




Analysis and Simulation of Electrostatic Charge Production on the Airplanes Fuel Tanks and Pipes

M. Shariatifar ¹, S.M.J. Razavi*², M. Roodbari ³, R. Toreinia ⁴ 

*Researcher, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

(Received: 2024/03/30 revised: 2024/06/19 Accepted:2024/07/10 published: 2024/07/24)

Abstract

Due to fluid movement in fuel pipes and tanks, the electric charge will emerge in the fluid and its common surface with the pipes. As these charges become discharged the tanks and pipes are threatened; because the discharge energy becomes more than the lowest required energy of the fuel explosion and can lead to the fuel flaming and the explosion of tanks and tubes. In this article, the effect of the conductive and insulator pipes, the fluid velocity, and the pipe radius in the production of electric charge have been analyzed and studied. Always, in the calm fluid current, the produced electric charge is lesser than the turbulent fluid current counterparts. With more velocity of the fluid, the turbulent will become more occurred. The results show that in the state of calm flow, the generated electric current is almost 250 dBA lower than the turbulent flow. Studies on the tanks during fueling show that accumulated electric charge has its maximum at the central axis and the charge is increasing with the filling of the tank.

Keywords: Fuel Tank, Fuel Ducts, Electrostatic Charge, Airplane

* Corresponding author E-mail: razavismj@mut.ac.ir

تحلیل و شبیه‌سازی تولید بار الکترواستاتیک بر روی مخازن و مجاری سوخت هواگردها

مرتضی شریعتی^۱ فر^۱، سید محمدجواد رضوی^{۲*}، محسن رودباری^۳، رضا ترینیا^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۴- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۱، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۰، انتشار: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳)



* 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

بر اثر حرکت جریان سیال در مخازن و مجاری سوختی بار الکتریکی در سیال و سطح مشترک آن با مجاری به وجود می‌آید. در صورت تخلیه این بارهای الکتریکی، مخازن و مجاری سوختی مورد تهدید قرار می‌گیرند؛ زیرا اگر انرژی تخلیه الکترواستاتیک از حداقل انرژی قابل اشتعال سوخت بیشتر شود می‌تواند منجر به شعله‌ور شدن سوخت و انفجار مخازن یا مجاری گردد. در این مقاله اثر لوله‌های رسانا و عایق، سرعت حرکت سیال و شعاع لوله‌ها در تولید بار الکترواستاتیک تحلیل و بررسی می‌شود. در جریان آرام سیال، همیشه بار الکتریکی تولید شده نسبت به جریان آشفته کمتر است. سرعت حرکت سیال هر چه بیشتر باشد آشفته‌گی بیشتری در لوله رخ می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در حالت جریان آرام، جریان الکتریکی تولید شده تقریباً ۲۵۰ dBA آمپر از جریان آشفته کمتر است. بررسی‌ها روی مخازن هنگام سوخت‌گیری نشان می‌دهد بار الکتریکی تجمع‌یافته در محور مرکزی مخزن استوانه‌ای بیشینه بوده و با پر شدن مخزن میزان بار افزایش می‌یابد.

کلیدواژه‌ها: مخزن سوخت، مجاری سوخت، بار الکترواستاتیک، هواگرد.

۱- مقدمه

در [۸] تجمع و حرکت بار ساکن در مخازن سوخت ناشی از منابع داخلی در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و معادلات حاکم بر بار ساکن توسعه یافته‌اند. برای جلوگیری از تجمع بار الکتریکی بین دو گزینه تولید و اتلاف آن رقابت وجود دارد. برای جلوگیری از تولید تاحدامکان باید اصطکاک بین سوخت و بدنه مجاری و مخازن را کاهش داد و برای اتلاف آن باید رسانایی سوخت و مجاری آن را افزایش داد. در [۹] چیدمانی برای اندازه‌گیری جریان الکترواستاتیک روی بدنه مجاری انتقال سوخت ارائه شده است که شامل آمپرمترهای بادقت پیکوآمپر می‌باشد. این اندازه‌گیری‌ها باید بادقت انجام شوند تا نتیجه دقیق حاصل شود، غفلت از برخی اقدامات احتیاطی می‌تواند منجر به اندازه‌گیری نادرست و خطر اندازه‌گیری اثر ناخواسته شود. در [۱۰] شبیه‌سازی تولید و تخلیه بار الکتریکی سوخت در مخازن کامپوزیتی انجام شده است. همچنین در [۱۱] چگونگی باردار کردن مایع‌های آلی با کمک افزودنی‌ها آمده است.

پدیده تخلیه بار الکتریکی ساکن (ESD) در هواپیما در اواخر قرن ۱۹ میلادی شناخته شده است [۱]. پدیده الکتریسیته ساکن روی بدنه هواپیما باعث تداخل الکترومغناطیسی در سیستم - های رادیویی، راداری و ناوبری هواپیما می‌شود. روش‌هایی شامل آنتن‌های کم تزویج [۲]، پوشش‌های ضد الکتریسیته ساکن [۳]، حذف‌کننده‌های سیگنال نویز ناشی از تخلیه بار ساکن [۴]، استحصال انرژی از الکتریسیته ساکن [۵] و [۶] و انواع تخلیه‌کننده‌های بار ساکن با کاهش نویز متناسب [۷] برای کاهش اثرات نامطلوب این پدیده ارائه شده است.

