

شبیه‌سازی گرمایش یونسفر در مختصات جغرافیایی ایران با استفاده از مدل SAMI2

حمیدرضا میرزایی*^۱، رضا اسدنژاد^۲، هدی مهدوی^۳، امیر محمدیها^۴، و مسلم کاظمی^۲

۱. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۱۴۳۹۵-۸۳۶، تهران

۲. دانشکده فیزیک و انرژی، دانشگاه امیرکبیر، تهران

۳. گروه فیزیک اتمی و مولکولی دانشگاه مازندران، دانشگاه مازندران، بابلسر

۴. دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

پست الکترونیکی: hamidreza.mirzaei@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱/۱۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱/۳۰)

چکیده

در این مقاله اثرات گرمایش ناشی از یک منبع مصنوعی با استفاده از مدل دو بعدی SAMI2 بررسی می‌شود. یک منبع گرمایش موضعی گوسی در معادله دمای الکترون به منظور مدل سازی گرمایش موج رادیویی یونسفر در نظر گرفته می‌شود. اثرات گرمایش به عنوان تابعی از زمان گرمایش، شدت منبع تابش، ارتفاع مرکز گرمایش و تغییر مختصه عرض جغرافیایی گرم کننده در نواحی مختلف ایران بررسی می‌شود. نتایج شبیه سازی‌ها پیشنهاد می‌کنند که ارتفاع مرکز گرمایش و شدت منبع تابشی اثر قابل ملاحظه‌ای بر ایجاد اختلالات در توزیع چگالی و دمای الکترون در یونسفر دارند. این اختلالات در محل گرم کننده و اثر آن در نقاط متناظر در نیم کره مقابل نیز قابل مشاهده است. با افزایش ارتفاع حتی در زمان‌های ابتدایی روشن کردن گرم کننده، شدت دما در ناحیه گرم کننده افزایش یافته و با گذشت زمان رشد قابل توجهی می‌یابد. در شدت‌های پایین منبع تابشی، دمای الکترون حتی در ناحیه گرم کننده نیز با گذشت زمان افزایش قابل ملاحظه‌ای نمی‌یابد، این در حالی است که با افزایش توان ورودی، دمای الکترون پس از ۳۰ دقیقه روشن کردن گرم کننده، در ناحیه گرمایش افزایش می‌یابد. اثر گرمایش همچنین به صورت اختلال در پربندهای چگالی مشاهده می‌شود که نشان دهنده کاهش چگالی و شکل گیری مجرا (کانال) در ناحیه گرم کننده و افزایش چگالی در نیم کره مقابل هستند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که با تغییر مکان جغرافیایی گرم کننده، در عرض جغرافیایی پایین تر، افزایش دما در نقطه گرمایش و در نقاط متناظر در نیم کره مقابل شدت بیشتری می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: گرمایش یونسفر، مدل SAMI2، پلاسما، شبیه‌سازی

۱. مقدمه

کننده امواج رادیویی است. شرایط یونسفر می‌تواند به طور قوی بر کیفیت ارتباطات موج رادیویی زمین به زمین در مسافت‌های دور و نیز ماهواره به زمین اثر بگذارد. این یک سامانه پیچیده برای یونسفر است و یونسفر فقط به وسیله فرایندهای رانده

یونسفر بخش مهمی از فضای اطراف زمین است که در آن انتشار امواج رادیویی می‌تواند تحت تأثیر قرار گیرد و منجر به اثرات گوناگونی شود. یونسفر در حقیقت کانال اصلی و حمل

الکترونی می‌تواند منجر به ایجاد کاواک‌های چگالی و افزایش‌هایی در امتداد میدان ژئومغناطیسی شود [۱۲].

مشاهده شده است که گرمایش الکترونی با دفع پلاسما از ناحیه گرم شده دنبال می‌شود؛ که منجر به شکل‌گیری کاواک می‌شود [۱۲]. گرمایش بسامد بالا در قله $F2$ یونسفر، می‌تواند یک تپ فشاری در پلاسما چگال ایجاد کند و به حرکت در امتداد خط میدان مغناطیسی رقیق‌تر محدود شود. واسکو و همکارانش و هوبا و همکارانش نشان دادند که تپ فشاری می‌تواند در یونسفر سمت بالا و مگنتوسفر منتشر شود؛ هنگام حرکت پلاسما را دفع و دور کرده و منجر به شکل‌گیری حفره‌ها و نواحی تهی چگالی پلاسما در راستای میدان مغناطیسی می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. این نواحی تهی از پلاسما می‌توانند به عنوان مجراهایی برای امواج ELF، هم با منشأ طبیعی و هم منشأ مصنوعی به صورت زیر استفاده شوند: گرادیان چگالی عمود بر خط میدان مغناطیسی موجب گرادیان ضریب شکست می‌شود که می‌تواند منجر به بازتاب کلی داخلی امواج ELF شود. اگر این گرادیان‌ها به اندازه کافی قوی باشند، موج ELF به طور پیوسته از مرزهای مجرا بازتاب می‌یابد و می‌تواند از یک نقطه انتهایی خط میدان به نقطه دیگر کانال بزند. از این رو مجرا تبدیل به یک موجبر در راستای مغناطیسی می‌شود و تحت اصول مشلحه با یک کلبل فیبر نوری، از یک نیم‌کره زمین به نیم‌کره دیگر عمل می‌کند. مجراهای طبیعی در یونسفر بدون هیچ گونه دخالت انسان ایجاد می‌شوند.

