

پژوهشنامه علوم دفاعی، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۷

ص ص ۴۹ تا ۷۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۰

مدل سازی پلاسموئید ناشی از رادیونوکلئیدهای موجود در سطح زمین به منظور پایش آلودگی هسته‌ای از راه دور

محمد نیکو صفت^۱، اردشیر باقری^۲، زهرا شهبازی راد^۳

چکیده

در سطوحی از زمین که به علت یک رویداد پرتویی توسط رادیونوکلئیدها آلوده شده باشند، پرتوایی آلودگی هسته‌ای منجر به ایجاد یونش و برانگیزش در اتمسفر شده و در نتیجه یک پلاسمای کم‌دمای شبه خنثی با یونیزاسیون ضعیف در جو بالای ناحیه‌ی آلوده شده شکل می‌گیرد. در حال حاضر روش‌های زیادی برای سنجش‌ازدور زمین وجود دارد که امکان شناسایی مناطقی با آلودگی هسته‌ای گسترده را فراهم می‌کند. این روش‌ها به اصول فیزیکی متنوعی متکی هستند و هر کدام محدودیت‌ها، مزایا و کاستی‌های خاصی دارند. به هنگام توسعه‌ی سامانه‌های پایش هوایی مناطق دارای آلودگی هسته‌ای، استفاده از مدل توزیع فضایی الکترون - یون پلاسمای کم‌دمای شکل گرفته بر روی مناطق و خاک‌های بسیار آلوده، یک روش بدیع و مؤثر خواهد بود. این مدل بیانگر خصوصیات فضایی منحصربه‌فرد توزیع چگالی الکترون - یون پلاسمای شکل گرفته است و با استفاده از آن می‌توان آلودگی هسته‌ای سطحی خاک‌ها و قلمروها را از راه دور با اطمینان شناسایی کرد. توسعه‌ی فناوری‌های سنجش‌ازدور آلودگی هسته‌ای از آنجایی قابل اهمیت است که برای مناطق به‌شدت آلوده‌ای مثل راکتورهای هسته‌ای آسیب دیده، حتی اقامت انسان برای مدت زمان بسیار کوتاه، کشنده است و لذا به جهت سنجش آلودگی، از روش‌های تشخیصی از راه دور باید استفاده نمود. در این پژوهش، اصول کلی روش پلاسمایی پایش آلودگی هسته‌ای از راه دور ارائه می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل شده، توسعه‌ی فناوری پلاسمایی پایش آلودگی هسته‌ای از راه دور، نقش مهمی در تحقق اهداف ایمنی سرزمینی و پدافند غیرعامل خواهد داشت.

واژگان کلیدی: آلودگی هسته‌ای، پلاسمای ناشی از رادیونوکلئید (پلاسموئید)، پایش از راه دور، ایمنی سرزمینی.

۱. دانشجوی دکتری تخصصی فیزیک هسته‌ای، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

ایمیل (*نویسنده مسئول): mohammad.nikoosefat91@gmail.com

۲. هیأت علمی گروه فیزیک، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران.

۳. دکتری تخصصی مهندسی هسته‌ای، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

مقدمه

در این مقاله یک مدل ساده از خاک آلوده شده‌ای را در نظر می‌گیریم که به علت فرونشست رادیونوکلئید در آن، در جو بالای ناحیه‌ی مرکزی تشعشعات یونیزان حاصل از خاک آلوده شده‌ی سطح زمین (مثلاً جو بالای یک راکتور هسته‌ای تخریب شده)، یک ابر رادیواکتیو شکل گرفته و در جهت باد در فضا توزیع می‌شود. در اتمسفر بالای سطوحی از زمین که توسط رادیونوکلئیدها آلوده شده باشند، پلاسموئیدهای^۱ کم دمای دارای یونیزاسیون ضعیف شکل می‌گیرد و این پلاسموئیدها متأثر از خطوط میدان مغناطیسی زمین می‌باشند. این پلاسموئیدها در نتیجه‌ی گسیل مداوم گاما (γ) از رادیونوکلئیدهای موجود در خاک‌های سطحی ایجاد می‌شوند. شکل، اندازه و خصوصیات یونیزاسیون پلاسموئیدها به میزان آلودگی رادیواکتیو سطح زمین، تراکم شار و انرژی فوتون‌های گاما بستگی دارد (Sukhorukov(2011)، Novikov(2016)).

پلاسموئید یک ساختار منسجم از پلاسما و میدان مغناطیسی است. پلاسموئیدها برای توضیح پدیده‌های طبیعی مانند رعدوبرق تویی^۲ (Silberg(2013)، Friday Silberg(2013)، حباب‌های مغناطیسی موجود در مگنتوسفر^۳ (Hones (1976)، دُم یونی و نورانی ستاره‌های دنباله‌دار^۴ Roosen (1976)، پدیده‌های مربوط به بادهای و اتمسفر خورشیدی (Lemaire (1981)، Wang(1988) و صفحه‌ی جریان هلیوسفری^۵ پیشنهاد شده‌اند (Smith (2001)). همچنین در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی نیز پلاسموئیدها از طریق ابزارهایی مثل پلاسما فوکوس^۶ قابل تولید هستند. واژه‌ی پلاسموئید در سال ۱۹۵۶ توسط وینستون اچستونیک بوستیک^۷ (۱۹۹۱-۱۹۱۶) به معنای «موجودیت پلاسمای متأثر از میدان مغناطیسی»^۸ ابداع شد و برای نامیدن همه‌ی پلاسماهای متأثر از میدان مغناطیسی به کار می‌رود. پلاسمای موجود در پلاسموئید به صورت بی‌شکل نیست بلکه با توجه به شرایط فیزیکی موجود، می‌تواند هندسه‌ی خاصی داشته باشد. در یک تعبیر می‌توان گفت پلاسموئیدها استوانه‌های پلاسمایی هستند که در جهت میدان مغناطیسی اعمال شده بر آن‌ها کشیده می‌شوند. پلاسموئیدها دارای ممان

-
1. Plasmoid
 2. Ball Lightning
 3. Magnetosphere
 4. Cometary Ionic Tails
 5. Heliospheric Current Sheet
 6. Plasma Focus
 7. Winston H. Bostick
 8. Plasma-Magnetic Entity

مغناطیسی قابل اندازه‌گیری، سرعت قابل اندازه‌گیری^۱، میدان الکتریکی عرضی یا متقاطع^۲ و ابعاد قابل اندازه‌گیری می‌باشند. ظاهراً پلاسموئیدها می‌توانند با یکدیگر در تعامل و اندرکنش باشند. پلاسموئیدها اگر به گازی با محدوده‌ی فشار 10^{-3}mmHg وارد شوند، به‌صورت مارپیچ‌وار^۳ متوقف خواهند شد. پلاسموئید دارای یک فشار داخلی است که از فشار گاز پلاسما و فشار مغناطیسی میدان^۴ ناشی می‌شود. برای حفظ شعاع تقریباً ایستای یک پلاسموئید، این فشار باید با فشار خارجی در تعادل باشد. به‌عنوان مثال، در یک خلأ و بدون حضور میدان مغناطیسی، یک پلاسموئید به‌سرعت گسترش می‌یابد و از بین می‌رود ((Bostick(1956)). بوستیک در ادامه، تئوری پلاسموئیدهای خود را در مورد پدیده‌های اخترفیزیک به کار برد. وی در مقاله‌ی خود در سال ۱۹۵۸، از خصوصیات اندرکنشی پلاسموئیدهای تولید شده در آزمایشگاه برای شبیه‌سازی مدل اولیه‌ی تشکیل کهکشان استفاده کرد و در این راستا از یک دستگاه پلاسما فوکوس قدرتمند بهره گرفت ((Bostick(1958)، Bostick (1986)، Laurence(1956).