یکی از زیر سیستم‌های حساس هواپیما به پدیده تخلیه بار ساکن سیستم سوخت‌رسانی و مخزن آن می‌باشد. منابع بالقوه تخلیه الکترواستاتیک پیرامون مخزن سوخت هواپیما عبارت‌اند از:

- ۱- منبع با منشأ خارج از مخزن شامل بار تجمع‌یافته روی بدنه
- ۲- منابع با منشأ داخل مخزن شامل بار ساکن به وجود آمده داخل مخزن و بار ساکن در اثر حرکت سوخت داخل مجاری انتقال سوخت

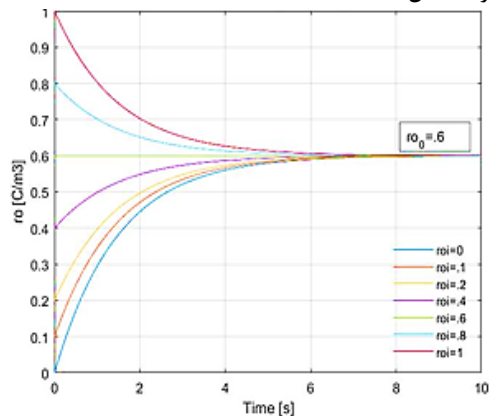
در این مقاله، با استفاده از معادلات حاکم بر تولید بار الکتریکی در مجاری و مخازن سوخت، بار الکتریکی ایجاد شده ناشی از حرکت سوخت در لوله‌های پلیمری (رسانا یا عایق) تحلیل و بررسی می‌شود. در این تحلیل اثر انواع لوله‌ها، سرعت آرام و

که در آن ρ_i مقدار چگالی بار اولیه است که احتمالاً در محل مخزن سوخت وجود داشته است. ρ_0 نیز مجموع بار اضافه شده در اثر حرکت داخل لوله است. اگر رسانایی سوخت بدون افزودن مواد آنتی استاتیک $8/85 \text{ pS/m}$ و ضریب دی‌الکتریک نسبی سوخت ۲ باشد زمان استراحت از رابطه (۲) برابر با دو ثانیه محاسبه می‌شود.

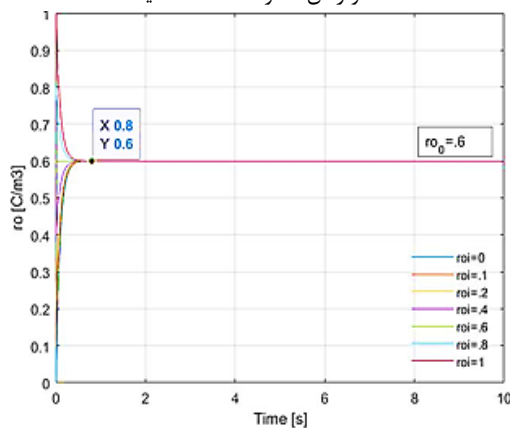
$$\tau = \frac{\epsilon}{\sigma} \quad (2)$$

با تحلیل معادله (۱) نتایج زیر حاصل می‌شود:

- ۱- شارژ اولیه ρ_i بعد از گذشت زمان نشست τ به سمت ρ_0 مقدار شارژی که در لوله اضافه می‌شود میل می‌کند و شارژ نهایی مایع سوخت در داخل لوله عدد ρ_0 خواهد بود (شکل ۳).
- ۲- با افزایش رسانایی سوخت زمان نشست کاهش می‌یابد بنابراین اثر شارژ اولیه ρ_i زودتر از بین می‌رود و به بدنه تخلیه می‌شود (شکل ۴).



شکل (۳). میزان شارژ الکتروسیسته ساکن در سوخت با رسانایی pS/m ۱۲ و زمان استراحت $1/48$ ثانیه



شکل (۴). میزان شارژ الکتروسیسته ساکن در سوخت با رسانایی pS/m ۱۲۰ و زمان استراحت $0/15$ ثانیه

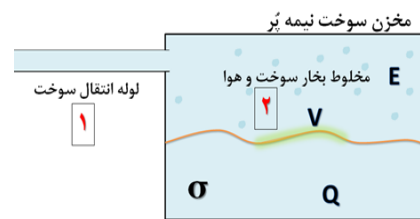
۲-۳- بار الکتريکی در سطح مشترک مجاری و سوخت

هنگامی که سوخت سیال با دیواره مجاری در تماس است،

آشفته سوخت درون لوله و مسیر پیچیده لوله شامل زانو نیز مطالعه شده است. همچنین بار الکتريکی تجمع یافته در مخازن سوخت هنگام عملیات سوخت گیری با استفاده از معادلات حاکم بر آن بررسی می‌شود.

۲- ایجاد بار الکتريکی در مجاری و مخازن سوخت

حرکت سوخت با سرعت زیاد داخل مجاری انتقال سوخت و همچنین برخورد سوخت به منافذ فوم داخل مخزن، تولید بار الکترواستاتیک می‌کند. در صورت تجمع بیش از حد این بار و وقوع تخلیه الکتروسیسته ساکن می‌تواند منجر به انفجار مخزن شود. چراکه مطابق شکل ۱ مخلوط بخار سوخت و هوا در بالای سطح سوخت آماده ترین ماده جهت اشتعال در داخل مخزن است. افزایش رسانایی سوخت مهم ترین راه جلوگیری از این خطر به واسطه تخلیه بار به بدنه فلزی مخزن است. فرآیندهایی که ممکن است موجب ایجاد بار الکتريکی ساکن در مجاری و مخازن سوخت شود شامل بار الکتريکی درون سیال، بار الکتريکی ناشی از اصطکاک سیال و مجاری سوخت و تجمع بار درون مخازن هنگام سوخت گیری می‌باشد. در ادامه معادلات حاکم بر هر یک تحلیل و بررسی می‌شوند.

