

(علمی - ترویجی)

سازگاری الکترومغناطیسی در سامانه‌های فضایی (بخش اول)

سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) یکی از مباحث ویژه در علم مهندسی الکترونیک و مخابرات است و عملکرد صحیح سیستم‌ها منوط به رعایت الزامات مربوط به آن است. این موضوع در سامانه‌های فضایی اهمیتی مضاعفی پیدا می‌کند. در این مقاله، بخش اول یک نوشتار دو قسمتی پیرامون مبحث سازگاری الکترومغناطیسی در سامانه‌های فضایی ارائه شده است. اهمیت و ضرورت پرداختن به این موضوع و لزوم در نظر گرفتن ملاحظات مربوطه از ابتدایی‌ترین فازهای طراحی بیان شده است. همچنین، به حوزه‌های مختلف EMC، از جمله به منابع نویز، روش‌های انتقال نویز و روش‌های ایمن‌سازی در برابر آن اشاره شده است. علاوه بر این، مهم‌ترین استانداردهای جهانی در حوزه EMC و به‌طور خاص استانداردهای نظامی و فضایی معرفی شده‌اند. در نهایت، اقدامات سیستمی مورد نیاز و ملاحظات و توصیه‌های طراحی در سطح سیستم ارائه شده‌اند. این موارد شامل روش‌ها و ملاحظات زمین‌سازی، مسائل مربوط به حفاظ‌سازی (شیلدسازی)، از جمله اثربخشی حفاظ، پدیده تشدید، جاذب‌ها و درزبندهای EMC و ملاحظات مربوط به «کابل‌ها و کانکتورها» است.

واژه‌های کلیدی: سازگاری الکترومغناطیسی، سامانه‌های فضایی، استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی، طراحی سیستمی

محمود تلافی نوغانی^۱، استادیار،
پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و
فناوری

* نویسنده مخاطب، آدرس: تهران،
کدپستی: ۱۴۶۶۵-۸۳۴

Electromagnetic Compatibility in Space Systems (Part I)

Electromagnetic compatibility (EMC) is an important subject in electronics and communications. The proper performance of a system is very much dependent on meeting EMC requirements. This is more important in space systems. In this paper, the first part of a two-part text about EMC in space systems is presented. The importance of the subject and the necessity to take the EMC considerations into account from the very beginning phases of the system design is discussed. The three main EMC subject areas: sources of noise, noise transfer paths, and immunity methods are mentioned. The most important global military and space EMC standards are presented. System level actions and design considerations are also mentioned. These include: grounding methods, shielding and related topics, such as shielding effectiveness, shield resonance, absorbers, EMC gaskets and issues regarding wirings, cables, and connectors.

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Space Systems, Electromagnetic Compatibility Standards, System Level Design

M. Talafi Noghani¹, Assistant
Professor, Aerospace Research
Institute, Ministry of Science,
Research, and Technology

*Corresponding Author, Postal
Code: 14665-834, Tehran,
IRAN

mtnoghani@ari.ac.ir

۱- مقدمه

سازگاری الکترومغناطیسی^۱ شاخه‌ای از دانش الکترومغناطیس است که به بررسی اثرات سیستم‌های مختلف در مجاورت یکدیگر، مکانیزم‌های این اثرات و روش‌های ایمن‌سازی تجهیزات در مقابل انواع تداخلات الکترومغناطیسی^۲ می‌پردازد. بحث سازگاری الکترومغناطیسی در سامانه‌های هوافضایی و به‌طور ویژه در زیرسامانه‌های الکترونیکی و مخابراتی آنها، از اهمیت بالایی برخوردار است. گزارش‌های متعددی از خرابی و یا شکست در پروژه‌هایی هوافضایی ثبت شده است که بر اهمیت این موضوع صحنه می‌گذارد [۱-۲]. در آوریل ۱۹۶۴، در حین انجام تست‌های پیش از پرتاب یک رصدخانه خورشیدی مدارگرد در سایت موشکی کاناورال^۳ آمریکا، یک جرقه ناشی از الکتروسیسته ساکن باعث روشن شدن موتور سوخت جامد پرتابگر شده و در مدت زمانی کوتاه کل اتاق مربوطه را از گاز سوزان پر کرد. سوختن ۱۱ تکنیسین و فوت ۳ نفر نتیجه این مسئله به ظاهر ساده بود. در جولای ۱۹۶۷، موشک یک جنگنده مستقر بر روی ناو هواپیمابر آمریکایی یو اس اس فورستال^۴ به‌صورت خودبه‌خودی شلیک می‌شود و پس از اصابت به جنگنده دیگری که مسلح و پر از سوخت بود، زنجیره‌ای از انفجارهای متعدد و آتش‌سوزی گسترده‌ای واقع می‌شود که باعث مرگ حدود ۱۳۴ نفر و خسارت‌های سنگین می‌شود (شکل ۱). عامل این حادثه، تداخل الکترومغناطیسی از رادار ناو به کابل و کانکتورهای مستهلک و غیراستاندارد سیستم تسلیح جنگنده بود. در سال ۱۹۸۷، برخورد صاعقه باعث فعال شدن سیستم احتراق سه راکت کاوش در مجموعه سایت جزیره والوپس^۵ ناسا شد. یکی از آنها (با نام اوربون^۶) پس از طی یک مسیر ۱۵۰ متری در دریا سقوط کرد و خوشبختانه کارکنان در بونکر فرماندهی بودند و آسیب ندیدند. اینها تنها چند نمونه از حوادثی است که در این زمینه گزارش شده است.

متخصصان حوزه EMC اذعان دارند که حدود ۸۰ درصد از مسائل مربوط به EMC بین همه حوزه‌های کاربردی الکترونیکی و مخابراتی مشترک است و حدود ۲۰ درصد به هر حوزه کاربردی از جمله حوزه فضا اختصاص دارد. علاوه‌براینکه باید به موضوعات اختصاصی EMC در هر حوزه پرداخت، باید از تجربیات عمومی آن در حوزه‌های پیشین نیز بهره برد [۵].



شکل (۱): حوادث ناشی از تداخلات الکترومغناطیسی، فاجعه ناو هواپیمابر فورستال ۱۹۶۷ (راست) [۳] و شلیک خودبخودی راکت کاوش اوربون ۱۹۸۷ (چپ) [۴].

متخصصان حوزه EMC اذعان دارند که حدود ۸۰ درصد از مسائل مربوط به EMC بین همه حوزه‌های کاربردی الکترونیکی و مخابراتی مشترک است و حدود ۲۰ درصد به هر حوزه کاربردی از جمله حوزه فضا اختصاص دارد. علاوه‌براینکه باید به موضوعات اختصاصی EMC در هر حوزه پرداخت، باید از تجربیات عمومی آن در حوزه‌های پیشین نیز بهره برد [۵].

دو موضوع باعث منحصربه‌فرد شدن بحث سازگاری الکترومغناطیسی در فضا می‌شود که عبارت‌اند از: محدودیت‌های این حوزه و چالش‌ها و مشکلات ویژه آن. چهار محدودیت عمده در بحث EMC فضایی وجود دارد: ۱- وزن، ۲- قابلیت اطمینان، ۳- شرایط محیطی و ۴- هزینه. اول اینکه، بسیاری از روش‌های مصون‌سازی سیستم‌ها در زمین همچون حفاظ‌سازی‌ها، فریت‌ها و غیره که مبتنی بر ساختارهای نسبتاً سنگین هستند را نمی‌توان در فضا بکار برد و بنابراین باید با ساختاری سبک یا روش‌های دیگر جایگزین شوند. دیگر اینکه، رفع مشکلات ناشی از ناسازگاری و یا تداخلات الکترومغناطیسی در یک فضای‌یما یا ماهواره پس از پرتاب و یا قرارگیری در مدار، غیرممکن و یا بسیار چالشی و پرهزینه است. ضمن اینکه می‌تواند کل پروژه را به شکست بکشاند. از این‌رو، سیستم‌های فضایی باید به نحوی طراحی و ساخته شوند که مدت زیادی بدون دخالت انسانی عمل کنند. مسئله سوم این است که سیستم‌های فضایی، در معرض سه نوع شرایط محیطی مجزا قرار می‌گیرند که عبارت‌اند از: شرایط قبل از پرتاب، در حین پرتاب و شرایط عملیاتی. در شرایط قبل از پرتاب، در اتاق تمیز و تحت تست‌های محیطی مختلف قرار می‌گیرند. در حین پرتاب، لرزش و شتاب‌های زیاد و همچنین سطوح بالای سیگنال RF از فرستنده‌های پرتوان مجاور را تحمل می‌کنند. در فضا، در شرایط خاص دمایی و فشار قرار گرفته و مشکلات خاصی همچون شارژ پلاسمایی یا تشعشعات

1. Electromagnetic Compatibility (EMC)
2. Electromagnetic Interference (EMI)
3. Canaveral
4. USS Forrestal (CV-59)
5. Wallops
6. Orion

۱-۲- منابع تداخل الکترومغناطیسی

منابع تداخل یا نویز می‌تواند خارج از سیستم ما باشد و یا از درون بر سیستم ما اثر بگذارد. تشخیص محل تولید نویز، سطح آن و سپس مسیر ترویج آن به پذیرنده، بسیار مهم و تعیین کننده است. برخی سیگنال‌ها برای قسمتی از سیستم (یا مدار) نویز محسوب می‌شود. درحالی‌که، برای قسمت‌های دیگر نویز به حساب نمی‌آید. ضمن اینکه برخی از سیگنال‌ها فقط در زمان‌های معینی نویز محسوب می‌شود. در یک نگاه کلی، منابع تولید انرژی تداخلی شامل موارد خواسته (عمدی) و ناخواسته (غیرعمدی) می‌شود. سیگنال‌های رادیویی پرتوان استفاده شده در جنگ الکترونیک که با هدف تخریب سامانه‌های دشمن استفاده می‌شود از جمله موارد عمدی است. برخی از مهمترین موارد ناخواسته که به طور عمومی در مدارها و سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی حائز اهمیت می‌باشد، عبارتست از: ۱- منابع باند باریک: همچون منابع و خطوط تغذیه (AC یا DC)، اسپلاتورهای محلی^۷، پردازنده‌های الکترونیکی، رادارهای داپلر، فرستنده‌های رادیویی و غیره. ۲- منابع پهن باند: مولدهای پالس (کلاک و I/O)، عناصر/مدارهای غیرخطی، رگولاتورهای ولتاژ، اتصالات زمین نامناسب، مدولاتورهای رادار، نویز مخابراتی، مدارهای سوئیچینگ و غیره. علاوه بر این موارد، منابعی همچون بارهای سلفی (موتورها)، لامپ‌های فلورسنت، جرقه و غیره در سیستم‌های مجاور و همچنین پدیده‌های محیطی همچون پدیده‌های جوی، ردوبرق، تخلیه الکتریسیته ساکن^۸ و غیره نیز می‌تواند بسته به سیستم مورد نظر دارای اهمیت باشد.

