

بررسی، شبیه‌سازی و مقایسه اثر تخلیه الکترواستاتیک (ESD) در پرنده‌های نظامی با بدنه فلز، کامپوزیت و حالت ترکیبی

مجید توحیدلو^۱، سیدعلی تقوی^۲، گلاره ملکشاهی^۳، سید محمدجواد رضوی^{۴*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی برق مخابرات میدان و امواج، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- دانشجوی دکتری، مهندسی برق مخابرات میدان و امواج، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی برق مخابرات میدان و امواج، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۴- دانشیار، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۰۱)

چکیده

با نظر به حساسیت‌های عملیاتی پرنده‌های نظامی، اقدامات بازدارنده در طراحی هواپیما برای جلوگیری از تجمع بار ساکن در سطح هواپیما و یا تخلیه آن، بسیار ضروری و حائز اهمیت است. تاکنون روش‌های مختلفی برای مقابله با این اثرات مطرح و به کارگرفته شده‌اند که می‌توان به پوشش‌های آنتی‌استاتیک، پاشش شعله‌ای، استفاده از کامپوزیت‌های فیبرکربن و نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با فلز در طراحی بدنه پرنده و تخلیه کننده‌های الکترواستاتیک اشاره نمود. هدف از این مقاله، بررسی، شبیه‌سازی و مقایسه اثر تخلیه الکترواستاتیک (ESD) در پرنده‌های نظامی با بدنه تمام فلز، تمام کامپوزیت و حالت ترکیب توأمان چندین ساختار می‌باشد، که با تغییر جنس بدنه پرنده و اثرات آن‌ها، سطح میدان الکتریکی القایی، جریانات سطحی حاصل از شارش الکترواستاتیک و میدان‌های الکترومغناطیسی تشعشعی حاصل از حالت گذرای جریان‌های سطحی در بخش‌های مختلف پرنده نظامی از جمله: سیستم راداری، کابین و سیستم‌های الکترونیکی مخابراتی، مخزن سوخت داخلی و مخزن سوخت خارجی، بررسی و مقایسه خواهند شد.

واژه‌های کلیدی: بار استاتیک، تخلیه الکترواستاتیک، پرنده نظامی، کامپوزیت، تداخل فرکانس رادیویی

Investigation, Simulation and Comparison of the Effect of Electrostatic Discharge (ESD) in Military Aircraft with Metal Body, Composite and Combined Mode

Abstract

Operational sensitivities of military aircraft, deterrent measures in aircraft design to prevent the accumulation of static charge on the surface of the aircraft or Electrostatic Discharge, is very necessary and important. These include antistatic coatings, flame spraying, the use of carbon fiber composites, and nanocomposites in aircraft fuselage design, and electrostatic dischargers. The aim of this article was to investigate, simulate, and compare the effect of electrostatic discharge (ESD) in military aircraft with all-metal, all-composite body and the combined state of several structures which by changing the material of the Aircraft's body and their effects, the level of the induced electric field, surface currents due to electrostatic flux and radiation electromagnetic fields from the transient state of surface current will be compared and examined in different parts of the military aircraft including: radar system, cabin and electronic telecommunication systems, internal and external fuel tank.

Keywords: *Static charge, Electrostatic discharge, Military aircraft, Composite, Radio frequency interference*

مقدمه

پدیده دشارژ الکترواستاتیک ناشی از اثر کرونا می‌تواند میدان الکتریکی بسیار بالایی را ایجاد کند که به سیستم سیم کشی، تزویج شده و باعث ایجاد اختلال در ارتباطات، حین پرواز شود [۵].

در طول پدیده‌های شارژ، بارها تا زمانی متمرکز می‌شوند که پتانسیل هواپیما شدت میدان الکتریکی را در تیزترین نقاط القاء کند و باعث ایجاد شکست ولتاژ در هوا شود. با رسیدن به چنین شرایطی، نقاطی که بیشترین شدت میدان را دارند، وارد تولید فرآیند کرونا می‌شوند و به ایجاد یک تشعشع الکترومغناطیسی منجر می‌گردند که بر گیرنده‌های رادیویی و سایر تجهیزات موجود در اطراف آن تأثیر می‌گذارند [۵]. تجمع بار استاتیک، ترکیبی از تولید و نشی بار است. با توجه به اینکه Q به عنوان بار ثابت در نظر گرفته می‌شود، فرآیند تجمع بار می‌تواند از طریق معادلات (۱) و (۲) تعریف شود [۵]:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{RC} = i(t) \quad (1)$$

$$Q = IRC \left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad (2)$$

در روابط ۱ و ۲، R مقاومت نشی هواپیما بر حسب اهم، C ظرفیت ذخیره انرژی بر حسب فاراد و I جریان بر حسب آمپر را نشان می‌دهند. در هنگام پرواز، هواپیما معادل هادی عایق‌بندی شده با ظرفیت C بوده که اختلاف پتانسیل آن برابر است با [۵]:

$$V = \frac{Q}{C} = \frac{\int i(t)dt}{C} \quad (3)$$

برای یک هواپیما با اندازه متوسط، ظرفیت ذخیره انرژی حدود 300PF است. اگر جریان شارژ $10\mu A$ باشد، پتانسیل هواپیما 30kV در ۱ ثانیه خواهد بود که در صورت وجود جریان، افزایش می‌یابد [۵].

ایمنی کارکنان و مسافران نیز یکی از مسائل قابل ذکر در این حوزه است. شوک‌های الکتریکی ناشی از تخلیه الکترواستاتیک (ESD) در مسافران، کارکنان و اعضای خدمه از نظر ایمنی، مسئله جدی خطوط هوایی می‌باشد [۶].

تجمع بار الکترواستاتیک^۱، تولید شده در حین پرواز در سطوح خارجی هواپیما و داخل سیستم‌های لوله‌کشی هواپیما، نمی‌تواند به عنوان یک خطر فوری برای ایمنی پرواز در نظر گرفته شود، اما بایستی از وقوع آن پیشگیری شده تا از بروز مشکلات در برقراری ارتباطات پرواز جلوگیری شود. تجمع بارهای الکترواستاتیک موجب ایجاد پتانسیل‌هایی می‌شود که خطرناک بوده و می‌توانند باعث ایجاد تداخل فرکانس رادیویی، عیب در تجهیزات، احتراق ناخواسته سوخت و شوک الکتریکی به افرادی که با هواپیما سر و کار دارند، گردند. هواپیما می‌تواند هنگام کار در شرایط بارندگی، بارهای الکتریکی استاتیک را با شارژ تریبولکتریک^۲ جمع کند، بنابراین پتانسیل هواپیما تا زمانی که به مقدار بحرانی برسد افزایش می‌یابد و تخلیه کرونا در نقاط شیب‌دار بالای هواپیما صورت می‌گیرد. این تخلیه‌های کرونا^۳ نوز ایجاد کرده و به سیستم‌های ارتباطی و ناوبری هواپیما القاء شده و باعث تداخل رادیویی موسوم به استاتیک بارشی می‌شوند [۱].

از سوی دیگر، هنگام برخورد صاعقه با هواپیما نیز تجمع بار الکتریکی اتفاق می‌افتد. در صورت برخورد صاعقه به هواپیما، ابتدا به اجزایی از هواپیما که نوک تیزتر هستند مانند دماغه یا نوک بال، صاعقه القاء شده و بعد به سمت بدنه حرکت می‌کند. در آنجا، جریان می‌تواند از طریق پوسته خارجی رسانا و ساختارهای بدنه هواپیما حرکت کند، سپس از اجزایی مانند دم یا چرخ هواپیما خارج شود. علاوه بر این، تخلیه استاتیک می‌تواند به کاهش بارهای هواپیما کمک کند [۲].