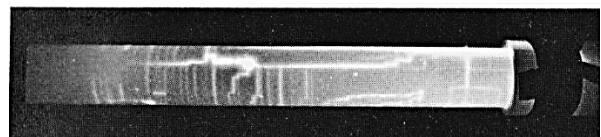


شکل (۱). مخزن سوخت و لوله انتقال سوخت

۳- لوله های انتقال سوخت

۳-۱- بار الکتريکی در درون سیال

بار الکتريکی درون سیال ممکن است ناشی از شارژ اولیه درون مخزن و یا اصطکاک درون سیالی باشد. در شکل ۲ تخلیه های الکتريکی درون یک لوله تفلونی متصل شده به فیلتر کاغذی با جریان ۱۵ گالن بر دقیقه و رسانایی 165 pS/m نشان داده شده است که اهمیت مطالعه این فرآیند را می‌رساند.



شکل (۲). تخلیه های الکتريکی درون یک لوله تفلونی [۱۲]

معادله حاکم بر بار درون لوله مطابق با رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۳].

$$\rho_{(t)} = \rho_i e^{-\frac{t}{\tau}} + \rho_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

این ضخامت به وجود آمده باعث ایجاد چگالی بارها در سطح مشترک مجاری و سیال می‌شود. چگالی بارهای الکتریکی به وجود آمده با ρ_ω نشان داده می‌شود و از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$\rho_\omega = Q \frac{r_0^2}{8} \left(\frac{\delta_0}{\alpha} \right)^{-2} \left(1 - 2 \frac{\delta_0}{\alpha} \frac{I_1 \left(\frac{\alpha \cdot r_0}{\delta_0} \right)}{I_0 \left(\frac{\alpha \cdot r_0}{\delta_0} \right)} \right)^{-1} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) Q میانگین چگالی بار جابجا شده توسط سیال است. r_0 شعاع لوله می‌باشد و α ضریب نفوذ یون است. I_1 تابع بسل بهبود یافته نوع اول و I_0 و تابع بسل بهبود یافته نوع صفر می‌باشد.

میانگین چگالی بار جابجا شده (Q) که از رابطه (۵) بدست می‌آید:

$$Q = \frac{I_S}{\pi r_0 U_m} \quad (۵)$$

که در آن I_S جریان جاری شده، r_0 شعاع لوله و U_m متوسط سرعت سیال است.

چگالی بارفضایی در دیواره لوله به‌عنوان تابعی از جریان جاری شده می‌باشد. با ترکیب رابطه (۵) و (۴) می‌توان جریان جاری را به‌صورت رابطه (۶) به دست آورد:

$$I_S = \rho_\omega U_m 8 \pi \left(\frac{\delta_0}{\alpha} \right)^2 \left(1 - 2 \frac{\delta_0}{\alpha} \frac{I_1 \left(\frac{\alpha \cdot r_0}{\delta_0} \right)}{I_0 \left(\frac{\alpha \cdot r_0}{\delta_0} \right)} \right) \quad (۶)$$

رابطه (۶) برای جریان آرام صدق می‌کند. اگر لایه الکتریکی به‌طور کامل در تمام لوله برای هر میزان جریان ایجاد شود، چگالی بار در دیواره لوله ρ_ω نیز ثابت خواهد بود و جریان الکتریکی ایجاد شده مستقیماً متناسب با سرعت حرکت سیال و شعاع لوله متغیر است.

برای جریان آشفته نیز باید عدد رینولدز^۱ را هم در نظر گرفت و رابطه جریان الکتریکی برای حرکت سیال به‌صورت آشفته به شکل رابطه (۷) خواهد شد.

$$I_S = \rho_\omega U_m 8 \pi \left(\frac{\delta_0}{\alpha} \right)^2 \left(1 - 2 \frac{\delta_0}{\alpha} \frac{I_1 \left(\frac{\alpha \cdot r_0}{\delta_0} \right)}{I_0 \left(\frac{\alpha \cdot r_0}{\delta_0} \right)} \right) \times Rn \quad (۷)$$

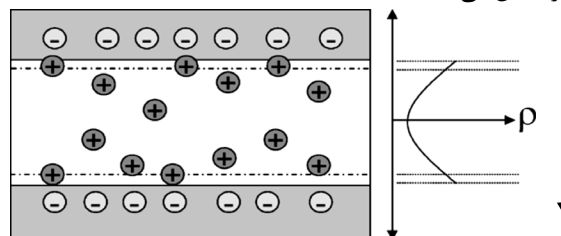
عدد رینولدز (Rn) آشفته‌گی در لوله‌ها را بیان می‌کند. هرچه عدد رینولدز بیشتر باشد آشفته‌گی و تلاطم در لوله‌ها بیشتر است. با استفاده از نرم‌افزار چند فیزیکی کامسول^۲ معادلات فوق برای یک لوله ساده و زانو دار توسعه‌یافته و نتایج آن در حالات مختلف

یک‌لایه شامل بار الکتریکی در سطح مشترک ایجاد می‌شود (شکل ۵). برای ایجاد این لایه، فرضیه‌های مختلفی مشتمل بر جذب یون‌های جدا شده در سیال یا فرآیند خوردگی در مجاری سوختی وجود دارد. جداسازی بار در سطح مشترک سیال و مجاری انجام می‌شود، که هر یک (سیال و بدنه مجاری) دارای بار مخالف می‌شوند. حرکت سیال موجب جابجایی الکترون‌ها می‌شود و بارهایی که در اثر اصطکاک با لوله‌ها بوجود آمده‌اند توسط سیال داخل لوله جابجا می‌شوند و مقدار آن به چگالی توزیع بار فضا وابسته است [۹].

