

Modeling of global atmospheric electric circuit based on WWLLN dataset

Borhanian, J. 

Department of Physics, Faculty of Science, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

Corresponding Author E-mail: borhanian.sci@gmail.com

(Received: 28 Jan 2026, Revised: 14 Feb 2026, Accepted: 30 June 2026, Published online: 5 Sep 2026)

Summary

A model of the global atmospheric electric circuit has been presented that is based on more realistic and up-to-date data and models for current generators and atmospheric conductivity. The World Wide Lightning Location Network data has been employed to estimate distribution of thunderstorms as the main sources of electric current in global electric circuit by means of the clustering approach. Thunderstorm clusters are combined with aircraft observations of electrified clouds to determine the contribution of thunderstorm and shower clouds in total conduction (Wilson) currents. The electrical conductivity of atmosphere results from the concentration of small ions in air and varies with height, because of the ion sources, e.g. cosmic rays, radon isotopes and terrestrial radioactivity, and the primary sink, e.g. aerosol particles of height profile. The CRAC: CRII, that is one of the most commonly used atmospheric ionization models, is employed to calculate the cosmic rays induced ionization rate; and radioactivity induced ionization rate is determined using an exponential vertical profile combined with an up-to-date data for surface Radon 222 ionization rate, as the main source of ionization agent in atmospheric boundary layer. Considering the aerosol particles to be monodispersed, the variation with height is represented by an exponential vertical profile. Based on these models and considering simple and well-known models for ion-aerosol attachment coefficients and ions mobility, the 3-dimensional distribution of the atmospheric conductivity is calculated. It is found that near the earth surface the conductivity profile resembles radioactivity induced ionization rate, while at higher altitudes it looks like the cosmic rays counterpart. From the air conductivity profile, the columnar resistance, namely the resistance of a unit area column of atmosphere from the orographic surface to the ionosphere, is found and shown that the major contribution to the columnar resistance is the resistance of the boundary layer, where the ion production rate is relatively small and the loss rate is large. Total atmospheric resistance is the total resistance of all the column resistances summed in parallel over the world, taking into account the change with latitude of the area of each grid element. Production of total resistance and total conduction current gives us ionosphere's electric potential, while electric potential at the surface of the earth is assumed to be zero. The global distribution of the downward air-earth current density which is independent of altitude, while affected by the orography and geographical coordinates via columnar resistance, is calculated and it is found that current density above land is larger than that of above sea. As the columnar resistance on high mountains is smaller, more air-earth current flows over those areas of the earth than others, in general. Atmospheric electric field, as one of the most studied elements of the global electric circuit, related to the local electrical conductivity and current density, is evaluated using Ohm's law and its global distribution at different altitudes is presented. The model described in the present research is validated by comparing the global diurnal variations of the electric field with the well-known Carnegie Curve, which represents the mean diurnal variability of the global electric circuit. The model confirms that the global atmospheric electric activity peaks daily at ~20 UTC and it is found that the overall variation of electric fields at 3 positions are the same and similar to that of the Carnegie curve.

Keywords: thunderstorms, shower clouds, global electric circuits, Carnegie curve.

مدل سازی مدار الکتریکی جهانی جو با استفاده از داده های WWLLN

✉ جعفر برهانیان

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: borhanian.sci@gmail.com

(دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۸، بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵، پذیرش نهایی: ۱۴۰۵/۴/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۶/۱۴)

چکیده

مدلی از مدار الکتریکی جهانی جو ارائه شده است که مبتنی بر مدل ها و داده های به روزتر و واقعی تر برای رسانش الکتریکی جو و مولدهای جریان است. داده های مربوط به شبکه جهانی تعیین مکان آذرخش ها به کار گرفته شده است تا توزیع جهانی ابرهای تندی با استفاده از روش خوشه بندی تعیین شود. سپس با ترکیب این خوشه ها با نتایج آزمایش های انجام یافته بر فراز ابرهای باردار، جریان کل شارش یافته از ابرهای تندی و رگباری به طرف یونسفر (جریان ویلسون) محاسبه شده است. به کمک مدل CRAC:CRII برای یونیزاسیون جو به وسیله پرتوهای کیهانی و داده های به روز برای یونیزاسیون حاصل از مواد رادیواکتیو، نرخ یونیزاسیون جو مشخص و به کمک مدل های ساده برای ضرایب چسبندگی یون ها به هواویزها و توزیع فضایی هواویزها، توزیع سه بعدی برای رسانندگی جو محاسبه شده است. با داشتن رسانندگی، مقاومت ستونی جو که به صورت مقاومت ستونی به ارتفاع یونسفر و مساحت سطح مقطع واحد تعریف می شود محاسبه و از روی آن مقاومت کل جو زمین تعیین شده است. با فرض پتانسیل صفر برای سطح زمین از حاصل ضرب مقاومت کل در جریان ویلسون پتانسیل یونسفر مشخص شده است. چگالی جریان الکتریکی رو به پایین که مستقل از ارتفاع بوده و به واسطه مقاومت ستونیکه وابسته به پستی و بلندی زمین و مختصات جغرافیایی است، محاسبه شده است. با استفاده از قانون اهم توزیع جهانی میدان الکتریکی در ارتفاعات مختلف تعیین و به منظور محک زدن مدل ارائه شده، تغییرات روزانه میدان الکتریکی در چندین نقطه با منحنی کارنگی مقایسه شده است.

واژه های کلیدی: ابرهای تندی، ابرهای رگباری، مدار الکتریکی جهانی، منحنی کارنگی.

۱. مقدمه

همکاران، (۲۰۰۸). این رسانندگی باعث می شود به صورت مداوم میدان الکتریکی و جریان ضعیفی بین لایه تحتانی یونسفر و سطح زمین برقرار باشد. این مجموعه را که برای اولین بار توسط ویلسون مطرح شد (ویلسون، ۱۹۲۱) مدار الکتریکی جهانی جو گویند (سینگ و همکاران، ۲۰۲۳؛ رایکرافت، ۲۰۲۵). در این مدار اختلاف پتانسیل حدود ۲۴۰ کیلوولت که بین یونسفر و سطح زمین برقرار است باعث شارش جریان الکتریکی رو به پایین با چگالی تقریبی ۲ پیکوآمپر بر مترمربع می شود (مارکسون، ۲۰۰۷). به دلیل تغییر رسانندگی با ارتفاع اندازه میدان الکتریکی با افزایش ارتفاع کاهش پیدا می کند ولی در نزدیکی های سطح زمین، متوسط میدان متناظر با این اختلاف پتانسیل در حدود ۱۳۰

ابرهای دارای بار الکتریکی یعنی توفان های تندی (thunderstorm) و ابرهای رگباری (shower clouds) باعث شارش بار الکتریکی مثبت به سمت یونسفر و بار الکتریکی منفی به سطح زمین می شوند. ابرهای رگباری به گروهی از ابرها اطلاق می شود که مانند ابرهای تندی جدایی بار در آنها اتفاق می افتد ولی دارای آذرخش نیستند. بدین ترتیب سطح زمین و یونسفر که هر دو به عنوان رسانای خوب محسوب می شوند به ترتیب دارای بار خالص منفی و مثبت خواهند بود. از طرف دیگر جو زمین به صورت مداوم توسط پرتوهای کیهانی، نور خورشید و پرتوهای حاصل از مواد رادیواکتیو بمباران می شود که نتیجه آن القای رسانندگی ضعیف به جو زمین خواهد بود (رایکرافت و

ولت تخمین زده می‌شود (هریسون، ۲۰۱۳).

مطالعه مدار الکتریکی جهانی از جهات مختلف دارای اهمیت است. در فهم سامانه اقلیمی و متغیرهای آن مهم است (ویلیامز، ۲۰۰۹؛ ماریف، ۲۰۱۰) به‌طوری‌که اخیراً سازمان جهانی هواشناسی، توفان‌های تندری را جزو متغیرهای اقلیم به شمار آورده است (آیچ و همکاران، ۲۰۱۸). مدار الکتریکی جهانی می‌تواند به‌عنوان یک نماگر برای گرمایش جهانی در نظر گرفته شود (ویلیامز، ۲۰۲۴)، با شاخص کیفیت هوا در ارتباط است (فاروق و همکاران، ۲۰۲۵) و می‌تواند به‌عنوان معرف تشکیل مه در نظر گرفته شود (میلر و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین نشان داده شده است که فعالیت‌های پیش از وقوع زمین‌لرزه و حین وقوع آن بر پارامترهای مدار الکتریکی جهانی تأثیرگذار بوده، و شاید بتوان از این تغییرات در پیش‌بینی وقوع زلزله بهره برد (نامگالادزه، ۲۰۱۳؛ پولیتس و خاچیکیان، ۲۰۲۱). از طرف دیگر جریان عبوری منتسب به مدار الکتریکی جهانی از داخل ابر می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر میکروفیزیک ابرها بر جای گذارد (تینسلی، ۲۰۰۸) که انگیزه کافی را برای مطالعه آن به‌وجود می‌آورد.

مدل‌سازی مدار الکتریکی جهانی علاوه بر این که نتایج تجربی را تکمیل می‌کند بلکه در فهم مکانیسم‌های فیزیکی که در آن اتفاق می‌افتد کمک شایانی کرده و می‌تواند پیش‌بینی‌هایی در مورد شرایط الکتریکی مورد انتظار در جو داشته باشد. بعد از معرفی مفهوم مدار الکتریکی جهانی توسط ویلسون، مدل‌سازی‌های عددی و تحلیلی متفاوتی طی چند دهه گذشته برای آن ارائه شده است. اولین مدل‌سازی جدی برای مدار الکتریکی جهانی توسط هایز و روبل (۱۹۷۹) در سال ۱۹۷۹ ارائه شد. آنها توفان‌های تندری را به‌صورت جفت منبع نقطه‌ای مثبت و منفی جریان الکتریکی در نظر گرفته و با تقسیم جو به نواحی مختلف و با فرضیات فراوان توانستند با استفاده از توابع هارمونیک کروی نحوه توزیع پتانسیل الکتریکی را به‌دست آورند. بعد از آن تلاش‌های زیادی به کار گرفته شد که توجه اغلب آنها معطوف به نحوه فرمول‌بندی رانش جو به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در مدل‌سازی مدار الکتریکی می‌باشد

(ماکینو و اوگاوا، ۱۹۸۴؛ استانسبری و همکاران، ۱۹۹۳؛ تینسلی و زو، ۲۰۰۶؛ رایکرفت و همکاران، ۲۰۰۷؛ اوزیمک و همکاران، ۲۰۱۰). این مدل‌ها با یافتن مقاومت عمودی جو و المان‌های مدار معادل، خواص الکتریکی جو را مشخص می‌کنند. یکی دیگر از روش‌ها برای یافتن توزیع جریان و میدان الکتریکی در جو حل معادلات ماکسول (معادله پواسون) می‌باشد که لازمه آن تعیین توزیع زمانی و فضایی رسانندگی الکتریکی جو همراه با شرایط مرزی مناسب و معقول می‌باشد که به‌صورت کلی توسط کالینین و همکاران (۲۰۱۴) طرح‌ریزی شده است که بعد از آن چندین پژوهش مستقل از این رهیافت برای مدل‌سازی مدار الکتریکی جهانی بهره برده‌اند (جانسکی و پاسکو، ۲۰۱؛ لوکاس و همکاران، ۲۰۱۵؛ بایونا و همکاران، ۲۰۱۵؛ ایلین و همکاران، ۲۰۲۰). تأثیر اختلالات رسانندگی جو بر مدار الکتریکی جهانی توسط جانسکی و پاسکو (۲۰۱۴ و ۲۰۱۵) بررسی شده است. بررسی تغییرات روزانه پارامترهای مدار الکتریکی جهانی برای مقایسه آن با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است که این کار توسط جانسکی و همکاران (۲۰۱۷) صورت گرفته است. و سهم یونسفر و مگنتوسفر به‌عنوان منبع جریان برای مدار الکتریکی جهانی نیز توسط کوتترین و اسلونیايف (۲۰۲۰) مورد تأکید واقع شده است. یکی از ساده‌ترین مدل‌ها برای مدار الکتریکی جهانی این است که سطح زمین و سطح زیرین یونسفر به‌عنوان دو پوسته رسانای یک خازن کروی در نظر گرفته شوند که جو زمین بین آنها همانند یک ماده دی الکتریک رفتار می‌کند. این مفهوم که تحت عنوان خازن زمین-یونسفر از آن یاد می‌شود برای اولین بار توسط لرد کلون (ویلیام تامسون) مطرح شده است. اخیراً درستی این مدل ساده توسط هالدوپیس و همکاران (۲۰۱۷) مورد سوال قرار گرفته و نشان داده شده است که این مفهوم غیر قابل دفاع بوده، بلکه به جای آن باید از مفهوم ظرفیت زمین-یونسفر استفاده شود. متناظر با این ظرفیت یک ثابت زمانی به‌صورت حاصل ضرب مقاومت جو در این ظرفیت تعریف می‌شود که طی این زمان سطح زمین می‌تواند بار الکتریکی منفی خود را نگه دارد. رایکرافت و همکاران