هواپیماها برای تخلیه الکتریسیته ساکن جمع شده از هوا در حین پرواز، باید مجهز به تخلیه‌کننده الکترواستاتیک باشند. به‌طور خاص، اگر الکتریسیته ساکن توسط تخلیه‌کننده از روی وسیله نقلیه هوایی حذف نشود، باعث یونیزاسیون و اثر کرونا بر لبه آنتن و بال شده که این پدیده باعث کاهش عملکرد ارتباطات رادیویی تجهیزات می‌شود [۳]. یک رویداد ESD^۴ ممکن است عملکرد تجهیزات را مختل نکند ولی با تکرار آن، ممکن است به مرور عملکرد اجزای داخلی را کاهش دهد [۴].

^۴ Electrostatic Discharge

^۱ Electrostatic Charge

^۲ Triboelectric

^۳ Corona Discharge

راهکارهای بازدارنده بسیار خطرناک است، ضمن اینکه با توجه به قرار داشتن سیستم راداری هواپیما در دماغه هواپیما، این تخلیه جریان در صورت عدم اعمال راهکارهای بازدارنده می‌تواند به سیستم راداری هواپیما نیز آسیب برساند، بنابراین قسمت‌های دماغه هواپیما، بال و دم هواپیما از نقطه نظر تخلیه بار ساکن، سه نقطه حساس هواپیما می‌باشند.

در صورتی که تخلیه بار ساکن در بدنه هواپیما صورت گیرد، از آنجایی که به صورت ذاتی این جریان از دماغه اعمال شده و نیز سیستم راداری هواپیما در همان جا قرار دارد، این پدیده می‌تواند عملکرد صحیح سیستم راداری هواپیما را با چالش روبرو سازد. همچنین اثر نویز ناشی از این تخلیه الکتریسته ساکن در آنتن‌ها هم دیده می‌شود، بنابراین با توجه به اهمیت سیستم راداری هواپیما، اقدامات بازدارنده بسیار ضروری و حائز اهمیت است [۷].



شکل ۱ - نمای رسم شده از مسیر تخلیه بار ساکن در هواگرد

در شکل ۲ تصویری از سیستم اویونیک یک هواپیما را می‌بینیم که در اثر تخلیه بار الکترواستاتیک آسیب جدی را متحمل شده است.



شکل ۲ - نمایی از آسیب سیستم اویونیک یک هواپیما

همچنین، تخلیه بار ساکن در هواپیما موجب ایجاد تداخل در سیستم‌های ناوبری و مخابراتی شده و می‌تواند در تمامی سیستم‌های فرکانس خیلی پایین (VLF)^۷، فرکانس خیلی

با توجه به اثرات مذکور و حساسیت‌های عملیاتی پرنده‌های نظامی، اقدامات بازدارنده در طراحی هواپیما برای جلوگیری از تجمع بار در سطح هواپیما و یا تخلیه آن، بسیار ضروری و حائز اهمیت است.

تاکنون روش‌های مختلفی برای مقابله با این اثرات مطرح و به کار گرفته شده‌اند که می‌توان از آن‌ها، پوشش‌های آنتی‌استاتیک، پاشش شعله‌ای^۵، استفاده از کامپوزیت‌های فیبرکربن و نانوکامپوزیت‌ها در طراحی بدنه پرنده و تخلیه کننده‌های الکترواستاتیک را نام برد.

در راستای ادامه‌ی پژوهش‌های مرتبط با حوزه تخلیه الکترواستاتیک در هواپیما و به‌طور خاص اثرات جنس بدنه پرنده‌های نظامی بر پارامترهایی مثل: مقدار بار استاتیک تجمع یافته در سطح بدنه هواپیما، شدت میدان الکتریکی و تداخلات ایجاد شده بر اثر تجمع بار خارجی در بخش‌های مختلف هواپیما از جمله کابین و آنتن رادار، مخازن سوخت داخلی و خارجی، بررسی خواهد شد.

در بخش‌های بعدی به بررسی اثرات مخرب تجمع بار استاتیک در پرنده‌های نظامی و انواع روش‌های تخلیه الکتریسته ساکن در پرنده‌های نظامی پرداخته می‌شود و نیز مزایا و معایب استفاده از کامپوزیت در بدنه‌های نظامی و ویژگی‌های شاخص مواد کامپوزیتی در کاهش اثرات تخلیه بار استاتیک، بررسی می‌گردد.

پس از پرداختن به کلیات مذکور، در پایان به نحوه شبیه‌سازی پرنده‌ی مدل انتخابی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بین بدنه‌های فلزی، کامپوزیتی و ترکیبی^۶ پرداخته می‌شود. در نهایت، نتیجه‌گیری انجام شده و پیشنهادات مطرح می‌گردد.

اثرات مخرب تجمع بار استاتیک در پرنده‌های نظامی

با توجه به اینکه تجمع بارهای مثبت در هواپیما روی دماغه هواپیما و بارهای منفی در انتهای هواپیما صورت می‌گیرند، تخلیه جریان در هواپیما در صورت تجمع بیش از حد بارهای ساکن از دماغه هواپیما شروع شده و به قسمت‌های بال و دم هواپیما هدایت می‌شوند (شکل ۱). حال با توجه به اینکه مخازن سوختی هواپیما در قسمت بال و دم هواپیما قرار دارند، این تخلیه جریان در صورت عدم استفاده از

^۵ Flame spray

^۶ Combined mode

^۷ Very Low Frequency

این پوشش حاوی پودرگرافیت یا ذرات رسانای سیاه کربن هستند که رسانایی کمی به رنگ دی‌الکتریک یا لعاب داده و از نفوذ امواج الکترومغناطیسی به ماده پوشش داده شده، محافظت می‌کنند و همچنین از تجمع الکتروسیسته ساکن در سطح خارجی پرنده جلوگیری می‌نماید.

این غشای خارجی باید با احتیاط روی ریدوم^{۱۱} آنتن استفاده شود. باید توجه داشت که استفاده زیاد از این نوع پوشش می‌تواند منجر به تضعیف سیگنال رادار شود.

استفاده از پوشش‌های رسانا در سطوح خارجی غیر رسانا، تخلیه بارهای الکتریکی ساکن را تسهیل می‌کند.

اکثر پوشش‌های سطح بالا برای استفاده در ریدوم هواپیماهای نظامی، مناسب هستند. از جمله این موارد شامل مواد پلی استر، پلی اورتان، اکریلیک و مواد اپوکسی می‌باشند. پلی اورتان، حساس به اشعه ماوراء بنفش است. بنابراین، باید آنها را با اکریلیک مقاوم در برابر اشعه ماوراء بنفش، رنگ آمیزی کرد.

مقاومت پوشش آنتی استاتیک معمولاً بین ۱ تا ۱۰۰ مگا اهم در هر مترمربع است. از هرگونه مواد رنگی که ظاهری مرواریدی یا "پوسته فلزی"^{۱۲} داشته باشد، بایستی خودداری شود، زیرا بسیاری از این رنگ‌ها حاوی شاخه‌های بسیار کوچکی از آلومینیوم یا فلز برنز به نام "رنگدانه‌های ورقه‌ای" هستند که می‌توانند تأثیر قابل توجهی در تضعیف سیگنال رادار داشته باشند.