مجاری رسانایی که به زمین وصل می‌شوند یک تعادل ایستا و پویا در بارهای ایجاد شده روی بدنه مجاری ایجاد می‌کند. بارهای موجود بر روی بدنه مجاری، آزادانه در امتداد سطح مجاری حرکت می‌کنند. هنگامی که بار توسط جریان سیال از لوله خارج می‌شود، بارهای موجود روی بدنه مجاری توسط سیم اتصال به زمین بلافاصله تخلیه می‌شود و هیچ‌گونه تجمع باری روی مجاری اتفاق نمی‌افتد. در مورد مجاری عایق یا رسانای بدون اتصال به زمین این‌گونه نیست. وقتی سیال شروع به حرکت در داخل مجاری می‌کند، تعادل استاتیک از بین می‌رود. هنگامی که بارهای موجود در مایع از لوله خارج می‌شوند، بارهای موجود بر روی بدنه مجاری آزاد نیستند و نمی‌توانند به‌سرعت تخلیه یا از بین بروند. سیال تازه‌وارد شده به مجاری باردار شده و در اثر این فرایند تجمع بار افزایش می‌یابد. در صورت انباشت بار به‌اندازه کافی، شرایط لازم برای تخلیه بارهای الکتریکی ایجاد می‌شود. ضخامت لایه الکتریکی تشکیل شده در سطح مشترک مجاری و سیال از رابطه (۳) به دست می‌آید [۹].

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{\epsilon D}{\sigma}} \quad (۳)$$

در رابطه ۳، σ هدایت الکتریکی، ϵ ثابت دی الکتریک سیال و D میانگین ضریب انتشار یون در سیال است. شکل ۵ لایه بارهای الکتریکی تشکیل شده در سطح مشترک سیال و مجاری را نشان می‌دهد.



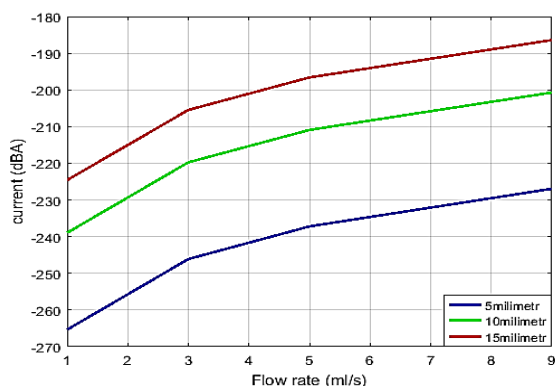
شکل ۵- لایه بارهای الکتریکی تشکیل شده در سطح مشترک سیال و مجاری [۹]

با عبور مداوم سیال از مجاری ضخامت لایه بارهای الکتریکی در سطح مشترک مجاری و سیال به‌مرور بیشتر شود و در نتیجه

¹ Reynolds number

² Comsol Multiphysics

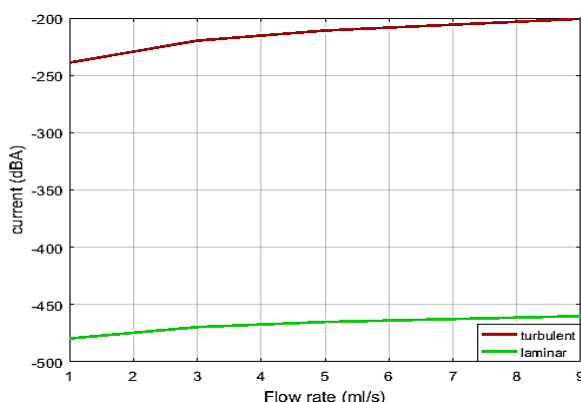
آشفته‌گی در شکل ۸ آمده است. نتایج نشان می‌دهد که در جریان آشفته نسبت به جریان آرام تولید بار الکتریکی بیشتر است. در جریان آشفته ابتدا جریان با توجه به سرعت حرکت سیال به آرامی افزایش می‌یابد اما وقتی سرعت سیال افزایش پیدا می‌کند جریان تولید شده به صورت خطی افزایش می‌یابد. در شکل ۸ شعاع‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ میلیمتری با یکدیگر مقایسه شده‌اند.



شکل (۸). جریان تولید شده در لوله با شعاع ۵، ۱۰ و ۱۵ mm برای جریان آشفته

مشابه شکل ۷ با افزایش شعاع لوله سطح جریان افزایش می‌یابد. شکل ۹ مقایسه جریان تولید شده را در جریان آرام و آشفته را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد تولید بار الکتریکی در جریان آشفته از جریان آرام بیشتر است چرا که تلاطم مایع سیال باعث می‌شود که مایع سطح تماس بیشتری با بدنه داشته باشد. نتایج شکل ۹ نشان می‌دهد که جریان سیال آشفته می‌تواند سطح جریان الکتریکی را تا ۲۵۰ dB افزایش دهد.

نمودار جریان باردار شدن ارائه شده در [۱۰] برای لوله با شعاع ۵ میلیمتر به دست آمده است که با مقایسه با نتایج شبیه‌سازی در شکل‌های ۷ و ۸ برای لوله حامل سوخت صحت آنها را تایید می‌نماید.

