

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مهندسی سازگاری  
الکترومغناطیسی  
(جلد ۱)



انتشارات  
جهاد دانشگاهی  
قزوین

سرشناسه: اوت، هنری، ۱۹۳۶- م.

Ott, Henry W

عنوان و نام پدیدآور: مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی / تالیف هنری اوت  
: ترجمه مصطفی مطاعی... [و دیگران].

مشخصات نشر: قزوین: جهاد دانشگاهی. سازمان انتشارات. واحد قزوین،  
۱۳۹۹-

مشخصات ظاهری: ج.

شابک: ج. ۵۱-۲-۶۶۴۷۶-۶۶۲۲-۹۷۸؛ ج. ۷۲-۸-۶۶۴۷۶-۶۶۲۲-۹۷۸؛

ج. ۳۰-۲-۹۷۴۲۰-۹۷۴۲۰-۳-۷-۴؛ ج. ۹۷۸-۶۲۲-۹۷۴۲۰-۳-۷-۴؛

وضعیت فهرست نویسی: فیبا

یادداشت: عنوان اصلی: Electromagnetic compatibility engineering, c2009.

یادداشت: مترجمان مصطفی مطاعی، محمدحسین کوهی قمصری،  
امیرحسام الفتی، مهسا شهرجردی.

موضوع: مدارهای الکترونیکی -- سرو صدا

موضوع: Electronic circuits -- Noise

موضوع: سازگاری الکترومغناطیسی

موضوع: Electromagnetic compatibility

شناسه افزوده: مطاعی، مصطفی، ۱۳۵۲-، مترجم

رده بندی کنگره: TK ۷۸۶۷/۵

رده بندی دیویی: ۶۲۱/۳۸۲۲۴

شماره کتابشناسی ملی: ۶۱۶۵۱۶۹

وضعیت رکورد: فیبا

عنوان: مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (جلد ۱)

مترجمان: مصطفی مطاعی، محمد حسین کوهی قمصری، امیرحسام

الفتی، مهسا شهرجردی

شابک دوره: ۹۷۸-۶۲۲-۶۶۴۷-۶۱-۸

شابک جلد اول: ۹۷۸-۶۲۲-۶۶۴۷-۶۲-۵

چاپ: نوبت اول - ۱۳۹۹

شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه

بهاء: ۸۰۰۰۰۰ ریال

مصوبه شورای شعبه انتشارات جهاد دانشگاهی قزوین

ناشر: انتشارات جهاد دانشگاهی قزوین

کلیه حقوق محفوظ است ©

# مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (جلد ۱)

تألیف:

هنری اوت HENRY W. OTT

مترجمان:

مصطفی مطاعی

محمد حسین کوهی قمصری

امیر حسام الفتی

مهسا شهرجردی

با مقدمه ای از: دکتر احمد چلداوی (استاد دانشگاه علم و صنعت)

دکتر محمد مهدی ناییبی (استاد دانشگاه صنعتی شریف)

خدایا یاریمان کن  
که سازگاری بین قطعات، ما را از سازگاری بین انسان ها غافل نکند.

### تقدیم به

پدر و مادر دلسوز و فداکارمان  
دانشجویان، پژوهشگران و صنعتگرانی که خالصانه برای سربلندی و  
پیشرفت ایران اسلامی مان تلاش می کنند.

همکاری با صنعت و دانشگاه در  
تدوین کتاب و مقاله، مشاوره و آموزش،  
طراحی و ساخت سیستم ها بر اساس اصول EMC

## فهرست

۱	مقدمه
۱۵	فصل ۱؛ سازگاری الکترومغناطیسی
۱۷	۱-۱ مقدمه
۱۸	۲-۱ نويزو و تداخل
۱۸	۳-۱ طراحی بر اساس سازگاری الکترومغناطیسی
۲۰	۴-۱ اسناد مهندسی و EMC
۲۱	۵-۱ مقررات EMC در آمریکا
۲۱	۱-۵-۱ مقررات FCC
۲۳	۲-۵-۱ زیربخش B از بخش ۱۵ FCC
۲۶	۳-۵-۱ انتشارات
۳۱	۴-۵-۱ روش‌های مدیریتی
۳۳	۵-۵-۱ تاثیرپذیری
۳۴	۶-۵-۱ تجهیزات و لوازم پزشکی
۳۵	۷-۵-۱ مخبرات راه دور
۳۶	۸-۵-۱ خودرو

۳۷	۶-۱ الزامات EMC کانادا .....
۳۸	۷-۱ الزامات EMC اتحادیه اروپایی .....
۳۸	۱-۷-۱ الزامات انتشاری .....
۴۰	۲-۷-۱ هارمونیک‌ها و سوسو .....
۴۲	۳-۷-۱ الزامات ایمنی .....
۴۲	۴-۷-۱ بخشنامه‌ها و استانداردها .....
۴۶	۸-۱ هماهنگ‌سازی بین‌المللی .....
۴۷	۹-۱ استانداردهای نظامی .....
۴۸	۱۰-۱ ارتباطات هوایی .....
۵۰	۱۱-۱ فرایند تنظیم مقررات .....
۵۰	۱۲-۱ راه‌های معمول نویز .....
۵۲	۱۳-۱ روش‌های پیوند نویز .....
۵۲	۱-۱۳-۱ پیوند نویز هدایتی .....
۵۲	۲-۱۳-۱ پیوند امپدانس مشترک .....
۵۳	۳-۱۳-۱ پیوند میدان الکتریکی و مغناطیسی .....
۵۴	۱۴-۱ منابع نویز متفرقه .....
۵۴	۱-۱۴-۱ فعالیت گالوانیک .....
۵۶	۲-۱۴-۱ فعالیت الکترولیتی .....
۵۶	۳-۱۴-۱ اثر تریبوالکتریک .....
۵۶	۴-۱۴-۱ حرکت هادی .....
۵۶	۱۵-۱ استفاده از نظریه شبکه .....
۵۹	خلاصه .....
۶۰	مسائل .....
۶۳	<b>فصل ۲؛ کابل کشی</b> .....
۶۵	کابل کشی .....
۶۶	۱-۲ پیوند خازنی .....
۶۹	۲-۲ اثر پوشش در پیوند خازنی .....
۷۳	۳-۲ پیوند سلفی .....