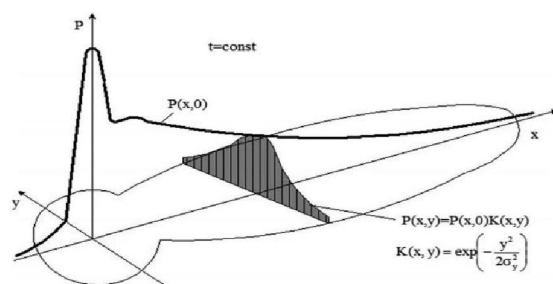
یونیزاسیون هوای اتمسفر که به علت پرتوزایی آلودگی هسته‌ای سطحی رخ می‌دهد، اساساً یک فرایند پایدار و ثابت نیست. به‌طور کلی، غلظت‌های الکترون - یونی متناسب با فعالیت (نرخ دز تابشی)^۵ رادیونوکلئیدهای پخش شده در سطح زمین است و روابط مربوط به این پدیده می‌تواند اشکال مختلفی به خود بگیرد. الکترون‌های ثانویه‌ی کامپتونی^۶ تولید شده به علت اندرکنش پرتوهای گاما با مولکول‌های هوا، بیشترین نقش را در یونیزاسیون مولکول‌های هوای جو ایفا می‌نمایند. تابش β به‌طور کامل توسط لایه‌ای از هوا به ارتفاع چندین متر جذب می‌شود و تابش α نیز توسط لایه‌ای از هوا به ارتفاع چندین سانتی‌متر جذب می‌شود؛ بنابراین، می‌توانیم فرض کنیم یونیزاسیون اتمسفر فقط توسط اشعه‌ی گامای ساطع شده از آلودگی هسته‌ای سطح خاک رخ می‌دهد. در مورد تخریب و از کار اندازی^۷ راکتورهای هسته‌ای، در فضای اطراف و روی راکتور، تابش شدید نوترون وجود خواهد داشت که توسط لایه‌ای از هوا به ارتفاع چندین کیلومتر جذب خواهد شد. طول مسیر آزاد^۸ فوتون‌های گاما در شرایط جوی استاندارد به انرژی آن‌ها و چگالی هوا بستگی داشته و این طول در محدوده‌ی

-
1. Translational Speed
 2. Transverse Electric Field
 3. Spiral
 4. Magnetic Pressure of the Field
 5. Activity (Radiation Dose Rate)
 6. Secondary Compton-Electrons
 7. Decommissioning
 8. Free Path Length

۱۰۰ تا ۵۰۰ متر است. تراکم الکترون - یون در محدوده‌ی معینی از ارتفاعات هوا به چگالی شار پرتوهای گاما بستگی داشته و مطابق با قانون تضعیف پرتوهای گاما توسط لایه‌های هوا، به آرامی تغییر می‌کند (Kovkov(2017)).

مواد و روش‌ها

به منظور مدل‌سازی فرآیند مذکور، شکل (۱) نشان‌دهنده‌ی وضعیت نرخ دز پرتوهای گامای دنباله‌ی ابر رادیواکتیو ناشی از آلودگی هسته‌ای خاک‌های سطحی در دستگاه مختصات متصل به زمین است. در این مختصات، مقادیر متوسط بادهای جوی در نظر گرفته می‌شود و بیان‌گر انعکاس ضعیفی از دینامیک کلی استقرار ابر رادیواکتیو در اتمسفر بالای خاک سطحی آلوده شده است (Kovkov(2017)). منطقه به صورت فرضی انتخاب شد و لذا دارای موقعیت جغرافیایی مشخصی نیست و نیز از اطلاعات پرتویی مربوط به یک راکتور هسته‌ای آب تحت فشار با سوخت دی‌اکسید اورانیوم که فرض کرده‌ایم دچار حادثه پرتویی شده است، استفاده نمودیم (Willett(2020)).

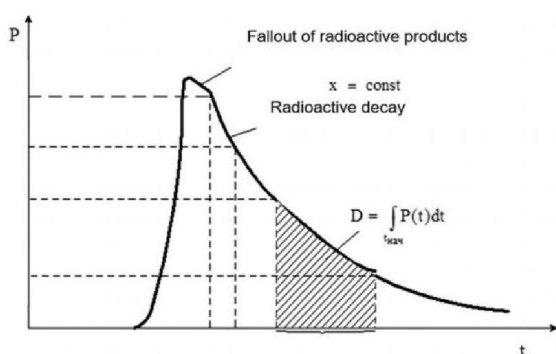


شکل (۱): تغییر در نرخ دز پرتوی گاما در دنباله‌ی ابر رادیواکتیو ناشی از آلودگی هسته‌ای خاک‌های سطحی (Kovkov(2017)).

با این حال، برای سهولت در مدل‌سازی اغلب پلاسموئیدها، این فرضیات قابل توجیه است که منحصر به فرد بودن خصوصیات فضایی پلاسموئیدها در چارچوب فرآیند توزیع شدن توده‌های الکترون - یون (از سطح خاک‌های آلوده به سوی ارتفاعات جوی) قرار می‌گیرد که در آن، یونیزاسیون هوا نهایتاً در ارتفاع خاصی متوقف خواهد شد. برای شفاف‌سازی، در نزدیکی راکتور هسته‌ای فرضی تخریب شده، منطقه‌ی دارای خاک‌های آلوده می‌تواند توسط یک دایره با شعاع مشخص تقریب یابد. در این حالت، مدل‌سازی پلاسموئیدها ساده‌تر خواهد بود، زیرا در این حالت می‌توان حرکات توده‌های هوا

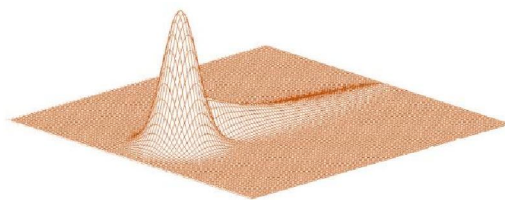
را کاملاً نادیده گرفت. در این حالت، به علت امکان اغماض کامل از حرکت توده‌های هوا، مدل‌سازی پلاسموئیدها ساده‌تر خواهد بود ((Voenzdat, Moscow(1963)).

شکل (۲) نشان دهنده‌ی وابستگی شناخته شده‌ی نرخ دز پرتوی گامای آلودگی هسته‌ای خاک‌های سطحی به زمان است. این وابستگی با قانون واپاشی رادیواکتیو مطابقت دارد و فرآیندهای موجود در دنباله‌ی ابر رادیواکتیو را به دقت نشان می‌دهد. این فرآیندها در آزمایش انفجارهای هسته‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. علی‌رغم وجود ترکیبات مختلف رادیونوکلئیدی ناشی از تخریب راکتورهای هسته‌ای، در مدل‌سازی موردنظر، چنین وابستگی را می‌توان بدون شاخص‌های زمانی خاص در نظر گرفت ((Voenzdat, Moscow(1963)).



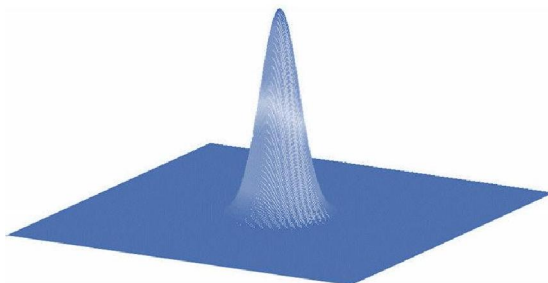
شکل (۲): تغییر در نرخ دز پرتوی گاما نسبت به زمان در دنباله‌ی ابر رادیواکتیو ناشی از آلودگی هسته‌ای خاک‌های سطحی ((۲۰۱۷) Kovkov).

با توجه به این حقیقت که چگالی الکترون - یون در حجم هوای اولیه به نرخ دز پرتوهای یونیزان در همان حجم بستگی دارد و نیز تغییرات نرخ دز در فضا مطابق با نمودار شکل (۱) نشان داده شده است، مطابق با توضیحات و فرضیات گفته شده، فرم مشروط پلاسموئید شکل گرفته در فضای بالای دنباله‌ی ابر رادیواکتیو به صورت شکل (۳) خواهد بود ((Kovkov(2017):



شکل (۳): فرم پلاسموئید شکل گرفته در نزدیکی راکتور هسته‌ای تخریب شده و بالاتر از دنباله‌ی ابر رادیواکتیو ((Kovkov(2017).

شکل (۴) تصویر ساده‌ای از پلاسموئید شکل گرفته برای یک مدل دایره‌ای از منطقه‌ی آلوده در نزدیکی راکتور هسته‌ای تخریب شده را نشان می‌دهد. از آنجایی که چگالی الکترون - یون در داخل چنین پلاسموئیدهایی به‌طور غیریکنواخت توزیع می‌شود و این چگالی با ارتفاع و فاصله‌ی افقی از راکتور هسته‌ای تخریب شده کاهش می‌یابد، چنین شکل‌هایی منطقی به نظر می‌رسد (Kovkov(2017)).



شکل (۴): فرم پلاسموئید شکل گرفته برای مدل دایره‌ای منطقه آلوده‌ی نزدیک به راکتور هسته‌ای تخریب شده (Kovkov(2017)).