(۲۰۲۴، ۲۰۲۵) در پژوهش‌های اخیر خود اقدام به محاسبه این ظرفیت و ثابت زمانی متناظر آن کرده‌اند. در این تحقیق مدلی برای مدار الکتریکی جهانی ارائه می‌شود که شامل داده‌های به‌روزتر و دقیق‌تری است. رسانندگی جو و همچنین توزیع فضا-زمانی ابرهای الکتریسته‌دار مهم‌ترین پارامترهای مدار الکتریکی جهانی است که دقت هر مدلی وابسته به دقت تعیین آنها است. برای محاسبه رسانندگی جو از معتبرترین و به‌روزترین داده‌ها برای نرخ یونیزاسیون حاصل از پرتوهای کیهانی و مواد رادیوکتیو استفاده شده است. همچنین با استفاده از داده‌های شبکه جهانی WWLLN و روش خوشه‌بندی، توزیع فضایی ابرهای الکتریسته‌دار تعیین شده است که تاکنون در هیچ یک از مدل‌های ارائه‌شده برای مدار الکتریکی جهانی چنین کاری انجام نشده است.

۲. مدل‌سازی مدار الکتریکی جهانی

برای مدل‌سازی مدار الکتریکی جهانی جو فرض می‌شود زمین و یونسفر دو سطح رسانا هستند که در آن پتانسیل سطح زمین برابر صفر در نظر گرفته شده و پتانسیل یونسفر نیز در اینجا مجهول قرار داده می‌شود و باید توسط مدل تعیین شود. سطح زیرین یونسفر در ارتفاع ۶۰ کیلومتر را به‌عنوان سطح رسانای بالا فرض می‌کنیم (تینسلی، ۲۰۰۸؛ رایکرافت و همکاران، ۲۰۲۴) که متناظر با سطح زیرین الکتروسفر نیز می‌باشد، لایه‌ای که به‌دلیل دارا بودن رسانندگی الکتریکی زیاد لایه هم‌پتانسیل در نظر گرفته می‌شود. بین این دو سطح هم‌پتانسیل، یعنی زمین و یونسفر جریان‌های رو به بالا و رو به پایین برقرار است. جریان‌های رو به بالا توسط ابرهای تندری و همچنین ابرهای رگباری ایجاد می‌شوند که بار الکتریکی منفی را به سطح زمین و بار الکتریکی مثبت را به یونسفر منتقل می‌کنند. برای این که این مدار بسته باشد لازم است یک جریان بازگشتی در نواحی خالی از ابرهای تندری و رگباری به‌طرف پایین برقرار باشد که این جریان را جریان هوای آرام (fair-weather) گویند. این که در هر نقطه از جو چگالی جریان و میدان الکتریکی چقدر باشند بستگی به اختلاف

پتانسیل بین زمین و یونسفر و همچنین به رسانندگی جو در آن نقطه دارد. برای محاسبه این اختلاف پتانسیل لازم است ابتدا جریان الکتریکی کل شارش‌یافته در جو و همچنین مقاومت کل جو تعیین شود. به‌همین خاطر مهم‌ترین پارامترها در مدل‌سازی مدار الکتریکی جو اول ارائه مدلی دقیق برای رسانندگی جو و دوم محاسبه جریان الکتریکی شارش‌یافته در جو است که این جریان همان جریان کل ایجاد شده توسط ابرهای تندری و رگباری است. جریانی که از طرف ابرها به یونسفر شارش پیدا می‌کند را جریان ویلسون نامند. با این توضیحات اعتبار و دقت مدل ارائه‌شده برای مدار الکتریکی جهانی جو در وهله اول به مدل ارائه‌شده و داده‌های استفاده‌شده برای محاسبه جریان الکتریکی شارش‌یافته از ابرها به‌طرف یونسفر و در وهله بعدی به مدل ارائه‌شده برای رسانندگی جو متکی می‌باشد. با این توضیحات طرح کلی برای مدل‌سازی مدار الکتریکی جهانی بدین شرح خواهد بود که ابتدا با استفاده از مدل ارائه‌شده برای رسانندگی جو، که وابسته به ارتفاع و مختصات جغرافیایی است، مقاومت ستونی (شرح آن در ادامه خواهد آمد) جو محاسبه شده و از روی آن مقاومت کل جو به‌دست خواهد آمد. سپس با استفاده از داده‌های مربوط به توزیع ابرهای تندری (آذرخش)، توزیع فضایی جریان شارش‌یافته به‌طرف بالا محاسبه و از روی آن جریان کل به‌دست خواهد آمد. حاصل ضرب جریان کل در مقاومت کل جو اختلاف پتانسیل بین سطح زمین و یونسفر را مشخص می‌کند. با مشخص شدن این اختلاف پتانسیل و با استفاده از توزیع فضایی مقاومت ستونی و جریان الکتریکی می‌توان توزیع فضایی میدان الکتریکی را نیز محاسبه کرد. در ادامه به جزئیات هر یک از مراحل پرداخته می‌شود. اگرچه مدل ارائه‌شده در این تحقیق همانند مدل‌های ارائه‌شده بر پایه معادله پواسون یک مدل سه‌بعدی است که قادر به محاسبه توزیع فضایی پارامترهای مدار الکتریکی جو زمین می‌باشد ولی دقت آن وابسته به دقت تعیین توزیع فضایی رسانندگی و ابرهای الکتریسته‌دار است. هر چند برای محاسبه توزیع رسانندگی سعی شده است از مدل‌ها و داده‌های به‌روزتر استفاده شود ولی ارائه

درجه (معادل ۳۰ تا ۱۵۰ دقیقه قوسی) بوده و فقط برای عرض های جغرافیایی بین ۳۸ درجه شمالی تا ۳۸ درجه جنوبی موجود می باشند. همچنین بازه زمانی داده های جمع آوری شده کوتاه و گسسته بوده و چون توسط ماهواره های در حال چرخش آشکارسازی و ثبت می شوند لذا به صورت همزمان قادر به شناسایی تمام آذرخش های اتفاق افتاده نخواهد بود. به همین خاطر در این پژوهش تصمیم بر این شد تا از داده های شبکه جهانی تعیین موقعیت آذرخش (World Wide Lightning WLLN Location Network) استفاده شود (ویرتس و همکاران، ۲۰۱۳). اخیراً تحلیل خوبی از داده های این شبکه توسط کاپلان و لائو (۲۰۲۱ و ۲۰۲۲) ارائه شده است. این شبکه شامل آشکارسازهایی است که بسته های امواج رادیویی با فرکانس بسیار پایین (۳ تا ۳۰ کیلوهرتز) ساطع شده از آذرخش ها (آذرخش های ابر به زمین و آذرخش های داخل ابر) را در بیش از ۷۰ نقطه بر روی سطح زمین آشکار و ثبت می کند. اگر حداقل ۵ ایستگاه بتواند یک بسته موج را آشکارسازی کند آنگاه آن بسته به عنوان یک رخداد صاعقه ای ثبت می شود. این شبکه به صورت رایگان داده های مربوط به توزیع فضایی چگالی این رخدادهای (تعداد وقوع رخداد در یک سال بر کیلومتر مربع) را با تفکیک فضایی ۰/۱ درجه (۶ دقیقه قوسی) و همچنین توزیع فضایی ساعت های تندی را با تفکیک فضایی ۰/۰۵ درجه (۳ دقیقه قوسی) در اختیار قرار می دهد. ساعت تندی، ساعتی است که در طول آن حداقل یک تندر شنیده می شود (دی گانگی و همکاران، ۲۰۲۲). این داده ها هم به صورت سری های زمانی (میانگین ماهانه برای تمام ماه های بین ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴) و هم به صورت میانگین های درازمدت در دسترس عموم می باشد. لازم به توضیح است که داده های معرفی شده در سطور بالا نمی توانند برای مدل سازی مدار الکتریکی جهانی به کار گرفته شوند چرا که همه آنها داده های میانگین هستند در حالی که برای محاسبه جریان الکتریکی شارش یافته از ابرها باید داده های خام را در اختیار داشت که بتوان با استفاده از آن تعداد ابرهای الکتریسته دار فعال در یک بازه زمانی کوتاه (یک

داده های دقیق تر برای ضرایب چسبندگی بین یون ها و هواویزها و همچنین تحرک پذیری یون ها اعتبار مدل حاضر برای رسانندگی را بالاتر خواهد برد. محاسبه مقدار جریان کل شارش یافته از ابرها به طرف یونسفر که نقش اساسی در تخمین پتانسیل یونسفر دارد عامل تعیین کننده دیگر در اعتبار مدل حاضر است. به کارگیری داده های دقیق تر برای توزیع فضایی و مشخصات ابرهای الکتریسته دار باعث نزدیکی بیشتر نتایج مدل با داده های واقعی خواهد شد.

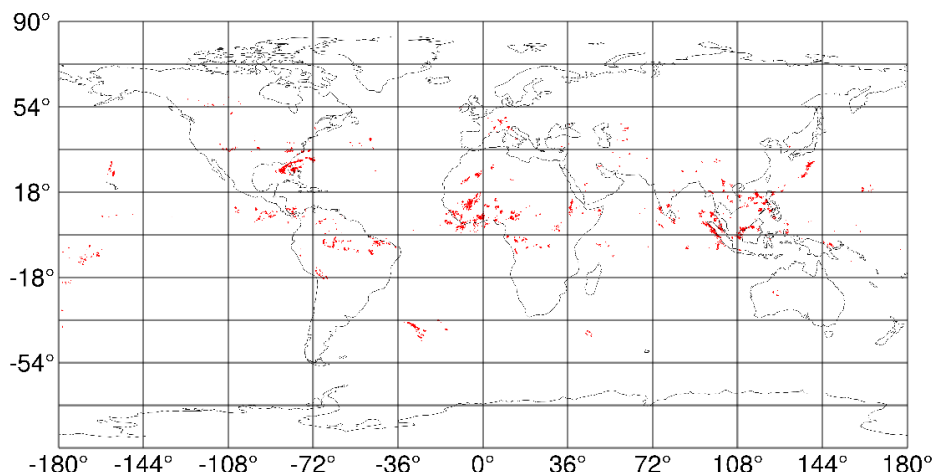
۱-۲. جریان الکتریکی بر اساس داده های شبکه جهانی تعیین موقعیت آذرخش (WLLN)