۷۶	۴-۲ محاسبه اندوکتانس متقابل
۷۸	۵-۲ اثر پوشش در پیوند مغناطیسی
۷۹	۱-۵-۲ پیوند مغناطیسی بین پوشش و هادی داخلی
۸۲	۲-۵-۲ پیوند مغناطیسی بین هادی پوشش دار و سیم خارجی
۸۶	۶-۲ پوشش برای جلوگیری از تشعشع مغناطیسی
۸۹	۷-۲ پوشش گیرنده در مقابل میدان های مغناطیسی
۹۰	۸-۲ پیوند امپدانس مشترک پوشش
۹۲	۹-۲ داده های تجربی
۹۶	۱۰-۲ مثالی برای پوشش انتخابی
۹۷	۱۱-۲ امپدانس انتقالی پوشش
۹۸	۱۲-۲ مقایسه کابل هم محور با زوج سیم به هم تابیده
۱۰۲	۱۳-۲ پوشش های بافته شده
۱۰۴	۱۴-۲ پوشش ماریچ
۱۰۷	۱۵-۲ پایان دهی پوشش
۱۰۸	۱-۱۵-۲ دم خوک های
۱۱۱	۲-۱۵-۲ زمین کردن پوشش کابل ها
۱۱۸	۲-۱۶ کابل های نواری
۱۲۰	۱۷-۲ کابل های طویل از لحاظ الکتریکی
۱۲۲	خلاصه
۱۲۴	مسائل
۱۳۱	<b>فصل ۳؛ زمین سازی</b>
۱۳۵	۱-۳ توزیع توان AC و زمین های ایمنی
۱۳۵	۱-۱-۳ تابلو برق ورودی
۱۳۸	۲-۱-۳ تقسیم مدارها
۱۴۰	۳-۱-۳ کنترل نویز
۱۴۳	۴-۱-۳ زمین های ارت
۱۴۵	۵-۱-۳ زمین های ایزوله شده
۱۴۷	۶-۱-۳ سیستم های راه انداز مجزا
۱۴۹	۷-۱-۳ افسانه زمین سازی

۱۵۰	۲-۳ زمین‌های سیگنال
۱۵۵	۱-۲-۳ سیستم‌های زمین تک‌نقطه‌ای
۱۵۸	۲-۲-۳ سیستم‌های زمین چندنقطه‌ای
۱۶۱	۳-۲-۳ پیوند امیدانس مشترک
۱۶۲	۴-۲-۳ زمین‌های ترکیبی
۱۶۴	۵-۲-۳ زمین‌های شاسی
۱۶۵	۳-۳ تجهیزات / زمین‌سازی سیستم
۱۶۶	۱-۳-۳ سیستم مجزا
۱۶۶	۲-۳-۳ سیستم‌های خوشه‌ای
۱۷۵	۳-۳-۳ سیستم‌های توزیع شده
۱۷۸	۴-۳ حلقه‌های زمین
۱۸۴	۵-۳ تحلیل فرکانس پایین چوک مد مشترک
۱۸۹	۶-۳ تحلیل فرکانس بالای چوک مد مشترک
۱۹۲	۷-۳ مرجع زمین مجزا برای یک مدار
۱۹۲	خلاصه
۱۹۴	مسائل
۱۹۷	<b>فصل ۴: متعادل سازی و صافی کردن</b>
۱۹۹	۱-۴ متعادل سازی
۲۰۳	۱-۱-۴ نسبت رد مد مشترک
۲۰۷	۲-۱-۴ تعادل کابل
۲۰۸	۳-۱-۴ تعادل سیستم
۲۰۹	۴-۱-۴ بارهای متعادل شده
۲۱۸	۲-۴ صافی کردن
۲۱۸	۱-۲-۴ صافی‌های مد مشترک
۲۲۲	۲-۲-۴ تأثیرات پارازیتی در صافی‌ها
۲۲۳	۳-۴ پیوندزدایی منبع تغذیه
۲۲۹	۱-۳-۴ پیوندزدایی مدار آنالوگ فرکانس کم
۲۳۲	۲-۳-۴ پیوندزدایی تقویت‌کننده
۲۳۳	۴-۴ بارهای خزنی کنترل‌کننده

۲۳۵	۵-۴ پهنای باند سیستم
۲۳۶	۶-۴ کدگذاری و مدولاسیون
۲۳۷	خلاصه
۲۳۸	مسائل
۲۴۱	<b>فصل ۵: قطعات غیرفعال</b>
۲۴۳	۱-۵ خازن
۲۴۵	۱-۱-۵ خازن‌های الکترولیتی
۲۴۷	۲-۱-۵ خازن‌های کاغذی و فیلمی
۲۴۷	۳-۱-۵ خازن‌های میکا و سرامیک
۲۵۰	۴-۱-۵ خازن‌های فیدترو
۲۵۲	۵-۱-۵ خازن‌های موازی
۲۵۳	۲-۵ سلف‌ها
۲۵۵	۳-۵ ترانسفورمرها
۲۵۷	۴-۵ مقاومت‌ها
۲۵۸	۱-۴-۵ نويز در مقاومت‌ها
۲۶۰	۵-۵ هادی‌ها
۲۶۰	۱-۵-۵ اندوکتانس هادی‌های دایروی
۲۶۲	۲-۵-۵ اندوکتانس هادی‌های مستطیلی
۲۶۲	۳-۵-۵ مقاومت هادی گرد
۲۶۴	۴-۵-۵ مقاومت هادی مستطیلی
۲۶۶	۶-۵ خطوط انتقال
۲۶۹	۱-۶-۵ امپدانس مشخصه
۲۷۲	۲-۶-۵ ثابت انتشار
۲۷۳	۳-۶-۵ تضعیف فرکانس بالا
۲۷۷	۴-۶-۵ ارتباط میان C، L و R
۲۷۷	۵-۶-۵ استدلال آخر
۲۷۸	۷-۵ فریت‌ها
۲۸۵	خلاصه
۲۸۸	مسائل



# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## هست کلید در گنج حکیم

### مقدمه دکتر احمد چلداوی

استاد دانشگاه علم و صنعت ایران

علم عزت می بخشد، علم اقتدار است.