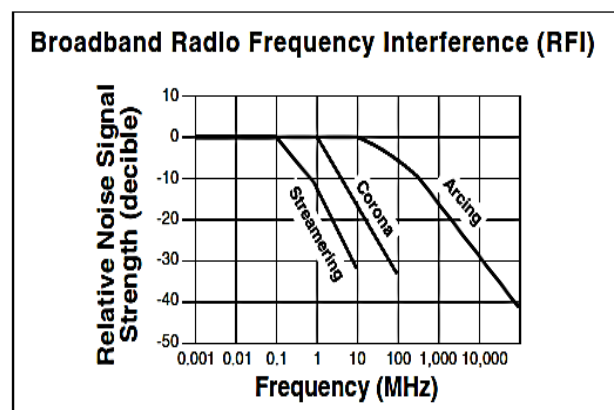
این ذرات فلزی را نباید با نمک‌ها و اکسیدهای فلزی معمولی که در اکثر پوشش‌های سطحی وجود دارد اشتباه گرفت زیرا این عناصر دی‌الکتریک بوده و باعث تداخل رادار نمی‌شوند. پوشش آنتی استاتیک نسل جدید، یعنی پوشش‌های متقاطع، بر اساس فناوری پلیمرهای الکتریکی فعال^{۱۳} ساخته شده و یک راه حل ایمن و بادوام برای مشکلات بار الکترواستاتیک ارائه می‌دهند.

این پوشش‌ها با بسیاری از مواد مختلف سازگار هستند، به طوری که در محیط‌های خشک یا مرطوب کار می‌کنند و

بالا^۸ (VHF) و همچنین فرکانس‌های بالا^۹ (HF) تأثیرگذار باشد.

در شکل ۳ تداخلات ایجاد شده بر اثر مدل‌های مختلف تخلیه بار ساکن نشان داده شده است [۸].

بخش عمده‌ای از تجهیزات هواپیما را سیستم‌های الکترونیکی تشکیل می‌دهند و از آنجایی که پدیده تخلیه بار ساکن عمده‌ترین اثرات را بر سیستم‌های الکترونیکی می‌گذارد، انجام اقدامات پیشگیرانه بسیار ضروری است. برای مثال ممکن است این پدیده منجر به بازنشدن چرخ‌های هواپیما در هنگام نشست و دیگر موارد خطرناک گردد [۹].



شکل ۳ - نمودار نویز ایجاد شده در فرکانس‌های مختلف و پدیده‌های مختلف تخلیه بار استاتیک [۸]

از دیگر مخاطرات تخلیه بار الکترواستاتیک، داغ شدن شدید قسمتی از بدنه به طور لحظه‌ای به علت عبور شدت جریان بالا از مقطعی کوچک است که باعث ایجاد حفره یا سوختگی‌های شدید در سطح هواپیما می‌شود که می‌تواند عامل خطرناکی برای پرواز پرنده‌های نظامی باشد [۱۰].

راهکارهای مقابله با تجمع بار ساکن

- پوشش‌های آنتی استاتیک

پوشش‌های ضد الکتروسیسته ساکن، که به عنوان پوشش‌های اتلاف الکترواستاتیک^{۱۰} نیز شناخته می‌شوند، به طور گسترده در پرنده‌های نظامی استفاده شده و به جلوگیری از مشکلات مرتبط با تجمع بار استاتیک کمک می‌کنند.

^{۱۱} Radome

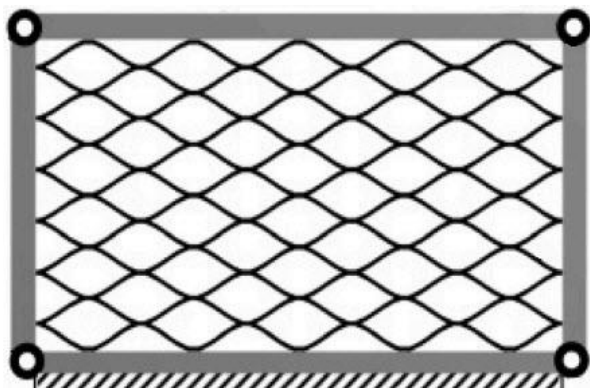
^{۱۲} Metal Flake

^{۱۳} Electroactive Polymers

^۸ Very High Frequency

^۹ High Frequency

^{۱۰} Electrostatic Dissipation Coatings



شکل ۵- نمای مفهومی از فویل آلومینیوم گسترش یافته

پیوسته (CEAF) [۱۳]

ورقه‌های فلزی ریزش‌بکه با انبساط دقیق از ورقه‌ی جامد فلز تشکیل شده‌اند. آنها یک محافظ موثر در برابر EMI/RFI (تداخل فرکانس رادیویی و الکترومغناطیسی) [۲۰] و ESD (تخلیه الکترواستاتیک) هستند که می‌توان آن را ورقه ورقه، روکش و آبکاری کرد.

هنگامی که از شبکه توری فلزی و فویل منبسط شده [۲۱] برای محافظت از کامپوزیت‌های غیررسانا استفاده می‌شود، میزان بار استاتیک کاهش می‌یابد [۱۱].

• کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها برای ائتلاف بار استاتیک نانومواد را می‌توان به عنوان موادی تعریف کرد که دارای اجزای ساختاری با حداقل یک بعد به اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند، یعنی موادی که دارای یک بعد در مقیاس نانو هستند و لایه‌هایی مانند پوشش‌های سطحی دارند را مواد نانویی یا نانومواد می‌خوانند، که این مبحث در قالب موضوعات مربوط به نانوفناوری جای می‌گیرد. موادی که دو بعد در مقیاس نانو دارند، جزو نانو سیم‌ها و نانو لوله‌ها هستند و موادی که سه بعد در مقیاس نانو دارند، نانو ذرات نام دارند. نانوکامپوزیت‌ها مواد جامدی هستند که با ترکیب یک یا چند جز جداگانه، بهترین خصوصیات هر جز (کامپوزیت) را بدست می‌آورند [۱۲]. کامپوزیت‌های پلیمری رسانا، به‌طور گسترده در صنایع الکترونیک، خودرو و هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند تا از تجمع بار استاتیک جلوگیری کنند. همان‌طور که در بخش‌های

هنگامی که زمین می‌شوند، تجمع بار استاتیک را در کسری از ثانیه از بین می‌برند.

آنها را می‌توان با اسپری کردن، پوشش دهی چرخشی [۱۴] و یا با استفاده از فرآیندهای رباتیک پوشش دهی که لایه‌های نازک و یکنواختی را ایجاد می‌کنند، استفاده کرد [۱۱].

• شبکه توری فلزی و فویل انبساط یافته

شبکه توری فلزی [۱۵] و فویل منبسط شده [۱۶] معمولاً در هوانوردی برای صاعقه و محافظت از هواپیماها به‌طور ترکیبی استفاده می‌شود. شبکه توری فلزی و فویل منبسط شده به عنوان لایه خارجی در کامپوزیت‌های فیبر کربن، بازپخت می‌شوند (آنیل کردن [۱۷]) [۱۲]، به عنوان مثال، پوسته‌های نازک (CFC) [۱۸] هواپیمای یوروفایتر، از جمله پوسته‌های خارجی پانل‌های هسته لانه زنبوری، توسط شبکه توری مسی محافظت می‌شوند. یک شبکه توری مسی از قبل آماده شده در طرح پانل گنجانده شده است تا خارجی‌ترین لایه پانل را تشکیل دهد [۱۲].