بر مبنای فیزیک پلاسموئیدها، یک روش پیشنهادی برای شناسایی مناطقی با آلودگی هسته‌ای سطحی شدید، روش تصویربرداری رادیو - موج فعال^۱ با استفاده از هواپیما، ماهواره‌های فضایی یا فضاپیما است. توسعه‌ی سریع الکترونیک رادیویی و فناوری‌های دیجیتال منجر به تسریع در تکامل روش تصویربرداری رادیو - موج شد. امروزه تصویربرداری رادیو - موج در محدوده‌ی باند رادیویی می‌تواند برای نظارت بر اشیاء با سطح قابل توجهی از جزئیات به کار آید به‌گونه‌ای که حتی برای پدیده‌هایی که در محدوده‌ی اپتیکی^۲ غیرقابل مشاهده هستند، قابل استفاده است. یکی از کاربردهای تصویربرداری رادیو - موج، شناسایی پلاسمای کم‌دمای دارای یونیزاسیون ضعیف موجود در جو روی مناطقی است که توسط رادیونوکلئیدها به‌شدت آلوده شده‌اند، به‌گونه‌ای که اثر آلودگی هسته‌ای از تابش زمینه‌ی^۳ محیط‌زیست قابل تفکیک می‌باشد (Voenzdat, Moscow(1963)).

1. Active Radio-Wave Imagery
2. Optical Range (1mm – 100nm)
3. Background Radiation

طبقه‌بندی دقیق روش‌های سنجش‌ازدور زمین که امکان شناسایی مناطقی با آلودگی گسترده‌ی هسته‌ای را فراهم می‌کنند در (Sukhorukov(2011) ارائه شده است. استفاده از شبیه‌سازی یک سیستم تصویربرداری رادیو - موج مبتنی بر فلسفه‌ی عملکردی رادار^۱ SAR که از سطح زمین تصویربرداری می‌نماید برای پایش فضایی و هوایی فعال مناطقی که به‌طور گسترده توسط رادیونوکلئیدها آلوده شده‌اند، یک روش بدیع و بسیار مؤثر است. در این روش از پلاسما کم‌دمای دارای یونیزاسیون ضعیف شکل گرفته در هوای روی مناطق آلوده شده توسط رادیونوکلئیدها (پلاسما رادیونوکلئید^۲) یک تصویر راداری تهیه می‌شود. به‌عبارتی دیگر، مسئله‌ی مورد بررسی، تجسم و تصویرسازی اجزای تشکیل دهنده‌ی پلاسما و امکان تمایز آن‌ها از تابش زمینه‌ی محیط‌زیست است. طول‌موج‌های تابشی برآیند حاصل از گونه‌های فعال پلاسما رادیونوکلئید در محدوده‌ی 1mm تا 100nm (فرابنفش، مرئی و فروسرخ) نیست^۳. به‌طورکلی، سیگنال‌های راداری و سیگنال‌های بازتاب شده توسط سطح زمین به علت ویژگی‌های منحصربه‌فرد پلاسما به‌طور موفقیت‌آمیزی مدوله^۴ می‌شوند (Voenzdat, Moscow(1963).

تصویر به‌دست‌آمده از هواپیمایی که بر روی جو زمین پرواز می‌کند تا حدودی با آنچه که از ماهواره یا سفینه‌ی فضایی متحرک در فضا حاصل می‌شود، از نظر ابعادی و خصوصیات فیزیکی متفاوت است. از فیزیک انتشار امواج EM می‌دانیم که هرچه‌قدر طول‌موج امواج کوتاه‌تر شود، میزان اثرگذاری امواج بر محیط انتشار و خصوصیات هواشناسی جوی بیشتر و مؤثرتر می‌شود. امواج کوتاه‌تر وضوح خوبی را ارائه می‌دهند اما به‌شدت تحت تأثیر خصوصیات هواشناسی جو (ابرها، باران و...) قرار می‌گیرند. برای امواج EM در محدوده‌ی متر، حتی گیاهان و لایه‌های فوقانی خاک شبه شفاف^۵ (با وضوح ضعیف) هستند، اما نسبت به آن‌ها، از پلاسما شکل گرفته در هوا تصویر واضح‌تری به دست می‌آید. امواج SAR هوابرد می‌تواند به‌عنوان امواج کاوشگر رادیویی مورد استفاده قرار گیرد. طول‌موج بلندتر امواج SAR نسبت به امواج باند S نشان می‌دهد که SARها به پلاسما حساس‌تر هستند. به علت این‌که یونوسفر برای امواج باند S مات است، سیستم‌های موجود در فضاپیماها و ایستگاه‌های فضایی نمی‌توانند از امواج باند S استفاده کنند. ترابرد کوتاه‌ترین امواج EM (پرتوهای X و گاما) در جو

1. Side-Looking Synthetic Aperture Radar
2. Radionuclide Plasma
3. Invisible in an Optical Range
4. Modulated
5. Translucent

به شدت متأثر از دما و فشار هوا است. لایه های هوایی نسبتاً متراکم نزدیک به سطح زمین برای پرتوهای گاما مات هستند به گونه ای که پرتوهای گاما در یک ضخامت چند صد متری از هوا جذب می شوند. در مورد موضوع مورد بحث ما، پرتوهای گاما به عنوان عامل اصلی تولید پلاسما در اتمسفر (پلاسموئید یا پلاسمای رادیونوکلئید) در نظر گرفته می شوند، یعنی همان پلاسمایی که با استفاده از امواج رادیویی قصد پایش آن را داریم. برای تهیه مدل سه بعدی پلاسمای رادیونوکلئید شکل گرفته در جو بالای آلودگی هسته ای سطح زمین (ناشی از یونیزاسیون هوا توسط پرتوهای گاما) از این اصول استفاده می شود. همچنین به منظور بهبود کارایی در تصویربرداری رادیو - موج، فقط از امواج پذیرفته شده بین المللی IEEE به عنوان امواج کاوشگر پلاسما استفاده می شود (Voenzdat, Moscow(1963)).

موضوع انتشار امواج الکترومغناطیسی تاکنون توسط دانشمندان زیادی به طور جدی مورد مطالعه قرار گرفته است (Jahoda(1971)، Alpert, J.L. (1972)، Hild(1968)). بسیاری از اصول مطالعه شده، امروزه به عنوان مبنایی برای توسعه ای ابزارهای تشخیصی پلاسما مورد استفاده قرار می گیرد. برای محدوده ی فرکانسی فعالیت اکثر سیستم های تصویربرداری هوا برد و فضا برد^۱، این امکان فراهم می شود تا بتوانیم از معادلات شناخته شده ی میدان های الکترومغناطیسی با واحدهای گوسین^۲ (به منظور توصیف انتشار و جذب امواج EM در پلاسمای همسانگرد یکنواختی که دارای خصوصیات متغیر است) در راستای توسعه ی روش پیشنهادی مورد نظرمان استفاده کنیم (Boyarchuk, K.A. (2000)، Ginzburg, V.L. (1967)). معادلات عمومی میدان الکترومغناطیسی با واحدهای گوسین برای پلاسما به شرح زیر است (Voenzdat, Moscow(1963)):

$$\text{rot}\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (۱)$$

$$\text{rot}\mathbf{H} = \frac{4\pi\mathbf{J}}{c} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (۲)$$

$$\text{div}\mathbf{E} = 4\pi\rho \quad (۳)$$

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} \quad (۴)$$

که در آن، E بردار میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی منتشر شده در حجم، H بردار میدان مغناطیسی موج الکترومغناطیسی منتشر شده در حجم، J بردار چگالی جریان موجود در حجم، ρ چگالی بار

1. Spaceborne
2. Gaussian Units

موجود در حجم و σ رسانایی ویژه است. پس از یافتن راه حل برای معادلات فوق و با در نظر گرفتن شرایط مرزی محیط پلاسما، می توان انتشار امواج EM در پلاسمایی که چگالی الکترون - یون کمی دارد را مورد بررسی قرار داد. برای این منظور فرض می کنیم نسبت چگالی پلاسما به چگالی بحرانی به مراتب کمتر از ۱ باشد (Voenzdat, Moscow(1963):

$$\omega \gg \omega_{pe} \Rightarrow \omega^2 \gg \omega_{pe}^2 \Rightarrow \frac{4\pi n_k e^2}{m_e} \gg \frac{4\pi n_e e^2}{m_e} \Rightarrow n_k \gg n_e \Rightarrow \frac{n_e}{n_k} \ll 1 \quad (5)$$

که در آن:

$$n_k = \frac{m_e \omega^2}{4\pi e^2} \quad (6)$$

رابطه $\omega \gg v$ به این معنی است که در عدد مختلط رسانایی پلاسما، مؤلفه ی حقیقی رسانایی پلاسما به طور قابل توجهی کوچک تر از مؤلفه ی موهومی آن است.

