Hz)	خصوصیات منبع	R: تلفات انعکاسی (dB)	A: تلفات جذبی (dB)	C: فاکتور تصحیح (dB)	SE=A+R+C: میزان موثر بودن شیلد (dB)
0.254	1 M	L	62	26	0	88
0.254	1 M	D	150	26	0	176
0.254	15 M	L	79	100	0	179
0.254	15 M	D	115	100	0	215
0.254	100 M	L	82	260	0	342
0.254	100 M	D	90	260	0	350
L: میدان نزدیک حلقه یا دو قطبی مغناطیسی، در فاصله 30 cm از شیلد **D: میدان نزدیک دو قطبی الکتریکی، در فاصله 30 cm 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 ویژه‌ایی 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 پرکاربردترین دسته از انواع تست‌های مربوطه، یعنی تست RE، میدان الکتریکی، 30 MHz تا 18 GHz، بسط داده شد. در نهایت به عنوانی راهکاری موثر، مساله شیلدینگ، راه‌های بکارگیری آن، محاسبات و انواع آن ارائه شد.

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).

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]

[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. Nanevicz, 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 Subeyetems and Equipment, Department of Defense Interfece Standard, 20 August 1999.
[11]] Architectural Electromagnetic Shielding Handbook: A Design and Specification Guide, Leland H. Hemming.
[12] P. Hajipour, M. Danaeefar, 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.

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

پیوست

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-12]