

Electrostatic discharge positioning on the airplane body with delay times measurement method

A. Mahdi¹, S.M.J. Razavi^{2*}, R. Toreinia³ 

^{2*}Associate Professor, Malek e Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

(Received:2022 /09/07, Revised: 2022/12/04, Accepted: 2023/12/31, Published: 2023/01/21)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.6.7>

Abstract

Electrostatic discharge(ESD) is a highly repeatable problem with harmful effects. These effects include destroying computer systems memory, damaging the electronic circuits, electromagnetic interference on the airplane radar and avionics systems, and destroying the surfaces. Knowing the places where electrostatic discharges have occurred in the airplane body can help in the airplane cost reduction for scanning and finding the resulting defects of ESD. Also, it informs the pilot and crews for example to know why communication and radar systems do not work correctly. So, it causes airplanes to be designed and fabricated safer. On this basis, in this article, the position of the electrostatic discharge in the cylindrical structure of the airplane has been obtained by the TDOA method. The accuracy of the estimation in the simulation is 9cm and in the measurement is 11cm.

Keywords: : Electrostatic discharge, Airplane, Positioning, Time Delay Of Arrival.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.


Publisher: Imam Hussein University

Authors



*Corresponding Author Email: razavismj@yahoo.com

مکان‌یابی تخلیه الکتریکی ساکن بر روی بدنه هواپیما با روش اندازه‌گیری تأخیرهای زمانی

علیرضا مهدی^۱، سید محمدجواد رضوی^{۲*}، رضاترینیا^۳ 

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- دانشیار، ۳- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۹/۱۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰، انتشار: ۱۴۰۱/۱۱/۰۱)

DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23454024.1401.10.2.6.7>



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

چکیده

تخلیه الکترواستاتیک (ESD) یک مشکل تکرارشونده با اثرات مضر است. این اثرات شامل تخریب حافظه سامانه‌های رایانه‌ای، آسیب‌رسانی به مدارهای الکترونیکی، ایجاد تداخل الکترومغناطیسی بر روی سیستم‌های راداری و اویونیک هواگردها و تخریب سطوح می‌باشد. دانستن اینکه رویدادهای تخلیه‌های الکترواستاتیک در کدام قسمت بدنه هواگرد اتفاق می‌افتد، می‌تواند به کاهش هزینه هواگرد برای پایش و یافتن خرابی‌های ناشی از آنها کمک کند. همچنین در حین پرواز به خلبان و خدمه پرواز آگاهی می‌دهد تا به‌عنوان مثال علت درست کار نکردن سامانه‌های ارتباطی و راداری را بدانند. این مهم سبب می‌شود هواگردها ایمن‌تر طراحی و ساخته شوند. بر همین اساس در این مقاله با استفاده از روش TDOA مکان تخلیه الکتریسیته ساکن بر روی ساختار استوانه‌ای هواپیما در شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به‌دست آمده است. در شبیه‌سازی بادقت کمتر از ۹ سانتی‌متر مکان تخلیه الکترواستاتیک تخمین زده شد و در اندازه‌گیری این دقت به ۱۱ سانتی‌متر رسید.

کلیدواژه‌ها: تخلیه الکتریسیته ساکن، هواگرد، مکان‌یابی، تأخیر زمانی

۱- مقدمه

ایجاد الکتریسیته ساکن روی بدنه هواگردها پدیده اجتناب‌پذیری است. این پدیده غیرقابل پیش‌بینی و غالباً ناخواسته است؛ به‌ویژه هنگامی که هواگرد در ارتفاع بالا پرواز می‌کند. تجمع بارهای ساکن بیش از حد آستانه، منجر به خرابی قطعات، اختلال در ارتباطات رادیویی و یا حتی می‌تواند باعث انفجار شدید گردد. تجمع بارهای ساکن در هواگرد دلایل مختلفی دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: اصطکاک بین سطوح خارجی هواگرد و محیط خارجی (از جمله ذرات هوا، یخ، تگرگ، برف، گردوغبار، خاکستر آتشفشان و...)، هنگام پر شدن مخزن سوخت، جریان داشتن سیال در سیستم لوله‌کشی و هنگام خروج جریان گازهای موتور؛ بنابراین هواگردها حامل بارهای ساکن عظیمی هستند که می‌توانند باعث مشکل و خرابی در ارتباطات رادیویی و الکترونیک هوانوردی شوند.

بار انباشته شده بر روی هواگرد در حین پرواز، به‌محض یافتن مسیری رسانا با کمترین امپدانس، به سمت زمین جهش می‌کند. در نتیجه جرقه‌هایی قابل شنیدن و گاهی اوقات قابل مشاهده ایجاد می‌شود. تخلیه الکتریکی سنگین برای زمانی است که هواگرد در هوای تمیز نزدیک ابرها و یا بین ابرهای باردار شده باشد. بر همین اساس ضرورت دارد که اقدامات لازم برای جلوگیری از انباشت بار الکتریکی بر روی بدنه هواگرد صورت گیرد، اقداماتی مثل:

- افزایش رسانایی پوشش بدنه هواگرد برای جلوگیری از انباشت بار الکتریکی و افزایش سطح پتانسیل در یک نقطه.
- قراردادن تخلیه‌کننده‌های الکتریسیته در انتهای بال‌ها و نقاطی که احتمال انباشت الکتریسیته ساکن در آن‌ها زیاد است.
- تخلیه ایمن الکتریسیته ساکن انباشت شده در هواگرد با استفاده از زمین کردن آن پس از فرود.

بالین‌حال همچنان وقوع ناگهانی تخلیه الکتریسیته ساکن در بدنه هواگرد یا رخداد صاعقه امری اجتناب‌ناپذیر و همراه با خرابی است [۱].