هر مدلی که برای مدار الکتریکی جهانی معرفی شود نیازمند داده های اندازه گیری شده برای توزیع فضایی و زمانی جریان الکتریکی شارش یافته از ابرها به طرف یونسفر (جریان ویلسون) است. اگرچه تاکنون داده هایی ارائه نشده است که توزیع جهانی جریان ویلسون را مشخص کند، ولی گروه هایی توانسته اند به صورت موردی و برای تعداد محدودی ابرهای تندی چگالی جریان الکتریکی شارش یافته از ابرها را با اندازه گیری میدان الکتریکی گزارش کنند (گیش و وایت، ۱۹۵۰؛ استرگیس و همکاران، ۱۹۵۷؛ وونگات و همکاران، ۱۹۶۶؛ بلاکسلی و همکاران، ۱۹۸۹؛ هولزورس و همکاران، ۲۰۰۵؛ توماس و همکاران، ۲۰۰۹؛ ماچ و همکاران، ۲۰۰۹). چگالی جریان الکتریکی از حاصل ضرب میدان الکتریکی در رسانندگی جو محاسبه می شود که برخی از این گروه ها اقدام به اندازه گیری رسانندگی کرده و برخی دیگر از مدل های موجود برای رسانندگی استفاده کرده اند. به دلیل عدم وجود توزیع فضایی و زمانی برای جریان الکتریکی ویلسون، اغلب از داده های مربوط به آذرخش برای محاسبه این جریان استفاده می شود. طی چند دهه گذشته داده های LIS/OTD مهم ترین داده های رایگان در مورد وقوع آذرخش بودند که از طریق ماهواره های ناسا برای سال های بین ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۰ تهیه شده است (سسیل و همکاران، ۲۰۱۴). داده های LIS/OTD دارای محدودیت هایی است از جمله این که تفکیک فضایی آن بین ۰/۵ درجه تا ۲/۵

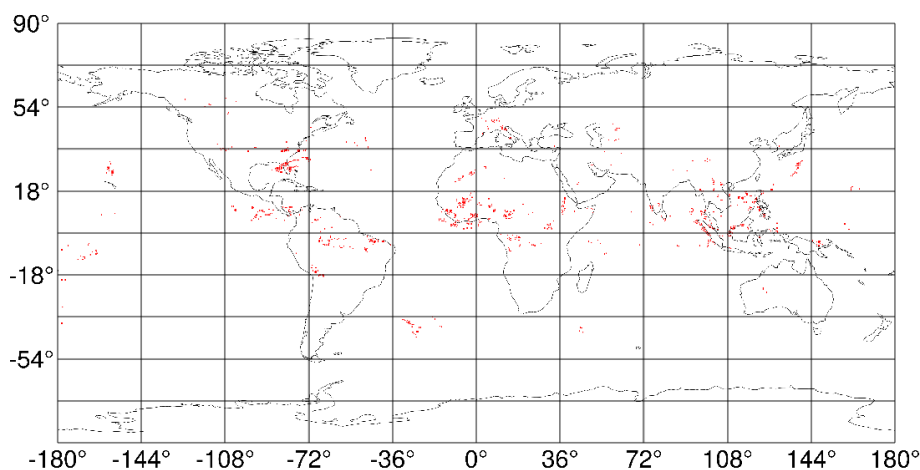
ساعت) را محاسبه کرد. این نوع داده خام برای روز ۱۵ ماه مه سال ۲۰۲۴ در اختیار نویسنده قرار گرفته است که شامل ۷۵۹۱۲۰ رخداد ثبت شده در طول یک شبانه روز می باشد. الگوی بلندمدت برای تعداد رخدادها در ساعت های مختلف شبانه روز و مقایسه آن با الگوی بلندمدت تغییرات شبانه روزی میدان الکتریکی جو (منحنی کارنگی) از اهمیت خاصی برخوردار است که توسط دیگران بررسی شده است (مزومن و همکاران، ۲۰۱۴؛ کوپا و همکاران، ۲۰۲۱).

به سبب این که هر آذرخش می تواند چند بسته موج ساطع کرده و منجر به ثبت چندین رخداد شود و همچنین هر ابر تندی می تواند در چرخه فعالیت خود چند آذرخش از چند نقطه متفاوت گسیل کند بنابراین هر رخداد ثبت شده به منزله حضور یک ابر تندی جداگانه نخواهد بود. برای این که بتوان از توزیع فضایی رخدادهای ثبت شده به توزیع فضایی ابرهای تندی دست یافت معمولاً از روش خوشه بندی استفاده می شود (هاچینز و همکاران، ۲۰۱۴؛ مزومن و همکاران، ۲۰۱۴، کوپا و همکاران، ۲۰۲۱). در این روش جو زمین به شبکه هایی با ابعاد مشخص تقسیم شده و تعداد رخدادهای ثبت شده در هر شبکه و در یک دوره زمانی معین شمرده می شود. چنانچه در این دوره زمانی حداقل یک رخداد در شبکه ای ثبت شده باشد، آن شبکه به عنوان محل حضور ابر تندی در نظر گرفته می شود. ابعاد شبکه ها باید متناسب با متوسط ابعاد ابرهای تندی و دوره زمانی نیز متناسب با متوسط مدت زمان چرخه فعالیت ابرهای تندی باشد. متوسط دوره زمانی فعالیت ابرهای تندی در حدود یک ساعت فرض می شود (دی گانگی و همکاران، ۲۰۲۲؛ کوپا و همکاران، ۲۰۲۱؛ مزومن و همکاران، ۲۰۱۴) و با توجه به بررسی های کوپا و همکاران (۲۰۲۱) مساحت تعلق یافته به هر ابر تندی به حدود ۸۰۰ کیلومتر مربع می رسد. بنابراین در این تحقیق برای خوشه بندی رخدادهای ثبت شده و استخراج تعداد و

موقعیت ابرهای تندی، سطح کره زمین به شبکه هایی با ابعاد 0.3° درجه (۱۸ دقیقه قوسی) تقسیم بندی شد. چنانچه در طول مدت زمان یک ساعت حداقل یک رخداد توسط شبکه WWLLN در داخل شبکه ای ثبت شده باشد، آن شبکه به عنوان محل حضور کل یا بخشی از یک ابر تندی محسوب خواهد شد. با توجه به این که یک ابر تندی ممکن است بخش هایی از چند شبکه مجاور را پوشانده باشد و با فرض این که در بازه زمانی یک ساعت بیش از یک ابر تندی نتواند در یک نقطه مشخص فعالیت داشته باشد لذا جهت تقلیل خطا شبکه های مجاور هم که حداقل یک رخداد ثبت شده داشته باشند در هم ادغام شدند. این فرایند به عنوان نمونه برای داده های ساعت ۱۷ روز ۱۵ ماه مه سال ۲۰۲۴ انجام یافته است که توزیع فضایی کل رخدادهای ثبت شده در این ساعت در شکل ۱ و توزیع فضایی ابرهای تندی متناظر در شکل ۲ به نمایش گذاشته شده است. شکل ۱ شامل ۳۳۴۶۹ رخداد ثبت شده می باشد که با استفاده از روش توصیف شده منجر به شناسایی ۷۹۸ ابر تندی (خوشه) می شود که توزیع فضایی آنها در شکل ۲ قابل مشاهده است. از بین ۷۹۸ ابر تندی شناسایی شده، تعداد ۳۹۶ مورد بالای اقیانوس ها و مابقی ۴۰۲ ابر نیز بر فراز خشکی تشکیل شده اند. بیشترین رخداد ثبت شده مربوط به شبکه واقع در عرض جغرافیایی ۱۱۷ درجه و طول جغرافیایی ۹۵ درجه بوده و میانگین رخدادهای ثبت شده برای هر شبکه نیز حدود ۱۱ می باشد. لازم به ذکر است که تعداد خوشه ها و در نتیجه تعداد ابرهای تندی شناسایی شده وابسته به ابعاد شبکه ها است. به عنوان مثال برای شبکه بندی با ابعاد 0.1° ، 0.2° ، 0.3° ، 0.4° و 0.5° تعداد ابرهای تندی شناسایی شده به ترتیب ۱۵۴۵، ۱۰۳۷، ۷۹۸، ۶۶۹ و ۵۶۸ خواهد بود. همان طور که قبلاً نیز ذکر شد انتخاب ابعاد 0.3° برای شبکه بندی بر پایه بررسی های کوپا و همکاران (۲۰۲۱) استوار است.



شکل ۱. توزیع فضایی رخدادهای ثبت شده توسط شبکه WWLLN برای بازه زمانی ۱۷-۱۸ روز ۱۵ مه سال ۲۰۲۴.



شکل ۲. توزیع فضایی خوشه‌های (ابره‌ای تندری) محاسبه شده برای بازه زمانی ۱۷-۱۸ روز ۱۵ مه سال ۲۰۲۴، متناظر با رخدادهای ثبت شده در شکل ۱.

ابره‌ای تندری و ابرهای رگباری در تغذیه جریان مدار الکتریکی جهانی به‌ترتیب ۸۳ درصد و ۱۷ درصد است. ولی از تعداد کل ابرهای دخیل در تغذیه جریان مدار الکتریکی جهانی (ابره‌ای الکتریسیته‌دار) ۶۳ درصد آنها ابرهای تندری و ۳۷ درصد نیز ابرهای رگباری هستند (ماچ و همکاران، ۲۰۱۱). اخیراً پترسون و همکاران (۲۰۱۸) با بررسی انبوه داده‌های ۱۵ ساله ماهواره TRMM که به‌منظور دستیابی به توزیع و تنوع بارش در مناطق استوایی طراحی شده بود به این نتیجه رسیدند که ابرهای تندری سهم ۶۱ درصدی و ابرهای رگباری سهم ۳۹ درصدی در جریان مدار الکتریکی جهانی دارند که تقریباً با یافته‌های

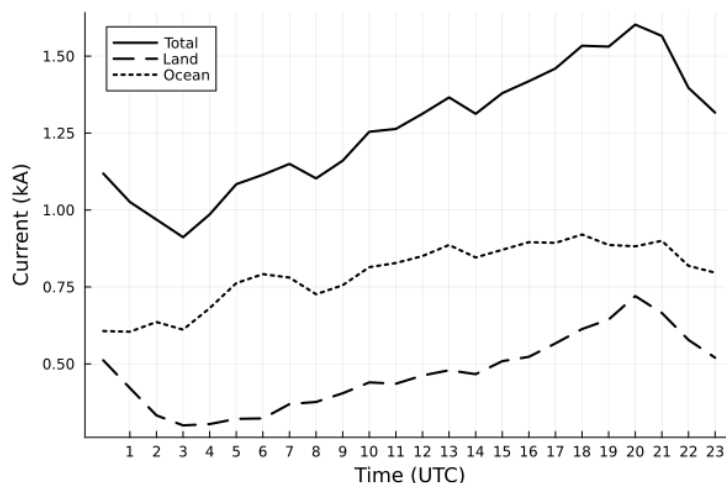
برای محاسبه جریان الکتریکی کل شارش‌یافته به یونسفر لازم است سهم هر ابر در تغذیه جریان را بدانیم. همان‌طور که توسط لیو و همکاران (۲۰۱۰) و همچنین بلاکسلی و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۲۰) نشان داده شده است ابرهای رگباری نیز سهم قابل‌توجهی در تغذیه جریان مدار الکتریکی جهانی دارند. اگرچه هیچ داده‌ای برای توزیع جهانی جریان شارش‌یافته از طرف ابرهای رگباری به طرف یونسفر وجود ندارد ولی سهم این ابرها در مقایسه با ابرهای تندری مطالعه شده است. بلاکسلی و همکاران (۲۰۱۴ و ۲۰۲۰) با ترکیب داده‌های ماهواره‌ای (LIS/OTD) و اندازه‌گیری‌های انجام یافته با هواگردها نشان دادند که سهم کل