امواج پرتوان رادیویی می‌توانند دما و چگالی موضعی الکترون را تغییر دهند و تغییر در رسانندگی پلاسما، ثابت دی الکتریک و سایر پارامترهای پلاسمایی را القا کنند. گرمایش یونسفر نه تنها از نظر تحقیقات علمی مقدار دارد بلکه اهداف عملی نیز دارد. برای مثال، گرمایش یونسفر پایین‌تر (۵۰-۱۰۰ کیلومتر) می‌تواند منجر به یونیزاسیونی شود که "آیینة یونسفری" را برای بازتاب برخی امواج الکترومغناطیسی خاص شکل دهد. گرمایش یونسفر پایینی به وسیله امواج HF با مدولاسیون دامنه می‌تواند به طور مؤثر منابع تابشی از امواج ELF/VLF را تولید کند [۱۵]. گرمایش یونسفر بالایی (۵۰-۱۵۰ کیلومتر) می‌تواند

شده مگنتوسفر و خورشید تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد [۱ و ۲] بلکه فرایندهای اتمسفری دینامیکی نیز بر آن اثر می‌گذارند. برای مثال رعد و برق می‌تواند یونسفر را گرم سازد و منجر به تغییر دما و چگالی عددی الکترون شود [۳ و ۴]. زمین لرزه‌ها ممکن است آنومالی‌های یونسفری پیش‌لرزه تولید کنند [۵ و ۶]. طوفان‌ها و تندبادها می‌توانند منجر به افزایش TEC یونسفری شوند [۷]. امواج اتمسفری (سیاره‌ای، گرانش و امواج فروصوتی) که از پایین می‌آیند به طور مستقیم و غیر مستقیم (برای مثال از طریق گرمایش‌های استراتسفری اصلی) بر یونسفر پایین‌تر اثر می‌گذارند [۸ و ۹]. محققین به تحقیق درباره فعالیت خورشیدی، فرایندهای فیزیکی مگنتوسفر و سایر پدیده‌های طبیعی که می‌تواند منجر به اختلالات یونسفر شوند، می‌پردازند. همزمان به تغییر مصنوعی یونسفر توجه بیشتری می‌شود. به غیر از اختلالات یونسفری، بسیاری از روش‌های مصنوعی نیز می‌توانند منجر به آشفتگی یونسفر شوند [۱۰]. از زمانی که "اثر لکسمبورگ" در سال ۱۹۳۳ یافت شد، سال‌ها است که محققین دریافته‌اند ویژگی‌های پیرامون یونسفر زمین می‌تواند به وسیله امواج HF پرتوان که از فرستنده‌های زمینی روانه می‌شوند، تغییر کنند. به دلیل آسانی، سرعت و اثر گرمایشی قابل ملاحظه و سازگار با محیط زیست، فرستنده‌های زمینی، یکی از ابزارهای اصلی تغییر یونسفر شدند. به ویژه پس از دهه ۱۹۷۰، جماهیر شوروی و برخی از کشورهای اروپایی ابزارهای تحقیقاتی بیشتری را برقرار کردند. مشاهده شده است که گرمایش الکترونی به وسیله دفع پلاسما از ناحیه گرم شده دنبال می‌شود. مشاهدات بسیاری نشان داده‌اند که گرمایش الکترونی قوی در یونسفر می‌تواند به وسیله ابزارهای HF پرتوان مانند هارپ و ایسکت تولید شوند [۱۱]. هارپ در آلاسکا بزرگ‌ترین توان بهره آنتنی را دارد (توان مؤثر می‌تولند تا ۱ گیگاوات برسد) و می‌تواند شار انرژی الکترومغناطیسی قوی را ارسال کند تا به طور مؤثر در یونسفر تغییر ایجاد کند.