این لایه اضافی، رسانایی الکتریکی پانل CFC را افزایش می‌دهد، انرژی را در یک منطقه بزرگتر توزیع می‌کند و دما را در نقطه اتصال کاهش می‌دهد و در نهایت اثرات خطرناک برخورد صاعقه را محدود می‌کند. برای محافظت از سطح خارجی، تعدادی از محصولات فلزی و الیاف متالیزه تولید شده‌اند، که به‌طور معمول صفحات بافته شده، غیربافته شده و فویل‌های منبسط شده هستند.

این محصولات مشبک اجازه می‌دهند تا جریان صاعقه به سرعت از سطح سازه عبور کند. فلز مورد استفاده می‌تواند برنز، آلومینیوم یا مس باشد. فویل آلومینیوم گسترش یافته پیوسته (CEAF) [۱۹] (شکل ۵) توسط اسید فسفریک آنودایز و پوشش داده شده است.

^{۱۸} Carbon Fiber Composite

^{۱۹} Continuous Expanded Aluminum foil

^{۲۰} Electromagnetic/ Radio Frequency Interference

^{۲۱} Woven Composite

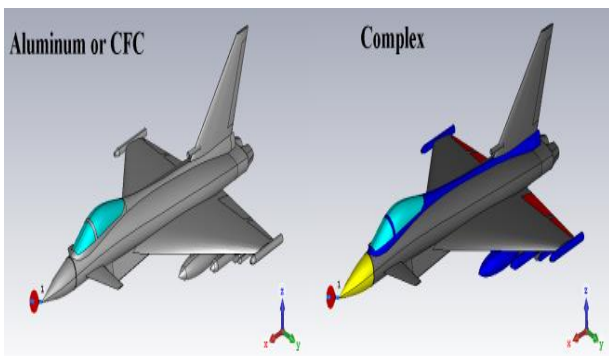
^{۱۴} Spin-Coating

^{۱۵} Metallic mesh

^{۱۶} Expanded foil

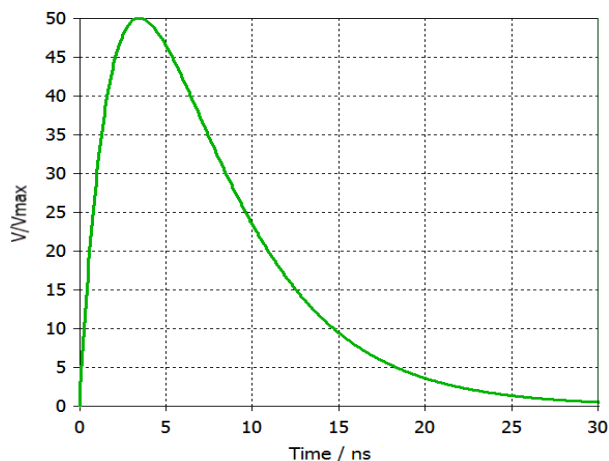
^{۱۷} Anneal

به منظور شبیه‌سازی و مقایسه اثرات و سطح میدان الکتریکی القایی و جریانات سطحی^{۲۲} حاصل از شارش الکترواستاتیک در بخش‌های مختلف پرنده نظامی، از نرم افزار CST استفاده شده است. ماژول ESD این نرم افزار قابلیت شبیه سازی انواع رویدادهای ESD از جمله اثرات مالشی و تخلیه کرونا را دارا می‌باشد. برای شروع شبیه‌سازی ابتدا یک مدل^{۲۳} CAD از هواپیمای نظامی مورد نظر را در نرم افزار وارد کرده و جنس سطح بدنه را طبق شرایط شبیه سازی، ساختار یکبار به صورت تمام فلز، بار دیگر به صورت تمام کامپوزیت و در نهایت به صورت ترکیبی از کامپوزیت، فلز و فایبرگلاس^{۲۴} انتخاب شده است (شکل ۷).



شکل ۷ - ساختارهای مختلف از لحاظ جنس بدنه

به منظور ایجاد یک جریان تخلیه الکترواستاتیک شدید، از Current Discrete Port بهره برده و مقدار جریان ۲۰۰ کیلوآمپر برای آن تعریف شده است.



شکل ۸ - سیگنال تحریک جریان بالا از نوع نمایی دوگانه^{۲۵}

قبلی توضیح داده شد، سیم کربنی یا مسی نیز به‌طور معمول به عنوان استحکام دهنده، استفاده می‌شود.

مواد نانو به دلیل طیف گسترده‌ای از مقادیر و انواع بار الکتریکی، مورد توجه بسیاری قرار گرفته است [۱۱].

سبکی وزن، تحمل آسیب و شوک‌های مکانیکی، بهبود خواص ضربه، عایق صوتی و میراسازی لرزش، مقاومت حرارتی، مقاومت در برابر اکسیداسیون، مقرون به صرفه بودن و رسانایی ویژه ذاتی بالای آن‌ها نسبت به دیگر مواد جایگزین (غیر از فلزات) که تا حدودی از تجمیع باراستاتیک جلوگیری می‌کند، از جمله مزایای استفاده از این نوع مواد در ساختارهای پرنده می‌باشد [۱۲].

باید همواره در نظر داشت که رسانایی ویژه این مواد در مقایسه با فلزها پایین‌تر می‌باشد [۱۴]. از همین رو، علی‌رغم مزایای زیاد کامپوزیت‌ها، استفاده از این ساختار بدون اتخاذ تمهیدات لازم باعث می‌شود که تجمیع بار الکترواستاتیک روی سطح بدنه هواپیما تمام کامپوزیت نسبت به بدنه فلزی، بیشتر رخ دهد. به همین دلیل معمولاً در ساختار بدنه پرنده‌های نظامی از ترکیب توأمان ساختارهای فلزی و کامپوزیت، قراردادن دشارژرهای الکترواستاتیک روی بال‌های پرنده و نقاط تخلیه بار و بالا بردن رسانایی ذاتی کامپوزیت (آلایش کامپوزیت با ساختارهای فلزی) استفاده می‌شود. شکل ۶ نشان دهنده‌ی ساختارهای استفاده شده در بخش‌های مختلف هواپیمای یوروفایتر می‌باشد.