۲-۲- روش‌های انتقال یا ترویج انرژی الکترومغناطیسی

روش‌های انتقال یا ترویج انرژی الکترومغناطیسی تداخلگر شامل دو دسته بندی کلی است: ۱- مکانیزم هدایتی که شامل تداخل از طریق شبکه تغذیه، از طریق خطوط سیگنال و یا صفحه زمین است و ۲- مکانیزم تشعشی که شامل ترویج میدان نزدیک و ترویج میدان دور می‌شود (شکل ۲). منظور از مکانیزم هدایتی، انتقال مستقیم انرژی الکترومغناطیسی از منبع به پذیرنده یا قربانی از طریق اتصالات رسانا شامل کابل‌ها، سیم‌ها و خطوط PCB و غیره است. در مکانیزم تشعشی، انرژی تداخلی به واسطه یک عنصر تشعشی از منبع نویز به قربانی منتقل می‌شود. بسته به فاصله بین منبع و قربانی، ترویج از نوع میدان نزدیک یا میدان دور خواهد بود. در حالت میدان نزدیک، چنانچه منبع مولد انرژی نویز به گونه‌ای باشد که مؤلفه

یونیزه را باید تحمل کنند. نکته آخر اینکه، موضوع هزینه در مأموریت‌های فضایی، روز به روز پررنگ‌تر می‌شود. رعایت و اعمال تمهیدات EMC در سطح طراحی زیرسیستم‌ها می‌تواند به کاهش قابل ملاحظه هزینه مأموریت‌ها و عملی شدن آنها کمک شایانی کند [۵]. علاوه بر محدودیت‌های بیان شده، چالش‌هایی در بحث EMC فضایی وجود دارد. این چالش‌ها که عمدتاً به سیستم‌های فضایی اختصاص دارند، عبارتند از: شارژ پلاسما، پاکیزگی مغناطیسی، تلفیق فرکانسی، سیگنال‌های فرکانس رادیویی پرتوان و اثرات هسته‌ای. این موارد را در بخش آینده تشریح خواهیم نمود. بنابراین، توجه ویژه به بحث EMC از ابتدایی‌ترین فازهای طراحی، بسیار حائز اهمیت است. براین اساس، استانداردهای متعدد جهانی در این زمینه تدوین شده که در آنها رعایت مسائل مربوطه و برآوردن انواع آزمون‌های تطبیقی الزامی شده است.

بحث «سازگاری الکترومغناطیسی در سامانه‌های فضایی» را در قالب دو بخش ارائه خواهیم داد. در این مقاله، به عنوان بخش اول موضوع ابتدا حوزه‌های کلی EMC را تشریح خواهیم کرد. سپس، به بیان استانداردهای مختلف EMC در سطوح عمومی، نظامی و فضایی خواهیم پرداخت. در ادامه، به بحث «طراحی سامانه‌های فضایی براساس اصول سازگاری الکترومغناطیسی» وارد خواهیم شد و اقدامات سیستمی و همچنین ملاحظات طراحی در سطح سیستم را تشریح خواهیم کرد. در بخش دوم که در مقاله‌ای مجزا ارائه می‌شود، ملاحظات طراحی در سطح زیرسیستم‌ها و مدارهای الکترونیکی و مخابراتی را بیان خواهیم کرد و در نهایت به معرفی روش‌ها و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی EMC به عنوان ابزاری برای افزایش دقت طراحی و صحت‌سنجی عملکرد مدارهای پیش از انجام هزینه‌های فاز ساخت و تست می‌پردازیم.

۲- نگاهی به حوزه‌های سازگاری الکترومغناطیسی

سه حوزه کلی در EMC باید مورد توجه قرار گیرد: ۱- منابع تولید انرژی الکترومغناطیسی تداخلگر، ۲- روش‌های انتقال و اثرگذاری انرژی الکترومغناطیسی تداخلگر و ۳- روش‌های جلوگیری، ایمن‌سازی یا کاهش اثرات تداخل الکترومغناطیسی. در این بخش به تشریح این حوزه‌ها می‌پردازیم. علاوه بر این، برخی چالش‌های ویژه این حوزه‌ها در مأموریت‌های فضایی را تشریح خواهیم نمود.

7. Local Oscillators (LO)

8. Electrostatic discharge (ESD)

نحوی انجام شود که توان ارسالی از منابع در حداقل ممکن باشد. نکته دیگر اینکه باید تا حد امکان، زمان صعود/نزول لبه پالس‌های دیجیتال را افزایش دهیم تا از ایجاد مؤلفه‌های فرکانس بالا در طیف فرکانسی سیگنال و ترویج ناخواسته سیگنال‌ها جلوگیری شود. روش‌های مختلفی برای ناکارآمدسازی مسیر ترویج، چه هدایتی و چه تشعشی وجود دارد. استفاده از کابل‌ها و کانکتورها با حفاظ (شیلد) مناسب و جانمایی حساب شده برای این منظور ضروری است. طرح‌بندی مدار و طراحی دقیق زمین، یکی از ارکان کاهش ترویج از منبع نویز به پذیرنده است. روش دیگر، استفاده از انواع فیلترهای تداخل است که بسته به نوع تداخل باید استفاده شود. شیلد کردن پذیرنده با استفاده از محفظه فلزی یا صفحات زمین در یک برد مدار چاپی نیز یکی از راهکارهای موثر است. خیلی از مواقع، کاهش حساسیت پذیرنده در عین حفظ عملکرد سیستم، دشوار است. استفاده از قطعات فعال (آی سی‌ها) و غیرفعال که مصونیت بالاتری نسبت به تداخلات محیط داشته باشند، باید مورد توجه قرار گیرد. علاوه بر این، می‌توان از روش‌های نرم‌افزاری نیز بهره برد. مثلاً استفاده از کدهای تصحیح خطا در یک گیرنده دیجیتال می‌تواند به عملکرد مطلوب آن با وجود نویز الکترومغناطیسی در محیط کمک کند. این موارد در بخش چهارم تشریح خواهند شد.

۲-۴- حوزه‌های چالشی در فضا

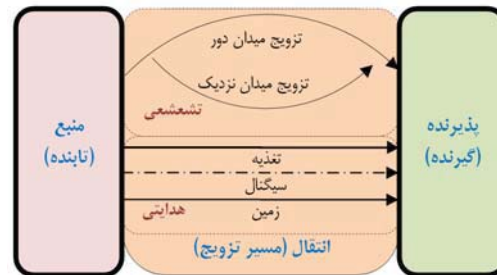
یکی از منابعی که می‌تواند بطور ویژه در سامانه‌های فضایی مشکل‌ساز شود، شارژ پلاسمایی است. حرکت فضاپیما از درون ذرات باردار (در یونیسفر یا باد خورشیدی) باعث تجمع بار بر روی سطح خارجی آن می‌شود. هدایت الکتریکی متفاوت در سطوح خارجی، باعث ایجاد پتانسیل الکتریکی و در نهایت شکست و جرقه زدن می‌شود. ایجاد اتصال الکتریکی بین سطوح مختلف و یا افزودن لایه‌هایی از هادی الکتریکی به سطوح غیرهادی می‌تواند به کاهش یا حذف این مشکل کمک کند.

یکی دیگر از مسائلی که در سامانه‌های فضایی حائز اهمیت است، پاکیزگی مغناطیسی است. در بسیاری از فضاپیماها، از میدان مغناطیسی ایستای زمین برای ناوبری استفاده می‌شود. از آنجاکه شدت این میدان در فضا بسیار کوچک است (در حد میلی‌گوس)، هر گونه میدان مغناطیسی موجود در فضاپیما (ناشی از جریان‌های DC یا آهنرباها) می‌تواند باعث ایجاد اختلال در سامانه‌های ناوبری شود.

میدان الکتریکی آن غالب باشد، ترویج از نوع خازنی است و چنانچه مؤلفه میدان الکتریکی آن غالب باشد، ترویج از نوع سلفی خواهد بود. در میدان دور، یک موج صفحه‌ای به عنوان عامل انتقال انرژی خواهد بود که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی آن از لحاظ شدت برابرند. مصونیت در برابر هر یک از حالت‌های فوق به تمهیداتی نیاز دارد که بدان خواهیم پرداخت. باید توجه شود که واسطه‌های مکانیزم هدایتی (کابل‌ها، سیم‌ها و خطوط PCB و غیره)، خود می‌تواند عاملی برای نشر و دریافت الکترومغناطیسی باشد. بنابراین، طراحی و مسیریابی صحیح آنها یکی از عوامل اساسی در کنترل ترویج در بحث سازگاری الکترومغناطیسی است.

۲-۳- روش‌های ایمن‌سازی یا کاهش اثرات تداخل الکترومغناطیسی

در بحث روش‌های جلوگیری، ایمن‌سازی یا کاهش اثرات تداخل الکترومغناطیسی لازم است به فرایند اثرگذاری در EMC (شکل ۲) توجه داشته باشیم. سه مسئله تولید، انتقال و دریافت انرژی الکترومغناطیسی در هر طراحی مربوط به EMC دخیل هستند.



شکل (۲): فرایند اثرگذاری در EMC.

با وجود اینکه انرژی الکترومغناطیسی از طریق مسیرهای مختلف ترویج منتقل می‌شود، اما تا زمانی که اندازه کافی یا محتوای فرکانسی قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد، نمی‌تواند پذیرنده را چندان تحت تأثیر قرار دهد. تعیین دقیق میزان انتقال یا دریافت انرژی در بسیاری از اوقات ممکن نیست اما باید دانست که آیا عملکرد پذیرنده تحت تأثیر قرار گرفته است یا خیر؟ براساس تقسیم‌بندی فوق، ۳ رویکرد برای کاهش تداخل قابل پیگیری است که عبارتند از: ۱- کاهش یا حذف انتشار از منابع، ۲- ناکارآمدسازی مسیر انتقال یا ترویج و ۳- کاهش حساسیت پذیرنده.

واضح است که کاهش نشر از منبع برای منابعی میسر است که درون سیستم تحت کنترل ما قرار دارند. سریعترین راه حل، کاهش توان ارسالی منبع است. طراحی سیستم باید به

صنعتی) است. گروه دوم برای تجهیزات نظامی و گروه سوم برای سیستم‌ها و تجهیزات فضایی است. اسناد استاندارد مختلفی در سطح جهان برای این موضوع تعریف شده است که برخی ملی (مربوط به یک کشور خاص) و برخی بین‌المللی است. مهمترین استانداردهایی که در سطح بین‌المللی برای محصولات غیرنظامی وجود دارد استانداردهای تعریف شده توسط «کمیته ویژه بین‌المللی تداخلات رادیویی»^{۱۳} است. در این استانداردها، حدود و روش تست پارامترهای مربوط به تداخلات رادیویی (ناشی از منابع نویز) ارائه شده است. اگرچه این استانداردها در اروپا شکل گرفته اما به عنوان پایه اصلی استانداردهای دیگر در سطح جهان قرار گرفته است.

مهمترین استاندارد نظامی در زمینه EMC توسط وزارت دفاع آمریکا تعریف شده است که با سری کد MIL-STD شناخته می‌شود. این استانداردها پایه تعریف استاندارد در بسیاری از کشورهای دیگر نیز قرار گرفته و طیف وسیعی از تجهیزات و سیستم‌های زمینی، دریایی، هوایی و حتی فضایی را در بر می‌گیرد. در زمینه استانداردهای فضایی، علاوه بر استانداردهایی که توسط وزارت دفاع آمریکا تعریف شده، استانداردهایی توسط موسسه هوانوردی و فضاوردی آمریکا^{۱۴}، آژانس فضایی اروپا^{۱۵} و سازمان استاندارد جهانی^{۱۶} تعریف شده است. با توجه به اهمیت استانداردهای نظامی و فضایی، به شرح مختصر آنها می‌پردازیم.