تغییر یونسفر با استفاده از امواج رادیویی توان بالا، ابزار مهمی برای درک فرایندهای پیچیده مربوط به برهم‌کنش موج توان بالا با پلاسماها است. یک اثر مهم این است که گرمایش

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{1}{3} n_e k_e \frac{\partial}{\partial s} k_e \frac{\partial T_e}{\partial s} = Q_{en} + Q_{ei} + Q_{phe} + Q_{RF}, \quad (1)$$

عبارت دوم در سمت چپ معادله عبارت پخش است، جایی که در آن k_e به عنوان رسانندگی حرارتی الکترون در راستای موازی، k ثابت بولتزمن و b_s مولفه میدان مغناطیسی در جهت میدان است که به مقدار استوایی آن در سطح زمین بدون بعد شده است. هوبا و همکارانش رسانش k_e و نرخ‌های گرمایشی Q_{en} ، Q_{ei} و Q_{phe} را با جزئیات تعیین کرده‌اند. Q_{RF} بخش گرمایشی است که باید در معادله به عنوان یک عامل خارجی در ایجاد گرمایش بر یونسفر در کد وارد شود [۱۸].

برای بررسی اثر گرمایش بر یونسفر، کد SAMI2 باید تغییر داده شود. بدین منظور برخی از زیرروال‌ها در کد اصلاح می‌شوند. همان گونه که نشان داده شد، عبارت گرمایش خارجی در معادله دمای الکترون در کنار سایر عبارت‌های گرمایشی اضافه می‌شود. یکی از اصلاحات انجام شده پیرامون تعریف عبارت گرمایش، به عنوان یک پارامتر در معادله دمای الکترون است. به منظور انجام مدل سازی، جمله گرمایش به صورت گوسی و به شکل زیر در کد تعریف شده است:

$$Q_{RF} = \left(\frac{dT_e}{dt} \right) \exp \left[\frac{-(z-z_0)^2}{\Delta z^2} \right] \exp \left[-(\theta - \theta_0)^2 / \Delta \theta^2 \right], \quad (2)$$

این عبارت در زیرروال دمای الکترون "etemp" در کد SAMI2 اضافه شده است و سپس از زیرروال "tesolv" برای حل معادله استفاده می‌شود. پارامترهای z_0 ، Δz ، θ_0 و $\Delta \theta$ به طور دستی در کد وارد می‌شوند. z_0 ارتفاع اولیه مرکز لکه گرم شده، Δz گسترش قائم ناحیه گرم شده و $\frac{dT_e}{dt}$ نرخ گرمایش برای الکترون‌ها است.

۳. نتایج

۳.۱. اثر ارتفاع گرمایش بر توزیع چگالی و دمای الکترون
برای بررسی اثر ارتفاع گرمایش بر نقطه مورد نظر در منطقه خلیج فارس، طول جغرافیایی $53^\circ E$ و عرض جغرافیایی $25^\circ N$

چگالی الکترون را تغییر دهد، ناحیه متمرکز کننده و غیرمتمرکزی را ایجاد کند و به طور بدی کانال ارتباطی را تغییر یا حتی مختل کند و نیز می‌تواند موجب ناپایداری‌های پارامتری و ناپایداری‌های خودمتمرکز کننده برای ایجاد بی‌نظمی‌هایی در امتداد میدان با مقیاس مختلف شود.

از آنجایی که آزمایش گرمایش بسیار گران است و همچنین گرمایش به صورت موضعی و با طول عمر کوتاه همراه است، تمام انواع مدل‌های عددی با افزایش دانش فیزیک یونسفر توسعه داده شده‌اند [۱۶].