شکل ۶ - نمای رسم شده از مواد استفاده شده در بدنه هواپیمای یوروفایتر

شبیه‌سازی اثر تخلیه الکترواستاتیک (ESD)

^{۲۵} Double Exp

^{۲۲} Surface Currents

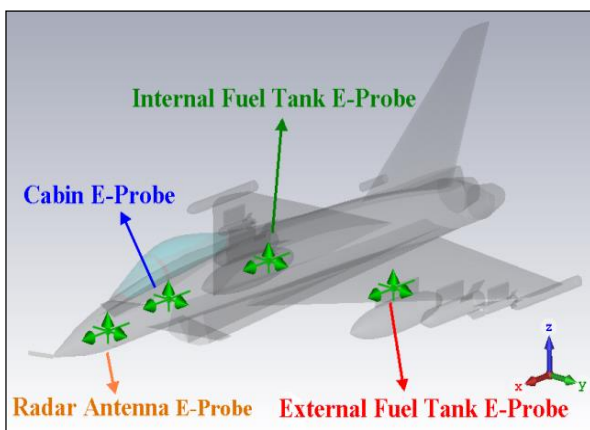
^{۲۳} Computer-aided design

^{۲۴} Fiber Glass

$\rho[kg/m^3]$	1400	3000
Thermal Cond[W/K/m]	0.2	0.71
Heat Capacity[kj/K/kg]	1	0.5
Diffusivity[m ² /s]	1.428e-07	4.733e-07
Young's Modulus[kN/mm ²]	2.5	-
Poisson's Ratio	0.4	-
Thermal Expan [1e-6/K]	25	-

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، مواد کامپوزیت، به علت رسانایی الکتریکی کمترشان نسبت به فلزات، علی‌رغم ویژگی‌های مثبت دیگری که دارند دارای تجمع بار استاتیکی بیشتری بوده، لذا برای جلوگیری از این تجمع بار به صورت ترکیبی با فلزات دیگر به کار می‌روند.

نتایج شبیه‌سازی برای سه حالت بدنه تمام آلومینیوم، تمام کامپوزیت و ترکیبی (آلومینیوم، تیتانیوم، شیشه، کامپوزیت) در بخش ۵-۱ ارائه شده است. به منظور اندازه‌گیری شدت میدان الکتریکی در بخش‌های مختلف پرنده از جمله آنتن رادار، کابین، مخزن سوخت داخلی و مخزن سوخت خارجی، تعداد ۴ عدد پروب میدان الکتریکی در بخش‌های مذکور تعبیه شده است. (شکل ۹)



شکل ۹ - محل تعبیه پروب‌های میدان الکتریکی در بدنه هواگرد

• نتایج شبیه سازی

نتایج حاصل از شبیه‌سازی ساختار، در ۳ حالت کلی زیر ارائه شده است:

۱- توزیع کیفی جریان سطحی

نوع حل‌کننده استفاده شده به منظور شبیه‌سازی، حل‌کننده حوزه زمان (Time-Domain Solver) می‌باشد که زمان گذار سیگنال تحریک جریان بالا نیز از ۰ تا ۳۰ نانوثانیه بوده و به صورت یک سیگنال نمایی دوگانه تعریف می‌شود (شکل ۸) [۱۰] و [۱۵].

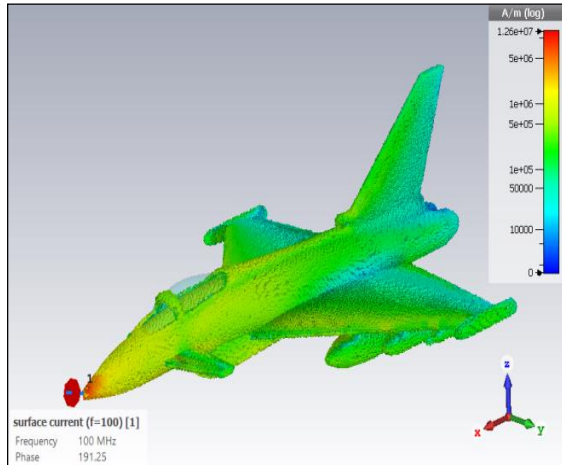
در این شبیه‌سازی از ۲ ساختار فلزی که شامل آلومینیوم و تیتانیوم و همچنین ۲ ساختار غیر فلزی که شامل کامپوزیت فیبر کربن و شیشه تقویت شده با پلاستیک (فایبر گلاس)، استفاده شده است. مشخصه‌های ذاتی این مواد در جدول ۱ و ۲ ذکر شده است.

جدول ۱ - مشخصه‌های ذاتی ساختار فلزی شامل آلومینیوم و تیتانیوم بکار رفته در بدنه هواگرد

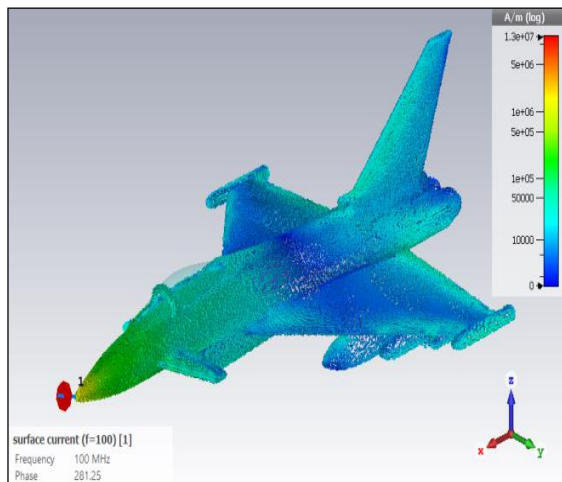
ماده / مشخصه	Al	Ti
μ	1	1
Electric Cond[S/m]	3.56e+07	2.38e+06
$\rho[kg/m^3]$	2700	4950
Thermal Cond[W/K/m]	237	21.9
Heat Capacity[kj/K/kg]	0.9	0.54
Diffusivity[m ² /s]	9.753e-05	8.193e-06
Young's Modulus[kN/mm ²]	69	116
Poisson's Ratio	0.33	0.32
Thermal Expan [1e-6/K]	23	8.6

جدول ۲ - مشخصه‌های ذاتی ساختار غیرفلزی شامل کامپوزیت فیبر کربن و شیشه تقویت شده با پلاستیک (فایبر گلاس) بکار رفته در بدنه هواگرد

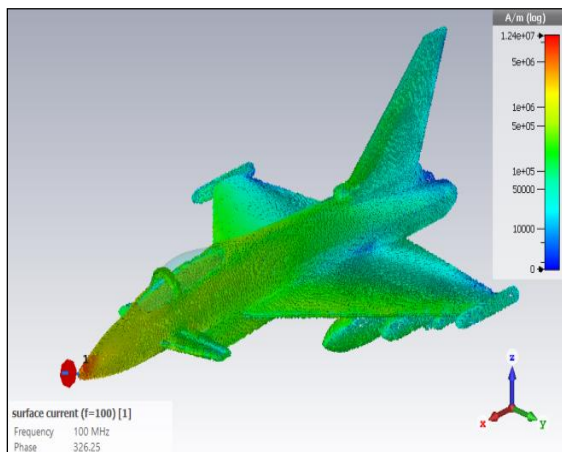
ماده / مشخصه	CFC	GlassRP
μ	1	1
Electric Cond[S/m]	3.5	1e-12



شکل ۱۰- توزیع جریان سطحی روی بدنه تمام آلومینیوم در فرکانس 100MHz



شکل ۱۱ - توزیع جریان سطحی روی بدنه تمام کامپوزیت در فرکانس 100MHz



شکل ۱۲ - توزیع جریان سطحی روی بدنه ترکیبی هواپیما در فرکانس 100MHz

۲-توزیع کمی میدان الکترواستاتیک بدنه در حوزه زمان
۳-توزیع کمی میدان الکترواستاتیک بدنه و میدان تابشی در حوزه فرکانس

به منظور بررسی اثرات میدان الکترومغناطیسی تشعشعی حاصل از رویداد ESD، الگوی تشعشعی در فرکانس 100MHz برای حالت تمام آلومینیوم رسم گردید. علت عدم رسم الگوی تشعشعی برای دو حالت دیگر، شباهت آن‌ها با الگوی تشعشعی بدنه تمام آلومینیوم در فرکانس مذکور می‌باشد. در ابتدا به بررسی توزیع کیفی جریان سطحی روی بدنه پرنده با جنس‌های مختلف خواهیم پرداخت.