$$|\sigma_i| \gg \sigma_r \quad (7)$$

$$\frac{n_e e^2 v}{m_e (\omega^2 + v^2)} \ll \frac{n_e e^2 \omega}{m_e (\omega^2 + v^2)} \Rightarrow \frac{\omega_{pe}^2 v}{4\pi (\omega^2 + v^2)} \ll \frac{\omega_{pe}^2 \omega}{4\pi (\omega^2 + v^2)}$$

که به نوبه ی خود به این معنی است که هدایت جریان در پلاسما اندک است و نیز جذب در این پلاسما به همان اندازه کوچک خواهد بود. با در نظر گرفتن روابط (۷)، یک بیان تقریبی برای کمیت α^2 به دست می آید:

$$\alpha^2 \approx \frac{1}{4} \frac{\omega^2}{c^2} \frac{v^2}{\omega^2} \left[\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right]^2 \left[\frac{1}{1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}} \right] \quad (8)$$

ضریب α بیانگر جذب امواج EM در محیط پلاسما است که همین ضریب α ، خودش با یک فاکتور نمایی کاهش می یابد.

$$\alpha \approx \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \frac{v}{\omega} \left[\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right] \frac{1}{\left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right]^{\frac{1}{2}}} \approx \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \frac{v}{\omega} \frac{n_e}{n_k} \left[1 - \frac{n_e}{n_k} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

همان‌طور که از معادله‌ی (۹) مشاهده می‌شود، جذب یک موج EM در پلاسما متناسب با عدد موج آن در خلأ است.

$$\frac{\omega}{c} = k_{\text{bak}} \quad (10)$$

با نزدیک شدن چگالی پلاسما به مقدار بحرانی، جذب موج افزایش می‌یابد. در نتیجه، مقادیر کوچک α توصیف‌کننده‌ی جذب امواج EM در محیط پلاسما است. در ادامه، پارامتر β^2 به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\beta^2 \approx \frac{\omega^2}{c^2} \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right] \quad (11)$$

از معادله‌ی (۱۱) عدد موج انتشار امواج الکترومغناطیسی در محیط پلاسما را استخراج می‌کنیم.

$$\beta \approx \frac{\omega}{c} \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right]^{\frac{1}{2}} \approx \frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{n_e}{n_k}} \quad (12)$$

همان‌طور که از معادله‌ی (۱۲) مشاهده می‌شود، عدد موج انتشار موج الکترومغناطیسی در پلاسما کمتر از عدد موج انتشار همان موج در خلأ است. طول موج امواج EM در پلاسما کمی کمتر از طول موج آن‌ها در خلأ است و با استفاده از معادله‌ی (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{\text{pl}} = \frac{2\pi}{\beta} \approx 2\pi \frac{c}{\omega} \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \approx \lambda_{\text{bak}} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{n_e}{n_k}}} \geq \lambda_{\text{bak}} \quad (13)$$

سرعت فاز موج EM در پلاسمای رادیونوکلئید از سرعت فاز نور (c) در خلأ فراتر می‌رود و برابر است با:

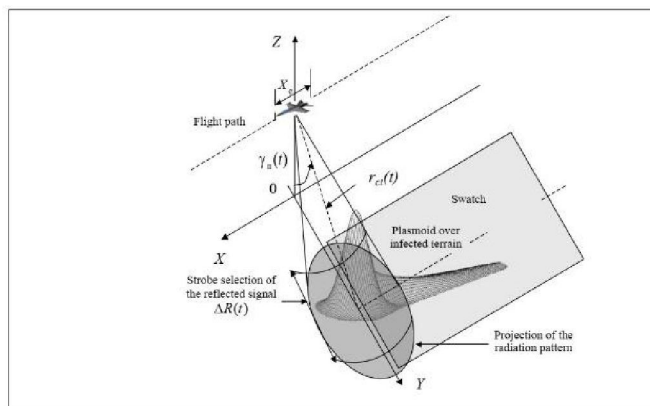
$$V_{\phi} \approx \frac{\omega}{\beta} \approx c \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right]^{-\frac{1}{2}} \approx c \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{n_e}{n_k}}} \geq c \quad (14)$$

طبق تئوری نسبیت، سرعت گروه امواج در پلاسما به مراتب کمتر از سرعت نور (c) در خلأ است.

$$V_r \approx \frac{d\omega}{d\beta} \approx c \left[1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right]^{\frac{1}{2}} = c \sqrt{1 - \frac{n_e}{n_k}} \quad (15)$$

مفهوم فیزیکی سرعت گروه یعنی سرعت انتشار انرژی در محیط. این سرعت کمتر یا مساوی با سرعت تابش نور در خلأ است. همچنین متذکر می‌شویم که از معادله‌ی (۱۴) و معادله‌ی (۱۵) به این نتیجه می‌رسیم که با افزایش چگالی پلاسما به مقدار بحرانی ($n_e \Rightarrow n_k$)، طول موج در پلاسما افزایش یافته در حالی که سرعت گروه کاهش می‌یابد. معادلات جانبی حاصل شده از معادلات موج، برای بررسی تغییرات طول موج در محیط پلاسما استفاده می‌شود. در شرایطی که چگالی پلاسما به مقدار بحرانی نزدیک شود، این رویکرد اهمیت ویژه‌ای پیدا خواهد کرد و با توجه به اینکه مدل پلاسمای رادیونوکلئید با ساختار گرادیان ناهمگن^۱ مطابقت دارد، هنگام انتخاب روش تقریبی برای شبیه‌سازی تصاویر رادیو - موج، باید این موضوع را در نظر داشت (Kovkov(2017)). برای تابش‌های یونیزان در لایه‌هایی از پلاسمای سه‌بعدی که به زمین نزدیک‌تر است، فرض بر این است که در یونیزه شدن جو توسط آن‌ها هماهنگی و هم‌زمانی وجود دارد. اکنون برای تشخیص و سنجش پلاسمای رادیونوکلئید ناشی از آلودگی هسته‌ای سطح خاک، دو روش پیشنهاد می‌شود:

- (۱) پایش رادیو - موج پلاسمای رادیونوکلئید با استفاده از هواپیمایی که در جو زمین پرواز می‌کند.
- (۲) پایش رادیو - موج پلاسمای رادیونوکلئید با استفاده از ماهواره‌ها و یا فضاییماهایی که در خارج از جو زمین حرکت می‌کنند (Voenzdat, Moscow(1963)).



شکل (۵): طرح‌واره‌ی استفاده از SAR برای آشکارسازی پلاسمای کم‌دما‌ی دارای یونیزاسیون ضعیف شکل گرفته بر روی خاک‌های سطحی‌ای که دارای آلودگی هسته‌ای هستند ((Panov(2018).

* پایش رادیو – موج پلاسمای رادیونوکلئید با استفاده از هواپیمایی که در جو زمین پرواز می‌کند:

شکل (۵) طرح‌واره‌ی استفاده از امواج SAR گسیل شده از هواپیما برای آشکارسازی پلاسمای کم‌دما‌ی دارای یونیزاسیون ضعیف شکل گرفته بر روی خاک‌های سطحی‌ای که دارای آلودگی هسته‌ای هستند را نشان می‌دهد. این یک مدل سه‌بعدی از پلاسمای رادیونوکلئید است که به صورت قطع مخروطی دارای دُم^۱ مدل‌سازی شده است. این مدل ساده می‌تواند برای نشان دادن آلودگی رادیواکتیو در ناحیه‌ی مرکزی یک نیروگاه هسته‌ای آسیب دیده که دارای یک ستون تابشی^۲ است مورد استفاده قرار گیرد. برای مدل‌سازی و تهیه‌ی تصویر آلودگی، از یک روش شناخته شده‌ی تصویربرداری راداری SAR^۳ بهره می‌گیریم ((Kondratenkov(2005). در این حالت، خصوصیات بازتابی حاصل شده را می‌توان از نظر ریاضی به عنوان یک عملکرد توپوگرافی راداری مدل کرد:

$$\dot{e}(r, x) = e(r, x) \exp[j\psi(r, x)] \quad (16)$$

که در آن $e(r, x)$ و $\psi(r, x)$ به ترتیب دامنه و خصوصیات فازی نقشه‌ها هستند. تصاویر راداری به دست آمده از سطح زمین، ناشی از حرکت SAR و با در نظر گرفتن شرایط مرزی موجود در طول