اتلاف زمانی به صفر میل می‌کند؛ همچنین هزینه‌ی پایش نیز به مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

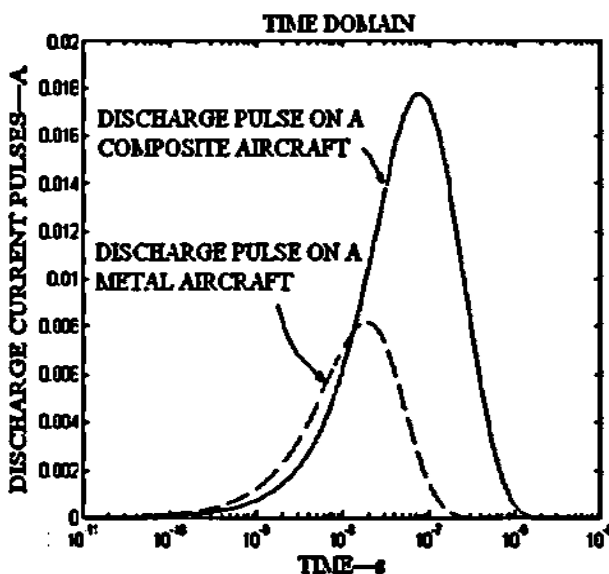
در این مقاله با مدل‌سازی نرم‌افزاری و اندازه‌گیری دامنه موج انتشار یافته ناشی از تخلیه الکتریسیته ساکن روی بدنه ساده‌سازی شده هواگرد، اختلاف تأخیر زمانی امواج رسیده به آنتن‌های مرجع محاسبه می‌شود. با اعمال اختلاف تأخیر زمانی‌های محاسبه شده به الگوریتم‌های TDOA مکان وقوع تخلیه الکترواستاتیک محاسبه می‌شود.

۲- تشخیص تأخیرهای زمانی

در فضاهایی که انتشاردهنده موج و گیرنده آن در خط دید هم هستند تشخیص تأخیرها با توجه به الگوریتم‌های فراوانی که توسعه داده شده‌اند آسان است. در هواگرد با توجه به شکل هندسی که هواگرد دارد در بیشتر مواقع انتشاردهنده موج و گیرنده آن در خط دید مستقیم یکدیگر نیستند. بر همین اساس تشخیص تأخیرهای زمانی با روش‌هایی مثل همبستگی سیگنال‌ها با خطا همراه است. در این پژوهش با خواندن اولین اکستریم تأخیرهای زمانی اندازه‌گیری شدند.

۳- شکل موج^۲ ESD و اثر آن در گیرنده‌ها

در شکل (۱) شکل پالس تخلیه کرونا و در شکل (۲) طیف فرکانسی آن برای دو نوع بدنه‌های مرسوم در هواگردها (کامپوزیت و فلز) آمده است.



در بیشتر مواقع برای کشف اینکه این خرابی کجا اتفاق افتاده است کل بدنه هواگرد را بازرسی می‌کنند.

در هواگردهای غول‌پیکر این کار زمان‌بر و هزینه‌زا است. یک راه‌حل خوب این است که در هنگام تخلیه بار و قوس الکتریکی یا در هنگام صاعقه به صورت در لحظه مکان وقوع این اتفاق به خدمه پرواز اعلام گردد. مزایای این کار این است که در همان لحظه خدمه مطلع شده و می‌توانند تمهیدات لازمه مثل بازرسی یا ترمیم خرابی را انجام دهند. اگر قادر به بازرسی در حین پرواز نبودند می‌توانند بعد از فرود هواگرد بدون پایش هواگرد مستقیم به محل وقوع قوس الکتریکی رفته و با اتلاف زمانی کمتری بررسی هواگرد را انجام دهند. برای تشخیص مکان وقوع قوس الکتریکی یک روش مناسب روش^۱ TDOA است در این روش اختلاف زمانی سیگنال‌های مخابراتی رسیده شده از محل وقوع قوس الکتریکی اندازه‌گیری شده و با توجه به مسیرهای رسیدن به حسگرها، مکان وقوع پالس تشخیص داده می‌شود.

روش TDOA کاربرد فراوانی در مکان‌یابی منابع انتشاری فرکانس بالا از جمله تخلیه الکترواستاتیک دارد. آقای جو برنیر و همکارانش در سال ۱۹۹۷ توانستند تخلیه الکتریکی را با روش TDOA مکان‌یابی کنند [۲]. آقای لین و همکارانش در سال ۱۹۹۸ یک سامانه مکان‌یاب تخلیه الکتریسیته ساکن ساختند که از دو سامانه آنتنی جهت مکان‌یابی تخلیه الکتریکی استفاده کردند [۳]. آقای یه تیان و ماساتاکه کاوادا در سال ۲۰۱۱ از TDOA برای مکان‌یابی تخلیه الکتریکی در ترانسفورماتورهای برق قدرت استفاده کردند [۴]. در سال ۲۰۱۹ آقای کامیارمهرناز امیر سخت افزار مورد نیاز برای مکان‌یابی تخلیه الکتریکی در آسمان را تشریح کردند [۵]. در سال ۲۰۲۲ فنگ از الگوریتمی غیرخطی جدیدی برای حل معادلات TDOA استفاده کردند تا تخلیه الکتریکی در پست‌های برق را مکان‌یابی کنند [۶].

تشخیص محل خرابی به وجود آمده از طریق تخلیه الکتریسیته ساکن یا تشخیص پیوسته نبودن رسانایی بدنه هواگرد با توجه به ابعاد هواگرد هزینه زیادی دارد. این هزینه هم شامل هزینه تجهیزات تشخیص خرابی و هم هزینه زمانی که برای تشخیص خطا در جسمی به بزرگی هواگردها اتلاف می‌شود است. در صورت استفاده از روش پیشنهاد شده

^۲ Electrostatic discharge

^۱ Time Difference of Arrival

آنتن‌های گیرنده استفاده شده در این مقاله ۷ سانتی‌متر طول دارند که به‌عنوان آنتن مونو پل با طول موج یک‌چهارم در نزدیکی ۱/۵ گیگاهرتز تشدید خواهند داشت. در چنین فرکانس‌هایی، در رابطه (۱) عبارت‌های مشتق زمانی غالب بوده و آنتن در میدان دور ESD واقع هست. با این فرض، رابطه (۱) به رابطه (۲) ساده می‌شود.