ماچ و همکاران (۲۰۱۱) در تطابق می‌باشد. بنابراین در این پژوهش از نتایج پترسون و همکاران (۲۰۱۸) در تسهیم جریان مدار الکتریکی بین ابرهای تندری و رگباری استفاده خواهد شد. نکته مهم دیگری که باید مدنظر قرار گیرد آن است که همه ابرها جریان ویلسون بالارونده (مثبت) ایجاد نمی‌کنند بلکه درصدی از آنها جریان ویلسون منفی تولید می‌کنند که در واقع تضعیف‌کننده جریان مدار الکتریکی جهانی به‌شمار می‌روند (راکوف و اومان، ۲۰۰۳). مشاهدات نشان می‌دهند که حدود ۷ درصد از کل ابرهای الکتریسته‌دار جریان ویلسون منفی ایجاد می‌کنند (ماچ و همکاران، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱). اندازه‌گیری‌های ماچ و همکاران (۲۰۱۱) طی ۸۵۰ پرواز بر فراز ابرها نشان می‌دهد متوسط جریان شارش‌یافته به بالا از طرف هر یک از ابرهای دارای صاعقه (ابرهای تندری) واقع شده بر فراز اقیانوس و خشکی به ترتیب ۱/۶ و ۱/۰ آمپر می‌باشد. همچنین متوسط جریان شارش‌یافته از هریک از ابرهای الکتریسته‌دار بدون صاعقه (ابرهای رگباری) واقع شده بر فراز اقیانوس و خشکی نیز به ترتیب ۰/۳۹ و ۰/۱۳ آمپر است. اکنون با توجه به تعداد ابرهای تندری شناسایی شده از شبکه جهانی WWLLN و سهم هر ابر در ایجاد جریان می‌توان جریان کل مدار الکتریکی جهانی را تخمین زد که برای ساعت ۱۷ روز ۱۵ ماه مه سال ۲۰۲۴ تقریباً برابر ۱۴۶۰ آمپر خواهد بود که از

این مقدار ۸۹۰ آمپر سهم ابرهای تندری و ۵۷۰ آمپر نیز سهم ابرهای رگباری می‌باشد. سهم ابرهای بر فراز اقیانوس‌ها، خشکی و کل ابرها در تغذیه جریان مدار الکتریکی جهانی به تفکیک ساعت در شکل ۳ نشان داده شده است. بیشترین مقدار جریان برابر ۱۶۰۲ آمپر بین ساعت ۲۰-۲۱ و کمترین مقدار جریان نیز برابر ۹۱۱ آمپر بین ساعت‌های ۳-۴ شارش می‌یابد. متوسط جریان شارش‌یافته نیز برابر ۱۲۶۴ آمپر می‌باشد. لازم به ذکر است که پترسون و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از اندازه‌گیری‌های حاصل از ماهواره‌ها جریان کل ایجاد شده توسط ابرهای باردار را بین ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ آمپر تخمین زده‌اند که ۱۴۰۰ آمپر با احتساب ۷ درصد جریان منفی ویلسون و ۱۶۰۰ آمپر بدون در نظر گرفتن جریان منفی است.

۲-۲. مقاومت ستونی و مقاومت کل جو

یکی دیگر از مؤلفه‌های مدار الکتریکی جهانی مقاومت جو می‌باشد. به دلیل حضور مواد رادیواکتیو بر روی سطح زمین و در جو و همچنین به دلیل پرتوهای کیهانی، جو زمین مقداری رسانندگی الکتریکی پیدا می‌کند. این رسانندگی باعث شارش جریان الکتریکی بین سطح زمین و یونسفر خواهد شد. متناظر با این رسانندگی متناهی یک مقاومت الکتریکی نیز می‌توان تعریف کرد.



شکل ۳. جریان کل شارش‌یافته از ابرهای بر فراز اقیانوس‌ها (خط نقطه چین)، ابرهای بر فراز خشکی (خط شکسته) و کل ابرهای جو (خط ممتد) در ساعت‌های مختلف روز ۱۵ ماه مه سال ۲۰۲۴.

مرسوم است برای جو زمین پارامتری به نام مقاومت ستونی تعریف می شود که برابر مقاومت استوانه ای با ارتفاع جو و با مساحت سطح مقطع واحد می باشد. مقاومت ستونی را می توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (هریسون، ۲۰۰۵):

$$n = \frac{-\beta_a N_a + \sqrt{\beta_a^2 N_a^2 + 4\alpha q}}{2\alpha} \quad (3)$$

که در آن q نرخ تولید یون بر واحد حجم، α ضریب بازترکیب یون-یون، β_a ضریب اتصال یون-هواویز و N_a چگالی عددی هواویزها می باشد. نرخ یونیزاسیون q مهم ترین نقش را در تعیین چگالی یون ها دارد. در نواحی پایین تر از یونسفر پرتوهای کیهانی و رادیواکتیویته نقش اصلی را در یونیزاسیون جو دارند هرچند در خارج از لایه مرزی رادیواکتیویته نقش خود را می بازند. برای یونیزاسیون حاصل از پرتوهای کیهانی از مدل CRAC:CRII استفاده شده است (اوسوسکین و همکاران، ۲۰۲۴) که بر پایه شبیه سازی مونت کارلو استوار می باشد. این مدل تعداد ۱۳۱ جدول را در اختیار قرار می دهد که هر جدول برای یک عمق (ارتفاع) مشخص از جو تدوین شده است و هر یک حاوی نرخ یونیزاسیون (بر حسب g/cm^2) حاصل از پرتوهای کیهانی در ارتفاع، زمان و موقعیت جغرافیایی مشخص می باشد (از صفر تا ۱۰۲۵ گرم بر سانتی متر مربع). بدین ترتیب نرخ یونیزاسیون بر حسب جفت یون بر گرم بر ثانیه در ارتفاع و موقعیت جغرافیایی مشخص در اختیار قرار می گیرد که چنانچه بر چگالی جرمی جو در آن نقطه ضرب شود نرخ یونیزاسیون بر حسب جفت یون بر ثانیه بر سانتی متر مکعب به دست می آید. در این تحقیق از فرمول بارومتریک $p(h) = p_0 \exp(-h/H)$ با $H=7.5 \text{ km}$ (متوسط مقیاس ارتفاع جو) و تبدیل $1 g/cm^2 = 1.0195 \text{ hp}$ استفاده شده است تا بتوان ارتفاع را بر حسب کیلومتر از سطح زمین به دست آورد. با این تبدیل نرخ یونیزاسیون مدل از سطح زمین تا ارتفاع ۸۵ کیلومتر با گام های غیریکنواخت به دست آمده (شامل ۱۳۱ گام) و با استفاده از درون یابی، نرخ یونیزاسیون با گام های (تفکیک) ۱۰۰ متر (۸۵۰ گام) محاسبه و در مدل برای تعیین رسانندگی جو مورد استفاده قرار گرفت. همچنین نرخ یونیزاسیون حاصل از اثرات رادیواکتیو q_r به صورت زیر

مرسوم است برای جو زمین پارامتری به نام مقاومت ستونی تعریف می شود که برابر مقاومت استوانه ای با ارتفاع جو و با مساحت سطح مقطع واحد می باشد. مقاومت ستونی را می توان با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد (هریسون، ۲۰۰۵):

$$R_c = \frac{V_I}{J_z} = \int_{z_s}^{z_i} \frac{dz}{\sigma(z)}, (\Omega.m^2) \quad (1)$$

که در آن $\sigma(z)$ نشانگر رسانندگی جو در ارتفاع z از سطح زمین، V_I پتانسیل یونسفر، J_z چگالی جریان الکتریکی، z_s ارتفاع از سطح دریا است که وابسته به موقعیت جغرافیایی بوده و z_i ارتفاع موثر یونسفر است که معمولاً سطح زیرین یونسفر و برابر ۶۰ کیلومتر فرض می شود (رایکرافت و همکاران، ۲۰۲۴). انتخاب این ارتفاع بسیار معقول است چراکه با افزایش ارتفاع رسانندگی افزایش قابل توجهی پیدا می کند و همان طور که نشان داده شده است حدود ۹۳٪ از مقاومت ستونی کل جو فقط متعلق به ارتفاعات پایین تر از ۱۰ کیلومتر می باشد (رایکرافت و هریسون، ۲۰۱۲). با توجه به این که رسانندگی جو تابعی از مکان است بنابراین مقاومت ستونی نیز تابعی از مکان خواهد بود. بدین ترتیب اگر کل جو به ستون هایی تقسیم شود آنگاه مقاومت کل جو به صورت مقاومت معادل یک سری از مقاومت های موازی قابل محاسبه خواهد بود که مقاومت هر ستون برابر حاصل تقسیم مقاومت ستونی بر مساحت سطح مقطع آن می باشد. برای محاسبه مقاومت ستونی لازم است رسانندگی معین باشد که در اینجا از مدل ارائه شده توسط برهانیان (۱۴۰۴) برای رسانندگی استفاده خواهد شد. این مدل به صورت خلاصه در اینجا توضیح داده می شود و جزئیات بیشتر را می توان در منبع مذکور یافت. در حالت کلی رسانندگی جو از رابطه زیر قابل محاسبه است (رایکرافت و همکاران، ۲۰۰۸).

$$\sigma = e(n_+ \mu_+ + n_- \mu_-) \quad (2)$$

که در آن μ_+ (μ_-) تحرک پذیری یون های مثبت (منفی)، n_+ (n_-) چگالی یون های مثبت (منفی) و e بار الکترون می باشد. با تعریف چگالی متوسط یون ها به صورت $n = (n_+ + n_-)/2$ ، رسانندگی از طریق رابطه

مدل‌بندی می‌شود.

$$q_r = q_{rd} \exp\left(-\frac{z}{0.2}\right) + 0.8q_m \exp\left(-\frac{z}{3}\right) + 0.2q_m \exp\left(-\frac{z}{6}\right) \quad (۴)$$

که در آن q_{rd} نرخ یونیزاسیون حاصل از ذرات آلفا، بتا، گاما و گاز رادون ^{220}Rn با نیمه‌عمر ۵۴ ثانیه بوده، q_{ro} نرخ یونیزاسیون حاصل از گاز رادون ^{222}Rn و z نیز ارتفاع از سطح زمین بر حسب کیلومتر است. مقدار q_{rd} ثابت و برابر ۱۰ جفت یون بر ثانیه بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته شده و مقدار q_{ro} نیز که وابسته به مختصات جغرافیایی است به‌وسیله داده‌های ارائه‌شده توسط گلوبنکو و همکاران (۲۰۲۰) تعیین می‌شود. ضریب باز ترکیب α نیز با استفاده از داده‌های ارائه‌شده توسط زونر-ویتزورک و همکاران (۲۰۲۲) محاسبه شده است. مقدار ضریب اتصال بین یون و هواویز β_a که وابسته به شعاع هواویزها r است به‌وسیله فرمول پیشنهادی هوپل (۱۹۸۵) به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

$$\beta_a = \begin{cases} 4.36 \times 10^{-5} r - 9.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} & \text{for } r \geq 0.01 \mu\text{m} \\ 10^{1.243 \log(r) - 3.978} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} & \text{for } r < 0.01 \mu\text{m} \end{cases} \quad (۵)$$

در این تحقیق شعاع متوسط هواویزها ۰/۱ میکرومتر در نظر گرفته شده (هریسون و بنت، ۲۰۰۷) و مطابق پیشنهاد ساپکوتا و وارشنیا (۱۹۹۰) چگالی عددی آنها نیز به‌صورت $N_a = N_{a0} \exp(-z)$ تغییر می‌کند که در آن N_{a0} چگالی هواویزها بر روی سطح زمین بوده و وابسته به موقعیت جغرافیایی است. مقدار N_{a0} با استفاده از داده‌های تینسلی و زو (۲۰۰۶) برابر ۵۰۰۰ بر سانتی متر مکعب در نظر گرفته می‌شود. در نهایت تحرک‌پذیری یونها نیز بر پایه رابطه زیر محاسبه شده است (زو و تینسلی، ۲۰۰۷).