مقام معظم رهبری حضرت امام خامنه‌ای

سپاس خالق را سزد که نور ایمان و ولایت رسول اکرم و خاندان پاکش علیهم افضل صلوات المصلین را در دل‌های ما به امانت سپرد.

سپاس خدای را که بر ما منت نهاد و ما را در برهه‌ای از زمان خلق کرد که می‌توانیم در پرتو نظام مقدس جمهوری اسلامی به اعتلای دین او و نام مبارک امام زمان روحی و ارواح العالمین لتراب مقدمه الفداء خدمتی ولو ناچیز بکنیم.

افتخار ما این است که در قرآن ما عظمت جایگاه عالم با جملاتی مثل:

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

(۱۱ مجادله)

«خدا مقام اهل ایمان و دانشمندان شما را (در دو جهان) رفیع گرداند، و خدا به هر چه کنید آگاه است.»

به روشنی تبیین شده است.

در این راستا یکی از وظایف مهم ما به دست آوردن منشأ علوم و ایجاد تحول بنیادین در آن با استناد به جهان بینی الهی و استفاده از آن برای آسایش و رستگاری بشریت و رفع ستم‌ها و تبعیض‌ها در عرصه بین‌الملل است.

در همین راستا رهبر معظم انقلاب حضرت امام خامنه‌ای می‌فرمایند "خود علم ارزش است. این ارزش را کسانی می‌توانند به ضد ارزش تبدیل کنند که از آن علیه منافع بشریت استفاده کنند، اما خود دانش یک ارزش است، در این شک نکنید. به برکت دانش معرفت خدا هم آسان می‌شود." بنابراین با الهام از آموزه‌های این دین بزرگ، فرهیختگان جامعه و به‌ویژه ما دانشگاهیان باید اولاً خودمان به این باور برسیم که «ما می‌توانیم»، ثانیاً باید این را به همه اقشار جامعه بباورانیم. تا خود به این باور قلبی نرسیم قادر به باوراندن آن به دیگران نیستیم.

یکی از تلاش‌های مقدس در این زمینه تلاش برای ترجمه دانش و اندوخته‌های دیگران از زبان اصلی به زبان فارسی برای استفاده بهتر دانش‌پژوهان است. کتاب حاضر حاصل یکی از همین تلاش‌هاست که به خوبی و زیبایی توسط جناب آقای مهندس مطاعی که خود متخصص در زمینه سازگاری الکترومغناطیسی هستند، به زبان روان فارسی ترجمه شده است. به دلیل احاطه و تخصص مترجم، ترجمه متن از حالت تحت‌اللفظی خارج شده و به جملاتی با محتوای قوی تبدیل شده است. به نوبه خودم از تلاش‌های این متخصص متعهد و همکاران ایشان کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم و امیدوارم در عرصه‌های مشابه موفق باشند.

## مقدمه دکتر محمد مهدی ناییبی

استاد دانشگاه صنعتی شریف

در شرایط کنونی که انواع و اقسام وسایل الکترونیکی در محیط کوچکی کنار هم کار می‌کنند به سادگی می‌توانند روی یکدیگر ایجاد تداخل نمایند. اگر مداری بدون علم به روش‌های سازگاری الکترومغناطیسی طراحی شود نمی‌تواند در محیط‌های واقعی و صنعتی درست کار کند. بارها شاهد این بوده‌ام که مهندسان فارغ‌التحصیل دانشگاه، مداری ساخته‌اند که در محیط آزمایشگاهی کار می‌کند ولی در محیط صنعتی رفتارهای عجیب و غریب از خود بروز می‌دهد. جای تأسف است که مهارت‌های کاربردی، از جمله این علم مهم، در دانشگاه‌های کشورمان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در حالی که بدون دانستن اصول سازگاری الکترومغناطیسی معمولاً نمی‌توان یک مدار کارا و عملی ساخت.

علی‌رغم اینکه معروف شده که مهندسان EMC در نشر این علم بخیل‌اند و این فوت‌های کوزه‌گری را کمتر آموزش می‌دهند، کتب متعددی در این زمینه در جهان به چاپ رسیده است که بعضاً به‌عنوان مرجع درسی در برخی دانشگاه‌های جهان نیز مورد استفاده‌اند ولی برخی از این کتب بیش از اندازه تئوری بوده و فاقد نکات کاربردی بوده و برخی نیز در عین بیان نکات کاربردی فاقد استدلال‌های روشن علمی هستند. کتاب اوت تعادل دلپذیری در پرداختن به هر دو جنبه نظری و عملی این علم به کار بسته است. سال‌ها، قبل از اینکه اینجانب تدریس

این درس را در دانشگاه صنعتی شریف آغاز کنم، یعنی زمانی که خودم تازه لیسانس مهندسی الکترونیک را گرفته بودم و مرتب با مشکلات مربوط به تداخل در کارهای عملی مواجه می‌شدم، کتاب "تکنیک‌های کاهش نویز در سیستم‌های الکترونیکی" که ترجمه ویرایش اول کتاب اوت بود به دستم رسید و افقی جدید بر من گشود و راه حل مشکلات را نشانم داد؛ لذا بعداً وقتی تدریس در دانشگاه را آغاز کردم لازم دیدم چنین درسی در میان دروس مهندسی برق ارائه شود. اکنون جای بسی تشکر است که جناب آقای مهندس مطاعی و همکارانشان نسبت به ترجمه ویرایش سوم کتاب بی‌نظیر آقای اوت که تغییرات اساسی نسبت به دو ویرایش قبلی دارد به زبان فارسی همت گماشته‌اند. اینجانب تمامی مشتاقان الکترونیک را به مطالعه این مجموعه ترغیب می‌نمایم.