۳-۱- استانداردهای نظامی

از مهمترین استانداردهای نظامی EMC در سطح دنیا، استانداردهای نظامی آمریکاست. در این استانداردها، کد MIL-STD-461 برای EMC در سطح «قطعه و سیستم» و کد MIL-STD-464 در سطح «برون سیستمی و بین سیستمی» معرفی شده است [۶]. استاندارد MIL-STD-461 معرفت‌هایی در سطح سیستم است که الزامات و حدود EMC را براساس پلتفرم عملیاتی (همچون کشتی، هواپیما و غیره) و موقعیت مورد نظر نسبت به آنها (داخلی یا خارجی) مشخص می‌کند. الزامات این استاندارد شامل ۱۸ زیرگروه در چهار دسته‌بندی نشر هدایتی و تشعشعی و حساسیت هدایتی و تشعشعی می‌شود که طیف وسیعی از مشخصات EMC همچون خطوط تغذیه، پدیده‌های گذرا، درگاه‌های آنتن، انترمدولاسیون، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، هارمونیک‌های آنتن و غیره از فرکانس ۳۰ Hz تا ۴۰ GHz را

موضوع دیگر، تلفیق فرکانسی بین مولدهای مختلف داخل یک سامانه فضایی است. تقریباً در تمامی فضاپیماها، چندین فرستنده-گیرنده برای کنترل، ناوبری، ارتباطات رادیویی و غیره وجود دارد. مخلوط شدگی فرکانسی این فرستنده‌ها باعث تلفیق فرکانسی (یا انترمدولاسیون^{۱۰}) بین آنها شده و می‌تواند مشکل‌ساز شود. مدیریت دقیق فرکانسی برای اجتناب از تداخل و همچنین استفاده از فیلترهای مناسب راهکار حل این مشکل است.

منابع پرتوان رادیویی^{۱۱}، یکی دیگر از مشکلات در سامانه‌های فضایی است. تجهیزات الکترونیکی فضاپیما می‌تواند در معرض اختلال یا خرابی ناشی از انرژی منابع HIRF، چه بصورت تصادفی (توسط رادارهای خارجی در زمان پرتاب یا در حین رهگیری) و چه عمدی (جنگ الکترونیک) قرار گیرد. استفاده از حفاظ مناسب و محافظت ویژه از مدارهای حساستر همچون ورودی گیرنده‌ها، حسگرهای آنالوگ ولتاژ پایین و غیره راهکار مقابله با این مشکل است. در نهایت، اثرات هسته‌ای طبیعی و یا مصنوعی می‌تواند برای سامانه‌های فضایی مشکل‌ساز شوند. چه تشعشعات یونیزه و چه غیریونیزه می‌تواند بر تجهیزات الکترونیکی فضاپیما اثر مخرب داشته باشد. تشعشعات یونیزه همچون گاما یا نوترونی و تشعشعات غیریونیزه همچون پالس الکترومغناطیسی^{۱۲} ناشی از انفجار هسته‌ای و یا برهمکنش ذرات باردار با فضاپیما می‌باشد. این موارد نیز باعث اختلال و یا خرابی دائمی می‌شود. راه حل آن شامل حفاظت‌سازی، پیشگیری از پدیده‌های گذرا و استفاده از اجزاء مقاوم در برابر تشعشعات است. همچنین، خاموش کردن موقت سیستم‌های حیاتی در زمان بروز خطر از جمله راهکارهای موقت مقابله با این موضوعات است [۵].

۳-۲ استانداردهای سازگاری الکترومغناطیسی

هدف اصلی در تعریف استانداردهای EMC، بیان الزامات و دستورالعمل‌هایی در سطح سیستم و زیرسیستم است تا محصولات و یا سیستم‌های مختلفی که در یک محیط مشترک حضور دارد عملکرد صحیح و مطلوب داشته باشد. این الزامات می‌تواند برای یک سیستم (مثل یک فضاپیما) و زیرسیستم‌های مربوطه نیز تعریف شود که منجر به عملکرد صحیح کل آن شود.

به طور کلی، سه نوع استاندارد برای EMC تعریف شده است. گروه اول مربوط به محصولات غیرنظامی (تجاری و

13. Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR; English: International Special Committee on Radio Interference)
 14. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)
 15. European Space Agency (ESA)
 16. International Organization for Standardization (ISO)

10. Intermodulation
 11. High Intensity Radio Frequency (HIRF)
 12. Electromagnetic Pulse (EMP)

مطمئن سیستم‌ها برای مأموریت‌های فضایی تدوین شده است و شامل دستورالعمل‌های طراحی و الزامات تصدیق و تأیید آنها در سیستم‌های فضایی از جمله فضاپیماها، وسایل فضایی، محموله‌های فضایی، پرتابگرها، سیستم‌های زمینی و تجهیزات و زیرسیستم‌های مربوطه است.

از جمله مهمترین استانداردهای اروپایی در حوزه EMC فضایی، استاندارد «مهندسی فضایی، سازگاری الکترومغناطیسی» با کد ECSS-E-ST-20-07C Rev.1 است که توسط کمیته مشترک استانداردهای فضایی در آژانس فضایی اروپا تعریف شده است. در این استاندارد، الزامات سیستمی، شرایط عمومی تست، الزامات تصدیق در سطح سیستم، روش‌های تست در سطح زیرسیستم و تجهیزات و حدود مربوطه ارائه شده است. این استاندارد، مبتنی بر سایر استانداردهای اروپایی و از جمله «کمسیون بین‌المللی الکتروتکنیکال»^{۱۸} است [۱۱].

یک مجموعه دیگر از استانداردهای EMC در حوزه فضا، استاندارد تعریف شده توسط سازمان استاندارد جهانی (ISO) است. این استاندارد با عنوان «سیستم‌های فضایی-الزامات سازگاری الکترومغناطیسی» و کد ISO 14302 شامل الزامات سیستمی عمومی، الزامات سیستمی ویژه و الزامات تداخل الکترومغناطیسی در سطح تجهیزات است.

۳-۳- بررسی موردی تفاوت استانداردهای فضایی، نظامی و تجاری-صنعتی

در اینجا، به بیان نمونه‌ای از تفاوت‌های استاندارد نظامی (خصوصاً MIL-STD-461) با استانداردهای تجاری و صنعتی بین‌المللی (از جمله IEC و CISPR) می‌پردازیم. همچنین، استاندارد فضایی AIAA را با استاندارد نظامی MIL-STD-461 در سطح کلان مقایسه می‌کنیم. تفاوت‌ها در چند موضوع خود را نشان می‌دهد که عبارتند از: محدوده تعریف فرکانسی استانداردها، سطوح مجاز در نشر هدایتی و تشعشعی و روش‌های تست و تأیید استاندارد.

در استاندارد نظامی ۴۶۱، الزامات به چهار دسته نشر تشعشعی^{۱۹}، نشر هدایتی^{۲۰}، حساسیت تشعشعی^{۲۱} و حساسیت هدایتی^{۲۲} تقسیم شده و بنا به نوع تست با ۱۹ کد مختلف دسته‌بندی می‌شود. در بسیاری از مواقع، دسترسی به محصولات تجاری و صنعتی آسانتر از محصولات نظامی و فضایی است. ضمن اینکه از لحاظ هزینه ارجح هستند. بنابراین، این موضوع

شامل می‌شود. اگرچه استاندارد MIL-STD-461 الزامات EMC مورد نیاز در سطح قطعه یا سیستم را برآورده می‌سازد اما برای الزامات برون سیستمی و بین سیستمی طراحی نشده است. این مسئله منجر به تنظیم استاندارد MIL-STD-464 شد. این استاندارد برای حفاظت از سامانه‌های هوایی، دریایی، فضایی و ایستگاه‌های زمینی و سامانه‌های پشتیبانی است که شامل اثراتی همچون صاعقه، الکتریسیته ساکن و پالس‌های الکترومغناطیسی نیز می‌شود. تست‌های این استاندارد برای احراز EMC در سامانه‌ها متناسب با کارکرد عملیاتی آنها در شرایط محیطی الکترومغناطیسی نظامی تعریف شده است. این شرایط عموماً از شرایط استانداردهای تجاری و صنعتی و حتی الزامات استاندارد MIL-STD-461 نیز سخت‌تر است.

۳-۲- استانداردهای فضایی

پایه و اساس استانداردهای فضایی در آمریکا، استانداردهای نظامی وزارت دفاع این کشور است. از جمله مهمترین استانداردهایی که برای سیستم‌های فضایی تعریف شده استاندارد «الزامات سازگاری الکترومغناطیسی برای سیستم فضایی» با کد MIL-STD-1541 است. این استاندارد مبتنی بر استانداردهای نظامی MIL-STD-461 و MIL-STD-464 است. الزامات اشاره شده در این استاندارد شامل الزامات فرکانسی و دیگر مسائل مربوط به تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی در سیستم‌های فضایی است. همچنین، الزامات مربوط به طراحی مناسب مرجع زمین در تجهیزات نصب شده و الزامات مربوط به مهار اثرات الکتریسیته ساکن را شامل می‌شود. از این استاندارد در طراحی وسایل فضایی و اجزاء جانبی و پشتیبان زمینی، هوایی یا فضایی استفاده می‌شود [۷].

استاندارد مکملی که برای تجهیزات و امکانات زمینی یک عملیات فضایی تعریف شده، استاندارد «الزامات سازگاری الکترومغناطیسی و زمین‌سازی»^{۱۷} برای امکانات (زمینی) سیستم فضایی» با کد MIL-STD-1542 است. الزامات این استاندارد برای طراحی و ساخت مجموعه‌های پرتابگر، ایستگاه‌های رهگیری، اتاق‌های پردازش داده، مراکز کنترل ماهواره، ساختمان‌های مونتاژ فضاپیما و هر نوع ساختار متحرک یا ثابت که حاول تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی می‌شود بکار می‌رود [۸]. البته استانداردهای فوق، بعدتر توسط استاندارد «الزامات سازگاری الکترومغناطیسی برای تجهیزات و سیستم‌های فضایی» با کد SMC-S-008 [۹] و سپس AIAA S-121A-2017 [۱۰] جایگزین شده است. استاندارد AIAA، آخرین استاندارد EMC در حوزه فضاستکه در راستای طراحی بسیار

18. International Electrotechnical Commission (IEC)
19. Radiated Emission (RE)
20. Conducted Emission (CE)
21. Radiated Susceptibility (RS)
22. Conducted Susceptibility (CS)

17. Grounding

اطمینان EMI مورد نیاز برای اضافه کردن به حدود تعریف شده در استاندارد ۴۶۱ تسهیل شود. این سطوح عبارتند از:
دسته ۱: صدمه جانی جدی و یا فوت افراد، صدمه به تجهیزات، یا شکست یا تاخیر جدی در مأموریت یا هر نوع اقدام خودکار که باعث شکست یا تاخیر در مأموریت شود،
دسته ۲: افت کیفیت مأموریت شامل از دست رفتن قابلیت عملکرد خودکار سیستم و

دسته ۳: از دست رفتن کارکردهای غیرحیاتی در مأموریت. علاوه بر این، حاشیه اطمینانی برای زیرسیستم‌های خطرناک همچون پیروتکنیک‌ها و غیره در قالب «سیستم‌های تحریک شده با سیگنال الکتریکی^{۳۳}» تعریف شده که به طور ویژه در سیستم‌های فضایی حائز اهمیت است. حاشیه اطمینان آنها در جدول ۳ آمده است. در طراحی مدارهای بحرانی، حاشیه اطمینان مورد نیاز برای زمانی که صرفاً از روش‌های تحلیلی برای محاسبه میزان تداخل الکترومغناطیسی استفاده می‌شود، ۶dB (۴ برابر) بالاتر از زمانی است که مدار تست می‌شود. جدول ۳ گویای این مطلب است که برای مدارهای غیر حیاتی، استفاده از الزامات نظامی کافی است اما برای سایر موارد باید سطوح اضافی ذکر شده به الزامات اضافه شود.