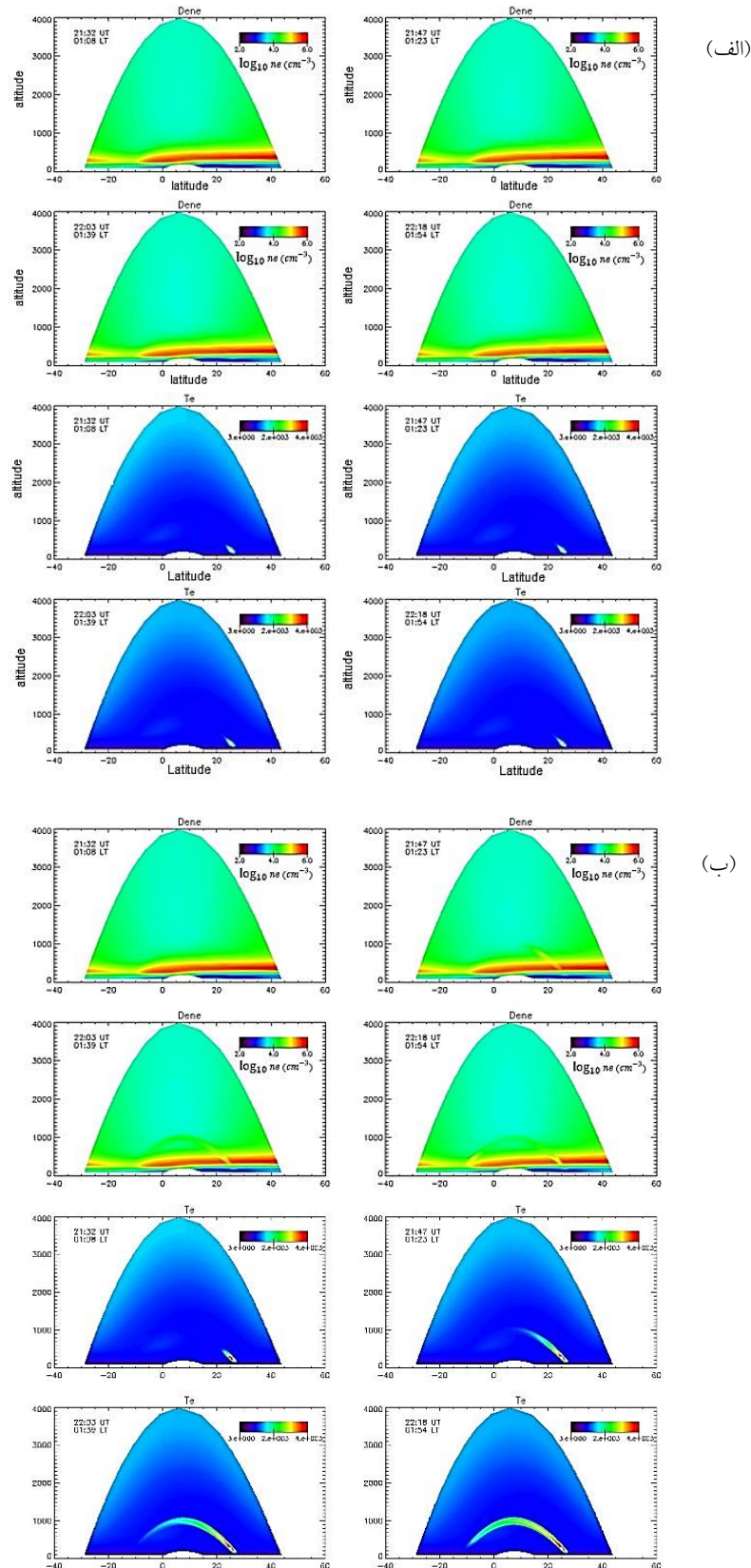
یکی از بررسی‌های اولیه در این زمینه توسط پرین و همکارانش و با استفاده از کد دو بعدی SAMI2 انجام شد [۱۷]. پس از آن هوبا و همکارانش نتایج مطالعه مدل‌سازی اثر گرمایش یونسفر در Arecibo بر روی یونسفر مزدوج آن را با استفاده از کد دو بعدی SAMI2 گزارش کردند [۱۸].

به دلیل اهمیت اثرات گرمایش مصنوعی یونسفر در انتشار امواج رادیویی و ارتباطات ماهواره‌ای، در این مقاله اثر گرمایش یونسفر با در نظر گرفتن پارامتر گرمایش مصنوعی، بر چگونگی توزیع چگالی و دمای الکترون در نقاط جغرافیایی مختلف در کشور، با استفاده از کد یونسفری SAMI2 مدل سازی و نتایج به دست آمده بررسی می‌شوند. پارامترهای مطالعه ما شامل بررسی اثر تغییر شدت منبع گرمایش، ارتفاع اولیه گرمایش و عرض جغرافیایی بر اختلالات چگالی و دما هستند.