## مقدمه نویسنده

مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی چاپ سوم کتاب قبلی ام با نام تکنیک‌های کاهش نویز در سیستم‌های الکترونیکی است که به نظر می‌رسد نام‌گذاری مناسب‌تری باشد. ۹ فصل از ۱۲ فصل کاملاً بازنویسی شده‌اند. علاوه بر این، ۶ فصل جدید به همراه ۲ پیوست جدید با بیش از ۶۰۰ صفحه اضافه شده و تغییراتی شامل ۳۴۲ شکل جدید اعمال شده است. بیشتر این تغییرات مربوط به کاربردهای عملی نظریه مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی هستند که بر اساس تجربیاتم در مشاوره‌های EMC و ارائه همایش‌های آموزشی در بیش از ۲۰ سال گذشته حاصل شده‌اند.

بعضی از مشکلاتی که مهندسان طراح با آن مواجه شده‌اند باعث شده است که مباحث سازگاری الکترومغناطیسی و تطابق با مقررات تنظیمی بااهمیت شوند. بیشتر مهندسان برای کنترل این مشکلات به خوبی آماده نشده‌اند، زیرا این موضوعات در دانشکده‌های مهندسی تدریس نمی‌شوند. رفع مشکلات EMC غالباً توسط آزمایش و خطا که با درک کمی از نظریه‌ها همراه است صورت می‌گیرند. چنین تلاش‌هایی زمان بر بوده و اغلب، راه‌حل‌های خیلی خوبی نیستند. این وضعیت مایه تأسف است؛ زیرا بیشتر اصول مورد نیاز ساده هستند و می‌توانند توسط فیزیک‌مقدماتی توضیح داده شوند. هدف این کتاب، اصلاح این وضعیت است.

این کتاب در مرحله اول برای مهندسانی است که با طراحی تجهیزات یا سیستم‌های الکترونیکی سروکار دارند و با مباحث EMC و تطابق‌های مقرراتی روبرو هستند. این کتاب جنبه‌های کاری

مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی شامل ایمنی و انتشار را در بر می‌گیرد. مفاهیم مطرح شده در این کتاب برای هر دو مدارات آنالوگ و دیجیتال با فرکانس‌های کمتر از فرکانس‌های صوتی تا گیگاهرتز کاربرد دارند. تأکید ما بر طراحی‌های EMC به‌صرفه با کمترین پیچیدگی‌های ریاضیاتی است. خواننده بهتر است دانش لازم برای طراحی تجهیزات الکترونیکی سازگار با محیط الکترومغناطیسی را کسب کرده و از آیین‌نامه‌های EMC ملی و بین‌المللی پیروی کند.

این کتاب به‌گونه‌ای نوشته شده است که به راحتی به عنوان یک کتاب درسی برای دانشجویان سال‌های آخر کارشناسی و نیز دانشجویان کارشناسی ارشد استفاده شود. برای این منظور، این کتاب ۲۵۱ مسئله برای دانشجویان دارد که جواب‌های آنها در پیوست "ه" آمده است.

کتاب به دو بخش تقسیم شده است: بخش اول، از فصل‌های ۱ تا ۱۰ در مورد نظریه EMC بوده و بخش دوم، از فصل ۱۱ تا ۱۸ شامل کاربردهای EMC است. علاوه بر این، کتاب دارای ۶ پیوست با اطلاعات تکمیلی است. سازمان بندی کتاب به صورت زیر است:

- فصل ۱ مقدمه‌ای بر سازگاری الکترومغناطیسی را بیان کرده و مقررات EMC ملی و بین‌کشوری را پوشش می‌دهد. که شامل مقررات اتحادیه اروپا، FCC و نظامی ایالات متحده هستند.
- فصل ۲ پیوند میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و هم‌شنوایی بین کابل‌ها و همین‌طور زمین‌سازی و پوشش کابل‌ها را در بر دارد. فصل ۳ شامل زمین‌سازی ایمنی، تغذیه، سیگنال و سخت‌افزار (سیستم‌ها) می‌شود.
- متعادل‌سازی و صافی‌سازی و همین‌طور پیوندزدایی تقویت‌کننده‌های تفاضلی و مدارات آنالوگ فرکانس کم در فصل ۴ بحث شده‌اند. فصل ۵ در مورد قطعات غیرفعال بوده و مشخصه‌های غیر آرمانی قطعاتی که بر کارکردشان مؤثر است را شامل می‌شود. علاوه بر مقاومت‌ها، خازن‌ها و القاگرها و مهره‌های فریت، هادی‌ها و خطوط انتقال نیز بیان شده‌اند.
- فصل ۶ تحلیل کارایی پوشش ورقه‌های فلزی، همین‌طور پوشش‌های هادی در پلاستیک و تأثیر شکاف‌ها بر کارایی پوشش را با جزئیات بیشتر بیان می‌کند.
- فصل ۷ محافظت از کنتاکت‌های رله‌ها و کلیدها را شامل می‌شود. فصل‌های ۸ و ۹ منابع نویز داخلی در عناصر و قطعات فعال را بررسی می‌کنند. فصل ۸ منابع نویز داخلی مانند نویز ضربه‌ای و حرارتی را شامل شده و فصل ۹ منابع نویز در قطعات فعال را بحث می‌کند.
- فصل‌های ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ مباحث سازگاری الکترومغناطیسی در مدارهای دیجیتال را شامل می‌شوند. فصل ۱۰ زمین‌سازی مدارات دیجیتال شامل امپدانس صفحه زمین را بررسی کرده