1. Paraboloid with a Tail
2. Radiation Plume
3. Side-Looking SAR

مسیر حرکت آن در جو زمین است. تصویر رادار به صورت خط به خط^۱ شکل می گیرد زیرا هواپیمای SAR در کل منطقه مورد نظر پرواز می کند. هواپیما به تدریج در جو حرکت می کند و در طی مسیر پرواز، زوایای $\psi_A(t)$ نسبت به مسیر حرکت و $\gamma_{\Pi}(t)$ نسبت به عمود محلی در هر لحظه، در دریافت تصویر راداری حائز اهمیت است. در مدت زمان کل یک دوره ی تصویربرداری راداری موفق خواهیم داشت (Panov(2018):

$$\psi_A(t) = \psi_A = \text{const} \quad \text{and} \quad \gamma_{\Pi}(t) = \gamma_{\Pi} = \text{const} \quad (16)$$

پارامترهای r_{ct} و ΔR به ترتیب مربوط است به موقعیت و ابعاد استروب^۲ که بسته به شرایط ثابت می ماند. تابع پشتیبانی^۳ $h_0(t)$ برای پرواز مستقیم ثابت در طول کل منطقه ی تحت پوشش رادار را می توان برای ناحیه ی مرکزی منتشر کننده ی آلودگی هسته ای به شرح زیر نوشت (Voenzdat, Moscow(1963):

$$\begin{aligned} \dot{h}_0(t) = H(t) \exp \left\{ j \left[- (4\pi/\lambda) V_{\Pi} t \cos \psi_A \sin \gamma_{\Pi} + \right. \right. \\ \left. \left. + (2\pi/\lambda) (V_{\Pi} t)^2 (1 - \cos^2 \psi_A \sin^2 \gamma_{\Pi}) / r_0 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

این بدان معنی است که فاز تابع پشتیبانی شامل یک ترم خطی است که به زاویه ی مشاهده و فرکانس تطبیقی ثابت $\psi_A = \text{const}$ بستگی داشته و نیز دارای یک ترم درجه دوم است که هم به زاویه ی مشاهده ی ψ_A و هم به فاصله ی r_0 مربوط به محدوده ی مورد نظر بستگی دارد. برای به دست آوردن یک تصویر راداری مطلوب در طول کل زمین آلوده شده ی مورد بررسی، در نظر گرفتن نقش تابع پشتیبانی ضروری است. در شبیه سازی که در آن هواپیمای مجهز به SAR در ارتفاع ۳۰۰۰ متری از سطح زمین پرواز می کند، پلاسمای رادیونوکلئید با سطح زمین آلوده شده تماس دارد و جهت پخش آن به گونه ای است که در طول مسیر پرواز هواپیما امتداد می یابد. پلاسمای رادیونوکلئید به علت تأثیرپذیری از خطوط میدان مغناطیسی زمین، هندسه ی نسبتاً ثابتی دارد و ابعاد آن در طی فرآیند پایش توسط هواپیمای مجهز

1. Line by Line
2. Strobe
3. Support Function

به SAR، با تقریب بسیار زیادی بدون تغییر خواهد بود. پلاسمای توصیف شده از نظر ریاضیاتی مدل می‌شود و در صورتی که چگالی الکترون - یون توزیع ناهمگنی داشته باشد، امواج راداری محدوده‌ی x ، مستعد جذب شدن در محیط پلازما خواهند بود. ابعاد هندسی پلازما از مدل بیضوی ساده شده‌ی^۱ منطقه‌ی دارای آلودگی هسته‌ای پیروی می‌کند که در آن، به علت انتشار آلودگی رادیواکتیو از نیروگاه هسته‌ای آسیب دیده، امتدادی از ستون پرتویی تشکیل شده است (Voenzdat, Moscow(1963)).

*** پایش راديو - موج پلاسمای رادیونوکلئید با استفاده از ماهواره‌ها و یا فضاپیماهایی که در خارج از جو زمین حرکت می‌کنند:**

پایش پلاسمای رادیونوکلئید از طریق SARهای فضایی نیز ممکن است. سنجش ازدور زمین با استفاده از SAR مبتنی بر ماهواره توسط بسیاری از دانشمندانی که تاکنون مقالات زیادی در این باره منتشر کرده‌اند مورد مطالعه قرار گرفته است (Zakharov, A.I. (2012), Zakharov(2011)، Franceschetti(1999)). بسیاری از نتایج نظری به دست آمده توسط آن‌ها به عنوان پایه‌ای علمی برای ساختن سیستم‌های ماهواره‌ای مدرن مورد استفاده قرار گرفته است. مفهوم اساسی سنجش از راه دور زمین با استفاده از ادوات فضایی در دهه‌ی ۱۹۷۰-۱۹۸۰ ایجاد شد. در آن سال‌ها اولین ماهواره‌ی مجهز به SAR راه‌اندازی و نیز سایر سخت‌افزارهای مورد نیاز هم ساخته شد. SAR ساخته شده می‌توانست در یک باند ماکروویو کار کند و هم به صورت فعال^۲ و غیرفعال^۳ تصویربرداری کند. در دهه‌ی ۱۹۹۰، چندین کشور ماهواره‌های مجهز به SAR را (با نرخ یک پرتاب در هر ۱،۵ تا ۲ سال) به فضا پرتاب کردند. در حال حاضر، کشورهایمانند آلمان، ژاپن، چین و ایتالیا به دنبال ایجاد سیستم‌های پیشرفته و تلفیقی از چندین SAR فضایی هستند به گونه‌ای که بتوانند کیفیت تصویربرداری برای هر منطقه روی زمین را افزایش دهند. از جمله سیستم‌های SAR فضایی که ساخته شده‌اند عبارت است از SEASAT، SIR-A و SIR-B (ایالات متحده)، SIR-C/X و SRTM (آلمان و ایالات متحده)، ERS-1، ERS-2 و ENVISAT (آژانس فضایی اروپا)، RADARSAT-1,2 (کانادا)، JERS-1 و PALSAR (ژاپن)، TerraSAR-X (آلمان) و Cosmo-SkyMED (ایتالیا). SARهای فضایی روسی عبارت‌اند از Kosmos-1870 و Almaz-1 (Zakharov, A.I. (2012)).

1. Simplified Elliptical Model
2. Active
3. Passive

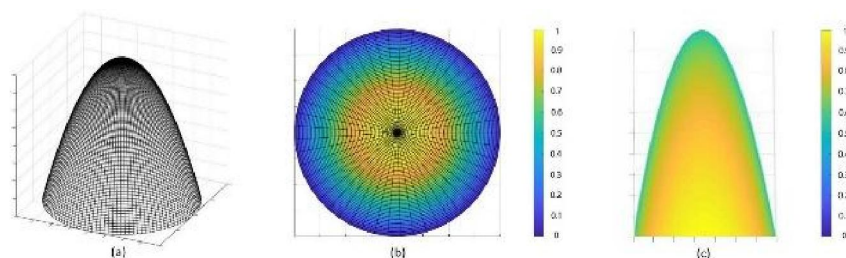
سیستم‌های ماهواره‌ای مبتنی بر SAR کاربردهای گسترده‌ای در تهیه تصاویر راديو – موج دارند و بر این مبناء، مدل ارائه شده در این پژوهش برای تجسم و آشکارسازی پلاسمای کم‌دمای دارای یونیزاسیون ضعیف (تولید شده در جو مناطقی که توسط رادیونوکلئیدها آلوده شده‌اند) به‌طور مؤثری به کار می‌آید (Voenzdat, Moscow(1963)).

نتایج

برای نشان دادن ساختار داخلی پلاسموئید ذکر شده، لازم است فرآیندهای پیچیده‌ی اندرکنش پرتوهای گاما با مولکول‌ها و اتم‌های هوا را مورد بررسی قرار داد (Kovkov(2017)). چگالی الکترون – یون ناحیه‌ی پلاسموئیدی بالای یک راکتور هسته‌ای فرضی تخریب شده با استفاده از مدل‌سازی ریاضی و با در نظر گرفتن نقش ارتفاع و فاصله‌ی افقی در تضعیف اشعه‌ی گاما با استفاده از نرم‌افزارهای ArcGIS9.3، MATLAB و COMSOL شبیه‌سازی شد و در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه می‌گردد. به‌طور اختیاری، سطح مقطع منطقه فرضی، دایره‌ای به شعاع ۱۵۰۰ متر انتخاب شده است.