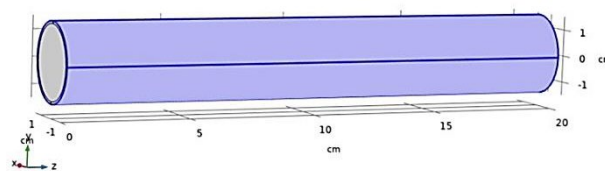


شکل (۹). جریان تولید شده در جریان آرام و آشفته (شعاع لوله ۱۰ میلیمتر)

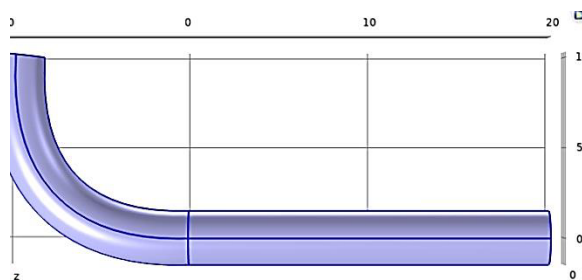
۳-۲-۳- بررسی اثر زانویی یا خمیدگی

در مجاری سوخت لوله‌ها دارای زانو یا خمیدگی هستند. وقتی

شامل سیال آرام یا آشفته، انواع سوخت و انواع لوله‌ها مطالعه شده است. لوله‌های شبیه‌سازی شده به صورت شکل ۶ (الف و ب) نشان داده شده است.



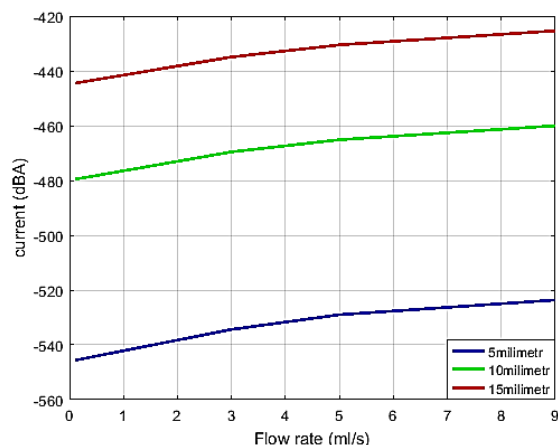
شکل (۶). (الف) لوله بدون زانو



شکل (۶). (ب) لوله همراه با زانو

۳-۲-۱- جریان سیال آرام

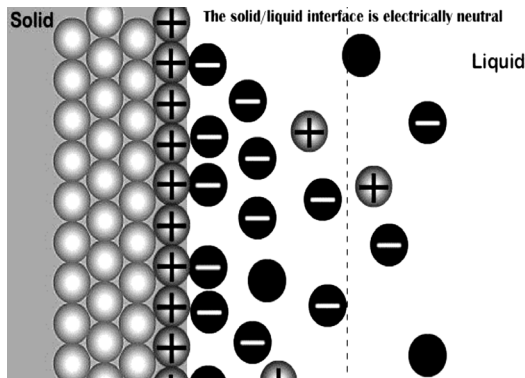
نتایج جریان الکتریکی در یک لوله با شعاع ۵، ۱۰ و ۱۵ میلیمتری برای حرکت سیال به صورت آرام با سرعت ۰/۱ تا ۰/۹ متر بر ثانیه در شکل ۷ نشان داده شده است. رفتار جریان الکتریکی نسبت به سرعت حرکت سیال به صورت خطی می‌باشد و با افزایش سرعت، جریان الکتریکی افزایش می‌یابد. اما این افزایش جریان به گونه‌ای نیست که باعث نگرانی شود. افزایش شعاع لوله باعث افزایش جریان الکتریکی می‌شود چرا که سطح تماس لوله با مایع سیال افزایش پیدا کرده است.



شکل (۷). جریان تولید شده در لوله با شعاع ۵، ۱۰، ۱۵ میلیمتر برای جریان آرام

۳-۲-۲- جریان سیال آشفته

رفتار جریان الکتریکی در جریان آشفته با توجه به تلاطم و



شکل (۱۱). فرآیند نفوذ بار در سطح تماس مایع و بدنه مخزن [۱۴]

ترکیب معادله (۸) با معادله بقای بار و فرض اینکه سوخت یک سیال تراکم ناپذیر است معادله انتشار بار الکتریکی (۹) را به دست می‌دهد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(r) + \frac{1}{\tau} \rho(r) + v \cdot \nabla \rho(r) - D_m \nabla^2 \rho(r) = 0 \quad (9)$$

باتوجه به شرایط مرزی مناسب، اکنون می‌توان چگالی بار را در هر مرحله از فرآیند پر شدن مخزن به دست آورد. اگر دیواره‌های مخزن رسانا باشند، باری که روی بدنه ایجاد می‌شود قطب مخالف سیال است. اگر سطح خارجی زمین شده باشد، بار خالص صفر می‌شود. در غیر این صورت، بار جمع می‌شود تا در نهایت تخلیه شود. فرض این است که بدنه مخزن به زمین وصل شده است و در زمان خالی بودن مخزن بار موجود در کف مخزن صفر است. برای حل تحلیلی راحت‌تر مخزن، استوانه‌ای شکل فرض می‌شود. محاسبات برای یک سلول مخزن هواپیمای متوسط انجام شده است. مقادیر شعاع و ارتفاع مخزن فرضی هست و سرعت سوخت‌گیری ۵۰ گالن بر دقیقه متناسب با هواپیماهای کوچک و متوسط است. با داشتن ابعاد مخزن و حجم مخزن و سرعت سوخت‌گیری، زمان پر شدن کامل و سرعت پر شدن عمودی به راحتی قابل محاسبه است.