- و بحثی در مورد چگونگی جاری شدن جریان‌های منطق دیجیتال ارائه می‌کند.
  - فصل ۱۱ در مورد توزیع و پیوندزدایی تغذیه مدار دیجیتال است و فصل ۱۲ سازوکارهای تشعشعی مدارات دیجیتال را در هر دو مد مشترک و تفاضلی را شامل می‌شود.
  - فصل ۱۳ انتشارات هدایتی در خطوط تغذیه جریان متناوب جریان (AC)، جریان مستقیم (DC) و همین‌طور مباحث EMC در منابع تغذیه کلیدزنی و راه‌اندازهای موتوری با سرعت متغیر را توضیح می‌دهد. فصل ۱۴ ایمنی گذرا و فرکانس رادیویی (RF) و همین‌طور محیط الکترومغناطیسی را بحث می‌کند. فصل ۱۵ محافظت در برابر تخلیه الکتریسته ساکن در طراحی محصولات الکترونیکی را شامل می‌شود. این فصل بر اهمیت یک رویکرد سه‌جانبه شامل طراحی نرم‌افزاری، الکتریکی و مکانیکی تأکید دارد.
  - فصل ۱۶ طرح‌بندی برد مدار چاپی و انباشت لایه‌ها را شامل می‌شود که اغلب بحث نمی‌شوند. فصل ۱۷ مسئله مشکل بخش‌بندی، زمین‌سازی و طرح‌بندی بردهای مدار چاپی سیگنال ترکیبی را ارائه می‌کند.
  - فصل پایانی (فصل ۱۸)، اندازه‌گیری‌های پیش‌تطابق EMC را بیان می‌کند. این اندازه‌گیری‌ها می‌توانند در آزمایشگاه توسعه محصول، با استفاده از تجهیزات آزمون ارزان و ساده که به کارکرد EMC محصول وابسته هستند، انجام شوند.
- در انتهای هر فصل، خلاصه‌ای از نکات مهم بحث شده و همین‌طور مسائل زیادی برای کمک به خواننده بیان شده است. برای تکمیل موضوعات مورد بحث، به هر فصل یک بخش مرجع و بخش مراجع بیشتر اضافه شده است.
- اطلاعات تکمیلی‌تر در ۶ پیوست بیان شده‌اند. پیوست الف در مورد دسی بل است. پیوست ب، ۱۰ روش بهینه برای بیشینه کردن انتشار از محصول را شامل می‌شود. پیوست ج معادلاتی برای بازتاب‌های چندگانه میدان مغناطیسی در پوشش‌های نازک را استخراج می‌کند. پیوست د با عنوان دوقطبی برای افراد مبتدی، بحث ساده و مفهومی از چگونگی کارکرد یک آنتن دوقطبی است. اگر محصولی انرژی الکترومغناطیسی را تشعشع یا دریافت کند، آنتن است. بنابراین، درکی از نظریه آنتن پایه برای همه مهندسان، به‌ویژه مهندسان EMC سودمند خواهد بود. پیوست "و" نظریه مهم اندوکتانس جزئی که به‌خوبی درک نشده است را شرح می‌دهد و پیوست "ه" جواب‌های مسائل انتهای هر فصل را بیان می‌کند.

جا دارد در اینجا از همه کسانی که جهت ارائه نظرات در کتاب تکنیک‌های کاهش نویز در سیستم‌های الکترونیکی وقت گذاشتند و به من کمک کردند و همه آنهایی که مرا در نوشتن کتاب مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی تشویق نمودند تشکر و قدردانی کنم. به‌ویژه، از جان سلی، باب جرمن، دکتر کلایتون پاول، مارک استفکا و جیم براون برای مرور عمیق بخش‌های اصلی کتاب و همین‌طور برای تشویق‌های آنها و بحث‌های مفیدی که در مورد موضوعات EMC داشتیم، قدردانی کنم. مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی به خاطر آنها کتاب بهتری شده است.

بخش‌هایی از کتاب در کلاس سازگاری الکترومغناطیسی توسط مارک استفکا در دانشگاه میشیگان - داربون در نیمسال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ تدریس شد. تشکر قلبی‌ام را نثار دانشجویانی می‌کنم که در آن دو کلاس با تعداد زیادی از نظرات و پیشنهادهای (که بسیاری از آنها به این کتاب اضافه شد) من را یاری کردند؛ به‌ویژه پیشنهادهایی که در مورد اضافه کردن مسائل به کتاب بیان داشتند. من همچنین مایلم از جیمز استایلز قدردانی کنم. مارک استفکا و من اغلب نکات سودمند ایشان را تأیید می‌کردیم.

در پایان، از همه همکارانی که زمان گذاشتند و بخش‌های مختلف این کتاب را مرور کرده و نظرات و پیشنهادهای سودمندی داشتند، سپاس‌گزاری می‌کنم.

اطلاعات فنی بیشتر، اطلاعات به‌روز در مورد مقررات EMC، همین‌طور غلط‌نامه در سایت [www.hottconsultants.com](http://www.hottconsultants.com) موجود است.

**Livingston, New Jersey**

HENRY W. OTT, January 2009

## مقدمه مترجمان

بارهای الکتریکی ساکن باعث ایجاد میدان الکتریکی ساکن می‌شوند، حرکت یکنواخت بارها (جریان الکتریکی ثابت)، میدان مغناطیسی ساکن ایجاد می‌کند و حرکت شتاب‌دار بارها (جریان الکتریکی متغیر) موجب میدان‌های الکترومغناطیسی شده که در شرایط خاصی می‌توانند مانند یک آنتن خوب تشعشع کنند. بر اساس نظریه الکترومغناطیس، میدان‌های الکترومغناطیسی، ولتاژها یا جریان‌هایی را در مدارات القا می‌کنند و برعکس، ولتاژها و جریان‌ها می‌توانند میدان‌های الکترومغناطیسی در اطراف خود ایجاد کنند. از طرفی، نویز، یک جریان، ولتاژ یا میدان الکترومغناطیسی ناخواسته است. بنابراین کاهش نویز، در واقع کاهش میدان‌های الکترومغناطیسی یا ولتاژها و جریان‌های مزاحم در سیستم‌ها است.