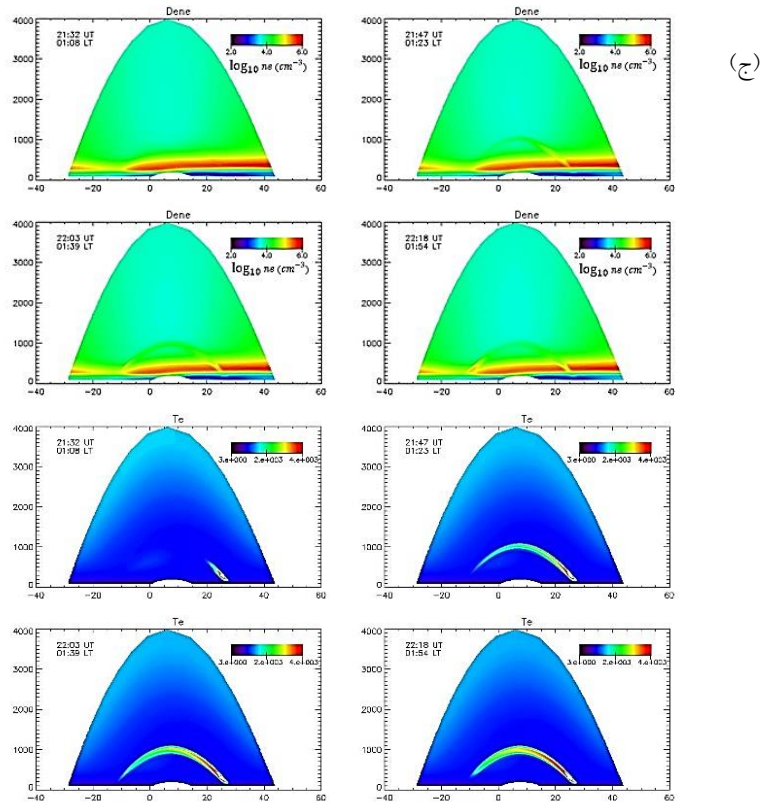
۲. مدل‌سازی گرمایش یونسفر

مدل یونسفری SAMI2 که در آزمایشگاه تحقیقاتی ناوال توسعه یافت، برای انجام شبیه سازی‌های گرمایش یونسفری استفاده می‌شود. SAMI2 هفت گونه یونی H^+ ، He^+ ، O^+ ، N^+ ، NO^+ ، N_2^+ ، O_2^+ در یونسفر را مدل سازی می‌کند. معادلات پیوستگی و تکانه برای هر گونه یونی حل می‌شوند؛ همراه با معادله دما که برای الکترون‌ها و گونه‌های یونی H^+ ، He^+ ، O^+ حل می‌شوند.

معادله دمای الکترون عبارت است از:



شکل ۱. کانتورهای تغییرات دما و چگالی الکترون بر حسب عرض جغرافیایی و ارتفاع، برای گرم کننده واقع در عرض جغرافیایی $25^{\circ} N$ و طول جغرافیایی $53^{\circ} E$ و ارتفاع اولیه گرمایش (الف) $z_0 = 250$ km، (ب) $z_0 = 280$ km و (ج) $z_0 = 300$ km.



ادامه شکل ۱.

ناحیه گرم کننده در ساعات اولیه پس از روشن کردن گرم کننده قابل مشاهده است. با گذشت زمان، دما در ناحیه گرم کننده افزایش می یابد و اثر آن در نیم کره مقابل نیز به صورت مؤثری قابل مشاهده است. افزایش بیشتر ارتفاع ناحیه گرمایش نشان دهنده افزایش شدت دما در ناحیه گرم کننده و انتقال آن به نیم کره مقابل است که در زمان های طولانی تر از روشن کردن گرم کننده به طور قابل ملاحظه ای رشد می کند. پربندهای چگالی نیز کاهش چگالی و شکل گیری مجرا (کانال) در ناحیه گرم کننده و افزایش چگالی در نیم کره مقابل را نشان می دهند.

۲.۳. اثر توان تابشی بر توزیع چگالی و دمای الکترون

میزان توان تابشی امواج رادیویی یکی از پارامترهای مهم در توزیع چگالی و دمای الکترون است. از این رو در این قسمت اثر شدت منبع تابشی بر دما و چگالی الکترون از طریق تغییر پارامتر $\left(\frac{dT_e}{dt}\right)$ که نرخ گرمایش به ازای هر الکترون است،

در نظر گرفته می شود. در این بررسی ها ارتفاع اولیه گرمایش مقادیر $z_0 = 250, 280, 300 \text{ (km)}$ انتخاب شده است. $\Delta\theta = 0/25^\circ$ و $\theta_0 = 25^\circ$ $\Delta z = 40 \text{ km}$ در نظر گرفته می شوند. گرم کننده به مدت ۱ ساعت و در زمان های ۱-۲ LT روشن شده است و پربندهای توزیع چگالی و دمای الکترون بر حسب ارتفاع و در بازه ای از عرض های جغرافیایی از محل گرم کننده تا نقاط واقع بر نیم کره مقابل، بررسی شده اند.

همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می شود با افزایش ارتفاع ناحیه جذب انرژی موج، تغییرات قابل ملاحظه ای در دمای الکترون مشاهده می شود. در ارتفاع اولیه $z_0 = 250 \text{ km}$ حتی پس از گذشت ۱ ساعت از روشن کردن گرم کننده، هیچ اثر قابل ملاحظه ای در پربند دمای الکترون مشاهده نمی شود. این در حالی است که با افزایش ارتفاع در $z_0 = 280 \text{ km}$ پس از گذشت حدود ۸ دقیقه، تغییر هر چند اندک دمای الکترون در

مقادیری ثابت و به ترتیب $z_0 = 300 \text{ km}$ و $q = 3000 \text{ k/s}$ در نظر گرفته شدند. نتایج به دست آمده در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در عرض جغرافیایی پایین-تر در همان زمان‌های اولیه پس از روشن کردن گرم کننده، اثر افزایش دما در نقطه گرم کننده قابل مشاهده است؛ در حالی که این اثر در عرض بالاتر با تأخیر زمانی ۱۰ دقیقه‌ای روی می‌دهد. از طرف دیگر مقایسه نمودارها نشان می‌دهد که در عرض‌های جغرافیایی بالاتر گرم کننده، افزایش دما در نقطه گرم کننده و اثر آن در نیم‌کره مقابل با شدت کمتری مشاهده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