$$Emf = -L \frac{2dl}{c} \frac{1}{cr} \left\{ \left(\frac{z^2}{r^2} - 1 \right) \cos \theta - \frac{xz}{r^2} \sin \theta \right\} \frac{\partial i}{\partial t}$$

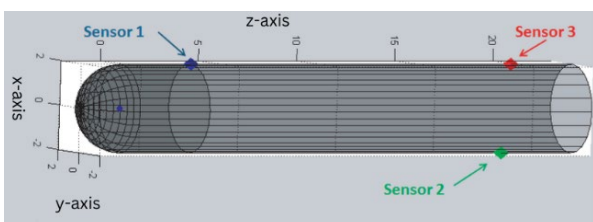
$$Emf = A(r, \theta, \phi) \left\{ dl \frac{\partial i}{\partial t} \right\} \quad (2)$$

EMF پیش‌بینی شده برای دریافت توسط آنتن‌ها به‌خوبی به دو بخش از شکل و دامنه اطلاعات جدا می‌شود. شکل با تابع $\frac{\partial i}{\partial t}$ تعیین می‌شود که برای همه گیرنده‌ها یکسان است. ضریب دامنه $A(r, \theta, \phi)$ ، مستقل از زمان بوده و تابع مکان و مشخصات گیرنده است. بنابراین، قبل از رسیدن هر انرژی بازتابی، هر گیرنده باید اولین بیشینه با همان شکل را دریافت کند (قطبش ممکن است بین گیرنده‌ها متفاوت باشد)، اما دامنه، به طور کلی، متفاوت خواهد بود. رابطه (۲) همچنین پارامترهای مرتبط با منبع $(dl$ و $\frac{\partial i}{\partial t})$ را جدا می‌کند. قدرت منبع با $(\frac{\partial i}{\partial t})$ مشخص می‌شود [۳].

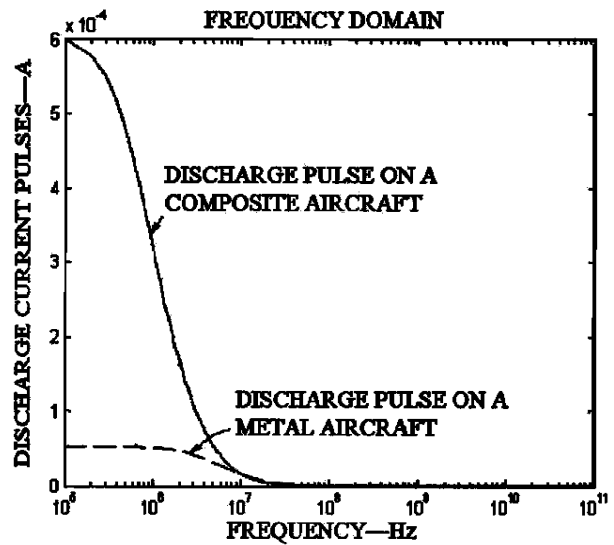
برای تعیین زمان رسیدن موج به آنتن‌ها و پیش‌بینی قدرت منبع و جهت‌گیری قوس، اولین قله‌ها در شکل موج به‌عنوان مرجع استفاده می‌شود. دلیل آن، این واقعیت است که اولین قله‌ها مستقل از امواج منعکس شده توسط اجسام فلزی اطراف هستند [۳].

۴- مکان‌یابی بر روی هواگرد

هواگرد مورد مطالعه در این بخش یک هواپیمای مسافربری است که از یک استوانه بزرگ و چندین بال و بالک تشکیل شده است. برای سهولت در فاصله‌یابی محل تخلیه کرنا با آنتن‌ها، از بال‌ها و بالک‌ها صرف‌نظر شده و به ترتیب از یک استوانه و یک نیمکره برای مدل‌سازی بدنه و کابین خلبان استفاده شده است. سه حسگر برای مکان‌یابی در نظر گرفته شده است و با افزایش حسگر چهارم می‌توان به بهبود دقت کمک کرد.



شکل (۱) جریان تخلیه الکتریکی کرنا [۷]



شکل (۲) جریان تخلیه الکتریکی کرنا در حوزه فرکانس [۷]

تفاوت تخلیه الکتریکی در بدنه کامپوزیتی و فلزی به علت اختلاف در هدایت الکتریکی است که دامنه پالس تخلیه در کامپوزیت‌ها به دلیل هدایت الکتریکی کمتر و تجمع بار الکتریکی بیشتر، بزرگ‌تر است. شکل‌های موج ESD دیجیتالی شده حاوی اطلاعات بیشتری مانند دامنه و زمان افزایش اولین پیک‌ها هستند. اطلاعات اضافی را می‌توان برای مشخص کردن منبع ESD فراتر از تعیین موقعیت استفاده کرد. به‌عنوان مثال، قدرت منبع ESD و جهت‌گیری قوس ESD را می‌توان از دامنه‌های اولین پیک‌ها تخمین زد [۳].