امروزه کلیه این مباحث با عنوان **سازگاری الکترومغناطیسی**<sup>۱</sup> مطرح هستند. برای این منظور قبلاً از عبارات **تداخل الکترومغناطیسی**<sup>۲</sup> یا **تداخل فرکانس رادیویی**<sup>۳</sup> استفاده می‌شد؛ ولی امروزه از واژه مثبت **سازگاری** به جای **تداخل** استفاده می‌شود.

اهمیت موضوع EMC در سه دهه اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. برای پی بردن به اهمیت موضوع EMC کافی است به این نکته اشاره کرد که **در اغلب کشورهای دنیا اگر یک محصول**

---

1 - EMC: ElectroMagnetic Compatibility

2 - EMI: ElectroMagnetic Interference

3 - RFI: Radio Frequency Interference

**برقی (حتی یک اسباب بازی الکترونیکی)، استاندارد EMC نداشته باشد، اجازه فروش نخواهد داشت؛** هرچند پیشرفته‌ترین روش‌های طراحی در آن به کار رفته باشد. از دلایل دیگر اهمیت موضوع EMC، گزارش‌های بسیاری در مورد حوادث ناشی از عدم رعایت اصول EMC است:

سقوط هواپیماهای نظامی به علت عدم رعایت اصول EMC

سال	هواپیمای نظامی	علت حادثه
۱۹۴۴	B29	تشعشع و هدایت از کابل تغذیه به تجهیزات مخابراتی HF و VHF
۱۹۴۷	B50	ضعف اتصالات و زمین
۱۹۵۰	B37, C97	نویز گذرگاه تغذیه‌ی DC
۱۹۵۴	B52	تداخل از رادار به تجهیزات مخابراتی

حوادث ناشی از تخلیه الکترواستاتیکی ساکن (یکی از مباحث EMC)

سالانه بیلیون‌ها دلار به علت خسارت ناشی از تخلیه الکترواستاتیکی ساکن ESD هدر می‌رود.
حدود ۶۰٪ خرابی قطعات الکترونیکی ناشی از ESD است.
۱۷۶ مورد آتش‌سوزی ناشی از ESD در پمپ‌بنزین‌های چند شهر در آمریکا (۲۰۱۰-۱۹۹۲)
حوادث بسیاری از قبیل آتش‌سوزی، سقوط یا اختلال در هواپیما، موشک، خودرو، .... ناشی از ESD.

متأسفانه برخی از مدیران صنایع، EMC را جدی نمی‌گیرند و اغلب این عقیده را دارند که تاکنون محصولاتمان آزمون‌های کارکردی را با موفقیت گذرانده و بنابراین نیازی به پرداختن به مقوله EMC نداریم! این عقیده را می‌توان با سؤالات زیر پاسخ داد:

- آیا ما هم باید شکست‌های پیش‌آمده را تجربه کنیم؟
- آیا هواپیماهای نظامی که به علت عدم رعایت الزامات EMC سقوط کرده‌اند، قبلاً آزمون‌های پروازی موفق نداشته‌اند؟
- آیا با چند آزمون موفق در زمان صلح (یعنی زمانی که هیچ تهدید الکترومغناطیسی مطرح

نیست) می‌توان نتیجه گرفت که هواپیما، پرتابه یا سیستم مورد نظر در برابر تهدیدات الکترومغناطیسی مقاوم است؟

- آیا جهت جلوگیری از تکرار حوادثی که اشاره شد، نباید اقداماتی صورت پذیرد؟
- آیا کارکرد محصولات در شرایط عادی کافی است و ایمنی، قابلیت اطمینان و نرخ خرابی مهم نیستند؟
- چرا آزمون‌های محیطی مانند دما و رطوبت را بدون شک می‌پذیریم ولی در آزمون‌های EMC ؟....

آری، یک نویز ساده گاهی با ایجاد بازخورد مثبت می‌تواند همانند یک گلوله بهمنی، بسیار مخرب باشد. به همین دلیل است که از بیش از ۵۰ سال قبل شرکت‌ها و مؤسساتی در اغلب کشورها تأسیس شده و به مشاوره، آموزش و ارائه تجهیزات در خصوص EMC می‌پردازند.

امروزه در اغلب کشورها موضوع EMC به یک فرهنگ عمومی تبدیل شده است و حتی در این خصوص فیلم و کارتون‌هایی می‌سازند که کودکان و نوجوانان و عموم جامعه را با ضررهای تشعشعات الکترومغناطیسی بر انسان‌ها، محیط زیست و ابزارهای الکترونیکی آشنا سازند؛ لذا جا دارد که مراکز صنعتی و تحقیقاتی ما به‌ویژه مراکز حساس و حیاتی مانند تولیدکنندگان تجهیزات پزشکی، صنایع نظامی، شرکت‌های حمل‌ونقل، نفت و گاز، ارتباطات، ... این موضوع را با جدیت بیشتر دنبال کنند تا شاهد خسارت‌های جانی و مالی هنگفت نباشیم.

یکی از افراد پیشرو در این خصوص آقای هنری اوت است که با انتشار کتاب و مقاله و ارائه همایش‌های آموزشی EMC توجه بسیاری را به خود جلب کرده است.

آقای اوت کتاب معروفش را در سال ۱۹۷۶ با عنوان *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems* منتشر کرد. این کتاب، حاصل کارگاه‌های آموزشی آقای اوت در آزمایشگاه‌های بل بوده و از لحاظ نکات کاری حائز اهمیت است. سایت آمازون، این کتاب را پرفروش‌ترین کتاب در این خصوص معرفی کرده و در برخی از سایت‌ها از آن به کتاب مقدس در زمینه EMC یاد شده است. استانداردها، کتاب‌ها و مقالات بسیاری به این کتاب به‌عنوان مرجع اشاره کرده‌اند. این کتاب به چندین زبان زنده دنیا ترجمه شده است.