تفاوت عمده دیگر استاندارد فضایی AIAA با استاندارد نظامی، افزایش تعداد دسته‌بندی الزامات از ۱۹ مورد به ۲۳ مورد است. ضمن اینکه کدهای مشترک نیز تغییرات جزئی در تجهیزات و نحوه اندازه‌گیری‌ها دارند [۱۰]. موارد اضافه شده شامل «نشر هدایتی مود مشترک RF بر روی خطوط تغذیه و سیگنال»، «نشر هدایتی مود تفاضلی، حوزه زمان و ولتاژگذرای ناشی از بار»، «حساسیت هدایتی ناشی از اعمال سیگنال‌های لحظه‌ای، فرکانس پایین و فرکانس رادیویی به صفحه زمین» و «حساسیت به اعمال سیگنال‌های گذرای سوئیچینگ به خطوط تغذیه در حوزه زمان» می‌شود. هر یک از الزامات ۲۳ گانه مطروحه براساس جدول ۶ مرجع [۱۰]، به صورت مستقیم یا با اعمال برخی محدودیت‌ها و یا با فراهم کردن برخی تجهیزات اضافی به سیستم‌ها و زیرسیستم‌های ۱- حامل، ۲- محموله و ۳- تجهیزات زمینی قابل اعمال است.

چهارچوب کلی سایر استانداردهای فضایی همچون ECSS نیز تشابه زیادی با استاندارد AIAA دارد اما تفاوت‌هایی در زمینه سطوح الزامات و روش‌های تست و ارزیابی دیده می‌شود که برای اطلاع از جزئیات آنها باید به مراجع مربوطه مراجعه نمود.

حائز اهمیت است که آیا استفاده از آنها در پروژه‌های فضایی قابل قبول است یا خیر. برای پاسخ به این سوال لازم است استانداردهای مربوطه به صورت دقیق مورد بررسی قرار گیرد. اما در یک نگاه کلی، جدول ۱ نشان می‌دهد محصولاتی که دارای استانداردهای صنعتی IEC و تجاری CISPR است، براساس استاندارد ۴۶۱ چنانچه در حوزه سیستم‌های فضایی بکار برده شود تا چه میزان ریسک ایجاد می‌کند.

جدول (۱): ارزیابی استانداردهای صنعتی-تجاری با استاندارد ۴۶۱ [۱۲].

وضعیت انطباق IEC/CISPR با کد مربوطه	کد الزام در استاندارد ۴۶۱	وضعیت انطباق IEC/CISPR با کد مربوطه	کد الزام در استاندارد ۴۶۱
ریسک بالا	CE106	ریسک بالا	CS101
ریسک متوسط	RE102	ریسک پایین	CS114
ریسک بالا	RE103	ریسک متوسط	CS115
ریسک متوسط	RS103	ریسک متوسط	CS116
		ریسک متوسط	CE102

ریسک پایین، مربوط به کد CS114 یعنی حساسیت هدایتی به تزریق جریان به مدار در فرکانس‌های ۱۰KHz تا ۲۰۰MHz است. ریسک بالا مربوط به کدهای CE106 و RE103 که به ترتیب مربوط به نشر هدایتی ترمینال آنتن در فرکانس ۱۰KHz تا ۴۰GHz و نشر تشعشعی هارمونیک‌های ناخواسته آنتن در فرکانس‌های ۱۰KHz تا ۴۰GHz است. سایر موارد دارای ریسک متوسط هستند. نتیجه‌گیری کلی چنین است که برای استفاده از محصولات فرکانس بالا در کاربردهای فضایی، احراز استانداردهای ویژه فضایی ضروری است.

در جدول ۲، به صورت نمونه الزامات نشر هدایتی CE106 با استاندارد تجاری CISPR 13 و IEC 61244-1A مقایسه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این مورد استاندارد نظامی دارای محدوده فرکانسی وسیع‌تر و حدود سختگیرانه‌تری است. نویز ولتاژ قابل قبول در استانداردهای تجاری و صنعتی از ۰dB تا ۲۰dB یعنی ۱۰۰ برابر! بالاتر از استاندارد ۴۶۱ است. مقایسه کامل این استانداردها در مرجع [۱۲] ارائه شده است.

یکی از مهمترین نکاتی که در استاندارد فضایی AIAA (که بروزرسانی شده استانداردهای MIL-STD-1541 و MIL-STD-1542 است) وجود دارد، تعریف سه سطح اهمیت و متناسب با سه دسته از شرایط بحرانی ناشی از طراحی سیستم‌ها، زیرسیستم‌ها و تجهیزات فضایی است. از آنجاکه بسیاری از الزامات این استاندارد برگرفته از الزامات نظامی و خصوصاً ۴۶۱ است، تعریف سه دسته فوق برای این است که میزان حاشیه

جدول (۲): مقایسه استاندارد CE106 با استانداردهای صنعتی-تجاری [۱۲].

پارامتر	CE106	CISPR 13	IEC 61244-1A	توضیحات
تجهیزات	فرستنده‌ها، گیرنده‌ها، تقویت کننده‌ها، آنتن‌های جداشونده	گیرنده رادیو و تلویزیونی، فرستنده در مود آماده به کار	فرستنده در حال ارسال	کمیت‌های یکسان در دو استاندارد تجاری و صنعتی و استاندارد نظامی اندازه‌گیری می‌شود.
محدوده فرکانسی				محدوده فرکانسی استاندارد نظامی، بسیار وسیع‌تر از دو استاندارد دیگر است.
روش	با استفاده از گیرنده کالیبره و آشکارساز قله	با روش «جابجایی در اندازه‌گیری» و استفاده از ترکیب کننده توان و مدار تطبیق	۱- کالیبره اولیه، ۲- جابجایی و ۳- کوپلر جهتی در تغذیه آنتن	نتایج حاصل از همه روش‌ها یکسان است.
حدود	فرستنده و گیرنده در حالت آماده به کار: ۳۴dBuV فرستنده در حالت ارسال: ۸۰dBuV	۱۲dB بالاتر از حدود استاندارد نظامی	حدودا بین ۰dB تا ۲۰dB بالاتر از حدود نظامی در فرکانس‌های مربوطه	استاندارد نظامی سختگیرانه‌تر است.

جدول (۳): حاشیه‌های اطمینان EMI در سیستم‌های فضایی [۱۰].

مورد	تست	تحلیل
مدارهای بحرانی مشمول دسته ۱ و ۲	۶dB	۱۲dB
اتصالات EID: سطح RF به DC	۲۰dB	۲۰dB
اتصالات EID: سطح RF به RF	۱۲dB	۱۲dB
سایر سیستم‌ها، زیرسیستم‌ها و تجهیزات و مدارهای مشمول دسته ۳	۰dB	۰dB

۴- طراحی سامانه‌های فضایی براساس اصول سازگاری الکترومغناطیسی

طراح یک سیستم فضایی از قبیل ماهواره یا فضاپیما ملزم است طرحی را دنبال کند که: ۱- سازگاری الکترومغناطیسی بین تجهیزات و زیرسیستم‌های داخل یک سیستم فضایی را احراز کند و ۲- سازگاری الکترومغناطیسی سیستم فضایی با محیط خارجی را نیز برآورده سازد.

برای این منظور، الزامات سازگاری الکترومغناطیسی در فاز ابتدایی طراحی تعریف می‌شود. این الزامات در دو دسته کلی تعریف می‌شوند، یکی الزاماتی که در استانداردها معین شده‌اند و دیگری الزاماتی که براساس نیاز پروژه، مشخصات محموله و حامل و غیره تعریف شده‌اند. این الزامات ثانویه، پس از تعیین حوزه‌های مهم و مورد نیاز EMC در یک پروژه تعریف می‌شود. به عنوان مثال، در یک پروژه نمونه لیست این حوزه‌ها عبارتند از:

- سازگاری تشعشعی میان تجهیزات الکترونیک دیجیتال و تله‌متری باند L.

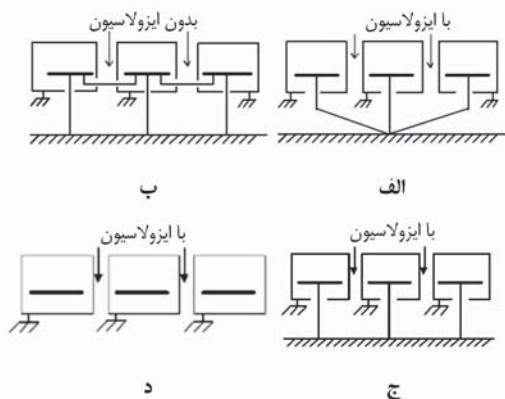
- سازگاری تشعشعی میان تجهیزات الکترونیک دیجیتال و گیرنده‌های VHF یا UHF،
- سازگاری تشعشعی میان پیرانش الکتریکی و گیرنده‌های RF محموله،
- سازگاری هدایتی بین مصرف‌کننده پالسی توان (همچون RADAR یا LIDAR) با زیرسیستم توان الکتریکی و سایر مصرف‌کننده‌ها،
- خودسازگاری بین محموله‌های مخابراتی در فرکانس‌های مختلف،
- سازگاری میان میدان مغناطیسی DC یا AC فرکانس پایین تابشی از تجهیزات فضاپیما و محموله‌های حاوی سنجنده میدان مغناطیسی (همچون fluxgate)،
- سازگاری بین تجهیزات نصب شده در خارج فضاپیما و ابزارهایی که میدان الکتریکی فرکانس پایین را می‌سنجند (مثلا در آزمایش موج پلاسمایی) و غیره.
- در هر صورت، باید برای الزامات EMC روش تأیید و صحت‌گذاری نیز تعریف شود. در بسیاری از اوقات، تست کردن مطمئن‌ترین روش است اما قطعاً از نقطه نظر هزینه، روش‌های تحلیلی (چه تئوری و چه شبیه‌سازی) می‌تواند ارجح باشد.
- استاندارد ECSS، طراح را ملزم کرده که یک «طرح کنترل EMC» را در فاز طراحی اولیه تدوین کند [۱۳]. این طرح باید موارد زیر را پوشش دهد: ۱- مدیریت برنامه EMC (شامل سازماندهی، روش انجام کار و اهداف زمانی)، ۲-

سیستم‌ها (به خصوص در فرکانس‌های بالا) ناشی از طراحی نامناسب زمین است.