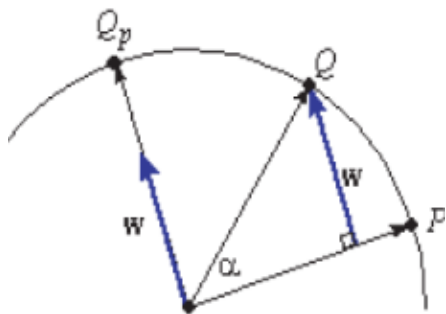
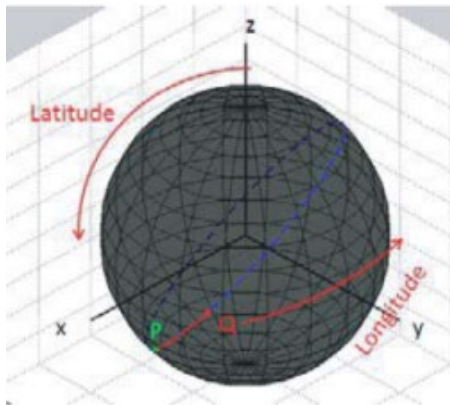
نیرو الکتروموتیو (Emf) پیش‌بینی شده برای آنتن‌ها در هنگام وقوع تخلیه الکتریکی ساکن از رابطه (۱) به دست می‌آید.

$$Emf = \int \vec{E} \cdot d\vec{l} = -L \frac{2dl}{c} \left[\left\{ \left(\frac{3z^2}{r^2} - 1 \right) \frac{i}{r^2} + \left(\frac{z^2}{r^2} - 1 \right) \frac{1}{cr} \frac{\partial i}{\partial t} \right\} \cos \theta - \frac{xz}{r^2} \left\{ \frac{3}{r^2} i + \frac{1}{cr} \frac{\partial i}{\partial t} \right\} \sin \theta \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱) انتگرال از نوک سیم آنتن تا پایه سیم ورودی به هادی مرکزی کابل کواکسیال است تا قطبش صحیح برای EMF را ایجاد کند. معادله شامل مولفه‌های مختلفی از جمله i و $\frac{\partial i}{\partial t}$ می‌باشد. برای میدان نزدیک مولفه $i(t)$ غالب است و برای میدان دور مولفه $\frac{\partial i}{\partial t}$ در معادله غلبه دارد.

مضرترین حوادث ESD اغلب تخلیه‌های فلز به فلز هستند که می‌توانند زمان افزایشی نزدیک به ۱۰۰ پیکوثانیه داشته باشند.

در شکل (۳) مدل ساده شده بدنه هواپیما به همراه حالت کلی محاسبه فاصله بین منبع و حسگر نشان داده شده و در جدول (۱) روابط محاسباتی برای حالات مختلف منبع و حسگر آمده است [۸]. با در نظر گرفتن مدل کابین خلبان به شکل کره، مشابه بدنه برای تعیین کوتاه‌ترین مسیر روی سطح یک کره محاسبات انجام می‌شود. می‌توان نشان داد که کوتاه‌ترین مسیر بین دونقطه روی سطح یک کره از یک‌سری دایره بزرگ می‌گذرد (دایره‌های که مرکز کره و شعاع یکسانی دارد). اگر نقاط P و Q روی سطح کره مشابه شکل (۴) تعریف شوند. روابط مربوط به تغییر مختصات آنها مطابق با رابطه (۳) خواهد بود.



شکل (۴) مدل هندسی در نظر گرفته شده برای کابین خلبان

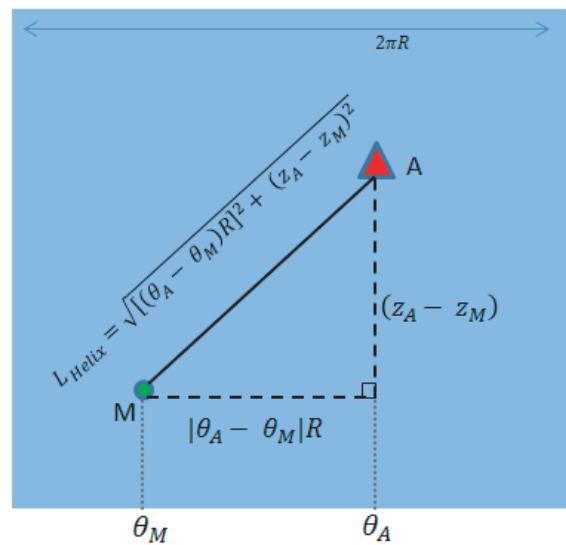
$$P_{Spherical} \begin{pmatrix} R \\ lat_p \\ lon_p \end{pmatrix} P_{Cartesian} \begin{pmatrix} x_p = R \cos(lon_p) \cos(lat_p) \\ y_p = R \sin(lon_p) \cos(lat_p) \\ z = R \sin(lat_p) \end{pmatrix} \quad (۳)$$

برای محاسبه کوتاه‌ترین مسیر بین نقاط P و Q به زاویه (α) بردارهای \vec{P} و \vec{Q} نیاز است که با استفاده از تعریف ضرب اسکالر می‌توان آن را تعیین کرد. طول کوتاه‌ترین مسیر بین P و Q کمان دایره است که با عبارت (۴) به دست می‌آید.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{P} \cdot \vec{Q}}{R^2} \right) \quad (۴)$$

طول دایره: $PQ = R\alpha$

(الف)



(ب)

شکل (۳) الف) مارپیچ مدل بدنه/کابین ساده شده

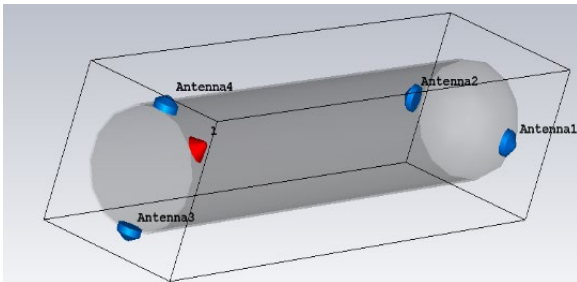
ب) معادله طول [۸]

اثرات ساختار هواپیما با استفاده از ملاحظات هندسی برای انتشار سیگنال در نظر گرفته می‌شود. در الگوریتم‌های مربوط به محاسبه اختلاف زمانی رسیدن سیگنال به آنتن‌ها در روش $TDOA$ باید کوتاه‌ترین مسیر بین منبع و حسگر را محاسبه کرد. روی سطح استوانه این مسیر ممکن است مستقیم (LOS) یا غیرمستقیم $(NLOS)$ باشد. برای مسیر بین منبع و حسگر روی سطح استوانه، می‌توان یک مسیر مارپیچ در نظر گرفت. سطح استوانه را می‌توان باز کرد تا به صفحه‌ای تبدیل شود که در آن مارپیچ تبدیل به یک خط ساده می‌شود.