$$\mu_i = \mu_{i0} \frac{p_0}{p} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{0.5} \left(\frac{T_0 + 120}{T + 120} \right) \quad (۶)$$

که در آن $i = p, n$ (یون‌های منفی و مثبت) و μ_{i0} بیانگر تحرک‌پذیری یون در سطح دریا است که به‌ترتیب برای یون‌های مثبت و منفی برابر $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{Vs}$ و $1.9 \times 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{Vs}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین

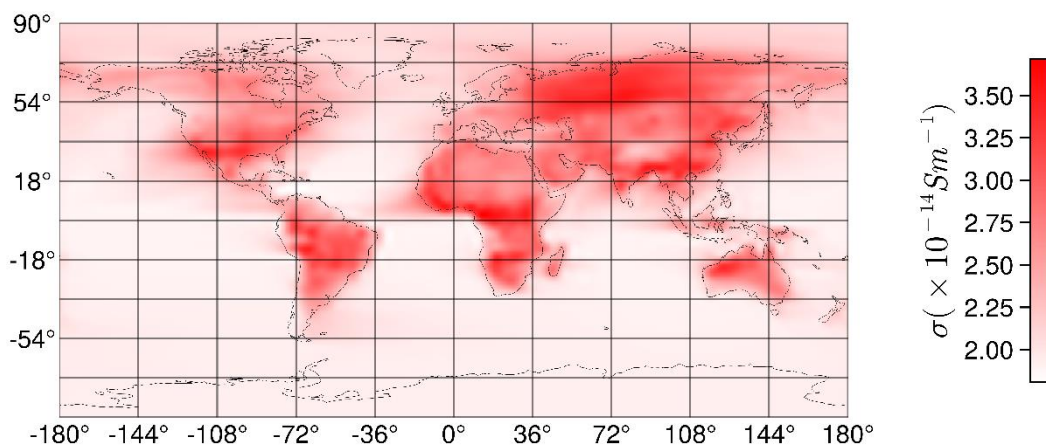
T_0 ، p_0 نیز نشانگر فشار و دما بر سطح دریا هستند که مقادیر آنها به‌ترتیب برابر ۱۰۱۳ هکتوپاسکال و ۲۸۸/۱۶ کلون فرض شده است. مقادیر T ، p نیز که بیانگر فشار و دما در ارتفاع معینی از جو هستند توسط مدل استاندارد جو آمریکا تعیین خواهد شد. به این ترتیب اکنون می‌توان رسانندگی و در پی آن مقاومت ستونی و مقاومت کل جو زمین را محاسبه کرد. در شکل ۴ توزیع فضایی رسانندگی جو بر روی سطح زمین و ارتفاعات ۳۰ و ۶۰ کیلومتری نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل پیدا است با افزایش ارتفاع رسانندگی افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند به‌طوری‌که رسانندگی در ارتفاع ۶۰ کیلومتر از سطح زمین حدود چهار مرتبه بزرگ‌تر از رسانندگی بر روی سطح زمین است. در نزدیکی‌های سطح زمین رسانندگی بر فراز خشکی بیشتر از بالای آب است چراکه در نزدیکی سطح زمین که رادیواکتیویته نقش غالب را در یونیزاسیون جو بازی می‌کند فقط بر بالای خشکی حضور دارد. با افزایش ارتفاع نقش رادیواکتیویته در یونیزاسیون کم‌رنگ‌تر شده و در عوض نقش پرتوهای کیهانی پررنگ‌تر می‌شود. به همین خاطر در نزدیکی سطح زمین توزیع رسانندگی همانند توزیع نرخ یونیزاسیون حاصل از گاز ^{222}Rn است در حالی که در ارتفاعات بالاتر نحوه توزیع رسانندگی مشابه توزیع نرخ یونیزاسیون حاصل از پرتوهای کیهانی است (مقایسه شود با شکل‌های ۱ و ۲ گلوبنکو و همکاران (۲۰۲۰)). اندازه و چگالی هواویزها نقش مهمی در میزان رسانندگی جو بازی می‌کنند، بدین ترتیب که با افزایش شعاع و چگالی هواویزها رسانندگی جو کاهش پیدا می‌کند چرا که هواویزهای بزرگ‌تر تعداد یون‌های بیشتری را جذب کرده و از این طریق می‌توانند تعداد حامل‌های بار با تحرک‌پذیری بالا را کاهش داده و در نتیجه رسانندگی نیز کاهش پیدا کند. برای این که به میزان حساسیت رسانندگی به اندازه و تعداد هواویزها پی ببریم وابستگی رسانندگی یک نقطه مشخص (مثلاً ۳۰ درجه شمالی، ۶۰ درجه شرقی و ارتفاع یک کیلومتر) به این پارامترها مورد مطالعه قرار گرفت. با ثابت نگه داشتن چگالی هواویزها رسانندگی جو برای هواویزهایی با شعاع‌های ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴

بر فراز خشکی در این لایه ها بیشتر است لذا در حالت کلی مقاومت ستونی بر فراز خشکی کمتر از مقاومت بر فراز دریا است که این نتیجه به خوبی در شکل ۵ نمایان شده است. با داشتن مقاومت ستونی می توان مقاومت کل جو زمین R_G را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد.

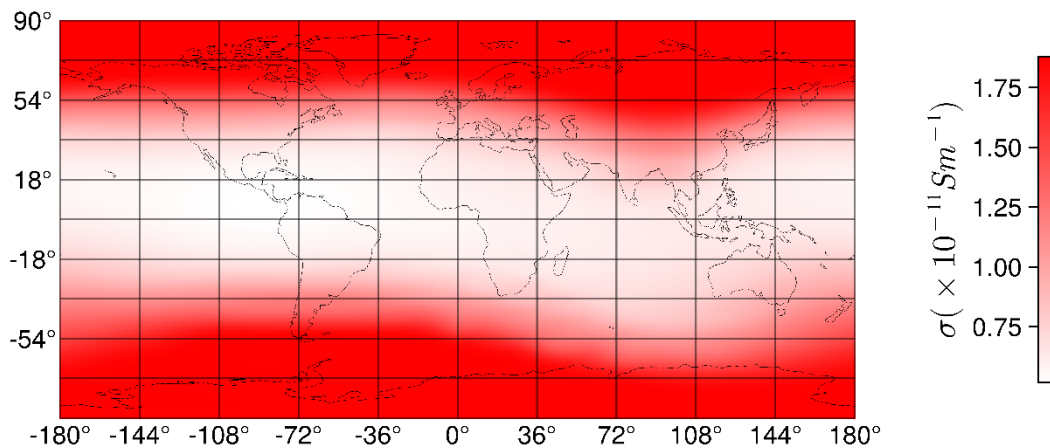
$$\frac{1}{R_G} = \sum_{i,j} \frac{\Delta A_{ij}}{R_{ij}} \quad (۷)$$

که در آن R_{ij} مقاومت شبکه ای با مساحت سطح مقطع ΔA_{ij} است. با استفاده از داده های شکل ۵ و رابطه (۷) مقاومت کل جو زمین حدود ۲۱۴ اهم به دست می آید. لازم به ذکر است که مقدار مقاومت الکتریکی کل جو زمین توسط مدل های دیگر بین ۲۰۰-۲۵۰ اهم تخمین زده شده است (تینسلی و زو، ۲۰۰۶؛ بامگاردنر و همکاران، ۲۰۱۳؛ جانسکی و همکاران، ۲۰۱۷).

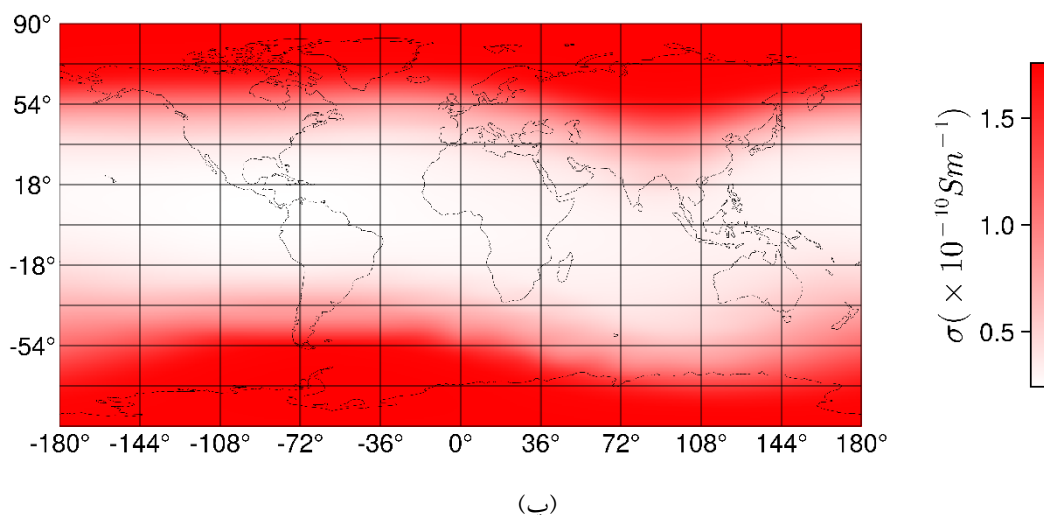
میکرومتر به ترتیب ۳۸/۳، ۲۰/۰، ۱۳/۷ و ۱۰/۴ فمتوزیمنس بر متر به دست آمد که تقریباً کاهش ۵۰ درصدی به ازای دو برابر شدن شعاع را گزارش می کند. همچنین برای چگالی های ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ گیگا ذره بر سانتی متر مکعب رسانندگی به ترتیب برابر ۴۸/۰، ۴۰/۸، ۳۵/۳، ۳۰/۹ و ۲۷/۴ فمتوزیمنس بر متر به دست می آید. همان طور که واضح است حساسیت رسانندگی به شعاع هواویزها بیشتر از چگالی آنها می باشد. لازم به توضیح است که برای نقاط دیگر نیز این حساسیت تقریباً به همین شکل باقی می ماند. با استفاده از داده های مربوط به رسانندگی، مقاومت ستونی جو با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شده است که توزیع که توزیع فضایی آن در شکل ۵ به تصویر کشیده شده است. با توجه به این که لایه های پایین جو سهم اصلی را در ایجاد مقاومت ستونی دارند و مطابق شکل ۴-الف رسانندگی جو



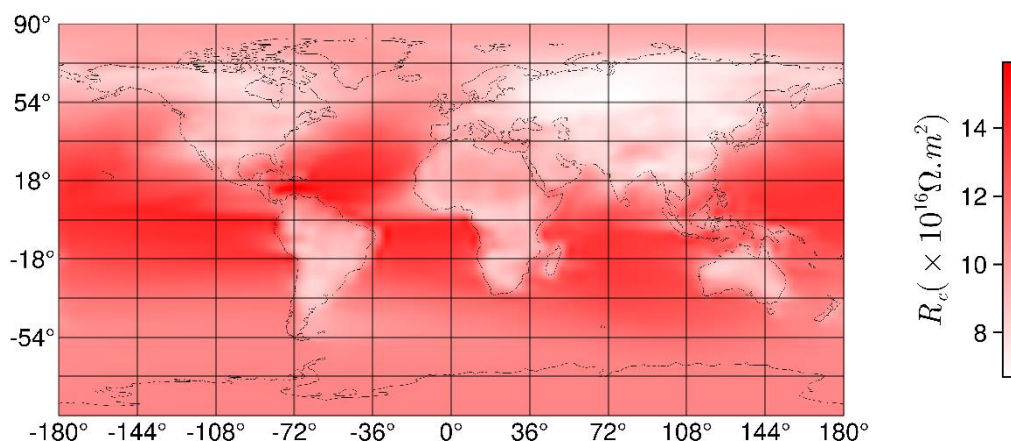
(الف)



(ب)



شکل ۴. توزیع فضایی رسانندگی جو در سه ارتفاع (الف) بر روی سطح زمین، (ب) ۳۰ کیلومتر و (پ) ۶۰ کیلومتر. زمان منطبق با شکل‌های ۱ تا ۴ می‌باشد.