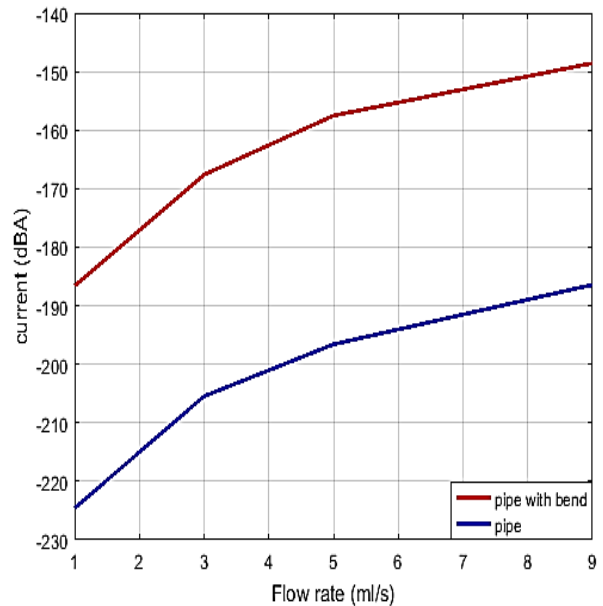
برای حل این معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی مفروضات جدول ۱ در نظر گرفته شده است.

با نوشتن معادله (۹) در دستگاه مختصات استوانه‌ای معادله (۱۰) به دست می‌آید.

$$V_z \frac{\partial}{\partial z} \rho(r) + \frac{1}{\tau} \rho(r) - \frac{D_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \rho(r) + \frac{\partial}{\partial t} \rho(r) - D_m \frac{\partial^2}{\partial r^2} \rho(r) - D_m \frac{\partial^2}{\partial z^2} \rho(r) = 0 \quad (10)$$

با فرض اینکه سرعت پر شدن مخزن یکنواخت است و سوخت‌گیری تا زمان پر شدن کامل متوقف نمی‌شود، می‌توان زمان t و ارتفاع z را متناظر و یک‌به‌یک در نظر گرفت.

سیال از درون لوله عبور می‌کند و به قسمت زانویی لوله می‌رسد دچار تنش و تلاطم بیشتر می‌شود و بار الکتریکی بیشتری تولید می‌شود. مطابق شکل ۶ ب لوله با زانو در نرم افزار مدل شده و جریان به دست آمده در آن بر حسب سرعت حرکت سیال برای جریان آشفته در شکل ۱۰ نشان داده شده و با لوله ساده بدون خم مقایسه شده است. خم زانویی باعث می‌شود سطح جریان حدود ۳۷ dB افزایش یابد.



شکل (۱۰). جریان الکتریکی در لوله شامل خم زانویی به صورت ۹۰ درجه و بدون زانو در لوله ۱۵ میلیمتری برای جریان آشفته

۴- مخزن سوخت

برای محاسبه چگالی بار الکتریکی $\rho(r)$ در هنگام پر شدن مخزن، به حل معادله انتشار بار الکتریکی نیاز می‌باشد. چگالی جریان را می‌توان مطابق با رابطه (۸) به صورت مجموع جریان رسانایی، جریان ناشی از همرفت بار توسط حرکت سیال با سرعت v و در آخر فرآیند نفوذ بار بیان کرد [۹].

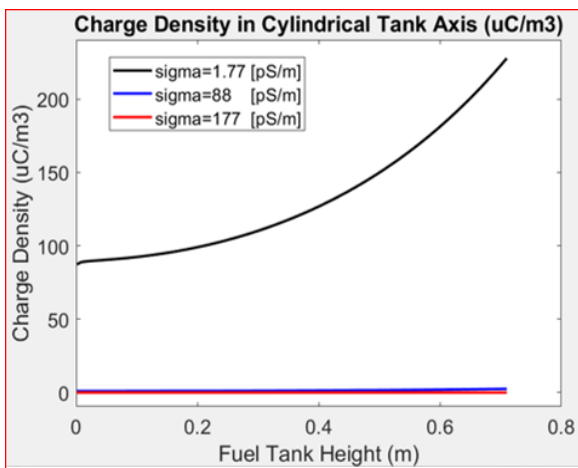
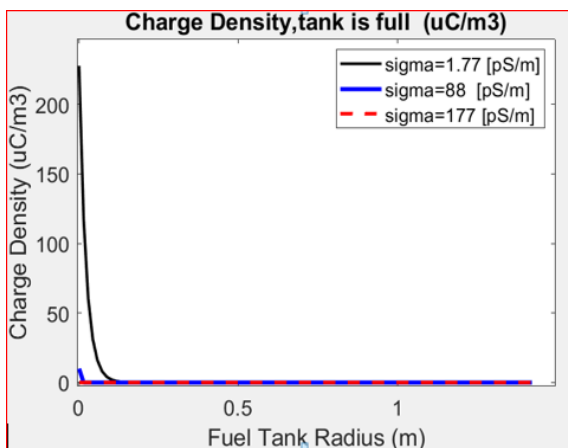
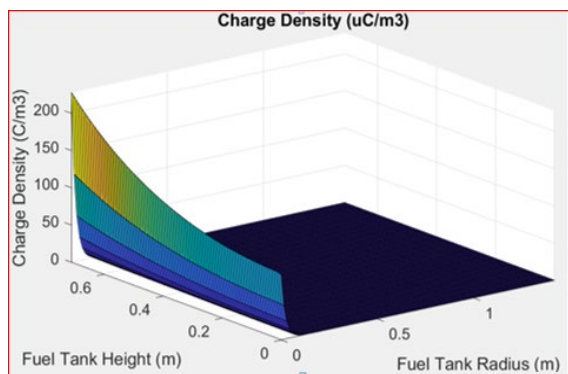
$$J(r) = \sigma E(r) + \rho(r)v - D_m \nabla \rho(r) \quad (8)$$