به علت استقبال بی‌نظیر از این کتاب، آقای اوت ویرایش دوم آن را با حدود ۴۰٪ افزایش مباحث (فصل ۱۰؛ نویز مدار دیجیتال و طرح‌بندی، فصل ۱۱؛ تشعشع مدارات دیجیتال، فصل

۱۲: تخلیه الکتروسیسته ساکن و پیوست "ه" رویه‌های آزمون سازگاری الکترومغناطیسی) در سال ۱۹۸۸ منتشر کرد. این کتاب توسط بنده و همکاران ترجمه شد و در سال ۱۳۸۹ توسط انتشارات دیباگران تهران به چاپ رسید که مورد استقبال خوبی توسط اساتید دانشگاه‌ها و کارشناسان صنایع واقع شده و هم‌اکنون در حال چاپ مجدد است.

هنگام ترجمه ویرایش دوم کتاب با ابهاماتی مواجه شدیم که با برخی اساتید و همچنین آقای اوت در میان گذاشتیم و پس از کسب راهنمایی‌های ایشان، نتیجه مربوطه را در کتاب اعمال کردیم. همچنین برخی نکات را که جنبه اجرایی و نظارتی دارند را پررنگ کرده‌ایم تا طراحانی که فرصت تحلیل مباحث را ندارند بتوانند سریع‌ترین نکات را بیابند و در طراحی‌هایشان بکار گیرند.

تقریباً همزمان با چاپ ترجمه ویرایش دوم کتاب، آقای اوت با ارسال رایانامه‌ای به ما خبر چاپ ویرایش سوم کتابش را البته با عنوان جدید **مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی** اطلاع دادند. این کتاب را به سرعت خریداری و با تعدادی از دانشجویان و کارشناسان اقدام به ترجمه آن کردیم. این کار حدود ۳ سال طول کشید و هم‌اکنون آماده چاپ است.

علت طولانی شدن ترجمه‌ها این بوده که هدف، ارائه یک ترجمه تحت‌اللفظی نبوده و بعضاً برای درک مفهوم یک جمله ساعت‌ها به بحث و تبادل نظر می‌پرداختیم و گاهی به چند دانشگاه یا مرکز علمی مراجعه می‌کردیم تا با مباحثه بیشتر با اساتید بتوانیم نه تنها یک کتاب با ترجمه خوب ارائه کنیم بلکه بتوانیم در مشاوره‌ها و دوره‌های آموزشی EMC که غالباً بر اساس همین کتاب (و همچنین چند مرجع دیگر که ترجمه آنها را هم زمان شروع کرده‌ایم) ارائه می‌کنیم، پاسخگوی نیاز صنایع و مهندسان طراح باشیم.

چون ترجمه این کتاب بیش از ۱۰۰۰ صفحه شد، لذا تصمیم گرفتیم هر ۵ فصل آن را در قالب یک جلد چاپ کنیم تا علاوه بر کاهش هزینه‌ها، هر شخصی با توجه به موضوع مورد نظر کتابچه مربوطه را تهیه کند. در ویرایش دوم کتاب بیشتر به مشکلات نویز مدارات کاری با فرکانس کم تا متوسط (فرکانس‌های صوتی تا VHF) تأکید شده است، زیرا در این خصوص مباحث مستند کمتری وجود دارد. در ویرایش سوم حدود ۵۰٪ به آن مباحث اضافه شده که در مقدمه نویسنده مشخص شده‌اند.

این مجموعه ۴ جلدی مهندسی سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) برای دانشجویان کلیه گرایش‌های برق (چراکه نویز در همه سیستم‌های الکترونیک، مخابرات، قدرت، کنترل، مهندسی پزشکی و کامپیوتر مؤثر است) به‌ویژه جهت دروس EMC، یکپارچگی سیگنال، طراحی مدارات آنالوگ



و دیجیتال (کم‌نویز)، طراحی مدارات فرکانس زیاد، طراحی منابع کلیدزنی و... مفید است. همچنین طراحان و تعمیرکاران سیستم‌های الکترونیکی برای رفع مشکل نویز سیستم‌هایشان و نیز جهت رعایت یا دریافت استانداردهای EMC، مخاطب این کتاب‌ها هستند.

بسیار خرسند خواهیم شد، اگر نظرات، پیشنهادهای و اشکالات این کتاب را برای ما ارسال کنید (mota@iran.ir). همچنین جهت اطلاع از اصلاحات کتاب، دوره‌های آموزشی و اخبار و اطلاعات جدید در این خصوص می‌توانید به سایت motaei.ir و یا وبلاگ www.mota.blogfa.com مراجعه فرمایید. در اینجا فرصت را غنیمت شمرده و از کلیه دانشجویان و کارشناسانی که مایل‌اند در خصوص EMC، کتاب، مقاله یا پایان‌نامه ارائه کنند **دعوت به همکاری** کنیم. باعث افتخار است اگر بتوانیم همکاری مفید و مؤثری داشته باشیم.

**تخلیه الکتریسته ساکن (ESD)** - که در جلد ۴ مطرح شده - از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مقالات و گزارش‌های متعددی با موضوع **تلفات جانی و خسارت‌های پنهان بلیون دلاری به سیستم‌های الکترونیکی و انفجاری ناشی از تخلیه الکتریسته ساکن** منتشر شده است. به‌ویژه در سیستم‌های دیجیتال تأکید می‌شود که مراقب باشید مدارتان به علت یک نویز ناشی از ESD یا سایر پالس‌های گذرا، به‌طور ناخواسته فرمانی را صادر نکند. گاهی یک فرمان ناخواسته مانند فرمان شلیک یک موشک یا فرمان فعال شدن کیسه هوای خودرو،... می‌تواند فاجعه جانی و مالی جبران‌ناپذیری به بار آورد. بنابراین دست‌کمی از اطلاعات در خصوص ESD و راه‌کارهای محافظت در برابر آن برای همه طراحان سیستم‌های الکترونیکی و مواد سوختی و قابل اشتعال یا انفجاری ضروری است.