۳-۴- روش‌های طراحی زمین

روش‌های مختلفی برای طراحی زمین وجود دارد که در دو دسته کلی زمین‌سازی تک نقطه و زمین‌سازی چندنقطه دسته‌بندی می‌شود. با ترکیب این دو روش نیز یک روش سوم بنام هیبرید بدست می‌آید که متناسب با نوع مدار، مشخصات سیگنال و فرکانس کاری استفاده می‌شود.

زمین تک نقطه (یا ستاره‌ای): در طراحی زمین تک نقطه، نقطه مرجع مدارهای مختلف در یک نقطه بر روی بدنه سازه وسیله پرنده به بهم متصل می‌شود (شکل ۳-الف). در این آرایش غیر از یک نقطه، تجهیزات مختلف نسبت بهم ایزوله است. هدف از وجود یک نقطه مرجع این است که جریان‌های خروجی از بخش‌های مختلف مدار (با سطوح مرجع پتانسیل متفاوت) از یک مسیر برگشتی مشترک عبور نکرده و ترویج امپدانس مشترک ایجاد نکند. این روش برای فرکانس‌های کمتر از حدود ۱ MHz مناسب است چراکه تأثیر امپدانس انتقالی در این فرکانس کمینه است. در فرکانس‌های بالاتر، اندوکتانس^۳ مسیر برگشتی، امپدانس صفحات تغذیه و خطوط ارتباطی، قابل ملاحظه خواهد شد. این مسئله باعث ایجاد اختلاف پتانسیل و همچنین جریان‌های ناخواسته RF می‌شود.



شکل (۳): الف- زمین تک نقطه، ب- زمین چند نقطه غیرایزوله، ج- زمین چند نقطه ایزوله و د- زمین معلق [۱۴].

زمین چند نقطه غیرایزوله: در طراحی زمین چند نقطه، زمین مدارهای تجهیزات مختلف به طور مستقیم به زمین بدنه متصل می‌شود، ضمن اینکه به یکدیگر نیز اتصال دارد (شکل ۳-ب). این روش برای فرکانس‌های بالا مناسبتر است زیرا به دلیل

الزامات عملکردی و طراحی EMC و صحت‌گذاری آنها در سطح سیستم، ۳- الزامات EMC و نحوه صحت‌گذاری آنها در سطح زیرسیستم‌ها و تجهیزات، ۴- تست‌های EMC در سطح زیرسیستم‌ها و تجهیزات و ۵- تحلیل‌های EMC.

مباحث مربوط به تست‌ها و تحلیل‌های EMC بسیار گسترده و مفصل است که برای شناخت آنها باید منابع مربوطه مراجعه نمود. موارد حائز اهمیت در این نوشتار برای ما، آشنایی با مسائلی است که از نقطه نظر طراحی باید مورد توجه قرار گیرند. شناخت این موارد، به تعیین الزامات عملکردی و طراحی EMC در یک سیستم فضایی کمک خواهد کرد.

۴-۱- ملاحظات طراحی در سطح سیستم

مهمترین مسائل مربوط به سازگاری الکترومغناطیسی که در طراحی سیستمی یک سیستم فضایی باید مورد توجه قرار گیرند شامل، ۱- زمین‌سازی، ۲- حفاظ‌سازی (شیلدسازی) و ۳- کابل‌ها و کانکتورهاست. ما در اینجا به اختصار به هریک از آنها اشاره خواهیم نمود.

۴-۲- زمین‌سازی

بطور کلی دو مفهوم از «زمین» در مدارهای الکتریکی/الکترونیکی استفاده می‌شود. یکی مربوط به «زمین ایمنی»^۱ و دیگری مربوط به «زمین سیگنال»^۲ است. منظور از زمین ایمنی همان زمینی است که در ادبیات مهندسی برق-قدرت با نام ارت^۲ و برای ایمن‌سازی تجهیزات در برابر پدیده‌هایی مثل صاعقه یا تخلیه الکتریسیته ساکن (ESD) استفاده می‌شود. آنچه در طراحی سازگاری الکترومغناطیسی مورد توجه ویژه است زمین سیگنال است. البته نکاتی در مورد زمین ایمنی و خصوصاً نحوه اتصال آن به زمین سیگنال در منابع و استانداردها آمده است که متناسب با نیاز می‌توان به آنها رجوع نمود.

زمین (یا زمین سیگنال) در واقع یک نقطه یا صفحه هم پتانسیل است که به عنوان نقطه مرجع برای مدار یا سیستم در نظر گرفته می‌شود. از منظری دیگر، زمین یک مسیر با امپدانس کوچک (و وابسته به فرکانس) است که جریان برگشتی به منبع از آن عبور می‌کند. مهمترین کارکرد زمین در بحث سازگاری الکترومغناطیسی، کمینه‌سازی ولتاژهای تداخلی در نقاط بحرانی نسبت به ولتاژ سیگنال دلخواه است. طراحی صحیح زمین در مدار، یکی از ارکان اصلی ایجاد سازگاری الکترومغناطیسی است. یک سیستم زمین مناسب باعث کاهش میزان نشر و افزایش مصنوعیت می‌شود. بسیاری از خرابی‌های عملکردی

در نزدیکی سیستم توزیع توان) باعث کاهش نویز هدایتی و تشعشعی می‌شود، اما خطر اتصال کوتاه در زمان خرابی تغذیه را دارد. بنابراین، بهتر است اتصال به بدنه از طریق یک مقاومت مناسب (مثلاً $2k\Omega$ برای ۲۸ ولت) صورت گیرد. همچنین، استفاده از یک «مدار قطع‌کن» به عنوان محافظ ولتاژ، موازی با این مقاومت توصیه می‌شود. در این حالت، برگشتی‌های تغذیه در کل سیستم باید به همین صورت به بدنه متصل شوند.

۳- منابع توان: به طور معمول، منابع توان همچون سلول خورشیدی، باتری و غیره از بدنه ایزوله شده‌اند. توصیه می‌شود که برای حفظ مرجع واحد زمین، بدنه آنها ایزوله باقی بماند.

۴- اتصالات مصرف کننده‌ها به باس توان: لازم است ایزولاسیون DC برگشتی باس توان نسبت به مرجع زمین $M\Omega$ باشد. این موضوع معمولاً با بکارگیری مبدل‌های DC-DC ایزوله در سمت بار محقق می‌شود.

۵- خطوط اتصال فرمان، سیگنال و داده: چنانچه طرح زمین منتخب برای یک سیستم، زمین ایزوله بین ماژول‌ها است، مدارهای سیگنال (فرمان، سیگنال و داده) باید ایزوله شوند. میزان امپدانس ایزولاسیون توصیه شده برای اتصال سیگنال‌ها، $1 M\Omega$ و $400 pF$ است. یعنی مقاومت بین سیم سیگنال یا برگشتی آن و بدنه باید بیش از $1 M\Omega$ و ظرفیت خازنی آن کمتر از $400 pF$ باشد.

۶- زیرسیستم‌های حساس (مثل زیر سیستم کنترل وضعیت ACS): در مورد سیستم‌هایی همچون ACS نمی‌توان یک توصیه جامع ارائه داد. لازم است بسته به نوع ماژول و طراحی آن، طرح مناسب ایزولاسیون بررسی شود.

۷- خطوط اتصال سیگنال‌های فرکانس رادیویی (RF): به دلیل فرکانس بالای سیگنال‌های رادیویی و لزوم رعایت پرهیز از اندوکنانس بالا در مسیر برگشتی سیگنال‌ها از طرح زمین چند نقطه استفاده می‌شود. در صورتی که در سیستم RF به ایزولاسیون DC نیاز داشته باشیم، زمین RF باید از طریق خازن‌های متعدد محقق شود. باید توجه شود که مدارهای غیر RF که درون زیرسیستم‌های RF قرار می‌گیرد باید براساس قواعد اشاره شده برای ایزولاسیون زمین طراحی شود. بنابراین، مدارهای آنالوگ و دیجیتال درون ماژول‌های RF باید به صورت فیزیکی و الکتریکی (مثلاً با چوک RF) از بخش‌های RF جدا شود.

۸- واحد پیروتکنیک^۴: بزرگترین مشکل در بحث پیروتکنیک، پدیده‌ای به نام «جریان خرابی زمین» است. جریان‌هایی تا حد ۲۰ آمپر بر روی بدنه در زمان رویداد فرمان آتش محتمل است. این موضوع ناشی از اتصال لحظه‌ای پایه مثبت تغذیه به بدنه در زمان

وجود مسیرهای بیشتر با امپدانس کوچک، امپدانس زمین سر راه جریان برگشتی RF کمینه می‌شود.

زمین چند نقطه ایزوله: نوع بهتری از زمین چند نقطه، حالت ایزوله آن است (شکل ۳-ج). این نوع زمین‌سازی نسبت به زمین تک نقطه، دارای مسیرهای زمین کوتاهتر با امپدانس کوچکتر است. هر تجهیز تنها یک اتصال به زمین دارد. از این زمین‌سازی در فضایی‌های جدید استفاده می‌شود.

زمین معلق: زمین معلق نوع دیگری از زمین است که در شکل ۳-د نشان داده شده است. اگرچه از لحاظ تئوری ضرورتی برای اتصال زمین مدارهای مجزا به زمین بدنه وجود ندارد اما ملاحظات عملی ایجاب می‌کند که حداقل یک مقاومت نشستی با مقدار مناسب بین زمین‌ها قرار گیرد تا از بروز نویز جلوگیری شود. این مقاومت، نه آنقدر بزرگ است که دو زمین را از هم ایزوله کند و نه آنقدر کوچک است که باعث اتصال مستقیم شود. وجود این مقاومت باعث تخلیه بارهای ناخواسته از مدار می‌شود. قابل توجه است که طبق استاندارد، این طرح برای سیستم‌های حامل موجود زنده توصیه نمی‌شود.

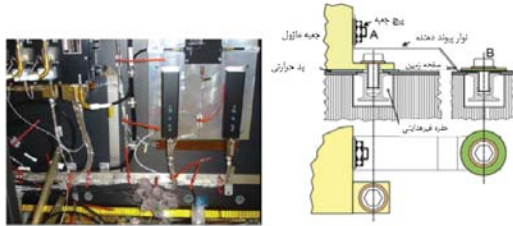
زمین زنجیری: آخرین نوع زمین، زمین زنجیری است. به اینصورت است که زمین یک ماژول، تنها در یک نقطه به زمین بدنه متصل می‌شود و زمین سایر ماژول‌ها به صورت زنجیروار به زمین این ماژول وصل می‌شود. این نوع از زمین از جهات مختلف نامطلوب است و صرفاً جهت پیشگیری از پیاده‌سازی ارائه می‌شود. مسیرهای برگشت مشترک، باعث بروز ولتاژ مود مشترک و القای نویز بین زیرسیستم‌ها می‌شود.