شکل ۵. توزیع فضایی مقاومت ستونی جو. زمان منطبق با شکل‌های ۱ تا ۴ می‌باشد.

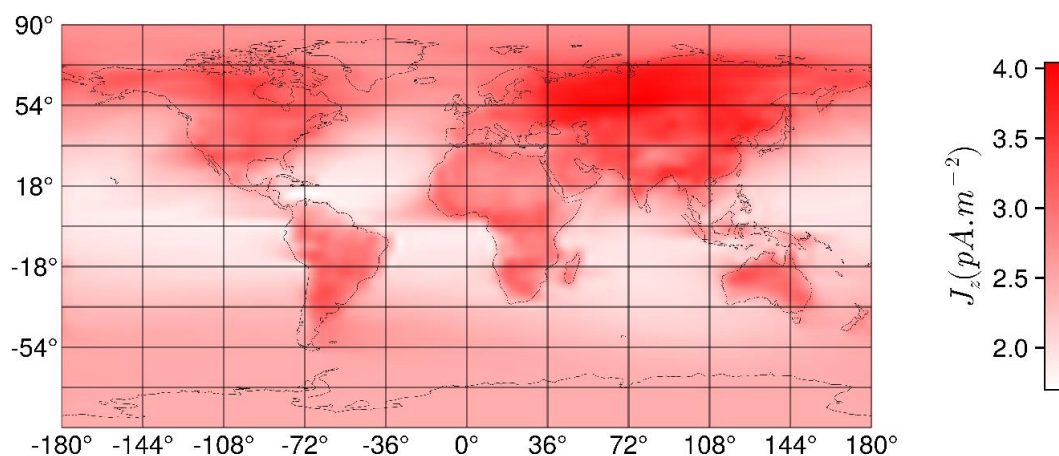
۳-۲. توزیع فضایی چگالی جریان و میدان الکتریکی در جو

اکنون اگر جریان کل شارش‌یافته به بالا از طرف ابرها را به صورت متوسط ۱۲۶۴ آمپر (متوسط جریان الکتریکی در روز ۱۵ ماه مه ۲۰۲۴؛ شکل ۳ و توضیحات مربوطه ملاحظه شود) و مقاومت کل جو را نیز برابر ۲۱۴ فرض کنیم آنگاه اختلاف پتانسیل بین زمین و یونسفر حدود ۲۷۰ کیلوولت به دست می‌آید. بنابراین با در نظر گرفتن این مقادیر برای اختلاف پتانسیل و مقاومت کل، توزیع فضایی چگالی جریان الکتریکی به کمک معادله (۱) از رابطه $J_z = V_I / R_c$ قابل محاسبه می‌باشد که در شکل ۶ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در حالت پایا چگالی

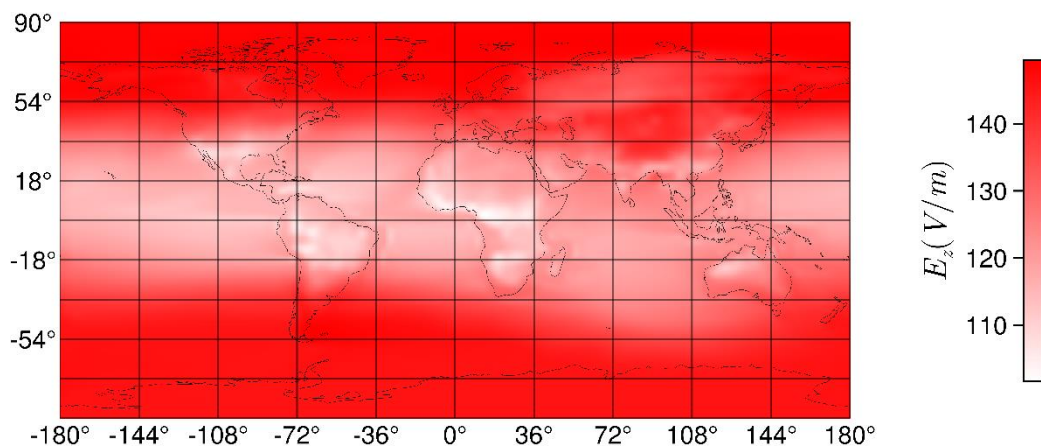
جریان الکتریکی جو وابسته به ارتفاع نبوده و در تمام ارتفاعات مقدار یکسانی دارد. همان‌طور که از شکل ۶ پیدا است الگوی توزیع فضایی چگالی جریان الکتریکی مشابه رسانندگی الکتریکی بر روی سطح زمین است (مقایسه شود با شکل ۴-الف) بدین دلیل که سهم اصلی در مقاومت جو مربوط به لایه‌های نزدیک سطح زمین است که رسانندگی پایین است. حال که توزیع چگالی جریان در دست است می‌توان به کمک قانون اهم $E = J_z / \sigma$ توزیع فضایی میدان الکتریکی جو را نیز محاسبه کرد. با توجه به این که میدان الکتریکی جو علاوه بر موقعیت جغرافیایی به ارتفاع نیز وابسته است لذا توزیع میدان الکتریکی برای سه ارتفاع مختلف در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. چون در

کشتی که به کشتی کارنگی معروف شد اقدام به اندازه‌گیری میدان الکتریکی جو در نزدیکی سطح زمین کرد و نشان داده شد که الگوی تغییرات روزانه میدان الکتریکی جو مستقل از مکان اندازه‌گیری از یک روند یکسان پیروی می‌کند که در شکل ۸ نشان داده شده و به نام منحنی کارنگی معروف است (هریسون، ۲۰۲۰). یکی از معیارهای سنجش هر مدل برای مدار الکتریکی جهانی و داده‌های مربوط به آن مقایسه با منحنی کارنگی است. بدین‌خاطر تغییرات روزانه میدان الکتریکی در سه نقطه متفاوت در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشخص است الگوی تغییرات میدان الکتریکی در هر سه نقطه به‌صورت کامل باهم انطباق دارند. در منحنی کارنگی کمترین مقدار میدان حوالی ۳ صبح (به وقت جهانی یا UTC) و بیشینه مقدار میدان نیز حوالی ساعت ۲۰ رخ می‌دهد که الگوی‌های به‌دست آمده توسط این مدل برای سه نقطه نیز انطباق خوبی با آن دارد. اگرچه اندازه و الگوی ریز میدان الکتریکی تخمین زده شده توسط مدل ارائه‌شده در این تحقیق با میدان نشان داده شده (اندازه‌گیری‌شده) توسط منحنی کارنگی متفاوت است ولی باید توجه داشت که منحنی کارنگی نشانگر یک الگوی میانگین برای یک بازه زمانی بلند است در حالی که میدان محاسبه شده در این تحقیق برای یک روز مشخص می‌باشد.

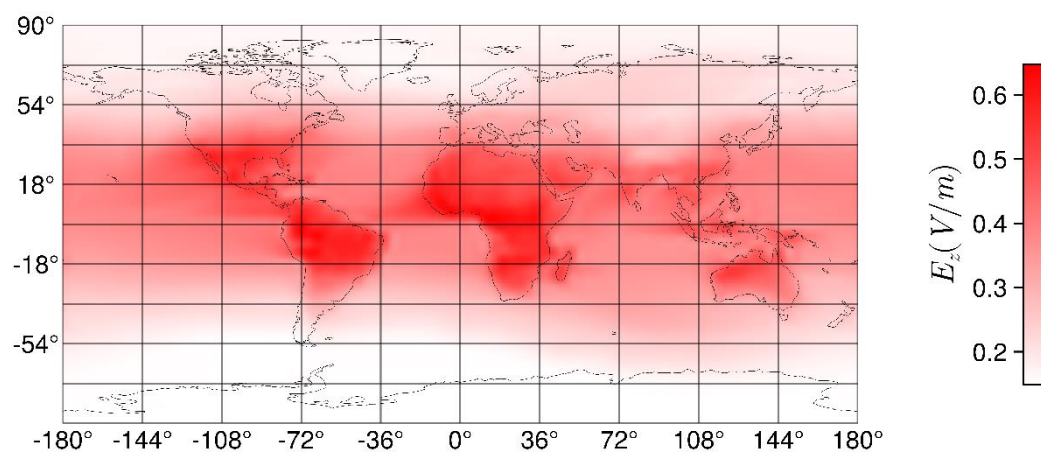
حالت پایا چگالی جریان با تغییر ارتفاع ثابت باقی مانده و رسانندگی با افزایش ارتفاع افزایش پیدا می‌کند به‌همین خاطر میدان الکتریکی با افزایش ارتفاع کاهش قابل توجهی را تجربه می‌کند طوری که میدان در ارتفاع ۶۰ کیلومتری نسبت به میدان بر روی سطح زمین حدود سه مرتبه کوچک‌تر است. در نزدیکی سطح زمین میدان الکتریکی در نواحی استوایی کمترین مقدار را دارا است ولی با افزایش عرض جغرافیایی میدان الکتریکی نیز افزایش پیدا می‌کند. به‌خصوص این که اندازه میدان الکتریکی در نواحی خشکی که رسانندگی بالاتر است به کمترین مقدار خود می‌رسد الگویی که بسیار شبیه به الگوی توزیع مقاومت ستونی است. در ارتفاعات بالاتر (خارج از لایه مرزی) این الگو برعکس می‌شود بدین معنی که در نواحی استوایی و به‌خصوص بر فراز خشکی اندازه میدان الکتریکی بیشتر بوده و با افزایش عرض جغرافیایی میدان الکتریکی کاهش پیدا می‌کند. علت این تفاوت ریشه در سازوکار متفاوت یونیزاسیون در لایه مرزی (رادپواکتیویته) و لایه‌های بالاتر (پرتوهای کیهانی) دارد. یکی دیگر از موضوعات مهم در بررسی مدار الکتریکی جهانی تغییرات روزانه میدان الکتریکی جو است و همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد به منحنی کارنگی معروف است. طی سال‌های ۱۹۱۵ تا ۱۹۲۹ موسسه کارنگی واشینگتن با استفاده از یک



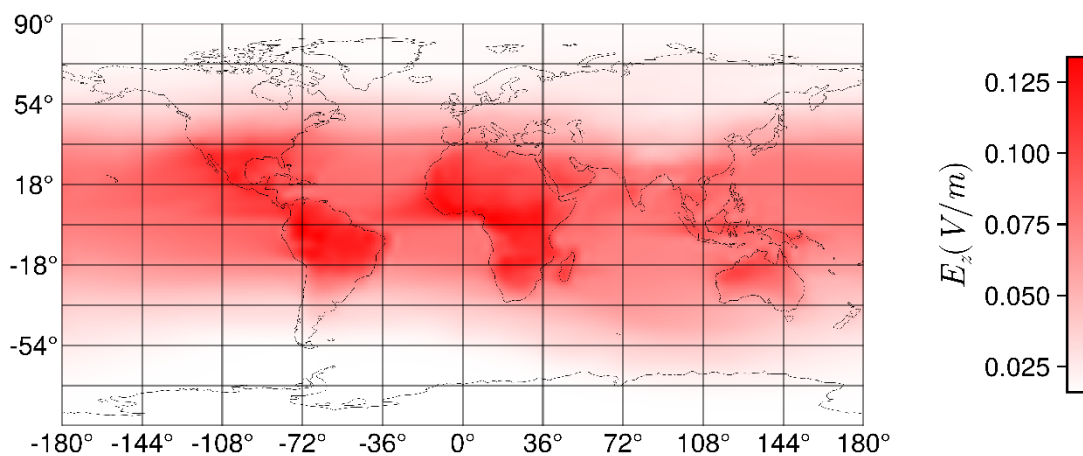
شکل ۶. توزیع فضایی چگالی شار جریان الکتریکی جو.