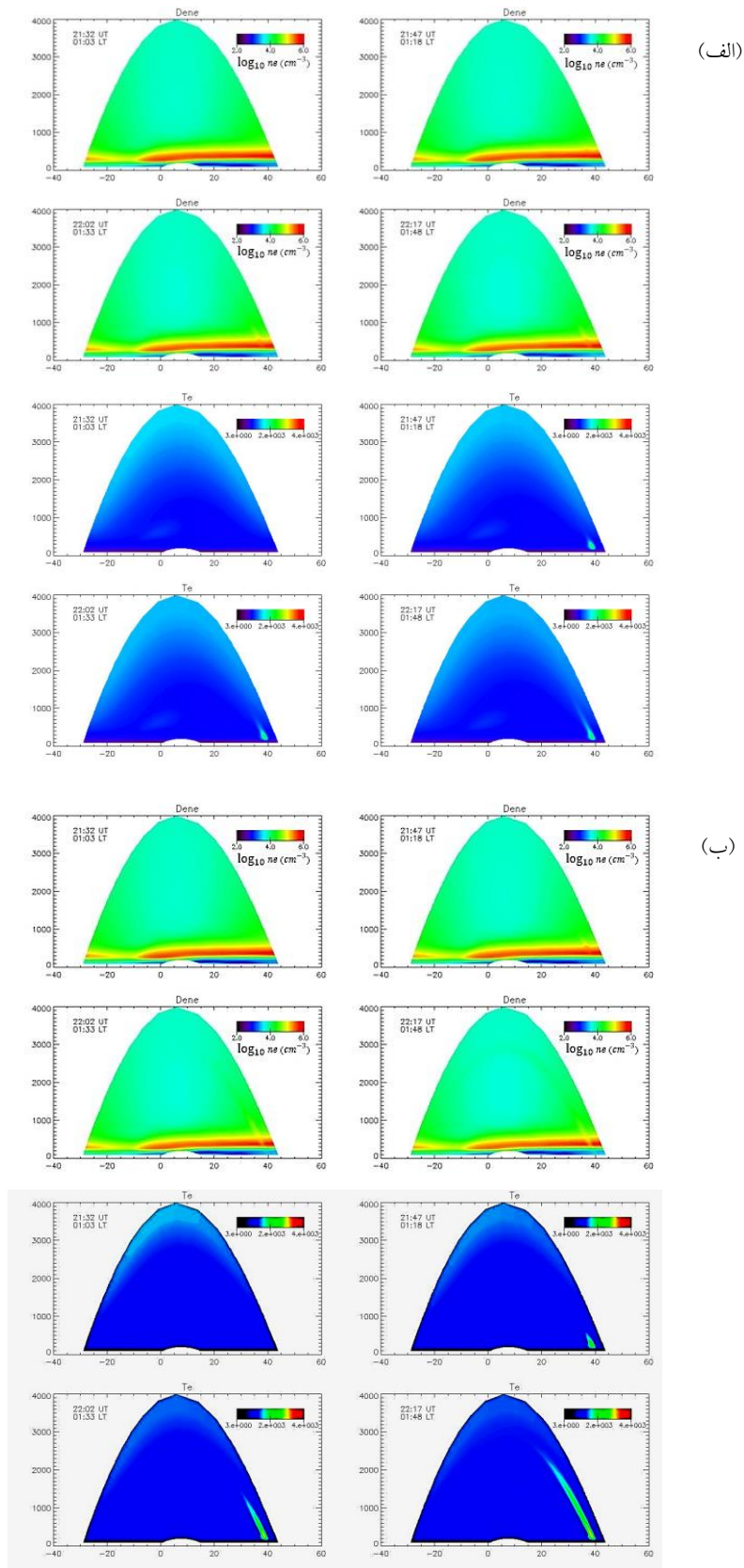
در این مقاله شبیه‌سازی اثرات گرمایش یونسفر ناشی از یک گرم کننده مصنوعی در ناحیه F_2 یونسفر بررسی می‌شود. نتیجه اولیه شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که در اثر گرمایش مصنوعی، یک اختلال در پلاسمای یونسفر می‌تواند ایجاد شود. این اختلالات در چگونگی توزیع چگالی و دمای الکترون در ناحیه گرمایش و انتشار آن در نیم‌کره مقابل روی می‌دهند. ارتفاع گرمایش، شدت منبع تابش و مختصه عرض جغرافیایی گرم کننده به عنوان پارامترهای بررسی در نظر گرفته شدند. با افزایش ارتفاع ناحیه جذب انرژی موج، تغییرات قابل ملاحظه‌ای در دمای الکترون مشاهده می‌شود. این به گونه‌ای است که در یک مختصه معین و به ازای یک شدت منبع ثابت؛ با افزایش ارتفاع در $z_0 = 280 \text{ km}$ پس از گذشت حدود ۸ دقیقه، تغییر هر چند اندک دمای الکترون در ناحیه گرمایش در ساعات اولیه پس از روشن کردن گرم کننده قابل مشاهده است. افزایش بیشتر ارتفاع ناحیه گرمایش نشان دهنده افزایش شدت دما در ناحیه گرم کننده و انتقال اثر آن به نیم‌کره مقابل است که در زمان‌های طولانی‌تر به طور قابل ملاحظه‌ای رشد می‌کند. همچنین اثر گرمایش به صورت اختلال در چگالی الکترون در ناحیه گرم کننده و نیم‌کره مقابل مشاهده شد. پربندهای چگالی نشان دهنده کاهش چگالی و شکل‌گیری مجرا (کانال) در ناحیه گرم کننده