در پایان لازم است از اساتید گرامی جناب آقای دکتر احمد چلداوی و جناب آقای دکتر محمد مهدی ناییبی به خاطر راهنمایی‌ها و تشویق‌هایشان، از مدیر محترم انتشارات جهاد دانشگاهی جناب آقای علی دل‌زنده و همکاران ایشان، از اساتید و دانشجویان مرکز تحقیقات آفاق دانشگاه علم و صنعت و پژوهشکده فن‌آوری مخابرات و الکترومغناطیس کاربردی دانشگاه امیرکبیر به خاطر بحث‌های علمی مفیدی که داشته‌ایم، از خانم مهندس لیلا فرهودی به خاطر همکاری در ترجمه فصل‌های ۱ و ۲ و تحلیل بخش‌های مختلف، و همچنین از خانم دکتر بهاره محمدزاده که در ترجمه فصل ۵ همکاری داشتند، کمال تشکر و قدردانی را به عمل آوریم.

**مصطفی مطاعی**

**و همکاران**



# سازگاری الکترومغناطیسی

## فصل ۱



## ۱-۱ مقدمه

استفاده گسترده از مدارات الکترونیکی در مخابرات، محاسبات، اتوماسیون و مقاصد دیگر موجب شده که این مدارات متضاد بنا به ضرورت در مجاورت هم کار کنند. این مدارات اغلب روی همدیگر اثرات منفی می‌گذارند. امروزه تداخل الکترومغناطیسی<sup>۱</sup> یکی از مهم‌ترین مسائل طراحان مدار شده است و احتمالاً در آینده نیز شدیدتر خواهد شد. یکی از دلایل این امر استفاده گسترده از دستگاه‌های الکترونیکی است. بعلاوه استفاده از مدارات مجتمع و مجتمع سازی در مقیاس بزرگ موجب کوچک شدن وسایل الکترونیکی شده است. با کوچک‌تر و پیچیده‌تر شدن مدارات، تعداد زیادی مدار در فضای کوچکی قرار گرفته و موجب افزایش احتمال تداخل می‌شود. علاوه بر این، بسامد زمان سنجی در طی سال‌ها و در موارد بسیاری به طرز چشمگیری به بالای یک گیگاهرتز رسیده است.

امروزه برای رایانه‌های شخصی مورد استفاده در خانه، داشتن سرعت زمان سنجی بیش از ۱ گیگاهرتز غیرعادی نیست. طراحان تجهیزات جدید نیاز دارند که تجهیزاتشان نه تنها در شرایط ایده‌آل آزمایشگاهی، بلکه باید در دنیای واقعی و در کنار وسایل دیگر به درستی کار کند و از مقررات سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) دولت پیروی کند. این بدین معنی است که دستگاه نباید متأثر از منابع الکترومغناطیسی خارجی باشد و از طرفی خود دستگاه هم نباید منبع نویزهای الکترومغناطیس و مخرب در محیط شود. بنابراین سازگاری الکترومغناطیسی (EMC) باید یکی از اهداف مهم طراحی باشد.

1 - Electromagnetic interference (EMI)

## ۱-۲ نویز و تداخل

هر نوع سیگنال الکتریکی نامطلوب در مدار را نویز می‌گویند. این تعریف در مورد اعوجاج‌های ناشی از غیرخطی بودن مدارها، به‌کار نمی‌رود. اگرچه این اعوجاج‌ها ممکن است مطلوب نباشند ولی تا وقتی که با بخش‌های دیگر مدار پیوند نداشته باشند، به‌عنوان نویز در نظر گرفته نمی‌شوند. بنابراین حتی اگر سیگنال مطلوبی با بخش‌های دیگر، پیوند ایجاد کند، نویز به حساب خواهد آمد.

منابع نویز را به سه گروه می‌توان تقسیم کرد:

(۱) منابع نویز ذاتی، مانند نویز گرمایی و نویز ضربه‌ای که در اثر نوسانات تصادفی در سیستم‌های فیزیکی به وجود می‌آیند. (۲) منابع نویز ساخت دست بشر، مانند نویز ناشی از موتورها، سوییچ‌ها، دستگاه‌های الکترونیکی دیجیتال و فرستنده‌های رادیویی و (۳) نویزهای ناشی از اغتشاشات طبیعی و جوی، مانند رعد و برق و تشعشعات خورشیدی.

تداخل اثر نامطلوب نویز است. اگر ولتاژ نویز باعث عملکرد نادرست مدار شود، به آن تداخل می‌گویند. نویز را نمی‌توان به‌طور کامل حذف کرد اما می‌توان مقدار آن را تا حدی که موجب تداخل نشود کاهش داد، اما تداخل قابل حذف است.

## ۱-۳ طراحی بر اساس سازگاری الکترومغناطیسی

سازگاری الکترومغناطیسی (EMC)، توانایی یک سیستم الکترونیکی در (۱) کارکرد درست در محیط الکترومغناطیسی مورد نظر و (۲) تبدیل نشدن آن به منبع (نویزی) آلوده‌کننده محیط است. محیط الکترومغناطیسی، ترکیبی از انرژی‌های هدایتی و تشعشعی است. بنابراین EMC دو جنبه دارد، انتشار و تأثیرپذیری (ایمنی).

تأثیرپذیری، توانایی یک دستگاه یا مدار در پاسخ به انرژی الکترومغناطیسی ناخواسته (یعنی نویز) است. نقطه مقابل تأثیرپذیری، ایمنی است. سطح ایمنی یک مدار یا دستگاه، محیط الکترومغناطیسی است که در آن دستگاه بتواند بدون تنزل و با یک حاشیه ایمنی تعریف شده، به‌صورت رضایت‌بخشی عمل کند. یکی از مشکلات در تعیین سطوح ایمنی (یا تأثیرپذیری) تعریف تنزل کارکرد دستگاه است.

انتشار، به توانایی ایجاد تداخل یک محصول مربوط می‌شود. هدف از کنترل انتشار، محدود