(الف)

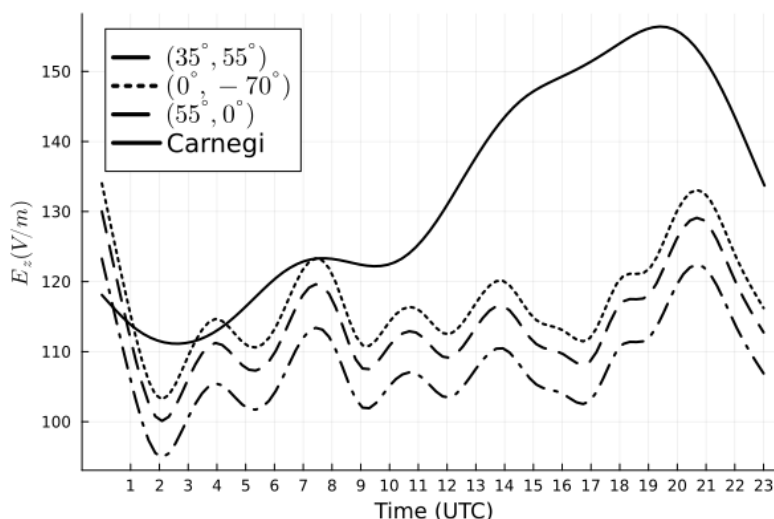


(ب)



(پ)

شکل ۷. توزیع فضایی میدان الکتریکی جو در سه ارتفاع الف) سطح زمین، ب) ۳۰ کیلومتر و پ) ۶۰ کیلومتر. زمان منطبق با شکل‌های ۱ تا ۳ می‌باشد.



شکل ۸. تغییرات روزانه میدان الکتریکی بر روی سطح زمین و در سه موقعیت جغرافیایی ۵۵ درجه شمالی و صفر درجه (خط-نقطه‌چین)، ۳۵ درجه شمالی و ۵۵ درجه شرقی (خط شکسته)، صفر درجه و ۷۰ درجه جنوبی (نقطه‌چین) و منحنی کارنگی (خط ممتد).

۳. خلاصه و بحث

در این تحقیق یک مدل فیزیکی برای مدار الکتریکی جهانی بر پایه دقیق‌ترین و معتبرترین داده‌ها ارائه شده است که توزیع جهانی و سه‌بعدی متغیرهای مدار الکتریکی جهانی یعنی میدان الکتریکی، چگالی جریان الکتریکی و مقاومت ستونی را با دقت ۰/۵ درجه (۳۰ دقیقه قوسی) در طول و عرض جغرافیایی و ۵۰ متر در ارتفاع محاسبه می‌کند. ابرهای الکتریسیته‌دار که شامل ابرهای تندری و ابرهای رگباری (ابرهای الکتریسیته‌دار بدون رعدوبرق) می‌شود منابع اصلی تأمین جریان مدار الکتریکی جهانی به شمار می‌روند. برای این که بتوان مدلی برای مدار الکتریکی جهانی ارائه کرد لازم است تا توزیع فضا-زمانی این ابرها در دسترس باشد. چون هیچ داده جهانی برای توزیع این ابرها وجود ندارد به همین خاطر از داده‌های شبکه جهانی وقوع آذرخش WWLLN برای یافتن توزیع ابرهای الکتریسیته‌دار استفاده شده است. این شبکه پالس‌های الکترومغناطیسی فرکانس پایین ساطع شده از ابرها را آشکارسازی و ثبت می‌کند. با توجه به این که هر پالس ثبت شده متناظر با یک ابر تندری نیست لذا از روش خوشه‌بندی برای یافتن توزیع ابرهای تندری استفاده شده است. با توجه به این که متوسط جریان شارش‌یافته از ابرهای تندری و ابرهای رگباری و همچنین نسبت تعداد این دو نوع ابر

اندازه‌گیری و گزارش شده، بر این اساس جریان کل شارش‌یافته به یونسفر از طرف ابرهای الکتریسیته‌دار محاسبه شده است. نشان داده شد برای روز ۱۵ ماه مه سال ۲۰۲۴ که داده‌های آن در اختیار نویسنده بوده است، میانگین جریان شارش‌یافته برابر ۱۲۶۴ آمپر، کمینه جریان برابر ۹۱۱ آمپر بین ساعت‌های ۳-۴ صبح و بیشینه جریان نیز برابر ۱۶۰۲ آمپر بین ساعت‌های ۲۰-۲۱ رخ می‌دهد.

رسانندگی جو زمین که در پایین‌تر از لایه یونسفر توسط برهم‌کنش پرتوهای کیهانی و پرتوهای ساطع شده از مواد رادیواکتیو با مولکول‌های هوا به وجود می‌آید بر پایه به‌روزترین مدل‌ها و داده‌ها محاسبه شده است. نرخ یونیزاسیون حاصل از پرتوهای کیهانی با استفاده از آخرین نسخه مدل CRAC:CRII که بر اساس شبیه‌سازی مونت کارلو استوار است محاسبه شده است. برای محاسبه نرخ یونیزاسیون ایجاد شده توسط مواد رادیواکتیو نیز از آخرین داده‌های گزارش شده کمک گرفته شده است. با استفاده از این مدل‌ها و داده‌ها توزیع سه‌بعدی رسانندگی الکتریکی جو به دست آمد. در نزدیکی سطح زمین رسانندگی از مرتبه 10^{-14} S/m تخمین زده شد که با افزایش ارتفاع رسانندگی نیز به شدت افزایش پیدا کرده به طوری که در ارتفاع ۶۰ کیلومتری رسانندگی نسبت به سطح زمین حدود چهار مرتبه بزرگ‌تر به دست آمد. به دلیل این که

در لایه مرزی مواد رادیواکتیو نقش غالب را در یونیزاسیون جو دارند لذا الگوی توزیع رسانندگی جو در لایه مرزی شبیه به الگوی یونیزاسیون حاصل از مواد رادیواکتیو است ولی در لایه‌های بالاتر که پرتوهای کیهانی نقش اصلی را در یونیزاسیون جو بازی می‌کنند، الگوی توزیع رسانندگی مشابه الگوی یونیزاسیون حاصل از پرتوهای کیهانی است. سپس با استفاده از داده‌های مربوط به رسانندگی، توزیع فضایی مقاومت ستونی جو محاسبه شده است که از مرتبه $10^{17} \Omega \cdot m^2$ به دست آمد. چون لایه مرزی سهم اصلی را در مقاومت ستونی جو دارد و به دلیل این که یونیزاسیون حاصل از مواد رادیواکتیو فقط بر فراز خشکی رخ می‌دهد، لذا در حالت کلی مقاومت ستونی بر فراز خشکی کوچک‌تر از مقاومت ستونی بر فراز اقیانوس پیش‌بینی شده است. مقاومت کل جو زمین که برابر مقاومت معادل این مقاومت‌های ستونی است برابر ۲۱۴ اهم تخمین زده شده است. با داشتن جریان کل ۱۲۶۴ آمپر و مقاومت کل ۲۱۴ اهم می‌توان اختلاف پتانسیل بین لایه زیرین یونسفر و سطح زمین را محاسبه کرد که حدود ۲۷۰ کیلوولت به دست می‌آید. در مرحله بعد به کمک اختلاف پتانسیل و مقاومت ستونی محاسبه شده توزیع فضایی چگالی جریان الکتریکی که مستقل از ارتفاع است تعیین شد که از مرتبه پیکوآمپر می‌باشد. بر خلاف مقاومت ستونی و به همان دلایل مذکور، چگالی جریان الکتریکی بر فراز خشکی بیشتر از نواحی بالای اقیانوس‌ها است.

در نهایت با استفاده از چگالی جریان الکتریکی و رسانندگی جو و به کمک قانون اهم توزیع فضایی میدان الکتریکی جو محاسبه شده است. میدان الکتریکی که وابسته به ارتفاع است در نزدیکی سطح زمین و با توجه به موقعیت جغرافیایی بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ ولت بر متر تغییر می‌کند. با افزایش ارتفاع اندازه میدان الکتریکی به شدت کاهش می‌یابد به طوری که در ارتفاع ۶۰ کیلومتر اندازه میدان حدود دو مرتبه کوچک‌تر از اندازه آن بر روی سطح زمین است. همانند رسانندگی و مقاومت ستونی، اندازه میدان الکتریکی نیز بر فراز خشکی و اقیانوس تفاوت آشکاری دارد ولی این تفاوت خود وابسته به ارتفاع نیز

می‌باشد، بدین صورت که در نزدیکی‌های سطح زمین (لایه مرزی) اندازه میدان الکتریکی بر فراز خشکی کمتر از بالای اقیانوس‌ها است ولی در ارتفاعات بالاتر برعکس شده و اندازه میدان الکتریکی بر فراز خشکی بیشتر است. همچنین در نزدیکی‌های سطح زمین میدان الکتریکی در نواحی استوایی کمترین مقدار را دارا است و با افزایش عرض جغرافیایی اندازه میدان نیز افزایش پیدا می‌کند ولی در ارتفاعات بالاتر این الگو بر عکس می‌شود. ریشه این رفتار میدان به سازوکار یونیزاسیون جو و وابستگی آن به ارتفاع برمی‌گردد. با توجه به این که مقدار جریان شارش یافته از ابرها به طرف یونسفر وابسته به زمان است لذا میدان الکتریکی نیز وابسته به زمان خواهد بود. بنابراین با هدف مقایسه با منحنی کارنگی، تغییرات میدان الکتریکی در طول یک شبانه‌روز به نمایش گذاشته شد. هرچند الگوی ریز تغییرات میدان الکتریکی با منحنی کارنگی تطابق ندارد ولی الگوی کلی مطابقت دارد، به خصوص این که زمان وقوع کمینه و بیشینه میدان که مطابق با منحنی کارنگی به ترتیب ساعت ۳ و ۲۰ (به وقت جهانی) است توسط مدل ارائه شده توسط این تحقیق نیز پیش‌بینی شده است.

۴. محدودیت‌های مطالعه

این تحقیق دارای محدودیت‌هایی است که می‌بایست در تعمیم نتایج آن مد نظر قرار داده شود. به دلیل عدم دسترسی نویسنده به داده‌های خام شبکه WWLLN برای یک دوره بلند مدت، نتایج حاصل شده در پژوهش حاضر فقط برای یک روز معین از سال گزارش شده است در حالی که پارامترهای معرفی شده برای معرفی مدار الکتریکی جهانی معمولاً ماهیت بلند مدت دارند. با این حال مدل حاضر رویکرد به‌روزتر و نزدیک‌تر به واقعیت برای محاسبه پارامترهای این مدار مانند رسانندگی، مقاومت ستونی، پتانسیل یونسفر و... ارائه می‌کند. همچنین بررسی مدار الکتریکی جهانی در این پژوهش بر پایه مدار معادل مقاومتی انجام یافته است که می‌تواند با مدل‌های دیگر مانند حل معادله پواسون جایگزین شود.

۵. داده‌ها

فراهم کردن داده‌های خام مربوط به شبکه WWLLN تقدیر و تشکر می‌شود.

داده‌های به‌دست آمده در این تحقیق در صورت درخواست قابل دسترسی می‌باشد.

مراجع

برهانیان، ج. (۱۴۰۴). رسانندگی جو و تأثیر جریان الکتریکی جهانی بر الکتریسیته ابرهای لایه‌ای. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۵۱ (۳): ۶۴۹-۶۶۳.