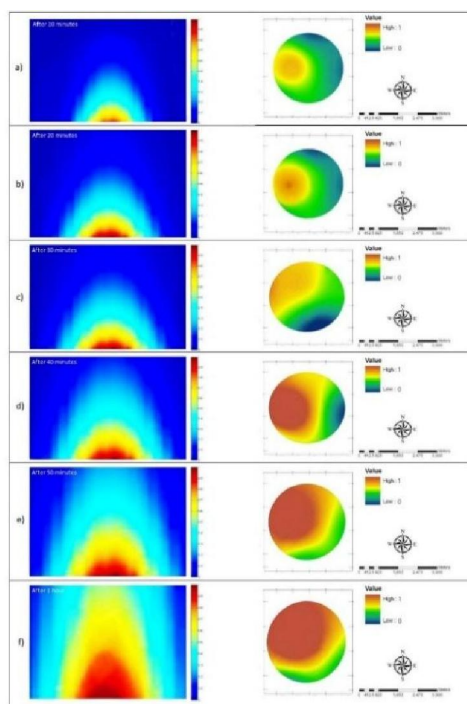
نرخ دز در هر حجم اولیه‌ی پلاسموئید شکل گرفته در جو، در یک لحظه از زمان کاهش می‌یابد. از آنجایی که یک توزیع فضایی منحصربه‌فرد ذاتی برای آلودگی رادیواکتیو خاک‌های سطحی یک ناحیه وجود دارد، شیب فضایی^۱ حاصل از تراکم و تمرکز الکترون – یون در شناسایی آلودگی رادیواکتیو خاک‌ها و قلمروها توسط رادارهای سنجش‌ازدوری که بر مبنای خصوصیات ثانویه^۲ عمل می‌کنند، اهمیت کاربردی ویژه‌ای دارد. تراکم و توزیع الکترون – یون نمایش داده شده در شکل‌های (۶) و (۷) برحسب یک واحد نسبی است؛ از عدد صفر (تراکم طبیعی در جو) تا رسیدن به اختلال و آشفتنگی^۳ در جو یعنی عدد ۱ (حداکثر چگالی الکترون – یون ناشی از یک رویداد هسته‌ای کم‌هوا برد^۴). با توجه به وجود نظم و قاعده‌ی توزیع برای غلظت‌های الکترون – یون از سطح خاک‌های آلوده به‌سوی ارتفاعاتی که در آن یونیزاسیون هوا متوقف می‌شود، خصوصیات منحصربه‌فردی در توزیع فضایی پلاسموئیدهای ناشی از آلودگی هسته‌ای وجود خواهد داشت که برای ساده‌سازی در امر مدل‌سازی اغلب پلاسموئیدها، از این فرضیات استفاده می‌گردد (Kovkov(2017)).

1. Spatial Gradient
2. Secondary Characteristics
3. Perturbation
4. Low Airborne Nuclear Explosion



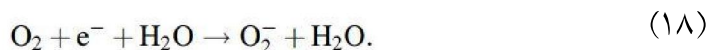
شکل (۶): شبیه‌سازی پلاسموئید شکل گرفته با استفاده از مدل دایره‌ای برای منطقه‌ی آلوده‌ی نزدیک به راکتور هسته‌ای فرضی تخریب شده؛ الف) مدل هندسی سه بعدی، ب) توزیع چگالی الکترون - یون (نمای دو بعدی از بالا، ج) توزیع چگالی الکترون - یون (نمای دو بعدی از پهلو).

بسته به رویداد هسته‌ای ایجاد شده در مناطق آلوده شده‌ی نزدیک به راکتورهای هسته‌ای تخریب شده، نرخ دز پرتوهای گاما می‌تواند به $10^5 R/h$ برسد. با در نظر گرفتن نتایجی (Boyarchuk (2000)) که در آن برای عملکرد پلاسمای فشار اتمسفری متأثر از تابش‌های یونیزان (با امکان وجود فرآیند بازترکیب)، معادلات اصلی شیمی پلاسما نشان داده شده است، این موضوع قابل استنتاج است که در چنین مقادیر زیادی از نرخ دز، حتی با امکان وجود بازترکیب گذرا و سریع در یک اتمسفر طبیعی چگال، پلاسموئیدهایی با چگالی الکترونی $10^{10} cm^{-3}$ تشکیل می‌شوند. این چگالی مطابق با فرکانس تشدید امواج در محدوده‌ی سانتی‌متر (برای رایج‌ترین ایستگاه‌های راداری) است. برای امواج الکترومغناطیسی در محدوده متر، فرکانس تشدید حتی با چگالی‌های پایین‌تر نیز مطابقت دارد. در این حالت، پوشش گیاهی و لایه‌های بالایی خاک‌های سطحی، شفاف به نظر می‌آیند. تعداد زیادی از آثار علمی به مطالعه‌ی اصول انتشار امواج الکترومغناطیسی در پلاسما پرداخته‌اند. بیشتر این اصول مبتنی بر روش‌های نوین تشخیصی پلاسما است (Ginzburg(1967), Alpert YaL(1972)).

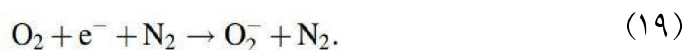


شکل (۷): شبیه‌سازی تراکم و توزیع الکترون - یون به صورت تابعی از زمان در پلاسموئید شکل گرفته بر روی اتمسفر یک راکتور هسته‌ای فرضی تخریب شده در مدت زمان دلخواه یک ساعت پس از حادثه و به فواصل زمانی ۱۰ دقیقه. سمت راست (نمای دو بعدی از بالا، سمت چپ) نمای دو بعدی از پهلو.

فرکانس پلاسما در چگالی الکترونی 10^{12} cm^{-3} مطابق با امواج میلی‌متری و چگالی ذرات 10^{19} cm^{-3} مطابق با امواج مادون قرمز است و البته این موضوع نیز درست است که غلظت‌های بالای الکترونی نظیر $10^{12} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ تنها تحت شرایط واکنش‌های گرما هسته‌ای در دمای 10^8 K قابل دسترس خواهد بود. همچنین لازم به ذکر است که توزیع غلظت الکترون - یون در پلاسموئیدهای هوا به شدت به خصوصیات هواشناسی جوی که پلاسموئیدها در آن شکل گرفته‌اند بستگی دارد؛ بنابراین، در هوای جو ناحیه‌ای که پلاسموئیدهای ناشی از رادیونوکلئیدهای خاک‌های سطحی تحت مطالعه تشکیل می‌شوند، هنگامی که رطوبت موجود تغییر کند، غلظت الکترونی نیز تغییر می‌کند به گونه‌ای که با ایجاد یک تغییر بسیار کوچک در رطوبت هوا، غلظت الکترونی چندین برابر کاهش می‌یابد (Lazarev(1994)). افتی در غلظت الکترونی، ناشی از افزایش از دست دادن الکترون‌های حرارتی آزاد در طی واکنش‌های شیمیایی بین مولکول‌های اکسیژن و آب است:



با افزایش بیشتر میزان رطوبت در هوا، سهم از دست دادن الکترون به علت انجام واکنش شماره‌ی (۱۹) بیشتر از سهم ناشی از واکنش شماره‌ی (۲۰) خواهد بود:



در محدوده‌ی دمایی ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ کلوین، افت غلظت الکترونی به‌اندازه‌ی ۱۰ تا ۲۰ برابر و در دماهای بالاتر از این، افت فقط ۴ تا ۸ برابر خواهد بود. این موضوع به این دلیل است که در دمای کمتر از ۱۵۰۰ کلوین، فرآیند غالب تشکیل چگالی الکترونی در محیط، یونیزاسیون مستقیم اجزای اتمسفری می‌باشد و سرعت این فرآیند عملاً وابسته به رطوبت محیط است ولی در شرایط دمایی بالاتر از ۱۵۰۰ کلوین، نرخ جداسازی الکترون‌ها و تولید الکترون‌های آزاد تقریباً مستقل از رطوبت محیط می‌باشد (Kovkov(2017)).

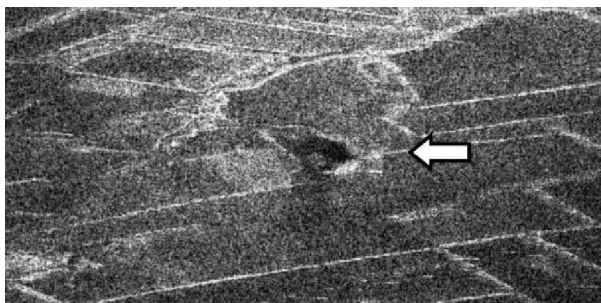
شکل (۸)، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برای تصویر یک پلاسمای سه‌بعدی تهیه شده توسط یک هواپیمای مجهز به SAR که در امتداد ستون پرتویی حاصل از آلودگی هسته‌ای سطحی پرواز می‌کند را نشان می‌دهد. نقاط روشن مربوط به جذب غیرهمگن امواج رادار در محیط پلازما است (Voenzdat, Moscow(1963)).