که در آن D_m ضریب نفوذ مولکولی است که مقدار آن در [۹] و [۱۴] برابر $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ است. فرآیند نفوذ بار مطابق شکل ۱۱ در محل سطح تماس مایع و بدنه به صورت مولکولی اتفاق می‌افتد و در حوزه علوم الکتروشیمی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۴-۱- مقایسه نتایج با مراجع

نتیجه حل معادله بار الکتریکی داخل مخزن که افزایش بار را با افزایش مقدار سوخت وارد شده به مخزن نشان می‌دهد تا حد زیادی وابسته به محل قرارگیری لوله ورودی است؛ اما در مراجع مختلف روند افزایشی بار تأیید می‌شود.

نتایج مراجع [۸] و [۱۵] هر دو به افزایش بار در اثر پر شدن مخزن اشاره دارد. مقایسه نتایج این مراجع با شکل ۱۲ صحت نتیجه به دست آمده را تأیید می‌نماید.



شکل (۱۲). بار داخل یک مخزن استوانه‌ای به شعاع ۱/۴۲ متر و ارتفاع ۰/۷۱ متر رسانایی سوخت به ترتیب ۱/۷ و ۸۸ و ۱۷۷ پیکو زیمنس بر متر

$$\rho\left(\frac{z}{H}\right) = \rho\left(\frac{t}{T}\right) \quad (11)$$

$$\rho(t) = \rho\left(\frac{zT}{H}\right) \quad (12)$$

به همین دلیل طبق معادله (۱۳) مشتق زمانی تبدیل به مشتق مکانی در راستای ارتفاع تبدیل می‌شود.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho(r) = \frac{H}{T} \frac{\partial}{\partial z} \rho(r) \quad (13)$$

بنابراین، با حذف زمان معادله (۱۰) به معادله (۱۴) تبدیل می‌شود.

$$(14)$$

$$\left(V_z + \frac{H}{T}\right) \frac{\partial}{\partial z} \rho(r) + \frac{1}{r} \rho(r) - \frac{D_m}{r} \frac{\partial}{\partial r} \rho(r) - D_m \frac{\partial^2}{\partial r^2} \rho(r) - D_m \frac{\partial^2}{\partial z^2} \rho(r) = 0$$

حل معادله (۱۱) با اعمال شرط مرزی $\rho(r,0) = 0$ در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. دقت شود که در شکل ۱۲ مخزن کامل پر شده است و تغییرات چگالی بار نسبت به شعاع و ارتفاع رسم شده است. مقدار بار تجمع یافته داخل مخزن به این صورت است که در محور مرکزی مخزن استوانه‌ای حداکثر است و هرچه از کف مخزن سوخت پر می‌شود تا به سقف مخزن برسد بار بیشتری انباشته می‌شود.

جدول ۱- مقادیر متغیرهای مورداستفاده در حل معادله بار مخزن

متغیر	نماد	مقدار	واحد	مراجع مقادیر
ضریب دی‌الکتریک سوخت	ϵ_r	۲	-	[۱۲] و [۱۳]
رسانایی سوخت	σ	۱/۷ و ۸۸ و ۱۷۷	pS/m	[۸]
ثابت زمانی تخلیه بار	τ	۰/۱ و ۰/۲ و ۱۰	ثانیه	[۱۰]
نرخ سوخت‌گیری	FR	۵۰	گالن بر دقیقه	
شعاع مخزن استوانه‌ای	R	۱/۴۲	متر	
ارتفاع مخزن استوانه‌ای	H	۰/۷۱	متر	
زمان سوخت‌گیری کامل	T	۱۴۲۰	ثانیه	
ضریب نفوذ مولکولی	D_m	10^{-6}	m^2/s	[۹] و [۱۴]
سرعت پر شدن مخزن	V_z	۰/۰۰۰۵۱۸۱	m/s	