۴-۴- ملاحظات طراحی زمین

طراحی زمین در ۹ حوزه کاربردی یک سیستم فضایی قابل بررسی است (شکل ۴). این ۹ حوزه عبارتند از:

۱- سیستم اصلی تأمین و توزیع توان: اولین ملاحظه در طراحی زمین یک سیستم فضایی این است که سیستم توزیع توان مرکزی تک ولتاژ است یا چند ولتاژ. در سیستم‌های بزرگ، معمولاً از تک ولتاژ استفاده می‌شود که باعث سهولت در طراحی زمین می‌شود. تنها یک زمین مرجع برای آن ولتاژ وجود خواهد داشت. هر مصرف‌کننده توان، باید از مبدل‌های DC-DC ایزوله مجزا استفاده کند. در سیستم‌های کوچک، که معمولاً زیرسیستم‌ها نزدیک به هم و یا بر روی یک برد مشترک درون یک جعبه قرار دارند، می‌توان از سیستم توان چند ولتاژی استفاده کرد.

۲- ماژول حفاظت از باس توان (مقاومت یا امپدانس): یک مسئله مهم در طراحی زمین این است که آیا سیم برگشتی تغذیه را به بدنه متصل کنیم یا نه؟ تجربه نشان داده است که اگرچه این کار



الف



ب

شکل (۵): انواع پیوند زمین الف- پیوند نواری، ب- پیوند صفحات شکل دهی شده [۱۳].

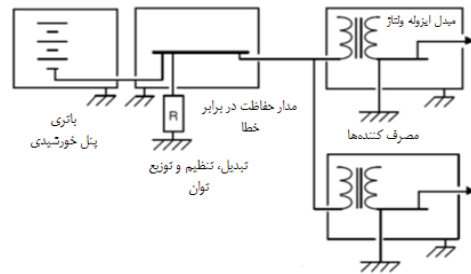
۴-۶- زمین سازی در ایستگاه زمینی

در زمان آماده‌سازی پیش از پرتاب یک سیستم فضایی، معمولاً تجهیزات مختلف زمینی برای تغذیه و همچنین ارسال فرمان و تبادل داده بین ایستگاه زمینی و سیستم فضایی (مستقر بر روی پرتابگر) وجود دارد. تجهیزات ایستگاه زمینی معمولاً شامل کابینت‌ها و قفسه‌هایی هستند که ماژول‌های مختلفی درون آنها نصب شده‌اند. این تجهیزات یا به صورت ثابت در یک بنای از پیش ساخته شده قرار دارند و یا بر روی وسایل متحرکی همچون خودرو یا غیره قرار دارند که معمولاً نسبت به زمین ایزوله هستند. در صورت وجود بنا، قاعدتاً یک شبکه مناسب ارت وجود دارد که تجهیزات باید طبق دستورالعمل‌های مربوطه به آنها وصل شده باشد. در هر حال، توصیه می‌شود که موارد زیر رعایت شود:

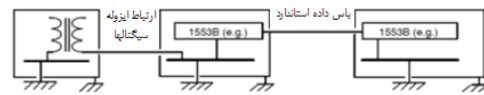
- برای کابینت‌ها و قفسه‌ها: بدنه ماژول‌ها مستقیماً به بدنه کابینت و قفسه متصل شود و
- برای اتصال بین تجهیزات ایستگاه زمینی و تجهیزات بخش فضایی:

- حفاظ کابل‌ها در هر دو طرف به بدنه‌ها متصل شود و
 - یک اتصال مستقیم بدنه به بدنه با استفاده از یک سیم مجزا و به موازات کابل‌های دیگر انجام شود.
- عدم رعایت موارد فوق در موارد خاص، باید با علم کامل به اثرات آن و پیش‌بینی تمهیدات مربوطه انجام شود [۱۳].

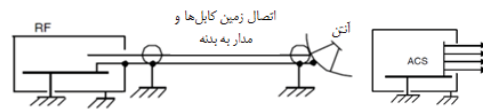
آتش است. برای جلوگیری از این مسئله لازم است واحد آتش پیرو از بدنه ایزوله باشد. برای این منظور می‌توان از یک مبدل ایزوله به صورت شکل (۴-۵) استفاده کرد. با توجه به اهمیت موضوع، استاندارد MIL-STD-1576 بطور مفصل به این موضوع می‌پردازد. ۹- موارد خاص دیگر: که بنا به حساسیت تجهیزات باید طراحی صورت پذیرد [۱۴].



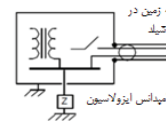
الف



ب



د



ه

شکل (۴): الف- زمین در سیستم توزیع توان، ب- زمین در اتصالات فرمان، سیگنال و داده، ج- زمین زیرسیستم کنترل وضعیت، د- زمین زیرسیستم‌های RF و ه- زمین واحد پیروتکنیک [۱۴].

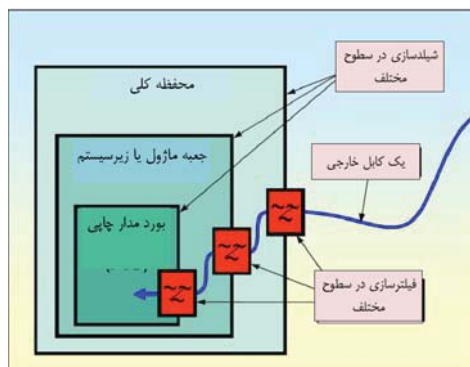
۴-۵- پیوند زمین

یکی از نکات مهم در طراحی زمین، اتصال بدنه ماژول‌ها و زیر سیستم‌ها به بدنه است. اندوکتانس بین جعبه زیرسیستم و صفحه زمین بدنه باید کمتر از $2-1nH$ باشد. در برخی از موارد، از نوار یا بند فلزی استفاده می‌شود تا اندوکتانس را به حداقل برساند. این روش در سیستم‌هایی با ابعاد بزرگ مرسوم است. در موارد دیگر، از صفحات زمین شکل‌دهی شده که به هم پیچ می‌شوند استفاده می‌شود (شکل ۵). این روش برای سیستم‌های کوچکتر همچون ماهواره‌های کوچک یا تاسواره‌ها قابل استفاده است.

۴-۷- حفاظسازی

هدف از حفاظسازی (یا شیلدسازی) یا طراحی حفاظ در بحث سازگاری الکترومغناطیسی، تضعیف انرژی الکترومغناطیسی عبوری از محیط پیرامونی به یک قطعه، مدار یا یک تجهیز حساس برای پیشگیری از اثرگذاری مخرب بر آنها و یا بالعکس برای جلوگیری از اثرگذاری تشعشعات مزاحم آنها بر سیستم‌های مجاور است. از آنجاکه شیلدکردن معمولاً هزینه بر است، باید ضرورت آن در جایگاه مربوط به خود، به درستی تشخیص داده شود. استفاده از شیلد می‌تواند برای یک قطعه (آی سی) یا بخشی از مدار، کل یک مدار، ماژول‌ها یا مجموعه بوردها، کل محصول و یا حتی بزرگتر در سطح یک اتاق یا ساختمان باشد (شکل ۶). واضح است که هر چه زودتر در مراحل طراحی یک سیستم، ضرورت استفاده از شیلد تشخیص داده شده و اعمال شود، هزینه پایین‌تر و معمولاً راندمان بالاتری نیز خواهد داشت. باید طراحی مکانیکی PCBها، ماژول‌ها و ساختار کلی قطعه از ابتدا به گونه‌ای باشد که امکان اضافه کردن شیلد در مراحل بعدی و پس از تشخیص ضرورت آن میسر باشد.

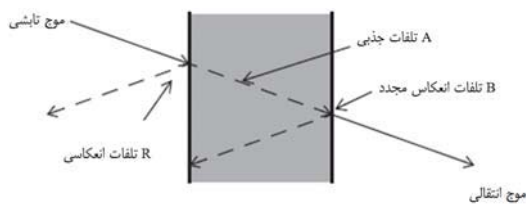
در بسیاری از اوقات، استفاده از شیلدهای تودرتو با راندمان کمتر در مقایسه با یک شیلد کلی از حیث هزینه و قابلیت اطمینان بهتر است. برای مثال فرض کنید به یک شیلد ۶۰dB در فرکانس ۱GHz نیاز است که آن را به وسیله یک محفظه کلی ایجاد کرده‌ایم. یک سوراخ کوچک در محفظه باعث کاهش راندمان شیلد به ۲۰dB و کمتر می‌شود. اما استفاده از سه سطح شیلد با هزینه کمتر که هر یک راندمان ۳۰dB دارد، ضمن اینکه می‌تواند هزینه کلی را پایین آورد، با بروز یک خرابی در شیلد خارجی، راندمان مورد نیاز ۶۰dB نیز خدشه دار نمی‌شود. شایان ذکر است برای فرکانس‌های بالا (بالتر از ۱GHz)، تنها بسنده کردن به شیلد کلی (محفظه کلی محصول) آسیب‌پذیر و پرهزینه است و بنابراین شیلدسازی در سطوح پایین‌تر (ماژول و PCB) اغلب ضروری خواهد بود.



شکل (۶): سطوح مختلف حفاظسازی [۱۵].

۴-۸- اثربخشی حفاظ

مهمترین پارامتر برای یک حفاظ (شیلد)، «اثربخشی» آن است. این پارامتر مشخص می‌کند که یک شیلد چقدر می‌تواند از نفوذ انرژی الکترومغناطیسی جلوگیری کند. اثربخشی، به مسائل مختلفی از جمله جنس ماده شیلد، ضخامت شیلد، فرکانس کاری، امپدانس موج تابشی، تعداد و شکل روزنه‌ها یا درزه‌های موجود در شیلد بستگی دارد و طبق تعریف عبارت است از نسبت اندازه میدان الکتریکی (یا مغناطیسی) تابشی به اندازه میدان عبوری (انتقالی) از آن. براساس مدل «خط انتقالی» می‌توان این نسبت را به صورت حاصلجمع تلفات انعکاسی، تلفات جذبی (یا حرارتی) و تلفات ناشی از انعکاسات متوالی بصورت شکل ۷ و با رابطه $SE=R+A+B$ [dB] در نظر گرفت.



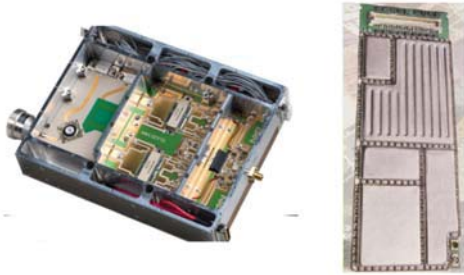
شکل (۷): انعکاس و جذب در یک شیلد [۱۶].

زمانی که فاصله شیلد از منبع مولد موج الکترومغناطیسی (منبع تداخلگر) کم باشد (کمتر از $\lambda/2\pi$) یا اصطلاحاً در ناحیه میدان نزدیک قرار داشته باشد، برای ایجاد شیلد در مقابل تداخلگر میدان الکتریکی از یک لایه فلزی نازک با ضریب هدایت بالا و برای ایجاد شیلد در مقابل تداخلگر میدان مغناطیسی از یک لایه فلزی ضخیمتر با خاصیت تلفات جذبی مناسب استفاده می‌شود. در ناحیه میدان دور (چندین برابر λ)، موج به صورت صفحه‌ای است و امپدانس موج به امپدانس مشخصه محیط میل خواهد نمود. در نتیجه اثربخشی شیلد ناشی از هر دو ویژگی هدایت سطحی و ضخامت خواهد بود.

باید توجه شود که چنانچه هدف، شیلد کردن یک منبع مولد تداخل باشد، در اینصورت منبع تابشی درون شیلد قرار می‌گیرد. آنگاه باید طراحی شیلد براساس حداکثر کردن تلفات جذبی انجام گیرد. چنانچه هدف، شیلد کردن یک بخش حساس نسبت به نویز بیرونی باشد، در اینصورت منبع تابشی بیرون شیلد قرار دارد. آنگاه باید طراحی شیلد براساس حداکثر کردن تلفات انعکاسی انجام شود.

برای فرکانس‌های بالاتر از چندصد کیلوهرتز اغلب فلزاتبا تنها چنددهم میلیمتر ضخامت اثربخشی مورد نیاز را فراهم می‌کنند. آنچه در مورد محفظه‌های شیلد مشکل‌ساز است، وجود

توسط آن شیلد می‌شود. نتیجه دیگر این پدیده، کاهش SE در فرکانس‌های رزونانس داخلی شیلد است. این مسئله ناشی از قرار گرفتن میدان‌های شدید داخل شیلد (نقاط داغ) در نزدیکی روزنه‌ها و منافذ هادی‌ها است که باعث نشت بیشتر میدان می‌شود. در نتیجه لازم است که طول و عرض شیلد از نصف طول موج بیشترین فرکانس مدار بسیار کوچکتر باشد تا از بروز رزونانس داخلی در محدوده کاری اجتناب شود. یک روش برای این منظور، بخش‌بخش کردن فضای داخلی شیلد است تا فرکانس‌های رزونانس از فرکانس کاری مدارها فاصله زیادی بگیرد. علاوه بر این، این کار از هم‌شناوبی^۷ بین مدارها جلوگیری می‌کند. نمونه‌ای از این شیلدها در شکل ۹ آمده است.



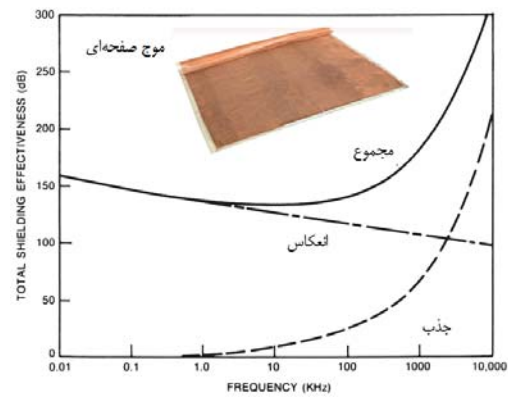
شکل (۹): نمونه‌هایی از شیلد چند بخشی برای جلوگیری از ایجاد فرکانس‌های رزونانسی پایین و کاهش هم‌شناوبی بین بخشی [۱۵].

برای کاهش میزان نشت از روزنه‌ها و در نتیجه بهبود وضعیت SE شیلد باید از دستورالعمل‌های پیروی کرد که عبارتند از:

- از روزنه‌های غیرضروری اجتناب کنید،
- از بزرگ کردن بی‌مورد روزنه‌ها پرهیزید و روزنه‌های ضروری را به ابعاد کوچکتر تقسیم کنید تا فرکانس رزونانس آنها به مقادیر بالاتر منتقل شود،
- محل درز درپوش‌ها در ساختارهای فلزی را با اتصال (جوش دادن یا پیچ کردن) در فواصل مناسب ببندید و برای این منظور بهتر است از واشرها یا درزبندهای رسانا و انعطاف‌پذیر که معمولاً «درزبندهای EMC»^۸ گفته می‌شود، استفاده شود،
- روزنه‌ها را با فواصل زیاد (بزرگتر از $\lambda/4$) نسبت به هم قرار دهید،
- سیم‌ها، کابل‌ها، قطعات، خطوط PCB و غیره را از روزنه‌ها دور نگهدارید. این کار برای روزنه‌هایی که امکان انسداد کامل آنها وجود ندارد و خصوصاً برای هادی‌ها یا

روزنه‌ها، درزها و منافذ ورود و خروج سیم‌ها و کابلهاست که باید مورد توجه قرار گیرند.

در شکل ۸ اثربخشی شیلد یک لایه مسی به قطر ۰/۵ میلی‌متر در ناحیه میدان دور نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس تلفات انعکاسی کاهش و تلفات جذبی افزایش می‌یابد. از منظری دیگر، برای شیلد کردن در فرکانس‌های پایین/بالا، از آنجاکه پدیده غالب تلفات انعکاسی/جذب است، برای افزایش اثربخشی شیلد باید به دنبال موادی با ضریب هدایت یا ضریب گذردهی مغناطیسی بهتر (بالا یا پایین‌تر متناسب با فرمول مربوطه) باشیم.



شکل (۸): اثربخشی شیلد یک لایه مسی به قطر ۰/۵ میلی‌متر در ناحیه میدان دور [۱۷].

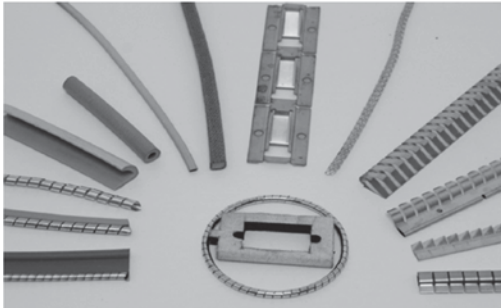
۴-۹- اثر روزنه در حفاظ

وجود هر نوع روزنه در شیلد بر روی SE اثر می‌گذارد. براساس تئوری آنتن شکافی، امکان محاسبه SE یک روزنه (مستطیلی) تک وجود دارد. حداکثر تشعشع از یک آنتن شکافی زمانی اتفاق می‌افتد که طول آن حدود نصف طول موج باشد. در این حالت میزان SE را 0 dB در نظر می‌گیریم. با کاهش طول روزنه، راندمان تشعشعی با نرخ ۲۰dB/dec کاهش یافته و بنابراین SE با همین نرخ افزایش می‌یابد. مثلاً برای SE=20dB باید ابعاد تک روزنه‌ها از ۱/۲۰ طول موج کوچکتر باشد. به عنوان نمونه، در فرکانس‌های ۳۰، ۳۰۰ و ۳,۰۰۰ مگاهرتز حداکثر ابعاد مجاز برای روزنه به ترتیب ۵۰، ۴۵۰، و ۵ میلی‌متر است.

۴-۱۰- اثر تشدید در حفاظ

در فرکانس‌هایی که فاصله بین دیواره‌های شیلد، مضرب صحیحی از نصف طول موج باشد، امکان تشدید یا رزونانس وجود دارد. بروز تشدید در شیلد باعث تشدید میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در برخی از نقاط داخل فضای شیلد می‌شود. این مسئله باعث تزویج بین مدارهای محصور شده

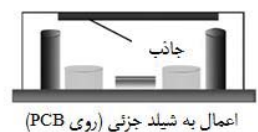
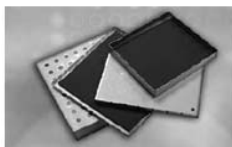
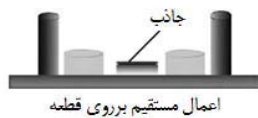
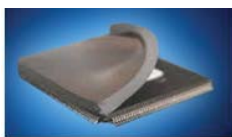
6. Hot Spots
7. Crosstalk
8. EMC Gaskets



شکل (۱۰): انواع درزبندهای EMC [۱۷].

۴-۱۲- جذب‌ها در EMC

جذب‌های EMC موادی هستند که در آنها، خصوصیات الکتریکی و یا مغناطیسی به‌طور مصنوعی تغییر داده شده تا جذب انرژی الکترومغناطیسی در یک یا چند فرکانس حداکثر باشد. مواد دی‌الکتریکی که معمولاً به عنوان جذب استفاده می‌شود، فوم‌ها، پلاستیک‌ها و الاستومرها هستند. از مواد مغناطیسی همچون فریت‌ها، آهن و آلیاژهای کبالت-نیکل برای تغییر ضریب گذردهی مغناطیسی آنها و همچنین از موادی همچون کربن، گرافیت و ذرات فلزی برای تغییر خصوصیات دی‌الکتریک آنها استفاده می‌شود. از جذب‌های EMC در سطح یک قطعه برای کنترل نویز تولید شده توسط قطعات سرعت بالا مثل آی‌سی‌ها یا پردازنده‌ها، در سطح شیلد مورد و یا در سطح محفظه کلی محصول برای کاهش تداخلات داخل شیلد و یا کاهش اثر رزونانس داخل محفظه استفاده می‌شود (شکل ۱۱). علاوه بر این، از جذب‌ها برای کنترل جریان سطحی و جلوگیری از تشعشع ناشی از آنها، کاهش هم‌شنوایی و ایمن‌سازی بوردها و همچنین در درزبندهای EMC استفاده می‌شود.



شکل (۱۱): سطوح اعمال جذب در فرایند شیلدسازی [۱۸].

قطعات نویزی (سیم‌های تغذیه) یا قطعات حساس نسبت به نویز خارجی (گیرنده‌های فرکانس بالا، پردازنده‌ها و غیره) ضروری است. اگرچه رابطه مستقیمی برای این فاصله وجود ندارد اما به صورت تخمینی می‌توان گفت برای SE بزرگتر از ۴۰dB در همه فرکانس‌ها، فاصله بین قطعات تا روزه باید حداقل ۱/۵ برابر بزرگترین بعد روزه باشد.

- چنانچه نتوان با کاهش ابعاد محفظه شیلد، فرکانس رزونانس آن را افزایش داد، می‌توان با کاهش Q محفظه، انرژی نشر یافته از آن را کاهش داد و برای این منظور باید از مواد جذب استفاده کرد.
- چنانچه نتوان با کاهش ابعاد محفظه شیلد، فرکانس رزونانس آن را کاملاً از محدوده کاری مدار خارج کرد، با تقسیم محفظه کلی به اشکال غیر یکسان و غیر هندسی، با دیواره‌های غیر موازی از تشدید اثر آنها جلوگیری کنید و
- چنانچه استفاده از روزه‌های نسبتاً بزرگ غیر قابل اجتناب باشد، (مثلاً برای درپوش‌ها) باید از روش‌های دیگری همچون استفاده از اثر موجبری در زیر فرکانس قطع و یا درزبندهای EMC بهره برد.

۴-۱۱- درزبندهای EMC

یک شیلد ایده‌آل محفظه‌ای پیوسته و بدون روزه از هادی بوده که در واقع یک قفس فارادی است. لحیم‌کاری یا جوشکاری اتصالات باعث ایجاد حداکثر حفاظت می‌شود. استفاده از پرچ و پیچ روش‌های معمول‌تری برای اتصال قطعات شیلد است. همان‌طور که پیشتر ذکر شد، باید فاصله پیچ‌ها در حدی باشد که درز ایجاد شده، اختلال قابل توجهی در اثربخشی شیلد ایجاد نکند. اما در مواقعی که کم کردن فاصله پیچ‌ها عملی نباشد و یا اینکه به‌طور کلی به دلیل ملاحظات مکانیکی یا سهولت دسترسی استفاده از پیچ ممکن نباشد، لازم است از درزبندهای EMC استفاده کرد. کارکرد اصلی درزبند EMC، ایجاد یک مسیر هدایتی بین دو جزء یک درز یا شکاف است. استفاده از یک درزبند EMC به همراه یک سطح‌سازی مناسب بر روی محفظه شیلد، پیوستگی الکتریکی خوبی بین اجزاء جفت شونده محفظه ایجاد کرده و امپدانس محل اتصال را حداقل و اثربخشی شیلد را حداکثر می‌کند. برخی از انواع متداول درزبندهای EMC عبارتند از: الاستومرها، رسانا، فنرهای انگشتی فلزی، توری فلزی، روبان‌های ماریپیچی و فوم‌های رسانا. درزبندها در طرح‌های مختلف سطح مقطع و همچنین مواد مختلف داخلی و سطح‌سازی شده با فلزاتی همچون قلع، نیکل، آلیاژ بریلیم-مس، نقره، فولاد ضد زنگ و غیره ارائه می‌شوند (شکل ۱۰).

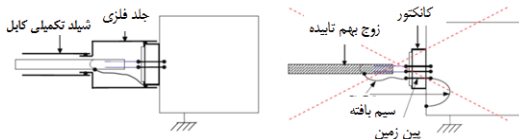
۴-۱۳- کابل‌ها و کانکتورها

مهم‌ترین منبع نشر یا تشعشع از یک سیستم، همچنین القاء نویز به درون آن، کابل‌ها و کانکتورها است. بنابراین، باید با دقت مشخص و انتخاب شود. هدف اصلی از این ملاحظه دو مسئله است: یکی حصول اطمینان نسبت به اینکه سیگنال‌های مود تفاضلی عامل تشعشع از کابل‌ها نباشد و دوم اینکه جریان‌های مود مشترک نه از طریق مدار داخلی بر روی کابل القا شود و نه اینکه به واسطه کابل از میدان‌های خارجی بر روی مدار داخلی القا شود. در بسیاری از موارد باید از کابل‌های شیلد/حفاظدار^۹ استفاده شود. البته در مورد کابل تغذیه (چنانچه فیلتر مناسب برای آن وجود داشته باشد) و واسطه‌های فرکانس پایین که امکان فیلتر کردن مناسب آنها وجود دارد، ممکن است استثنا وجود داشته باشد. رعایت مسائل زیر در مورد کابل‌ها و کانکتورها باعث افزایش قابل ملاحظه سازگاری الکترومغناطیسی در سیستم می‌شود:

- حتی‌الامکان طراحی سیستم به نحوی انجام شود که نیاز به اتصالات سیمی/کابلی در سیستم به حداقل برسد،
- از عبور کابل‌های حامل سیگنال نویزی از کنار قطعات یا مدارهای حساس اجتناب شود،
- مساحت حلقه جریانی بین مسیره‌های رفت و برگشت در حداقل باشد. برای رعایت این مسئله، علاوه‌براین که لازم است طول سیم‌ها حداقل باشد، باید چینش سیم‌ها در یک کابل چند رشته به درستی انجام شود. با قرار دادن سیم‌های رفت و برگشت جریان یک سیگنال در مجاور هم، علاوه‌براین که اندوکتانس را کاهش می‌دهد، تزویج خازنی بین آنها را افزایش و تزویج بین آنها و مدارهای دیگر را کاهش می‌دهد،
- استفاده از زوج سیم‌های به هم تابیده شده یکی از روش‌های موثر برای افزایش سازگاری الکترومغناطیسی است و چنانچه دارای شیلد باشد تا فرکانس‌های چند ده مگاهرتز شرایط مناسبی از نظر EMC فراهم می‌کند،
- برای اتصال شیلد کابل‌های شیلددار به زمین باید دقت شود که چنانچه شیلد در دو سر کابل به یک زمین مشترک متصل می‌شود، ایجاد حلقه در زمین سیستم می‌تواند عاملی باشد برای حساسیت بیشتر مدار به تداخلات الکترومغناطیسی. چنانچه مکانیزم تزویج سیگنال تداخلی قابل شناسایی باشد، آنگاه می‌توان یک طراحی زمین هیبرید را پیاده‌سازی نمود. اگر تزویج خازنی نویز غالب باشد (یا به عبارتی دیگر، میدان الکتریکی نویز غالب باشد) باید اتصال زمین در یک سمت انجام شود (معمولاً در سمت منبع سیگنال) و اگر تزویج سلفی

- نویز غالب باشد (میدانی مغناطیسی غالب باشد) باید اتصال زمین در هر دو سمت انجام شود،
- لازم است برای کابل‌های نواری (یا دیگر کابل‌های چند سیمه شیلد نشده)، چندین زمین یا مسیر برگشت جریان در نظر گرفته شود. برای کابل نواری، بهترین آرایش، یک درمیان قرار دادن سیگنال و زمین است. از آنجاکه در بسیاری از مواقع این پیشنهاد قابل انجام نیست، حداقل شرط لازم این است که خط زمین در دو انتها و وسط نوار قرار داشته باشد. چنانچه نیاز به عبور تعداد زیادی سیگنال با نرخ داده بالا وجود داشته باشد، استفاده از کابل نواری شیلددار ارجح است،
- استفاده از کابل‌های شیلدشده، خصوصاً برای کابل‌هایی که از سیستم خارج می‌شود و پتانسیل بالاتری برای دریافت نویز و یا تشعشع ناخواسته دارد، توصیه می‌شود. در این حالت، نحوه پایان‌دهی^{۱۰} کابل و خصوصاً شیلد آن اهمیت دارد. باید از اتصال به شکل «موی بافته شده»^{۱۱} اجتناب کرد چراکه باعث افزایش اندوکتانس مسیر برگشت جریان شده و برای فرکانس‌های بالا مشکل‌ساز خواهد بود. در مواقع ضروری، باید از کانکتور با جلد فلزی استفاده کرد (شکل ۱۲) و

پایان‌دهی مناسب برای یک کابل شیلددار، اتصال مستقیم آن به بدنه فلزی سیستم یا زمین محفظه شیلد است. این کار باعث به حداقل رسیدن امپدانس فی‌مابین می‌شود و بهترین روش برای این کار اتصال ۳۶۰ درجه است.



شکل (۱۲): پایان دهی ناصحیح (راست) و صحیح (چپ) کابل شیلد شده بر روی جعبه [۱۳].

۴-۱۴- محافظت در برابر تخلیه الکتریسیته ساکن

همهٔ دسته سیم‌ها/کابل‌های خارجی در یک سیستم فضایی باید دارای یک شیلد پوششی اضافی باشد و ضروری است که این شیلد پوششی در محل کانکتور اتصال به تجهیزات خارجی و همچنین در محل ورود به بدنهٔ سیستم فضایی، به بدنه متصل شود. به اینصورت یک قفس فارادی کامل در اطراف اجزاء خارجی ایجاد می‌شود. البته در مواردیکه ملاحظات انتقال حرارت بر روی سیم/کابل، اجازه اضافه کردن شیلد را نمی‌دهد،

10. Termination
11. Pigtail

9. Screened/Shielded Cables

Military and Commercial Equipment”, M.Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 2009.

- [7] Military Standard, *Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Systems*, MIL-STD-1541A, 1987.
- [8] Military Standard, *Electromagnetic Compatibility and Grounding Requirements for Space System Facilities*, MIL-STD-1542B, 1991.
- [9] Space and Missile Systems Center Standard, *Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems*, SMC Standard SMC-S-008, 2008.
- [10] Standard, *Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Equipment and Systems*, AIAA S-121A-2017, 2017.
- [11] ESA Requirements and Standards Division, *Space Engineering, Electromagnetic Compatibility*, ECSS-E-ST-20-07C, Rev. 1, 2012.
- [12] Engineering Practice Study, *Results Of Detailed Comparisons of Individual EMC Requirements and Test Procedures Delineated in Major National and International Commercial Standards with Military Standard MIL-STD-461E*, DoD/Industry Electromagnetic Environmental Effects Standards Committee, 2001.
- [13] Space Engineering Electromagnetic Compatibility Handbook, ECSS-E-HB-20-07A, European Cooperation for Space Standardization, Noordwijk, Netherlands, 2012.
- [14] Electrical Grounding Architecture for Unmanned Spacecraft, NASA-HDBK-4001, Feb 17, NASA Stennis Space Center, Saint Louis, 1998.
- [15] Armstrong, K. “Design Techniques for EMC—Part 4: Shielding”, *EMC Compliance Journal*, available at: http://www.compliance-club.com/archive/old_archive/990810.htm, 2006-2009.
- [16] Williams, T., “EMC for Product Designers: Fifth Ed.”, Newnes, Elsevier, Boston, 2017.
- [17] Ott, H.W., *Electromagnetic Compatibility Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 2009.
- [18] www.lairdtech.com

باید تمهیدات حفاظتی مناسب بر روی تجهیزات و مدارهای فعال متصل به کابل‌ها دیده شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، به عنوان بخش اول ارائه شده در موضوع «سازگاری الکترومغناطیسی در سامانه‌های فضایی»، اولاً چهارچوب کلی بحث و اهمیت موضوع مطرح شد. دانستیم که از شروط لازم برای موفقیت در یک مأموریت فضایی، توجه ویژه به موضوع سازگاری الکترومغناطیسی از ابتدایی‌ترین فازهای طراحی است. در ادامه، به بیان مهمترین استانداردهای جهانی EMC در سطوح نظامی و فضایی پرداختیم. پیگیری این استانداردها در فازهای طراحی، ساخت، تست و عملیات از اهمیت بسزایی برخوردار است. پس از آن، به طراحی سیستمی سامانه‌های فضایی براساس اصول سازگاری الکترومغناطیسی پرداختیم. سه موضوع مهم «زمین‌سازی»، «شیلدسازی»، «کابل‌ها و کانکتورها» و ملاحظات مربوطه مطرح شد. الزامات و توصیه‌های ارائه شده می‌تواند تا حد زیادی به افزایش قابلیت اطمینان در یک مأموریت فضایی کمک کند. شایان ذکر است که موضوع سازگاری الکترومغناطیسی، بسیار گسترده و متنوع بوده و قطعاً گردآوری آن در قالب یک یا چند نوشتار مقدور نیست. بنابراین، سعی بر این بود که در این نوشتار ضمن تبیین اهمیت موضوع به مدیران و طراحان، ملاحظات اصلی در زمینه طراحی سیستم‌های فضایی ارائه شود.

۶- مراجع

- [1] Leach, R.D. and Alexander, M.B., “Electronic Systems Failures and Anomalies Attributed to Electromagnetic Interference”, *NASA Reference Publication 1374*, July 1995.
- [2] Harland, D.M. and Lorenz, R.D., *Space Systems Failures: Disasters and Rescues of Satellites, Rockets and Space Probes*, Springer Praxis, 2005.
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/1967_USS_Forr_estal_fire
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Orion_\(rocket\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Orion_(rocket))
- [5] <https://interferencetechnology.com/emc-in-space/>
- [6] Pierce Jr., J.D., “Electromagnetic Compatibility (EMC) Requirements for