شکل (۹) تصویری از یک منطقه‌ی دارای آلودگی هسته‌ای را نشان می‌دهد که برای به دست آوردن آن از مدل پلاسمایی رادیونوکلئید توضیح داده شده در متن و نیز تصویربرداری SAR انجام گرفته توسط هواپیمای، استفاده شده است. قسمت مرکزی تصویر که حالت سایه‌دار دارد، نشان‌دهنده‌ی پلاسمای رادیونوکلئید شکل گرفته در جو است و بیانگر توزیع الکترون - یون در حجم پلازما می‌باشد. مدل‌های ریاضی پیش‌بینی می‌کنند که چگالی الکترون - یون، از مرکز ناحیه به سمت بیرون کاهش می‌یابد (Voenzdat, Moscow(1963)).



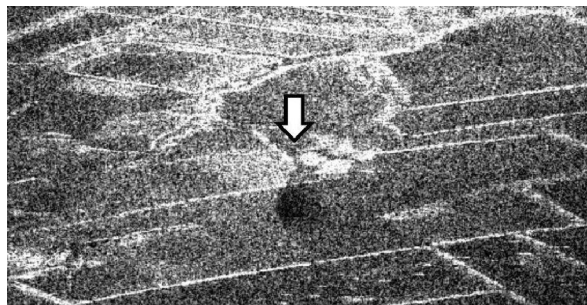
شکل (۸): تصویر یک پلاسمای سه‌بعدی که توسط یک هواپیمای مجهز به SAR که در امتداد ستون پرتویی حاصل از آلودگی هسته‌ای سطحی پرواز می‌کند، تهیه شده است (Voenzdat, Moscow(1963)).

شکل (۹) تصویری از یک منطقه‌ی دارای آلودگی هسته‌ای را نشان می‌دهد که برای به دست آوردن آن از مدل پلاسمایی رادیونوکلئید توضیح داده شده در متن و نیز تصویربرداری SAR انجام گرفته توسط هواپیما، استفاده شده است. قسمت مرکزی تصویر که حالت سایه‌دار دارد،



شکل (۹): مدل دوبعدی تصویر راداری از پلاسمای رادیونوکلئید شکل گرفته در جو، متناظر با تصویر پلاسمای سه‌بعدی ارائه شده در شکل (۸) (Voenzdat, Moscow(1963)).

نشان‌دهنده‌ی پلاسمای رادیونوکلئید شکل گرفته در جو است و بیانگر توزیع الکترون - یون در حجم پلاسمای باشد. مدل‌های ریاضی پیش‌بینی می‌کنند که چگالی الکترون - یون، از مرکز ناحیه به سمت بیرون کاهش می‌یابد (Voenzdat, Moscow(1963)). شکل (۱۰) نتایج شبیه‌سازی‌هایی را نشان می‌دهد که شبیه به سناریوی بیان شده برای هواپیماهای مجهز به سیستم SAR انجام گرفته است، اما در حقیقت برای عکس‌برداری از سیگنال‌های SAR فضایی استفاده شده است. این تصویر شبیه‌سازی شده، نشان‌دهنده‌ی پلاسمای رادیونوکلئید پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی است که به‌صورت یک ابر نیمه شفاف تاریک برای چگالی الکترون - یون درآمده است و در حقیقت این توده‌ی پلاسمایی باعث جذب طیف خاصی از امواج الکترومغناطیسی راداری می‌شود (Voenzdat, Moscow(1963)).



شکل (۱۰): مدلی از تصویربرداری زمین بر مبنای شناسایی پلاسمای ناشی از رادیونوکلئیدهای موجود در سطح زمین و تحت سناریوی جذب امواج EM توسط پلاسمای تهیه شده توسط سیستم SAR فضایی (Voenzdat, Moscow(1963)).

در شبیه‌سازی‌های SAR فضایی، شرایط باید طوری بهینه شود که امواج راداری مورد استفاده، هیچ اندرکنش و جذبی در لایه‌ی یونسفر نداشته باشند و نیز اثرات نامطلوب احتمالی این فرآیندها در محاسبات باید در نظر گرفته شود ((Voenzdat, Moscow(1963)).

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، برای پلاسموئید کم‌دمایی که در جو روی خاک‌های سطحی منطقه‌ای با آلودگی رادیواکتیو شدید شکل گرفته است، یک مدل فضایی از توزیع چگالی الکترون - یون شکل گرفته در پلاسموئید، مورد بررسی قرار گرفت. این مدل خواص منحصربه‌فردی را نشان می‌دهد که به‌طور قابل اعتمادی می‌تواند به ما در شناسایی آلودگی هسته‌ای شدید خاک‌های سطحی قلمروها کمک نماید و در توسعه‌ی تکنولوژی‌های نوین سنجش‌ازدور آلودگی هسته‌ای به‌منظور تحقق اهداف ایمنی سرزمینی و پدافند غیرعامل نیز مفید خواهد بود.

در مدل پیشنهادی برای شناسایی پلاسمای ایجاد شده در جو، ویژگی‌های دامنه‌ی^۱ پالس رادار بسیار تأثیرگذار است. رویکرد ارائه شده در این پژوهش، برای بررسی ناهنجاری‌های پرتویی شکل گرفته در سطح زمین که ناشی از میدان‌های شدید تابش‌های یونیزان هستند، بسیار مفید است و این اثر می‌تواند نتیجه‌ی بالقوه‌ی یک حادثه در راکتور هسته‌ای باشد؛ که برای مثال در نیروگاه هسته‌ای چرنوبیل اتفاق افتاد. پلاسمای در تصویر راداری به‌آسانی قابل مشاهده است و به‌صورت نقاطی با رنگ‌های متمایز نشان داده می‌شود. خصوصیات نورانی این نقاط متأثر از شرایط اقلیمی محیط تصویربرداری و نیز شدت تابشی آلودگی هسته‌ای روی سطح زمین است ((Voenzdat, Moscow(1963)).

در یک مدل جامع‌تر برای شرایطی که در آن چگالی پلاسمای کم‌دمای دارای یونیزاسیون ضعیف، از حد خاصی کمتر باشد، برای دستیابی به تصاویری با وضوح بالا، بهتر است که تغییرات فاز و قطبش امواج رادار در نظر گرفته شود. برای توسعه‌ی نسل جدید سیستم‌های تصویربرداری رادیو - موج قابل استفاده در پایش و نظارت بر محیط‌زیست، باید موضوع تغییرات فاز ناشی از پلاسمای کم‌دمای دارای یونیزاسیون ضعیف ($\Delta\phi$)، شناسایی و مورد بررسی قرار گیرد و البته این کمیت از تنوع زیاد و افت‌وخیزهای تصادفی برخوردار است. به‌طورکلی، هرچه شدت تابش‌های یونیزه‌کننده بیشتر

1. Amplitude

باشد، یونیزه شدن پلاسمای شکل گرفته در جو نیز بیشتر خواهد بود و در نتیجه، تداخل فاز^۱ بیشتری رخ خواهد داد. همچنین فاز سیگنال بازتاب شده از سطح زمین، در هنگام ثبت شدن توسط SAR، تصادفی است. با این حال، روش‌های پردازش سیگنال دیجیتال که در حال حاضر در دست توسعه هستند، امکان دستیابی به تصاویر راداری بسیار دقیق را ممکن می‌سازند (Voenzdat, Moscow(1963)). امروزه روش‌های متنوع و مدرنی برای بررسی دقیق‌تر ویژگی‌های پلاسمای رادیونوکلید وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارت‌اند از: تئوری فیلتر مارکوف^۲، تبدیلات موجکی و فراکتالی^۳، فیلتراسیون غیر مارکوف^۴ و الگوریتم‌های پردازش غیر شیب^۵ (Potapov(2011), German(2006), Russkin, A.B. (2010)). در پایان، مجدداً تأکید می‌شود که از مدل‌سازی عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR برای شناسایی پلاسموئید ناشی از حوادث پرتویی می‌توان استفاده کرد. مدل عملکردی پیشنهادی، مانند تابع پاسخ ضربه برای سیستم‌های خطی مستقل از زمان، نحوی رفتار این سامانه‌ها را نشان می‌دهد و با استفاده از آن می‌توان فرآیند تصویربرداری SAR را شبیه‌سازی کرد. صحت مدل عملکردی پیشنهادی، براساس مقایسه‌ی نتایج به دست آمده توسط سایر محققان و نتایج مورد انتظار گزارش شده در مراجع معتبر این حوزه به اثبات رسیده است (ح. دهقانی(۱۳۹۲)). در هنگام پایش محیطی قلمروهای وسیع، استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال به همراه ابزارهای دقیق ناوبری ماهواره‌ای، دقت تصاویر راداری به دست آمده را تضمین نموده و در نتیجه اطلاعات قابل اطمینانی از میزان آلودگی هسته‌ای پخش شده در محیط زیست به دست می‌آید. از جمله کاربردهای عملیاتی روش ارائه شده در این پژوهش، هواپیمای ردیاب هسته‌ای متعلق به نیروی هوایی ارتش ایالات متحده (wc-135 مشهور به فونیکس^۶) است که در این هواپیما از تکنیک‌های مدرن پایش آلودگی هسته‌ای استفاده می‌شود و یکی از این تکنیک‌ها، تکنیک پایش پلاسموئیدها است (Voenzdat, Moscow(1963)).