جدول (۱) محاسبه طول مارپیچ‌ها در استوانه [۸]

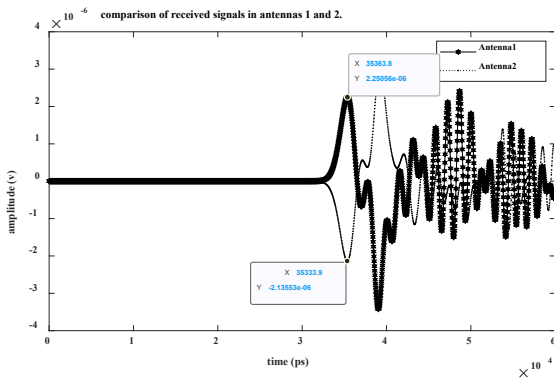
$\theta_A > \theta_M$	$\theta_A - \theta_M < \pi$	$\varepsilon = +1$ $t = [0; \theta_A - \theta_M]$ $L_{helix} = \sqrt{[(\theta_A - \theta_M)R]^2 + (z_A - z_M)^2}$
	$\theta_A - \theta_M > \pi$	$\varepsilon = -1$ $t = [0; 2\pi(\theta_A - \theta_M)]$ $L_{helix} = \sqrt{[2\pi - (\theta_A - \theta_M)R]^2 + (z_A - z_M)^2}$
$\theta_A < \theta_M$	$ \theta_A - \theta_M < \pi$	$\varepsilon = -1$ $t = [0; \theta_A - \theta_M]$ $L_{helix} = \sqrt{[\theta_A - \theta_M R]^2 + (z_A - z_M)^2}$
	$ \theta_A - \theta_M > \pi$	$\varepsilon = +1$ $t = [0; 2\pi \theta_A - \theta_M]$ $L_{helix} = \sqrt{[2\pi - \theta_A - \theta_M R]^2 + (z_A - z_M)^2}$

افزار استفاده شده است. آنتن‌های بکار رفته به عنوان حسگر مونوپل داری طول ۷ سانتی‌متر و مقاومت ۵۰ اهمی می‌باشند.



شکل (۶) بدنه ساده شده‌ای از هواگرد در نرم‌افزار CST

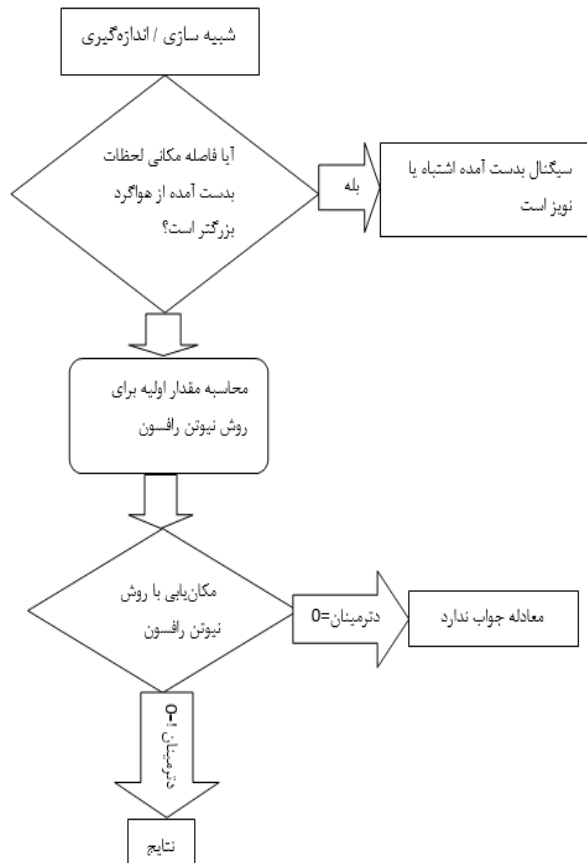
آنتن‌ها به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که کل شکل را پوشش دهند. برای مکان‌یابی از روش عددی نیوتن رافسون استفاده شده است. در این روش به مقدار اولیه برای حل معادلات نیاز است. از آنجایی که شکل قرینه است به دست آوردن این مقدار اولیه دشوار به نظر می‌رسد. در اینجا با توجه به دامنه دریافتی سیگنال‌ها مقدار اولیه به دست می‌آید؛ بنابراین محل قرارگیری آنتن‌ها به گونه‌ای قرار گرفته است که هر یک از آنتن‌ها با یک ربع منحصر به فرد از استوانه هم راستا باشد. در چنین حالتی با مقایسه دامنه می‌توان مقدار اولیه مورد نیاز برای روش نیوتن رافسون را به شکل صحیح به دست آورد. برای شبیه‌سازی تخلیه الکتریسیته ساکن از سیگنال تحریکی جریانی به صورت نمایی دوگانه^۲ مشابه شکل (۱) با زمان صعود^۳ ۲۶ نانوثانیه و زمان افول^۴ ۱۲ نانوثانیه استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از حل‌کننده حوزه زمان نرم‌افزار CST انجام شده است. در شکل‌های (۷) و (۸) نمونه سیگنال‌های دریافتی از آنتن‌ها آورده شده است.



شکل (۷) سیگنال‌های دریافتی در آنتن ۱ و ۲

۵- فرایند شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

با در نظر گرفتن شکل‌های ساده شده از بدنه و کابین خلبان فرایند مکان‌یابی تخلیه کرونا مطابق فلوجارت شکل (۵) در هر دو بخش شبیه‌سازی و اندازه‌گیری انجام می‌شود.