تشکر و قدردانی

صمیمانه از جناب آقای دکتر Micheal McCarthy عضو هیئت علمی کالج محیط‌زیست دانشگاه واشینگتن به‌دلیل

- Aich, V., Holzworth, R., Goodman, S., Kuleshov, Y., Price, C., & Williams, E., (2018). Lightning: A New Essential Climate Variable. *Eos*, 99. <https://doi.org/10.1029/2018eo104583>.
- Baumgaertner, A.J.G., Thayer, J.P., Neely III, R.R., & Lucas, G., (2013). Toward a comprehensive global electric circuit model: atmospheric conductivity and its variability in CESM1(WACCM) model simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 9221.
- Bayona, V., Flyer, N., Lucas, G. M., & Baumgaertner, A. J. G. (2015). A 3-D RBF-FD solver for modeling the atmospheric global electric circuit with topography (GEC-RBFFD v1.0), *Geosci. Model. Dev.*, 8, 3007.
- Blakeslee, R. J., Christian, H. J., & Vonnegut, B., (1989). Electrical measurements over thunderstorms, *J. Geophys. Res.*, 94, 13,135.
- Blakeslee, R. J., Mach, D. M., Bateman, M. G., & Bailey, J. C. (2014). Seasonal variations in the lightning diurnal cycle and implications for the global electric circuit, *Atmos. Res.*, 135-136, 228.
- Blakeslee, R. J., Lang, T. J., Koshak, W. J., Buechler, D., Gatlin, P., Mach, D. M., & Christian, H., (2020). Three Years of the Lightning Imaging Sensor Onboard the International Space Station: Expanded Global Coverage and Enhanced Applications. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2020JD032918.
- Ccopa, J. G. A., Tacza, J., Raulin, J. P., & Morales, C. A., (2021). Estimation of thunderstorms occurrence from lightning cluster recorded by WWLLN and its comparison with the 'universal' Carnegie curve. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 221, 105682.
- Cecil, D. J., Buechler, D. E., & Blakeslee, R. J., (2014). Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description, *Atmos. Res.*, 135, 404.
- DiGangi, E. A., Stock, M., & Lapierre, J., (2022). Thunder Hours: How Old Methods Offer New Insights into Thunderstorm Climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(2), E549-E569.
- Faruque, R. A., Pal, S., Amin, A., & Mondal, S. K., (2025). Atmospheric electric field variations and its correlation with air quality index as observed from two low-latitude Indian stations, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 271, 106505.
- Gish, O. H., & Wait, G. R., (1950). Thunderstorms and the Earth's general electrification, *J. Geophys. Res.*, 55, 473.
- Golubenkov, K., Rozanov, E., Mironova, I., Karagodin, A., & Usoskin, I. (2020). Natural Sources of Ionization and Their Impact on Atmospheric Electricity. *Geophysical Research Letters*, 4, e2020GL088619.
- Haldoupis, C., Rycroft, M., Williams, E., & Price, C., (2017). Is the "Earth-ionosphere capacitor" a valid component in the atmospheric global electric circuit? *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 164, 127.
- Harrison, R. G. (2005). Columnar resistance changes in urban air. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 67, 763.
- Harrison, R. G., & Bennett, A. J. (2007). Cosmic ray and air conductivity profiles retrieved from early twentieth century balloon soundings of the lower troposphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69, 515-527.
- Harrison, R. G., (2013). The Carnegie curve, *Surv. Geophys.*, 34, 209.
- Harrison, R. G., (2020). Behind the curve: a comparison of historical sources for the Carnegie curve of the global atmospheric electric circuit. *Hist. Geo Space Sci.*, 11, 207.
- Hays, P. B., & Roble, R. G. (1979). A quasi-static model of global atmospheric electricity, 1. The lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 84, 3291.
- Holzworth, R. H., Bering, E. A., Kokorowski, M. F., Lay, E. H., Reddell, B., Kadokura, A., & Dowden, R. L., (2005). Balloon observations of temporal variation in the global circuit compared to global lightning activity. *Advances in Space Research*, 36, 2223.
- Hoppel, W. A. (1985), Ion-aerosol attachment coefficients, ion depletion, and the charge distribution on aerosols, *J. Geophys. Res.*, 90(D4), 5917-5923
- Hutchins, M. L., Holzworth, R. H., & Brundell, J.

- B., (2014). Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 119, 620.
- Ilin, N. V., Slyunyaev, N. N., & Mareev, E. A. (2020). Toward a realistic representation of global electric circuit generators in models of atmospheric dynamics. *J. Geophys. Res.: Atmospheres*, 125, e2019JD032130.
- Jánský, J., & Pasko, V. P., (2014). Charge balance and ionospheric potential dynamics in time-dependent global electric circuit model. *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 10184.
- Jánský, J., & Pasko, V. P., (2015). Effects of conductivity perturbations in time-dependent global electric circuit model, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 10654.
- Jánský, J., Lucas, G.M., Kalb, C., Bayona, V., Peterson, M.J., Deierling, W., & Pasko, V.P., (2017). Analysis of the diurnal variation of the global electric circuit obtained from different numerical models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 12906.
- Kalinin, A. V., Slyunyaev, N. N., Mareev, E. A., & Zhidkov, A. A. (2014). Stationary and nonstationary models of the global electric circuit: Well-posedness, analytical relations, and numerical implementation, *Izv. Atmos. Oceanic Phys.*, 50, 314.
- Kaplan, J. O., & Lau, K. H.-K. (2021). The WGLC global gridded lightning climatology and time series, *Earth System Science Data*, 13, 3237.
- Kaplan, J. O., & Lau, K. H.-K. (2022). World Wide Lightning Location Network (WWLLN) Global Lightning Climatology (WGLC) and time series, 2022 update. *Earth System Science Data*, 14, 5665.
- Kuterin, F.A., & Slyunyaev, N.N., (2020). Implementation of Ionospheric Generators in the Numerical Model of the Global Electric Circuit. *Geomagn. Aeron.* 60, 768.
- Liu, C., Williams, E. R., Zipser, E. J., & Burns, G., (2010). Diurnal variations of global thunderstorms and electrified shower clouds and their contribution to the global electrical circuit. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 67, 309.
- Lucas, G. M., Baumgaertner, A. J. G., & Thayer, J. P. (2015). A global electric circuit model within a community climate model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 12054.
- Mach, D. M., Blakeslee, R. J., Bateman, M. G., & Bailey, J. C., (2009). Electric fields, conductivity, and estimated currents from aircraft overflights of electrified clouds, *J. Geophys. Res.*, 114, D10204.
- Mach, D. M., Blakeslee, R. J., & Bateman, M. G. (2011). Global electric circuit implications of combined aircraft storm electric current measurements and satellite-based diurnal lightning statistics, *J. Geophys. Res.*, 116, D05201.
- Makino, M., & Ogawa, T. (1984). Responses of atmospheric electric field and air-Earth current to variations of conductivity profiles, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46, 431.
- Mareev, E. A., (2010). Global electric circuit research: achievements and prospects. *Physics-Uspekhi*, 53, 504.
- Markson, R. (2007). The Global Circuit Intensity: Its Measurement and Variation over the Last 50 Years. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 223-242.
- Mezuman, K., Price, C., & Galanti, E., (2014). On the spatial and temporal distribution of global thunderstorm cells, *Environ. Res. Lett.* 9, 124023.
- Miller, C., Nicoll, K.A., Westbrook, C. & Harrison, R.G., (2024). Evaluating atmospheric electricity changes as an indicator of fog formation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 1892.
- Namgaladze, A.A., (2013). Earthquakes and global electrical circuit. *Russ. J. Phys. Chem. B* 7, 589.
- Odzimek, A., Lester, M., & Kubicki, M. (2010). M.EGATEC: A new high-resolution engineering model of the global atmospheric electric circuit—Currents in the lower atmosphere, *M.J. Geophys. Res.*, M.115, M.D18207.
- Peterson, M., Deierling, W., Liu, C., Mach, D., & Kalb, C. (2017). A TRMM/GPM retrieval of the total mean generator current for the global electric circuit. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(18), 10,025-10,049.
- Peterson, M., Deierling, W., Liu, C., Mach, D., & C. Kalb, (2018). A TRMM assessment of the composition of the generator current that supplies the Global Electric Circuit, *J. Geophys. Res.: Atmosph.*, 123, 8208.
- Pulinets, S., & Khachikyan, G., (2021). The Global Electric Circuit and Global Seismicity. *Geosciences*, 11, 491.
- Rakov, V. A., & Uman, M. A., (2003). *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Rycroft, M. J., Odzimek, A., Arnold, N. F., Fullekrug, M., Kulak, A., & Neubert, T. (2007). New model simulations of the global atmospheric electric circuit driven by thunderstorms and electrified shower clouds: The roles of lightning and sprites, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 69, 2485.
- Rycroft, M. J., Harrison, R. G., Nicoll, K. A., & Mareev, E. A. (2008). An overview of earth's global electric circuit and atmospheric conductivity. *Space Science Reviews*, 137, 83–105.

- Rycroft, M. J., & Harrison, R. G. (2012). Electromagnetic atmosphere-plasma coupling: The global atmospheric electric circuit. *Space Science Reviews*, 168, 363–384.
- Rycroft, M. J., Odzimek, A., & Harrison, R. G., (2024). Determining the time constant of the global atmospheric electric circuit through modelling and observations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 260, 106267.
- Rycroft, M. J. (2025). Some Recent Key Aspects of the DC Global Electric Circuit. *Atmosphere*, 16, 348.
- Rycroft, M. J., Nickolaenko, A. P., Harrison, R. G., & Odzimek, A., (2025). The global circuit capacitor and two new ways of deriving the time constant of the global atmospheric electric circuit, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 273, 106545.
- Sapkota, B. K., & N. C. Varshneya, (1990). On the global atmospheric electrical circuit, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 50, 1–20.
- Siingh, D., Singh, R. P., Victor, N. J., & Kamra, A. K., (2023). The DC and AC global electric circuits and climate., *Earth-Science Reviews*, 244, 104542.
- Stansbery, E.K., Few, A.A., & Geis, P.B., A global model of thunderstorm electricity, *J. Geophys. Res.*, 1993, 98, 16591.
- Stergis, C. G., Rein, G. C., & Kangas, T., (1957). Electric field measurements above thunderstorms, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 11, 83.
- Thomas, J. N., Holzworth, R. H., & McCarthy, M. P., (2009). In situ measurements of contributions to the global electrical circuit by a thunderstorm in southeastern Brazil, *Atmos. Res.*, 91, 153.
- Tinsley, B. A., & Zhou, L. (2006), Initial results of a global circuit model with variable stratospheric and tropospheric aerosols, *J. Geophys. Res.*, 111, D16205.
- Tinsley, B. A. (2008). The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics, *Rep. Prog. Phys.*, 71, 066801.
- Usoskin, I. G., Kovaltsov, G. A., & Mishev, A. L. (2024). Updated model of cosmic-ray-induced ionization in the atmosphere (CRAC: CRII_v3): Improved yield function and lookup tables. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 14, 20.
- Virts, K. S., Wallace, J. M., Hutchins, M. L., & Holzworth, R. H., (2013). Highlights of a new ground-based, hourly global lightning climatology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(9), 1381.
- Vonnegut, B., Moore, C. B., Espinola, R. P., and Blau Jr., H. H., (1966). Electrical potential gradients above thunderstorms, *J. Atmos. Sci.*, 23, 764.
- Williams, E.R., (2009). The global electrical circuit: A review. *Atmos. Res.* 91, 140.
- Williams, E. R., (2024). Electricity in the Atmosphere: Global Electrical Circuit. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96026-7.00053-9>.
- Wilson, C. T. R., (1921). Investigations on lighting discharges and on the electric field of thunderstorms. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, 221, 73.
- Zauner-Wieczorek, M., Curtius, J., & Kurten, A., (2022). The ion-ion recombination coefficient α : comparison of temperature and pressure dependent parametrizations for the troposphere and stratosphere, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 12443-12465.
- Zhou, L., and B. A. Tinsley, (2007). Production of space charge at the boundaries of layer clouds, *J. Geophys. Res.*, 112, D11203