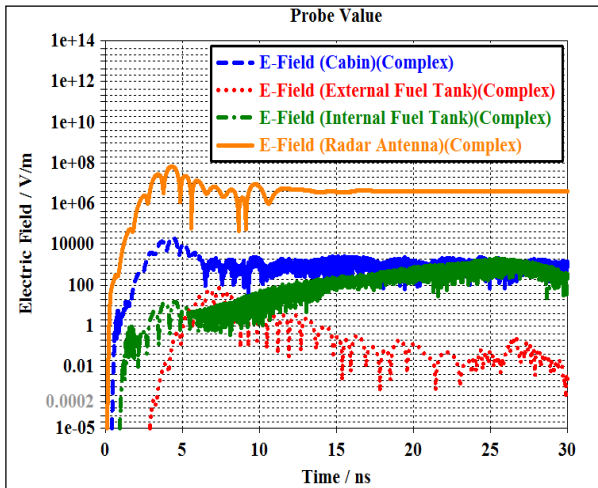
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشهود است، در حالتی که جنس بدنه پرنده تماماً از فلز آلومینیوم تشکیل شده، شدت جریان توزیعی سطحی به علت رسانایی بالای فلز آلومینیوم، بسیار زیاد است.

شکل ۱۱ نمایان‌گر ساختار بدنه تمام کامپوزیت می‌باشد که به علت رسانایی بسیار پایین نسبت به فلزات دارای شدت توزیع جریان سطحی کمتری می‌باشد.

شکل ۱۲ نیز که حالت ترکیبی از فلز، کامپوزیت و فایبر گلاس می‌باشد دارای شدت توزیع جریان سطحی مابین دو حالت قبل می‌باشد.

شدت جریان‌های سطحی توزیع شده روی یک سطح با شدت میدان الکترواستاتیک تجمعی بر بدنه ساختار، رابطه معکوس دارد. به عبارت دیگر، شکل ۱۰ دارای کمترین مقدار بار استاتیک روی بدنه پرنده، شکل ۱۱ دارای بیشترین مقدار تجمع بار استاتیک و شکل ۱۲ نیز مجدداً حالتی میانی از دو حالت قبل می‌باشد.

تجمع بار استاتیک روی سطح موجب ایجاد میدان الکتریکی ایستا در سطح بیرونی و بخش‌های داخلی ساختار پرنده خواهد شد که در ادامه با تعبیه پروب‌های میدان الکتریکی در هر بخش، شدت میدان سنجیده شده است.



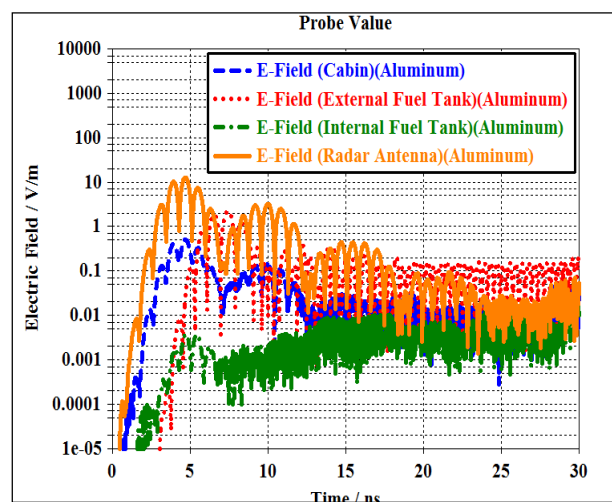
شکل ۱۵ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش‌های مختلف پرنده با بدنه ترکیبی

به‌طور مثال حداکثر مقدار شدت میدان الکتریکی در شکل ۱۳ مربوط به پروب تعبیه شده در محدوده آنتن رادار (دماغه از جنس آلومینیوم) بوده که دارای مقدار $10 \left(\frac{V}{m}\right)$ می‌باشد. در حالی که این مقدار در شکل ۱۴ $10 \left(\frac{KV}{m}\right)$ و در شکل ۱۵ $100 \left(\frac{MV}{m}\right)$ می‌باشد. یعنی مقدار شدت میدان الکتریکی به ترتیب حدود ۱۰۰۰ برابر و ۱۰ میلیون برابر شده است. علت این رویداد، استفاده از کامپوزیت در نوک دماغه ساختار پرنده شکل ۱۴ و فایبرگلاس در نوک دماغه ساختار شکل ۱۵ می‌باشد که به علت کاهش شدید رسانایی الکتریکی، تجمع بار استاتیک و به تبع آن شدت میدان الکتریکی در آن‌ها افزایش داشته است. از طرف دیگر، کمترین مقدار مربوط به پروب تعبیه شده در بخش مخزن سوخت داخلی بوده که تقریباً در تمامی شکل‌های ۱۳ تا ۱۵، به ترتیب دارای مقادیری در حدود $0.01 \left(\frac{V}{m}\right)$ و $10 \left(\frac{V}{m}\right)$ و $100 \left(\frac{V}{m}\right)$ می‌باشد. علت این امر جانشانی مخزن سوخت داخلی، در داخلی‌ترین بخش بدنه است که از اثر گذاری میدان الکتریکی در آن ناحیه جلوگیری می‌کند.

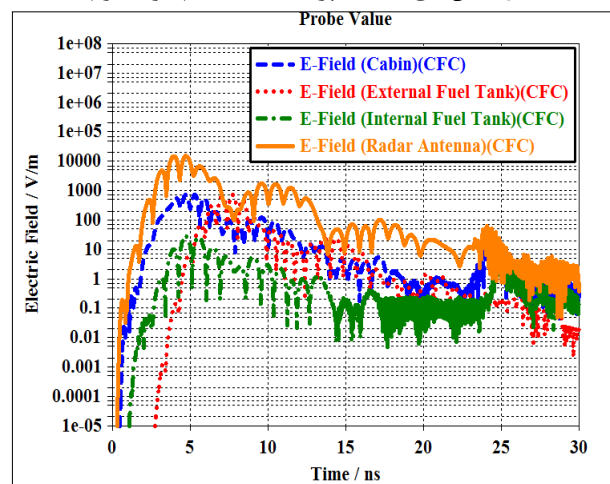
پروب‌های تعبیه شده در بخش‌های کابین و مخزن سوخت خارجی، دارای مقادیر میانی بین آنتن رادار و مخزن سوخت داخلی هستند. به منظور سهولت در مقایسه شدت میدان الکتریکی برای هر بخش از پرنده، پروب‌های تعبیه شده هر بخش در ساختار پرنده با جنس‌های مختلف (تمام آلومینیوم، تمام کامپوزیت و بدنه ترکیبی، به بررسی شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ پرداخته خواهد شد.

پس از آن به بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک در تقابل با زمان، در بخش‌های مختلف پرنده خواهیم پرداخت که در شکل‌های ۱۳ الی ۱۵ شدت میدان الکتریکی هر بخش (آنتن رادار، کابین، مخزن سوخت داخلی و مخزن سوخت خارجی) پرنده به ترتیب، با بدنه تمام آلومینیوم، تمام کامپوزیت و ترکیبی بررسی می‌گردد.