شکل (۵) فلوجارت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی

۶- شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی مطابق شکل (۶) بدنه ساده شده هواگرد در نرم‌افزار CST پیاده شد. شبیه‌سازی‌ها برای دو جنس هادی کامل (PEC) و کامپوزیت (CFC) تکرار شدند. کامپوزیت در نظر گرفته شده اپوکسی گرافن است که در صنایع هواگردسازی کاربرد فراوان دارد مقدار رسانایی این ماده به مقدار کربن بافته شده در آن بستگی دارد. در این شبیه‌سازی رسانایی $5900 \frac{S}{m}$ در نظر گرفته شده است. چینش آنتن‌ها به گونه‌ای هستند که بر هر چهار ربع استوانه محیط باشند. برای شبیه‌سازی آنتن‌ها از درگاه LP^1 نرم-

² Double exponential

³ Rise time

⁴ Fall time

¹ lumped port

جدول (۳) نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای جنس بدنه CFC

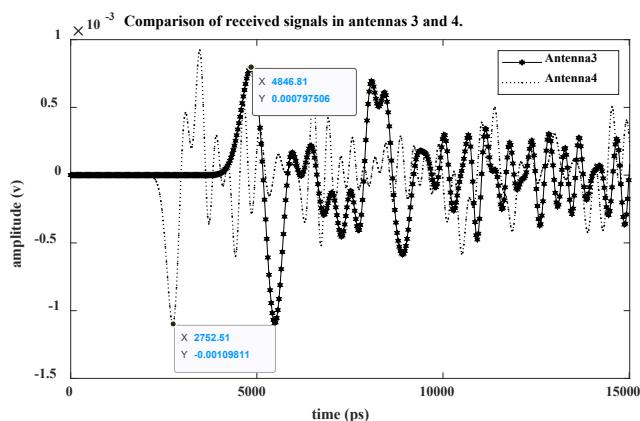
محل تخلیه الکتریسیته ساکن			نتایج حاصل از شبیه‌سازی		
ردیف	θ (radian)	Z (cm)	θ (radian)	Z (cm)	دقت اندازه‌گیری (cm)
۱	۰,۸۸	-۴۷۰	۰,۷۲۱۳	۴۶۵, -۵	۱۰
۲	۳,۱۴	۰	۳,۱۲۲	۳,۱	۳
۳	۲,۱۲	۲۵	۲,۲۰۲	۲۹,۸ ۲	۷
۴	۴,۸	۱۵۰	۴,۷۰۱	۱۵۰, ۸	۶
۵	۶,۲۸	۴۵۰	۶,۱۵۴	۴۴۳, ۶	۱۰

جدول (۴) نتایج شبیه‌سازی‌های صورت گرفته برای جنس بدنه PEC

محل تخلیه الکتریسیته ساکن			نتایج حاصل از شبیه‌سازی		
ردیف	θ (radian)	Z (cm)	θ (radian)	Z (cm)	دقت اندازه‌گیری (cm)
۱	۰,۸۸	۴۷۰-	۰,۷۳۳	- ۴۶۶,۶۵	۹
۲	۳,۱۴	۰	۲,۹۸۲	۱,۲۵۵	۹
۳	۲,۱۲	۲۵	۲,۰۰۲	۲۰,۶۸۲	۸
۴	۴,۸	۱۵۰	۴,۸۸	۱۵۵,۷۸	۷
۵	۶,۲۸	۴۵۰	۶,۳۴	۴۴۵,۵	۵

۵- اندازه‌گیری

به منظور اعتبارسنجی الگوریتم ارائه شده برای مکان‌یابی تخلیه الکترواستاتیک روی بدنه هواپیما و شبیه‌سازی انجام شده، اندازه‌گیری‌ها روی یک ماکت فلزی انجام می‌شود. این ماکت، بدنه کوچک شده با نسبت ۱ به ۶/۵ است که از یک استوانه ساده با قطر ۶۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. چهار حسگر ساده UHF یکسان روی سطح قرار می‌گیرند؛ زیرا طیف فرکانسی تخلیه الکترواستاتیک مطابق شکل (۲) بیشتر در این باند است. این حسگرها در واقع



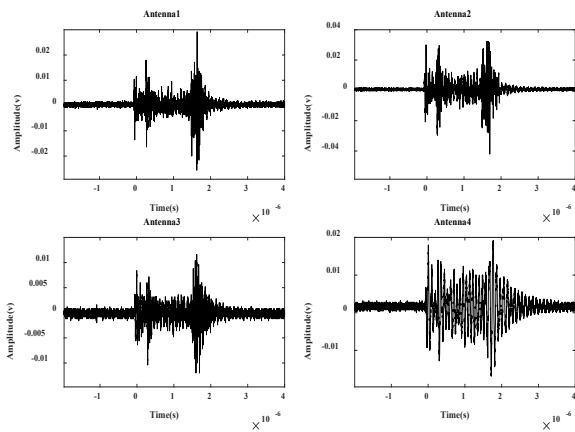
شکل (۸) سیگنال‌های دریافتی در آنتن ۳ و ۴

بعد از اتمام شبیه‌سازی الکترومغناطیسی در نرم‌افزار CST و ذخیره سیگنال‌های ثبت شده توسط هر چهار حسگر (آنتن) زمان اولین قله‌ها (مثبت یا منفی) به عنوان مرجع اختلاف زمانی استخراج می‌گردد. برای نتایج ثبت شده در شکل‌های (۷ و ۸) زمان‌های تخلیه الکتریسیته ساکن به همراه زمان قله‌های سیگنال رسیده به هر حسگر در جدول (۲) ثبت شده است. سیگنال‌های رسیده به آنتن‌های ۱ و ۲ دارای دامنه بسیار اندکی نسبت به سیگنال‌های رسیده به آنتن‌های ۳ و ۴ هستند؛ از این رو تخلیه الکتریسیته ساکن در سمتی قرار دارد که به آنتن‌های ۳ و ۴ نزدیک‌تر است. همچنین با مقایسه اختلاف زمانی رسیدن سیگنال‌ها نیز مشخص می‌گردد که سیگنال به آنتن ۴ نزدیک‌تر است.