-
1. Phase Incursion
 2. Markov Filter Theory
 3. Wavelet Transforms and Fractal
 4. NonMarkov Filtration
 5. Non-Gradient Processing Algorithms
 6. Phoenix

فهرست منابع

ح. دهقانی (۱۳۹۲)، ع. ریوندی، م. فلاحپور و ک. موسی‌زاده، "مدل‌سازی عملکرد سامانه‌های تصویربرداری SAR" در فصل‌نامه‌ی علمی-پژوهشی علوم و فناوری فضایی، جلد ۶، شماره ۱، صفحه ۵۶-۴۷، بهار

Alpert YaL (1972): Distribution of electromagnetic waves and the ionosphere. 563 p. Nauka, Moscow.

Boyarchuk, AV Kakrelin, AM Lomonosov. ZhTF 70(1).

Ginzburg (1967), V.L.: Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma, 2nd edn. Publishing House Nauka, Moscow. 684 p.

Boyarchuk (2000), K.A.: Features of ionization of atmospheric air during radioactive contamination/ KA

Bostick (1956), Winston H. "Experimental study of ionized matter projected across a magnetic field." Physical Review 104.2: 292.

Bostick (1958), Winston H. "Possible hydromagnetic simulation of cosmical phenomena in the laboratory." Symposium-International Astronomical Union. Vol. 8. Cambridge University Press.

Bostick (1986), Winston H. "What laboratory-produced plasma structures can contribute to the understanding of cosmic structures both large and small." IEEE transactions on plasma science 14.6703-717.

Boyarchuk, K.A. (2000): Peculiarities of the atmospheric air ionization under radioactive pollution/ Boyarchuk, K.A., Karelin, A.V., Lomonosov, A.M. J.T.Ph. Volume 70, ed. 1.

Friday Silberg (2013), David M., et al. "Further insight into the nature of ball-lightning-like atmospheric pressure plasmoids." The Journal of Physical Chemistry A 117.39 9931-9940.

Hones (1976), Edward W. Magnetotail: its generation and dissipation. No. LA-UR-76-1301; CONF-760645-1. Los Alamos Scientific Lab., N. Mex. (USA),.

Lemaire (1981), J., and M. Roth. "Differences between solar wind plasmoids and ideal magnetohydrodynamic filaments." Planetary and Space Science 29.8: 843-849.

Laurence (1956), W. L. "Physicist creates universe in a test tube." New York Times I.

Kovkov (2017), D. V., et al. "Spatial Model of Electron-Ionic Concentrations Distribution of in Low-Temperature Air Plasmoid Over Strong Radiation Contamination of Soils and Territories." International Congress on Soils of Urban, Industrial, Traffic, Mining and Military Areas. Springer, Cham.

Panov (2018), D. V., et al. "Method of Active Radio-Wave Imagery of the Areas Extensively Contaminated by Radionuclides from the Aircraft and Spacecraft." Proceedings of the 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies.

, I.E. Moscow (2011): Publishing House of The Air Force Military Training Scientific Centre, 312 p.

Jahoda (1971), F.C. and Sayer, G.A.: Optical refractivity of plasmas. In Methods of Experimental Physics. R.H.Lovberg and H.R.Griem, eds. Vol. 9B. New York: Academic.

Hild (1968), M.A., Worton, S.V., Microwave Diagnostics of Plasma. Moscow: Atomizdat, 293 p.

Alpert, J.L. (1972): Propagation of Electromagnetic Waves and Ionosphere. Moscow: Nauka Publishing, 563 p.

Ginzburg, V.L. (1967): Propagation of Electromagnetic Waves in Plasma/ Ginzburg, V.L., 2nd Edition, Moscow.

Kovkov (2017), D.V., Koryagin, N.D., Eroshkin S.Yu., Kameneva, N.A., Zaitsev, E.G., Sukhorukov, A.I., Sukhorukov, T.A. Spatial Model of Electron-Ionic Concentrations Distribution of in Low-Temperature Air Plasmoid Over Strong Radiation Contamination of Soils and Territories. In: Urbanization: Challenge and Opportunity for Soil Functions and Ecosystem Services. SUITMA. Pp. 199-205.

Kondratenkov (2005), G.S., Frolov, A.Yu. Radio Vision, Radiolocation Systems for Remote Earth Sensing. A High School Tutorial. Moscow: Radiotekhnika. p. 88.

Franceschetti (1999), G. Synthetic Aperture Radar Processing/ G. Franceschetti, R. Lanari, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press., 1999. - 328 c.

Franceschetti (1999), G. Synthetic Aperture Radar Processing / G. Franceschetti, R. Lanari, Boca Raton, London, New York, Washington, D.C., CRC Press., 1999. - 328 p.

Lazarev (1994), B.N., Protopopov, V.Kh.: Investigation of the dependence of the electron concentration on the moisture content in ionized air. Sarov.VANT. Series Theoretical and Applied Physics (2), 22–25 (1994).

German (2006), V.A., Kuznetsov, Ye.V., Potapov, A.A., Chesnokov, Yu.S.: Design of Fractal Radio Systems: Selected Questions of the Real Radar Information Using the Fractal Processing// Nelineynyi Mir. Vol. 4. No. 5-5, p. 208-213.

Novikov (2016): Programmatic complex of mathematical modelling of the processes of gamma radiation transfer and registration for developing the systems for remote

radiation monitoring of the earth's surface. *Extreme Robotics*. vol. 1, N 1, pp. 441–446, Saint Petersburg.

Potapov (2011), A.A., Fractal models on the basis of the scaling and dynamic chaos in remote sensing of the atmosphere and underlying surface. International Symposium 'Atmospheric Radiation and Dynamics'. Saint-Petersburg-Petrodvorets. June 21-24, 2011.

Russkin, A.B. (2010): Identification of Extended Objects on Radar Images Using Fractal-Dimension Evaluations. PhD Thesis, Technical Sciences. Moscow: Moscow Aviation Institute.

Roosen (1976), R. G., and J. C. Brandt. "Possible Detection of Colliding Plasmoids in the Tail of Comet Kohoutek (1973f)." NASA Special Publication 393 378.

Smith (2001), Edward J. "The heliospheric current sheet." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 106.A8 15819-15831.

Sukhorukov (2011), A.I., Khismatov, I.F., Novikov, I.E.: The Fundamentals of Satellite/Aircraft Radiation Monitoring of the Earth. Part 1. Physical Fundamentals of Radioactive Remote Sensing of the Earth/ Sukhorukov, A.I., Khismatov, I.F., Novikov

Silberg (2013), Paul A. "Ball lightning and plasmoids." *Journal of Geophysical Research* 67.12

Sukhorukov (2011), A.I., Khismatov, I.F., Novikov, I.E.: Fundamentals of the Theory of Aerospace Radiation Monitoring of the Earth, Monograph/VVUNTS VVS "Air Force Academy named after N.E. Zhukovsky and A. Yu. Gagarin", Moscow 309 p.

Voenzdat, Moscow (1963)•The Action of Nuclear Weapons: Translation from English,. 684 p.

Willett (2020), C. D., S. R. Kimmig, and W. S. Cassata. "Fission Gas Measurements in Spent Fuel: Literature Review."

Wang (1988), S., et al. "A mechanism for the formation of plasmoids and kink waves in the heliospheric current sheet." *Solar physics* 117.1 157-169.

Zakharov (2011), A.I. Study of PALSAR radiometric stability with passive calibration targets / A.I. Zakharov et al. // *IEEE Proc. of IGARSS*, Vancouver, Canada, 24-29 July 2011.-P. 910- 913.

Zakharov, A.I. (2012): Satellite-Based Monitoring of the Earth: Radar Sensing of the Earth Surface / Zakharov, A.I., Yakovlev, O.I., Smirnov, V.M. Moscow: KRASAND, 248 p.