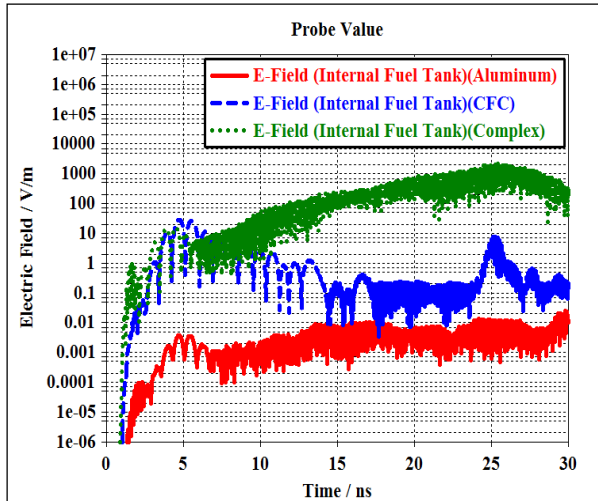
از مقایسه نمودارهای شدت میدان الکتریکی نتیجه می‌شود که، هرچه رسانایی ذاتی ساختار استفاده شده دارای مقدار بیشتری باشد (فلزات)، شدت میدان الکتریکی ایجاد شده حاصل از تجمع بارهای استاتیک چه در بخش‌های بیرونی و چه در بخش‌های داخلی، کمتر خواهد بود.



شکل ۱۳ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش‌های مختلف پرنده با بدنه تمام آلومینیوم



شکل ۱۴ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش‌های مختلف پرنده با بدنه تمام کامپوزیت



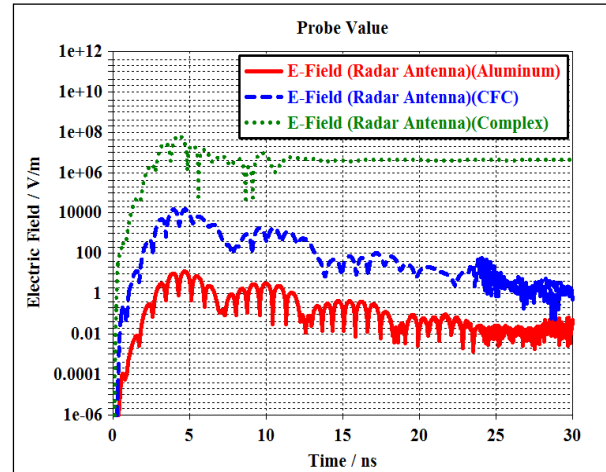
شکل ۱۹ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش مخزن سوخت داخلی و با جنس بدنه مختلف

همانگونه که مشهود است و پیش تر نیز اشاره شد، بدنه هایی با رسانایی ذاتی بالاتر، دارای جریان سطحی بیشتر، تجمع بار استاتیک کمتر و به تبع آن شدت میدان الکتریکی ضعیف تری می باشند. علت افزایش شدت میدان الکتریکی در ساختار ترکیبی نسبت به ساختار تمام کامپوزیت، علی رغم استفاده از فلزاتی چون تیتانیوم و آلومینیوم در ساختار آن، وجود فایبرگلاس در نوک دماغه ساختار ترکیبی می باشد که به علت رسانایی الکتریکی بسیار ضعیف خود، موجب تجمع شدید بار استاتیک در آن ناحیه و نواحی مربوطه دیگر شده و شدت میدان الکتریکی نیز به تابعیت از آن افزایش می یابد که در شکل های ۱۶ تا ۱۹ شاهد آن بودیم.

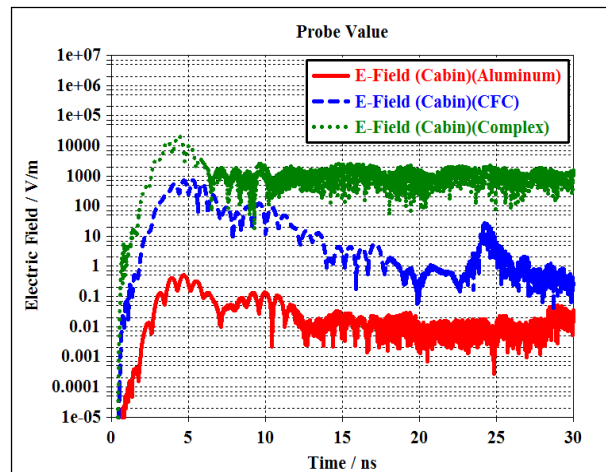
از دیدگاه دیگر، بر اثر ایجاد بار ساکن و حرکت جریان های سطحی و همین طور حالت های گذرای تجمع بار استاتیک، در کنار میدان الکتریکی ایجاد شده، میدان مغناطیسی نیز ایجاد خواهد شد. این میدان ها در حالت های خاص، حالت تابشی پیدا کرده و احتمال اختلال در سیستم راداری یا مخابراتی کابین پرنده را افزایش می دهند.

از همین رو به بررسی حوزه فرکانس شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در پرنده با جنس های مختلف در بخش های آنتن رادار و کابین پرداخته شده است.

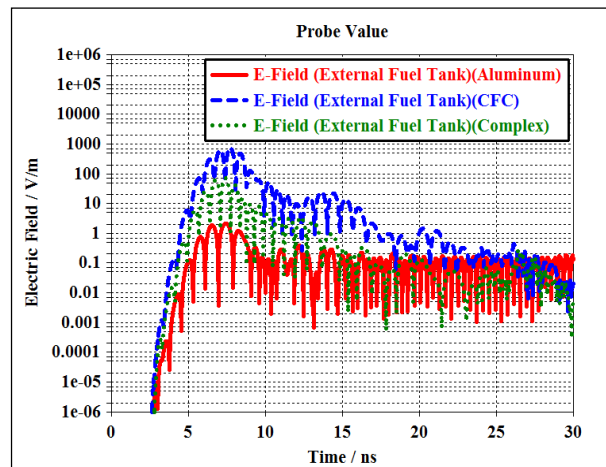
شکل ۲۰ نشان دهنده ی شدت میدان الکتریکی بر حسب $dB\left(\frac{V}{m}\right)$ در تقابل با فرکانس، برای بخش آنتن رادار می باشد. همان گونه که انتظار می رفت در این نمودار نیز، بیشترین شدت



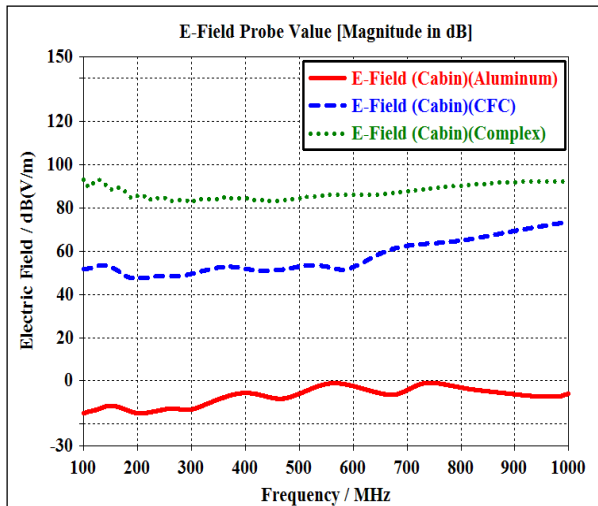
شکل ۱۶ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش آنتن رادار و با جنس بدنه مختلف