جدول (۲) زمان‌های اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی

نوع سیگنال	لحظه دریافت سیگنال (ps)
تخلیه الکتریسیته	179,511
آنتن ۱	$3.536377 * 10^4$
آنتن ۲	$3.533385 * 10^4$
آنتن ۳	$4.846811 * 10^3$
آنتن ۴	$2.752510 * 10^3$

با استفاده از نتایج جدول (۲) اختلاف تأخیرهای زمانی سیگنال‌های رسیده به هر حسگر محاسبه شده و معادلات غیرخطی برای فاصله هر حسگر با منبع مطابق با روابط جدول (۱) تشکیل می‌شود. حل این معادلات بر طبق فلوجارت ارائه شده در شکل (۵) انجام شده و نتایج آن برای ۵ مثال و بدنه‌های CFC و PEC به ترتیب در جداول (۳ و ۴) آمده است. میانگین دقت محاسبه مکان تخلیه الکترواستاتیک برای بدنه PEC ۷/۶ سانتی‌متر با انحراف معیار ۱/۶۷۷ و برای بدنه CFC برابر ۷/۲ سانتی‌متر با انحراف معیار ۲/۹۴۹۶ به دست آمده است.



شکل (۱۱) سیگنال‌های دریافتی قوس الکتریکی (اندازه‌گیری)

مشابه فرایندی که در بخش شبیه‌سازی ارائه شد برای محاسبه مکان تخلیه الکترواستاتیک (شبیه‌سازی مجدد و اندازه‌گیری) روی ماکت کوچک شده برای ۱۰ مثال انجام شد و نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری آن در جداول (۵) و (۶) آمده است.

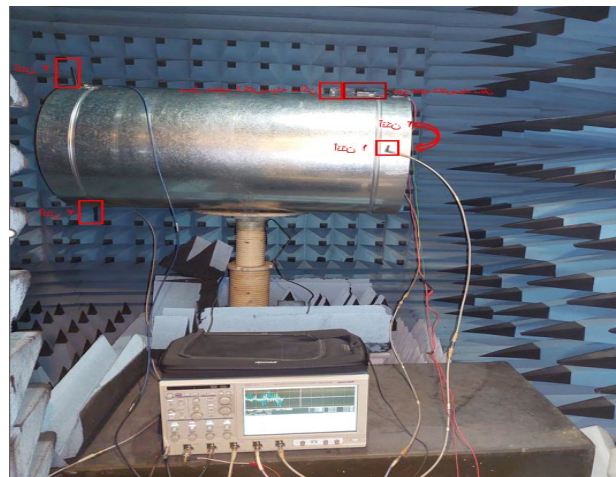
جدول (۵) نتایج حاصل از شبیه‌سازی

محل تخلیه الکتریسته ساکن			نتایج حاصل از مکان‌یابی		
ردیف	θ (radian)	z (cm)	θ (radian)	Z (cm)	دقت اندازه‌گیری (cm)
۱	۰	۰٫۲۷	۰٫۱۲۷	۰٫۲۲۰	۵
۲	۰٫۷۸۵	۰٫۲۷	۰٫۶۸۸	۰٫۲۵۲	۷
۳	۱٫۵۷	۰٫۲۷	۱٫۴۴۴	۰٫۲۸۰	۸
۴	۲٫۳۵۶	۰٫۲۷	۲٫۲۵۳	۰٫۲۵۸	۱۰
۵	۳٫۱۴	۰٫۲۷	۲٫۹۸۴	۰٫۳۲	۱۰
۶	۰	۰٫۵۳	۶٫۱۹	۰٫۴۶۰	۹
۷	۰٫۷۸۵	۰٫۵۳	۰٫۶۹۵	۰٫۶۰	۹
۸	۱٫۵۷	۰٫۵۳	۱٫۶۷۸	۰٫۴۸۱	۸
۹	۲٫۳۵۶	۰٫۵۳	۲٫۲۷۳	۰٫۵	۱۰

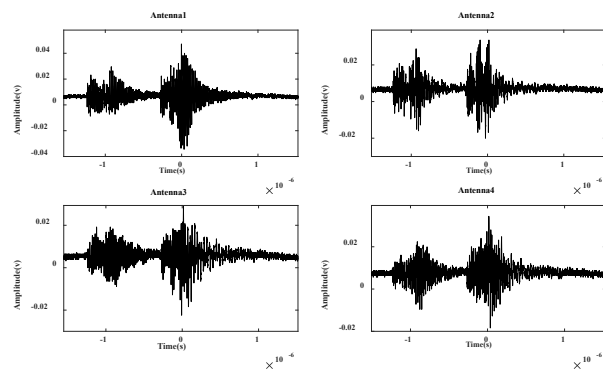
چهار آنتن ۷ سانتی‌متری یکسان هستند که با استفاده از کابل‌هایی با طول تقریباً یکسان به اسیلوسکوپ *Dpo750* با نرخ نمونه‌برداری ۴۰ گیگا نمونه بر ثانیه متصل می‌شوند.

طول کابل‌ها تقریباً یکسان در نظر گرفته شده‌اند تا تأخیری که بر روی سیگنال‌ها اعمال می‌کنند یکسان باشد. یک تخلیه قوس الکتریکی در سطح سیلندر با استفاده از یک ژنراتور ولتاژ بالا که ولتاژ خروجی آن نزدیک به ۴۰ کیلوولت است ایجاد می‌شود. انتشار این تخلیه با استفاده از حسگرهای *UHF* اندازه‌گیری می‌شود. از آنجایی که اندازه‌گیری مطابق با شکل (۹) در اتاقک بدون انعکاس انجام می‌شود از مسیره‌های انعکاس اجتناب می‌شود و تنها مسیر انتشار در امتداد سطح استوانه است.

برای مقایسه دقیق‌تر نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری، دوباره شبیه‌سازی برای ماکت فلزی کوچک‌شده انجام شد و سیگنال‌های ثبت‌شده از آن در شکل (۱۰) و نتایج اندازه‌گیری آن در شکل (۱۱) آمده است.



شکل (۹) چینش آنتن‌ها برای اندازه‌گیری



شکل (۱۰) سیگنال‌های دریافتی برای تخلیه کرونا (شبیه‌سازی)

۶- نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند $TDOA$ روش مناسبی برای مکان‌یابی تخلیه الکتریسیته ساکن در هواگرد است، همچنین چپش آنتن بکار رفته برای مکان‌یابی بر روی استوانه مناسب است. دقت محاسبه مکان تخلیه الکترواستاتیک روی بدنه با ابعاد واقعی CFC و PEC در شبیه‌سازی کمتر از ۸ سانتی‌متر به دست آمد. در اندازه‌گیری دقت به‌دست‌آمده کمتر از ۱۱ سانتی است. نتایج نشان می‌دهند اندازه‌گیری و شبیه‌سازی با اختلاف کمی با یکدیگر مطابقت دارند.

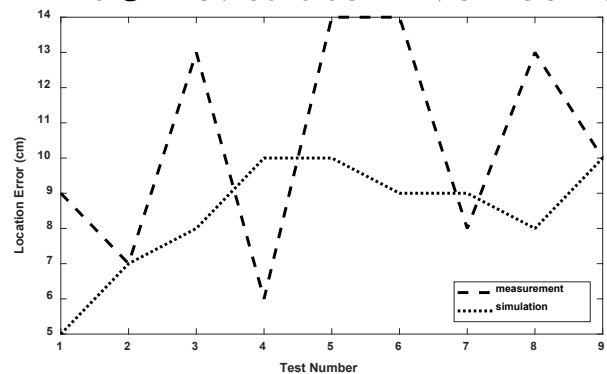
۷- مراجع

- [1] N. Amsc and A. Reli, "Military handbook electrostatic discharge control handbook for protection of electrical and electronic parts, assemblies and equipment (excluding electrically initiated explosive devices)(metric)," 1991.
- [2] J. Bernier, G. Croft, and R. Lowther, "ESD sources pinpointed by analysis of radio wave emissions," in *Proceedings Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, 1997, pp. 83–87. DOI:10.1109/EOESD.1997.634229
- [3] D. L. Lin, L. F. DeChiaro, and M.-C. Jon, "A robust ESD event locator system with event characterization," in *Proceedings Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium*, 1997, pp. 88–98. DOI:10.1109/EOESD.1997.634230
- [4] Y. Tian and M. Kawada, "Estimation of DOAs of EM Waves Emitted from Multiple Partial Discharge Sources in Free Space by Using Wideband Signal Subspace Methods," *Journal of International Council on Electrical Engineering*, vol. 1, no. 4, pp. 384–389, 2011. DOI:10.5370/JICEE.2011.1.4.384
- [5] K. Mehranzamir, H. N. Afrouzi, Z. Abdul-Malek, Z. Nawawi, M. A. B. Sidik, and M. I. Jambak, "Hardware and software implementation of magnetic direction finding sensors," in *2019 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, 2019, pp. 23–28. DOI:10.1109/ICECOS47637.2019.8984532
- [6] X. Feng, H. Liu, D. Zhang, Y. Cui, S. Xue, and Z. Zhang, "Partial Discharge Location of Converter Station Based on Time Difference of Arrival," in *2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2022, pp. 982–986. DOI:10.1109/ACPEE53904.2022.9783927
- [7] H.-Z. Fu, Y.-J. Xie, and J. Zhang, "Analysis of corona discharge interference on antennas on composite airplanes," *IEEE Trans Electromagn Compat*, vol. 50, no. 4, pp. 822–827, 2008. DOI:10.1109/TEMC.2008.2004598
- [8] I. Garcia-Hallo, D. Lemaire, N. Raveu, and G. Peres, "Method for p-static source location on aircraft using time domain measurements," *Progress In Electromagnetics Research C*, vol. 62, pp.89–98, 2016. DOI:10.2528/PIERC15121507

جدول (۶) نتایج حاصل از اندازه‌گیری

محل تخلیه الکتریسیته ساکن			نتایج حاصل از مکان‌یابی		
ردیف	θ (radian)	z (cm)	θ (radian)	Z (cm)	دقت اندازه‌گیری (cm)
۱	۰	۰.۲۷	۶.۱۶۶	۰.۲۳۲	۹
۲	۰.۷۸۵	۰.۲۷	۰.۶۵۸	۰.۲۵۴	۷
۳	۱.۵۷	۰.۲۷	۱.۸۰۱	۰.۳۲۶	۱۳
۴	۲.۳۵۶	۰.۲۷	۲.۴۵۸	۰.۲۸۱	۶
۵	۳.۱۴	۰.۲۷	۳.۲۱۸	۰.۲۲۵	۱۴
۶	۰	۰.۵۳	۶.۴۱۹۸	۰.۴۹۲	۱۴
۷	۰.۷۸۵	۰.۵۳	۰.۸۸۵	۰.۵۹۰	۸
۸	۱.۵۷	۰.۵۳	۱.۸۵۸	۰.۵۹۱	۱۳
۹	۲.۳۵۶	۰.۵۳	۲.۱۸۸	۰.۵۱۰	۱۰

در شکل (۱۲) مقایسه‌ای از دقت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی برای زوایای مختلف تخلیه آورده شده است. داده‌های جداول (۵) و (۶) نشان می‌دهند مقدار متوسط دقت اندازه‌گیری برابر با ۱۰/۴۵ با انحراف معیار ۳/۱۲ و مقدار متوسط دقت شبیه‌سازی برابر با ۸/۴۵ با انحراف معیار ۱/۶ است. دلایل خطاهای به وجود آمده اختلاف بین مدل انتشاری ساده‌سازی شده و انتشار موج با طیف فرکانسی گسترده در استوانه روی مسیره‌های مختلف است که به دلیل پیچیدگی مساله غیر قابل اجتناب است. همچنین در اندازه‌گیری پیدا کردن اکستریم‌ها به دلیل وجود نویز دچار خطا می‌شود.



شکل (۱۲) مقایسه خطای مکان‌یابی برای شبیه‌سازی و اندازه‌گیری