مورد مطالعه قرار می‌گیرد. نقطه مورد نظر در طول جغرافیایی $51^\circ E$ و عرض جغرافیایی $38^\circ N$ انتخاب شده است، در حالی که ارتفاع اولیه گرمایش $z_0 = 280 \text{ km}$ است. بررسی‌ها با حفظ مقادیر مربوط به سایر پارامترها در نرخ‌های گرمایش $\left(\frac{dT_e}{dt}\right) = 3000, 5000 \text{ k/s}$ انجام می‌شوند. همچنین گرم کننده به مدت ۱ ساعت و در زمان محلی LT ۲-۱ روشن می‌شود.

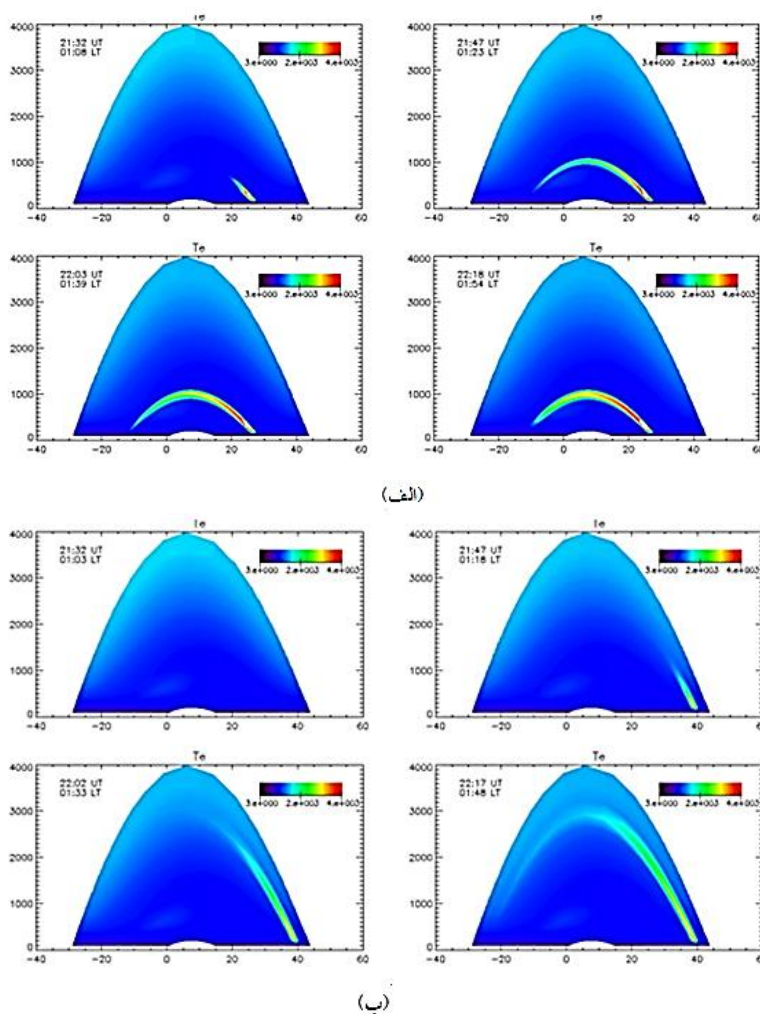
شکل ۲. الف تغییرات دما و چگالی الکترون در نقطه مورد نظر را برای $q = 3000 \text{ k/s}$ نشان می‌دهد. همان گونه که مشاهده می‌شود دمای الکترون در ناحیه گرم کننده حتی با گذشت زمان نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای نمی‌یابد و اثری نیز در نیم‌کره مقابل قبل مشاهده نیست. با تغییر نرخ گرمایش به $\left(\frac{dT_e}{dt}\right) = 5000 \text{ k/s}$ تفاوت قابل ملاحظه‌ای در دمای الکترون در ناحیه گرم کننده مشاهده می‌شود. همان گونه که در شکل ۲. ب نشان داده شده است، با افزایش توان ورودی دمای الکترون پس از ۳۰ دقیقه روشن کردن گرم کننده، در ناحیه گرمایش افزایش یافته و با گذشت زمان و در ساعات پایانی پیش از خاموش کردن گرم کننده شدت آن رشد می‌یابد. نکته قابل ذکر این است که حتی با افزایش شدت دما در ساعات پایانی هنوز اثری در نقاط واقع بر نیم‌کره مقابل مشاهده نمی‌شود. بررسی نمودار چگالی الکترون نیز نشان می‌دهد که با افزایش دما در مقطع گرم کننده، چگالی در آن ناحیه دچار اختلال شده و با کاهش مواجه می‌شود و امکان شکل‌گیری مجرا در این ناحیه به وجود می‌آید.

۳.۳. اثر عرض جغرافیایی گرم کننده بر توزیع چگالی و دمای الکترون

در آخرین بررسی انجام شده اثر تغییر عرض جغرافیایی گرم کننده در یک نیم‌کره، بر تغییرات دما و چگالی الکترون در نظر گرفته شد. از این‌رو گرم کننده در مختصات طول جغرافیایی $53^\circ E$ و در عرض‌های جغرافیایی $38^\circ N$ و $25^\circ N$ در کد وارد شد. در این بررسی ارتفاع اولیه گرمایش و نیز نرخ گرمایش



شکل ۲. کانتورهای تغییرات دما و چگالی الکترون بر حسب عرض جغرافیایی و ارتفاع، برای گرم کننده واقع در عرض جغرافیایی $38^{\circ}N$ و طول جغرافیایی $51^{\circ}E$ ، ارتفاع اولیه گرمایش $z_0 = 280$ km. (الف) $q = 3000$ k/s و (ب) $q = 5000$ k/s



شکل ۳. پربند تغییرات دمای الکترون بر حسب عرض جغرافیایی و ارتفاع برای گرم کننده واقع در طول جغرافیایی $53^{\circ} E$ و ارتفاع اولیه گرمایش $38^{\circ} N$ (ب) و $25^{\circ} N$ (الف): $q = 3000 \text{ k/s}$ و $Z_0 = 300 \text{ km}$

ساعات پایانی پیش از خاموش کردن گرم کننده، رشد قابل ملاحظه‌ای در شدت آن مشاهده می‌شود. نتایج بررسی‌ها انجام شده نشان می‌دهند که با تغییر مکان گرم کننده در عرض جغرافیایی، چگالی و دمای الکترون با تغییرات قابل توجهی مواجه می‌شوند. در شرایط مورد نظر در مقاله با کاهش عرض جغرافیایی گرم کننده، افزایش دما در نقطه گرمایش و در نقاط متناظر در نیم کره مقابل شدت بیشتری می‌یابد.

و افزایش چگالی در نیم کره مقابل هستند. اختلالات دما و چگالی الکترون همچنین وابستگی قابل ملاحظه‌ای را به شدت منبع نشان می‌دهند. در شدت‌های پایین، دمای الکترون در ناحیه گرم کننده حتی با گذشت زمان نیز افزایش قابل ملاحظه‌ای نمی‌یابد. این در حالی است که با افزایش توان ورودی دمای الکترون پس از ۳۰ دقیقه روشن کردن گرم کننده، در ناحیه گرمایش افزایش یافته و با گذشت زمان و در

مراجع

1. D J Gorney, *Rev. Geophys* **28** (1990) 315.
2. J M Forbes, S Bruinsma, and F G Lemoine, *Science* **312** (2006) 1366.

3. U S Inan, T F Bell, and J V Rodriguez, *Geophys Res. Lett.* **18** (1991) 705.
4. A P Nickolaenko and M Hayakawa, *Geophys Res. Lett.* **22** (1995)3015.
5. Y B Yao, *et al.*, *Chin Sci. Bull.* **57** (2012) 500.
6. T Yu, *et al.*, *Chin Sci. Bull.* **54** (2009) 1080.
7. T Mao, *et al.*, *Chin Sci. Bull.* **55** (2010) 712.
8. J Lastovicka, *J. Atmos. Solar. Ter.r Phys.* **68** (2006) 479.
9. J Lastovicka, *Adv. Space Res.* **43** (2009) 1.
10. M Mendillo and J M Forbes, *J. Geophys Res.* **83** (1978) 151.
11. G M Milikh, *et al.*, *Geophys Res. Lett.* **35** (2008) GL034630.
12. L M Duncan, J P Sheerin, and R A Benke, *Phys. Rev. Lett.* **61, 2** (1988) 239.
13. V V Vas'kov, *et al.*, *Geomagn. Aeron.* **32, 5** (1992) 698.
14. J D Huba, G Joyce, and J A Fedder, *Geophys. Res. Lett.* **27, 19** (2000b) 3181.
15. S W Willis and J R Davis, *J. Geophys. Res.* **78** (1973) 5710.
16. M M Shoucri, G J Morales, and J E Maggs, *J. Geophys. Res.* **89** (1984) 2907.
17. R P Perrine, *et al.*, *Radio Sci.* **41** (2006) RS4002.
18. T W Wu, *et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **39** (2012) L07103.