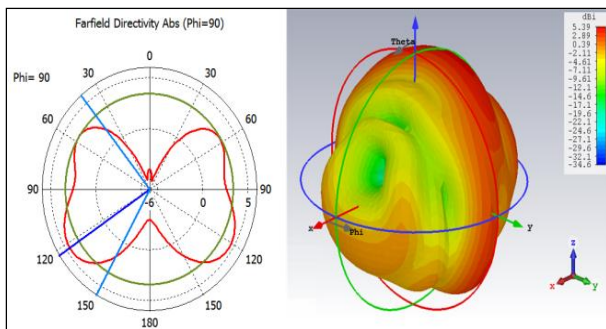
شکل ۱۷ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش کابین و با جنس بدنه مختلف



شکل ۱۸ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمع بار استاتیک، در بخش مخزن سوخت خارجی و با جنس بدنه مختلف



شکل ۲۱ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمیع بار استاتیک در حوزه فرکانس، در بخش کابین و با جنس بدنه مختلف



شکل ۲۲ - الگوی تشعشع حاصل از حالت گذرای جریان‌های سطحی در فرکانس 100 MHz

نتیجه‌گیری

در این مقاله اثرات ESD در بخش‌های مختلف یک پرنده نظامی با جنس بدنه مختلف در حوزه زمان و فرکانس شبیه‌سازی شده و نتایج مورد انتظار محقق گردید. طبق نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی، ساختارهایی با رسانایی ذاتی کم مانند کامپوزیت‌ها، تجمیع بار استاتیک زیادی روی سطح خود داشته و به تبع آن میدان الکتریکی حاصله، باعث ایجاد تداخل در سیستم‌های الکترونیکی و مخابراتی پرنده شده یا حتی امکان انفجار در مخازن سوختی را نیز تقویت می‌کند.

ساختارهای ترکیبی نیز به علت استفاده همزمان از فلزات، مواد کامپوزیت و فایبرگلاس رویکرد مشابهی از دیدگاه حوزه ESD با ساختارهای تمام کامپوزیت دارند.

با این وجود که ساختارهای تمام فلزی مشکلاتی از این قبیل را نداشته اما معایب خاص خود را دارند. در نتیجه باید به

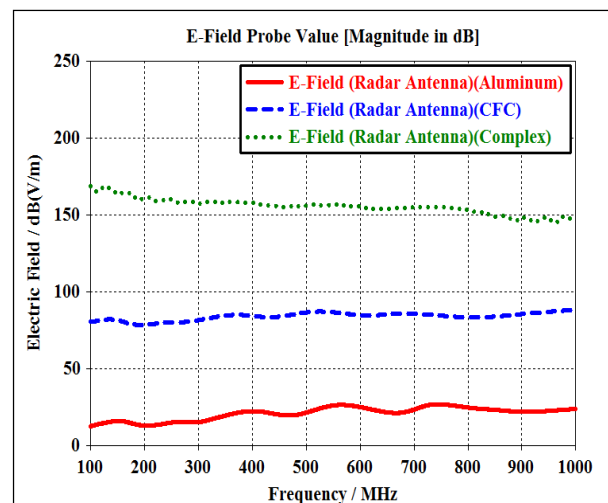
میدان برای حالت بدنه ترکیبی و کمترین شدت میدان برای حالت بدنه از جنس تمام آلومینیوم می‌باشد.

شکل ۲۱ نیز نمایان‌گر شدت میدان الکتریکی در تقابل با فرکانس، برای بخش کابین پرنده می‌باشد.

مقادیر شدت میدان الکتریکی نیز در اشکال فوق با افزایش فرکانس در محدوده شبیه‌سازی شده، تغییری چشم‌گیری نداشته و تقریباً یک مقدار برابر را اتخاذ می‌کنند.

در شکل ۲۲ یک نمونه از الگوی تشعشعی میدان تابشی حاصل از جریان‌های سطحی گذرا برای پرنده با جنس بدنه تمام آلومینیوم در حالت سه بعدی و قطبی آورده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که بدنه هواپیما از جنس کامپوزیت دارای تجمع بار بیشتری بوده و باید با جابجایی مناسب آنتن‌ها و تخلیه‌کننده‌های الکتریسته ساکن روی بدنه هواپیما تا میزان زیادی از این بار را تخلیه نموده و از ایجاد تداخلات ناشی از الکتریسته ساکن روی گیرنده‌های منصوب بر هواپیما جلوگیری کرد.



شکل ۲۰ - بررسی شدت میدان الکتریکی حاصل از تجمیع بار استاتیک در حوزه فرکانس، در بخش آنتن رادار و با جنس بدنه مختلف

سوی انجام اقدامات اصلاحی ساختارهای کامپوزیت گام برداشت.

منابع و مراجع

- [9] Lee, J. Y. and Collins, G. J., 2017, March. "Risk analysis of electromagnetic environmental effects in aircraft systems," In *2017 IEEE Aerospace Conference* (pp. 1-7). IEEE.
- [10] Fisher, F. A. and Plumer, J. A., *Lightning protection of aircraft (Vol. 1008)*. National Aeronautics and Space Administration, Scientific and Technical Information Office, 1977.
- [11] K. Gigliotti, "Static electricity and aircraft," *Wiley Encyclopedia of Composites, Second Edition*, pp. 1-8, February 2012.
- [12] K. Gigliotti, "Static electricity and aircraft," *Wiley Encyclopedia of Composites*, pp.1-8, 2011.
- [13] Smith, D., Graciano, C. and Martínez, G., "Expanded metal: A review of manufacturing, applications and structural performance," *Thin-Walled Structures*, 160, p. 107371.
- [14] M. Gagné and Therriault, D., "Lightning strike protection of composites," *Progress in Aerospace Sciences*, 64, pp.1-16, 2014.
- [15] C. Pavan, P. Fontanes, M. Urbani, N. C. Nguyen, M. Martinez- Sanchez, J. Peraire, J. Montanya and C. Guerra- Garcia, 2020. "Aircraft charging and its influence on triggered lightning," *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(1), p.e2019JD031245.
- [1] E. C. STARR, "Aifandrcraft precipitation static radio," *AIEE Transactions*, vol. 60, pp. 363-370, 1941.
- [2] M. Hettermann, "System, apparatus and method for automatically facilitating the discharge of static electricity from an apparatus," *United States Patent*, Patent No.: US 7,570.474 B1, 2009.
- [3] H. Ch. Woo, Y. T. Kim and B. G. Kim, "A research on the static discharger installation design and test for air vehicle," *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, pp. 574-580, 2017.
- [4] N. E. P. Egg, "An electrostatic charging model for aircraft fuel tanks," *BAE Systems Advanced Technology Centre*, pp. 102-103, 2008.
- [5] V. L. Bychkov and A. I. Klimov, "Application of tesla and erosive discharge for removing of static charge on the airplane's surface," *International Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE)*, pp. 1-35, June, 1999.
- [6] J. Y. Lee, "Electrostatic discharges and grounding for aircraft," *IEEE Aerospace Aircraft*, pp. 4-6, 2017.
- [7] Huan-Zhan Fu, Yong-Jun Xie and Jun Zhang, "Analysis of corona discharge interference on antennas on composite airplanes," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008.
- [8] O'Neill Jr, J. F. and Enterprises, J.A.Y.F.O.N., 1992. *Static Electricity in Flight Threatens Aircraft Safety*.