- Electricity Aircraft Interaction. AGARD Lecture Series 1980, No.110,
- [2]. J. E. Nanevicz and R. L. Tanner, "Some techniques for the elimination of corona discharge noise in aircraft antennas," in Proceedings of the IEEE, 1964, 52(1), pp.53-64 DOI: 10.1109/PROC.1964.2742
 - [3]. J. E. Nanevicz, "Alleviation Techniques For Effects Of Static Charging On Avionics", North Atlantic Treaty Organization, Atmospheric Electricity Aircraft Interaction, AGARD Lecture Series, 1980, No.110
 - [4]. R. L. Tanner and J. E. Nanevicz, "Precipitation charging and corona-generated interference in aircraft", Stanford Res. Inst., Menlo Park, CA, Tech. Rep. 73, Contract AF 19(604)-34-58, Stanford Research Institute, 1961
 - [5]. H. Xie, Z. Huang, S. Guo, E. Torru, "Feasibility of an Electrostatic Energy Harvesting Device for CFCs Aircraft", Procedia Engineering, 2015, 99, pp.1213-1222 DOI:10.1016/j.proeng.2014.12.650
 - [6]. K.Y. Chan, D.Q. Pham, B. Demir, D. Yang, E.L.H. Mayes, A.P. Mouritz, A.S.M. Ang, B. Fox, H. Lin, B. Jia, K.T. Lau, "Graphene oxide thin film structural dielectric capacitors for aviation static electricity harvesting and storage" Composites Part B: Engineering, 2020, 201, pp 108375, DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108375
 - [7]. Jay D. Cline, "AIRCRAFT STATC DSCHARGER", United States Patent, 4,080,643 Mar. 21, 1978
 - [8]. E. Radgowski, R. Albrecht, "Investigation of electrostatic discharge in aircraft fuel tanks during refueling", AIAA Aircraft Systems and Technology Conference, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Los Angeles, Calif, 1978, 506-512. DOI:10.2514/3.58555
 - [9]. J. V. Garcia, J. Rivenc, A. Agneray, T. Paillat, G. Touchard, "A critical approach to measure streaming current: Case of fuels flowing through conductive and insulating polymer pipes", IEEE Transactions On Industry Applications, 2005, 41(5), pp 1335-1342, DOI: 10.1109/TIA.2005.853378
 - [10]. J. Rivenc, P. Clermout, T. Paillat and et al, "Quantification of Electrostatic Charge Generation and Relaxation in Composite Aircraft Fuel Tanks," International Conference on Lightning and Static Electricity, 2015, DOI: 10.1049/ic.2015.0162
 - [11]. K. Lim, Y. Sun, W. Lim and S. Soh, "Charging Organic Liquids by Static Charge," Journal of The American Chemical Society, 2020, DOI: 10.1021/jacs.0c06000
 - [12]. M. R. Shafer, D. W. Baker, K. R. Benson, "Electric currents and potentials resulting from the flow of charged liquid hydrocarbons through short pipes", Journal Of Research Of The National Bureau of Standards-Co Engineering and Instrumentation, 1965, 69C(4), pp 307-317, DOI:10.6028/JRES.069C.036
 - [13]. N. E. Pegg, "An electrostatic charging model for aircraft fuel tanks", IET 7th International

۵- پیشنهادات برای کاهش بار ساکن

- ۱- سعی شود سوخت، حداقل رسانایی الکتریکی لازم را داشته باشد.
- ۲- حتی‌الامکان از ایجاد زائده و تغییر مسیر در مجاری سوخت اجتناب شود.
- ۳- مخازن سوخت به آرامی پر شود و از پر شدن مخازن با سرعت بالا اجتناب گردد.
- ۴- مخازن و مجاری سوخت حداقل رسانایی الکتریکی لازم را داشته باشند و در نقاط مناسب به زمین الکتریکی متصل شوند.
- ۵- از ایجاد تلاطم و آشفتگی سوخت در مخازن و مجاری اجتناب شود.

۶- نتیجه‌گیری

مقدار بار الکتریکی تولید شده در لوله بستگی به سرعت حرکت مایع سیال و شعاع لوله دارد. جریان آشفته در به‌وجود آمدن بار الکتریکی تأثیر بسزایی دارد و می‌تواند تا 250 dB سطح جریان را افزایش دهد. هر نوع زائده‌ای در لوله‌ها باعث به‌وجود آمدن بار الکتریکی می‌شود. این زائده ممکن است خمیدگی یا زانو باشد و یا برآمدگی در داخل لوله که مایع سیال پس از برخورد به آن دچار تلاطم شود. هر عاملی که باعث به‌وجود آمدن تلاطم و آشفتگی در مایع سیال شود باعث می‌شود بار الکتریکی بیشتری تولید شود. یک خم زانویی در مسیر سیال می‌تواند سطح جریان الکتریکی تولیدی را تا 37 dB افزایش دهد.

سرعت بالای سوخت‌گیری و در مواردی مثل هواپیماهای نظامی که مخزن مجهز به فوم سرکوب‌کننده انفجار باشد بر خورد سوخت با فوم داخل مخزن نیز منجر به تولید بار ساکن می‌شود. افزایش رسانایی سوخت تا بیش از ۱۰۰ پیکو زیمنس بر متر به کمک مواد افزودنی راه‌حل مناسبی برای تخلیه سریع‌تر بار ساکن در لوله‌ها و فیلترها و مخازن سوخت است. البته به شرطی که محفظه و بدنه فلزی بوده و متصل به زمین الکتریکی باشد. افزایش رسانایی همچنین باعث می‌شود در صورت وجود بار اولیه در انبار سوخت، بار اولیه در زمان کمتر از ۱ ثانیه تلف شود. حل معادله انتشار بار الکتریکی نشان می‌دهد که عمده بار در مرکز مخزن تجمع پیدا می‌کند و هرچه به سمت دیواره‌ها پیش می‌رود مقدار بار بسیار کم‌تر می‌شود؛ بنابراین پیداکردن راهی جهت تخلیه بار موجود در مرکز مخزن مفید خواهد بود.

۷- مراجع

- [1]. J. Taillet, "Basic Phenomenology of Electrical Discharges at Atmospheric Pressure", North Atlantic Treaty Organization, Atmospheric

- Insulation,2016,23(2),pp 624-632, DOI: 10.1109/TDEI.2015.005332
- [15].A. Sidi-Yekhlef, J. E. Sunderland, "A boundary element method analysis of electrostatics in a tank during filling operations", International Journal For Numerical Methods In Engineering, 1989, 28, pp 315-329, DOI: 10.1002/nme.1620280206
- Conference on Computation in Electromagnetics (CEM 2008), BAE Systems Advanced Technology Centre, 2008, 102 – 103, DOI:10.1049/cp:20080232
- [14].P. D. S. Clermont, T. Paillat, G. Peres, Y. Duval, J. Rivenc," Materials for aircraft fuel tanks characterized for charge generation from flow electrification with jet a-1 fuel", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical