

مطالعه اقلیم‌شناختی محتوای الکترون کلی (TEC) یون‌سپهری با استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده ایستگاه‌های GNSS

محمد جغتایی^{۱*}، نیلوفر جوینده^۲ و محمدحسین معاریان^۱

۱. استادیار، گروه فیزیک فضا، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(دریافت: ۹۸/۶/۴، پذیرش نهایی: ۹۸/۱۱/۱)

چکیده

لایه یون‌سپهر از لایه‌های مهم جو زمین است که در اثر جذب تابش ماوراءبنفش و ایکس خورشیدی و برخورد ذرات باردار با اتم‌ها و مولکول‌های جو زمین و برهمکنش فوتوشیمیایی بین ترکیبات آن تشکیل می‌شود. الکترون‌های آزاد در این لایه بر مسیر امواج رادیویی تأثیر می‌گذارد و هرگونه اختلال احتمالی در این لایه، تأثیر جدی در ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات دقیق ناوبری و ارتباطات دوربرد می‌گذارد. پس شناخت مقادیر میانگین و توزیع نصف النهاری مقادیر الکترون‌های آزاد کمک شایانی به شناخت پربشیدگی و اختلال‌های احتمالی آن می‌کند. یک روش پذیرفته‌شده در تحقیق ساختار زمانی و فضایی و تغییرپذیری الکترون‌های آزاد یون‌سپهر، برآورد محتوای کلی الکترون (TEC) است. TEC مجموع الکترون‌های موجود در استوانه‌ای با سطح مقطع یک متر مربع است که در مسیر ماهواره تا گیرنده زمینی محاسبه می‌شود.

در این پژوهش برای بررسی پربشیدگی‌های یون‌سپهری از داده‌های جهانی و شبکه‌بندی‌شده ایستگاهی GNSS، برای بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ استفاده شده‌است. از داده‌ها میانگین سالانه و ماهانه برای ۱۹ سال گرفته شده‌است. همچنین برای فعالیت خورشیدی از شاخص F10.7 استفاده شده است که تابش خورشید در طول موج ۱۰/۷ cm است. در پژوهش انجام‌شده، روند تغییرات TEC، وابستگی زیادی به تغییرات چرخه خورشیدی دارد. با بررسی مقادیر TEC مشاهده شد که مقدار TEC در ماه‌های آوریل و مارس و اکتبر بیشینه است در حالی که در ماه‌های جولای و جون کمینه مقادیر را دارد. به بیان دیگر مقادیر TEC در اعتدالین بیشتر و در انقلاب تابستانی کمترین مقدار را داراست.

واژه‌های کلیدی: یون‌سپهر، TEC، GNSS، چرخه خورشیدی، F10.7.

۱. مقدمه

الکتریکی و مغناطیسی می‌توانند جابه‌جایی‌های متفاوتی را تجربه کنند. یون‌سپهر را می‌توان همچون لایه‌ای رسانا در نظر گرفت که بارکلی آن صفر است و مشابه پلاسما سرد رفتار می‌کند. البته باید توجه داشت که در بیشینه غلظت الکترون‌های لایه یون‌سپهر (یعنی لایه F2) بازهم غلظت ترکیبات جوی حدود دو مرتبه بزرگی بیشتر از غلظت الکترون‌هاست.

ساختار لایه‌های یون‌سپهر به صورت افقی است و گسترش افقی دارند. چگالی مولکول‌ها و اتم‌های خنثی با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد در حالی که شدت تابش خورشیدی با آن افزایش می‌یابد. بنابراین در یک ارتفاع معین که همان لایه F2 است، فرآیند یونیزاسیون افزایش و چگالی

یون‌سپهر یکی از مهم‌ترین لایه‌های جو است که از ارتفاع حدود ۶۰ کیلومتری آغاز و تا حدود ۱۰۰۰ کیلومتری ادامه دارد. این لایه کمتر از ۱ درصد از جرم کل جو را به خود اختصاص می‌دهد. با این وجود به علت تأثیری که روی تابش ورودی خورشید و عبور امواج رادیویی دارد، بسیار با اهمیت است. این لایه در ارتفاعات بالاتر از حدود ۶۰ کیلومتر در اثر تابش به صورت اشعه ایکس خورشیدی، فرابنفش و برخورد ذرات ایجاد می‌شود (آتاک و همکاران، ۲۰۰۹). در اثر برهم‌کنش این تابش‌ها با جو زمین، الکترون‌ها از مولکول‌ها یا اتم‌های موجود در آن ارتفاعات جدا و ترکیبات یونیزه می‌شوند. الکترون‌ها و یون‌های حاصل از یونیزاسیون تحت تأثیر میدان‌های

GNSS که مخفف Global Navigation Satellite System است، به معنی سامانه تعیین موقعیت و ناوبری ماهواره‌ای می‌باشد. سامانه تعیین موقعیت ماهواره‌ای با استفاده از امواج دریافتی از سمت ماهواره‌های موجود در مدار و به کمک گیرنده‌های زمینی، امکان تعیین محل قرار گرفتن یک نقطه در فضای سه بعدی را فراهم می‌آورد. GNSS از سامانه‌های ماهواره‌ای مختلفی (GPS، GLONASS و ...) تشکیل شده‌است. این سامانه‌ها می‌توانند منطقه‌ای و یا جهانی باشند.

در سال‌های اخیر سیگنال‌های دوفراکانسی سامانه موقعیت‌یابی جهانی (GPS) به‌طور گسترده‌ای برای برآورد مقادیر TEC منطقه‌ای و جهانی استفاده می‌شوند (لیائو، ۲۰۰۰؛ کارسیا، ۲۰۰۷). مزیت سیگنال‌های GPS به‌خاطر تعداد زیاد ماهواره‌های GPS در ارتفاع ۲۰۰۰۰ کیلومتری، پوشش جهانی آنها و در دسترس بودن دریافت‌کننده‌های تجاری است. TEC می‌تواند از تأخیر زمانی حرکت سیگنال‌های GPS ثبت‌شده در دریافت‌کننده‌های زمینی استخراج شود (نیر و همکاران، ۲۰۰۷). برای ارائه فایل‌های مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی، پارامترهای ناوبری ماهواره‌های GNSS و نیز پارامترهای جوی از فرمت RINEX استفاده می‌شود. فرمت مستقل مبادله گیرنده (RINEX) یک فرمت تبادل اطلاعات برای داده‌های سامانه ناوبری خام است. هر فایل RINEX از دو قسمت عنوان و محتوا تشکیل شده‌است. RINEX این اجاره را به کاربر می‌دهد تا داده‌های دریافت‌شده را برای تولید نتیجه دقیق‌تر، پردازش کند. اولین فرمت RINEX توسط گرتنر و مادر در سپتامبر و اکتبر ۱۹۹۰ منتشر شد (گوتنر و استی، ۲۰۰۷). خروجی نهایی یک گیرنده ناوبری معمولاً موقعیت، سرعت و یا سایر مقادیر فیزیکی مرتبط با آن است. با این حال، محاسبه این مقادیر بر اساس یک سری از اندازه‌گیری‌ها از یک یا چند ماهواره است. با استفاده از برنامه‌ها، مدل‌ها و ... داده‌های RINEX را پردازش، تأخیرها را محاسبه و مقدار محتوای یون را به دست می‌آورند. فرمت داده‌های پردازش‌شده IONEX می‌باشد،

الکترون‌ها بیشینه می‌شود. در خارجی‌ترین ترازهای جو بالا، شدت تابش زیاد است اما اتم‌های کمتری برای برهم‌کنش وجود دارند، در نتیجه نرخ یونیزاسیون کم است. با کاهش ارتفاع چگالی اتم‌ها و مولکول‌ها افزایش پیدا می‌کنند، اما شدت تابش کاهش می‌یابد (بم جوهان و ترومن، ۱۹۹۷).

الکترون‌های آزاد در این لایه بر مسیر امواج رادیویی تأثیر می‌گذارد، اگر این لایه دچار اختلال شود، تأثیر جدی در ارتباطات موج کوتاه، ارتباطات ماهواره‌ای، ارتباطات دقیق ناوبری و به عبارتی تأثیر بسیاری بر فعالیت‌های بشر در زمین گذاشته، و ارتباطات را مختل می‌کند. بنابراین پیش‌بینی رفتار لایه یونسپهر در بررسی دینامیک جو بالا و همچنین ارتباطات رادیویی زمینی و زمین-فضا دارای اهمیت فراوانی است. محتوای کلی الکترون (TEC, Total Electron Content) در تعیین تأخیر فاز امواج رادیویی اهمیت بسیار زیادی دارد و در مرحله اول توسط فرآیند یونیزاسیون تعیین می‌شود (سبزه‌ای و همکاران، ۱۳۹۴). البته عکس آن هم وجود دارد یعنی از این تأخیر فاز و زمانی موج رادیویی می‌توان به محتوای TEC هم پی برد یعنی همان کاری که در ایستگاه‌های GPS انجام می‌شود. تغییرات تصادفی کوتاه‌مدت و تغییرات دوره‌ای بلندمدت (مانند نوسانات شبانه‌روزی) یونسپهر باعث ناپدیدشدن، شکست و پراکندگی سیگنال‌های HF و سیگنال‌های ارتباطی ماهواره می‌شود (نیر و همکاران، ۲۰۰۷). یک روش پذیرفته‌شده در تحقیق ساختار زمانی و فضایی و تغییرپذیری یونسپهر، برآورد محتوای کلی الکترون (TEC) است (اسچائر، ۱۹۹۹). TEC مجموع الکترون‌های موجود در استوانه‌ای با سطح مقطع یک متر مربع است که در مسیر ماهواره تا گیرنده محاسبه می‌شود یا می‌تواند TEC را به‌عنوان انتگرال خطی چگالی الکترون در راستای یک مسیر پرتو L یا به‌عنوان اندازه تعداد کلی الکترون‌ها در راستای مسیر موج رادیویی بیان کرد که واحد آن TECU می‌باشد. هر TECU برابر با 10^{16} الکترون در واحد مترمربع است.

کرد. این داده‌ها شامل محصولات اولیه با تأخیر ۲۴ ساعت و محصولات نهایی با تأخیر ۱۱ روز می‌باشد.

مقادیر TEC در فرمت IONEX در شبکه‌ای منظم از نقاط ارائه می‌شود. نقاط در طول جغرافیایی در بازه 180° تا 180° با قدرت تفکیک 5° (۷۳ نقطه) و در عرض جغرافیایی در بازه $87/5^\circ$ تا $87/5^\circ$ با قدرت تفکیک $2/5^\circ$ (۷۱ نقطه) ارائه می‌شود. از ساعت UT ۰۰:۰۰ تا UT ۲۴:۰۰، هر دو ساعت یک نقشه حاوی مقادیر TEC ارائه می‌شود. هر فایل IONEX شامل ۱۳ نقشه است که آخرین نقشه هر روز و اولین نقشه روز بعد همزمان هستند. به‌طور کلی نقشه‌های TEC با قدرت تفکیک 5° در طول جغرافیایی و $2/5^\circ$ در عرض جغرافیایی با دوره تناوب دو ساعت در زمان جهانی ارائه می‌شوند. در این پژوهش از داده‌های ۱۹ ساله TEC (IONEX) در بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ (چرخه خورشیدی ۲۳ و چرخه خورشیدی ۲۴) استفاده شده است. داده‌های IONEX را می‌توان از طریق لینک <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gnss/products/ionex/> استخراج کرد. لازم به‌ذکر است که مقادیر TEC در این داده‌ها بر اساس ۰/۱ TECU گزارش شده است و نتایج ما در این گزارش هم با همین واحد گزارش شده است.

برای این که کدهای مسافت‌یابی و جهت‌یابی از ماهواره به‌گیرنده برسند باید در یک بسامد حامل تعدیل شوند. این امواج حامل توسط ساعت‌های اتمی سزیم و ربدیوم با فرکانس پایه ۱۰/۲۳ مگاهرتز تولید می‌شوند. انواع موج حامل در GPS شامل موج پایه L1 (با فرکانس MHz ۱۵۷۵/۴۲)، موج L2 (با فرکانس MHz ۱۲۲۷/۶۰) و امواج جدید L2C (با فرکانس MHz ۱۲۲۷/۶۰)، موج L5 (با فرکانس MHz ۱۱۷۶) و موج L1C (با فرکانس MHz ۱۵۷۵/۴۲) است. امواج L₁ و L₂ معمولاً توسط امواج دیگری مدوله می‌شوند که شامل کدهای P و C/A می‌باشد. با استفاده از بیاس کد تفاضلی می‌توان اطلاعات مفید ژئودینامیکی از این داده‌ها استخراج کرد. TEC

این فرمت نیز مانند فرمت RINEX از دو قسمت عنوان و محتوا تشکیل شده است. فرمت IONEX نقشه‌های ۲ و ۳ بعدی از TEC را پشتیبانی می‌کند، داده‌های IONEX به‌صورت شبکه بندی شده و جهانی هستند (اسچائر و همکاران، ۱۹۹۸).

مطالعات انجام شده روی اقلیم‌شناسی جو بالا با استفاده از داده‌های IONEX وجود چرخه سالانه، درون‌سالانه، فصلی و ۲۷-روزه را نشان می‌دهد (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). البته اثر زاویه میل خورشید روی مقادیر TEC به‌دست آمده از این داده‌ها و فعالیت خورشید در طول موج رادیویی در عرض‌های پایین و فعالیت خورشید در طول موج‌های EUV در عرض‌های بالاتر مشهود بود (لیو و همکاران، ۲۰۰۹). حتی اثرات دینامیکی کشندهای جوی را نیز روی این داده‌ها اخیراً مطالعه کرده‌اند (مختاروف و همکاران، ۲۰۱۳).

در پژوهش حاضر ابتدا در بخش دو، به بررسی داده‌های جهانی TEC می‌پردازیم. سپس روش محاسبه و کار روی این داده‌ها در بخش سه معرفی می‌شود. نتایج توزیع نصف‌النهاری TEC به‌صورت سالانه و بعد میانگین ماهانه و فصلی ارائه می‌شود. در نهایت به بحث و نتیجه‌گیری خواهیم پرداخت.

۲. روش پژوهش

۲-۱. داده یون‌سپهری

سرویس جهانی IGS با استفاده از ایستگاه‌های GNSS محصولات متنوعی برای مطالعات ژئودینامیکی برای کاربران اعم از دانشمندان و کارکنان مراکز فضایی فراهم کرده است. این داده‌ها با استفاده از اطلاعات بیش از ۳۵۰ ایستگاه GNSS فراهم شده است. این داده‌ها شامل اطلاعاتی از قبیل آب قابل‌بارش با استفاده از تأخیر زمانی مسیر سروسو (zenith path delay) و گرادیان‌های مداری و نصف‌النهاری آن برای وردسپهر فراهم می‌شود. از سال ۱۹۹۸ مرکز IGS اقدام به تولید محتوای الکترون یون‌سپهری با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های دوفرکانسه

محاسبه این نوع میانگین مداری سعی در شناخت بیشتر اقلیم جو بالا را داریم. البته در این پژوهش بیشتر اثرات نوسان این تغییرات تحت تأثیر اثرات خورشیدی بررسی می‌شود.

در این پژوهش جهت بررسی توزیع نصف‌النهاری میانگین مداری TEC، داده‌های IONEX را برای بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷، به عبارتی برای یک دوره ۱۹ ساله استخراج شد. سپس از داده‌ها برای هر روز میانگین مداری گرفته و در ادامه برای هر ماه و هر سال میانگین‌گیری صورت گرفت و در نهایت برای ۱۹ سال به صورت ماهانه و سالانه میانگین مداری گرفته شده است. همچنین شاخص فعالیت خورشیدی از F10.7 استفاده شده است. این شاخص تابش خورشید در طول موج رادیویی ۱۰/۷ cm و فرکانس ۲۸۰۰ مگاهرتز است که همبستگی بالایی با تعداد لکه‌های خورشیدی دارد و چرخه‌های خورشیدی را آشکار می‌کند. این گسیل رادیویی از پلاسمای کروئای خورشیدی که بین خطوط میدان مغناطیسی گیرافاده، روی مناطق فعال خورشیدی ایجاد می‌شود. بنابراین این گسیل رادیویی بیانگر پخش غیرتابشی گرمایش پلاسمای کروموسفری است. پس نشانگر خوبی از فعالیت‌های کلی خورشیدی است. شار رادیویی F10.7 معمولاً بر اساس solar flux units همان که می‌شود که همان $1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ در زمان فعالیت‌های بیشینه خورشیدی، همراه با افزایش شدت میدان مغناطیسی، بی‌هنجاری‌های پلاسمایی سطح و جو خورشید افزایش می‌یابد در نتیجه تابش خورشید در تمامی طول‌موج‌ها حتی رادیویی افزایش می‌یابد. افزایش تابش خورشیدی و بی‌هنجاری‌های تابشی منجر به افزایش یونیزاسیون و بی‌هنجاری‌های یون‌سپهر می‌شود.

۴. نتایج

میانگین مداری پراسنج‌های جوی کاربرد گسترده‌ای در مطالعه اقلیم‌شناختی دارد. جهت بررسی توزیع

می‌تواند برحسب تفاضل کدهای P_1-P_2 به صورت زیر استخراج شود (گائو و همکاران، ۲۰۱۵):

$$TEC = -\frac{1}{40.3 F(z)} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_4 - dcb)$$

$$TEC = \frac{1}{40.3 F(z)} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_4 - \Delta Amb - DCB) \quad (1)$$

که در آن $P_4 = P_1 - P_2$ ، $L_4 = \Phi_1 \lambda_1 - \Phi_2 \lambda_2$ که در این روابط Φ_1, Φ_2 مربوط به فاز موج حامل اول و دوم و λ_1, λ_2 طول موج هر کدام از فرکانس‌های L_1 (با طول موج ۱۹ cm) و L_2 (با طول موج ۲۴/۴ cm) و f_1, f_2 فرکانس هر کدام از آنهاست. در ضمن dcb تأخیر سخت‌افزاری گیرنده، DCB تأخیر سخت‌افزاری ماهواره و $\Delta Amb = N_1 \lambda_1 - N_2 \lambda_2$ است.

نقشه‌های یون‌سپهری جهانی با دقت زمانی ۲ ساعت و تفکیک افقی $5^\circ \times 5^\circ$ توسط (CODE, Center for Orbit Determination in Europe) فراهم شده است. مقادیر TEC نقاط شبکه جهانی از بازسازی مقادیر TEC قائم ایستگاه‌های IGS با تابع هماهنگ‌های کروی زیر ایجاد شده است:

$$TEC(\alpha, \beta) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\alpha) [a_{nm} \cos(m\beta) + b_{nm}(m\beta)] \quad (2)$$

که در آن α و β به ترتیب عرض و طول جغرافیایی، n_{\max} بالاترین درجه، $P_{nm}(\alpha)$ تابع لژاندر نرمال شده، a_{nm} و b_{nm} ضرایب هماهنگ‌های کروی است که n و m به ترتیب درجه و مرتبه هستند. البته در تبدیل TEC مایل به TEC قائم از تابع نگاهت مدل تک‌لایه‌ای به صورت زیر استفاده شده است:

$$F(z) = \frac{1}{\cos(z')} \quad (3)$$

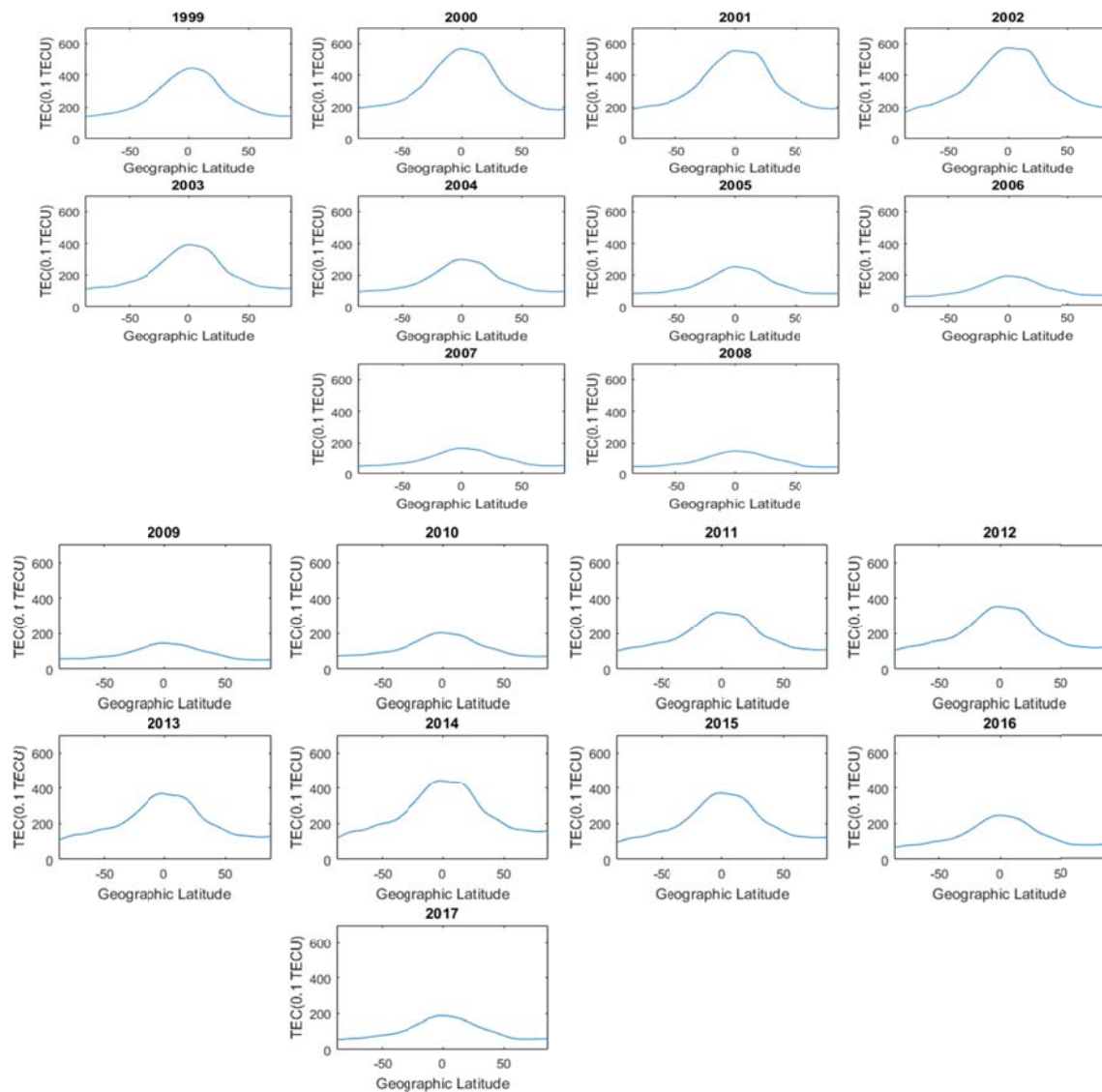
که در آن $z' = R \sin(z)/(R+H)$ است که $R = 6371 \text{ km}$ و $H = 450 \text{ km}$ است.

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

میانگین مداری پراسنج‌های جوی کاربرد گسترده‌ای در مطالعه اقلیم‌شناختی دارد. بنابراین ما در این پژوهش با

یک دوره ۱۹ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷) را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که در چرخه خورشید ۲۳ که از آگوست ۱۹۹۶ شروع شده و تا دسامبر ۲۰۰۸ ادامه دارد، کمینه مقدار TEC در سال ۲۰۰۸ (۱۴ TECU) و بیشینه مقدار در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ می‌باشد که حدوداً مقداری برابر با ۵۷ TECU دارد. در این چرخه، فاصله بین کمینه و بیشینه مقدار TEC تقریباً بین ۶ تا ۸ سال می‌باشد.

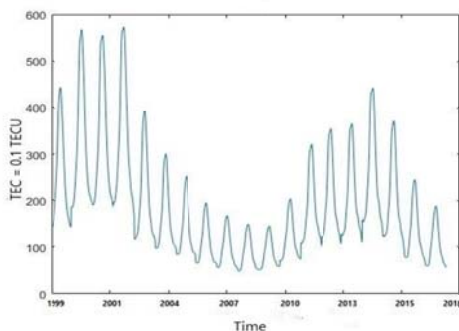
نصف‌النهار میانگین مداری TEC، داده‌های IONEX را برای بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷، یعنی یک دوره ۱۹ ساله ارائه می‌شود. از داده‌ها برای هر روز میانگین مداری گرفته و در ادامه برای هر ماه و هر سال میانگین‌گیری صورت گرفت و در نهایت برای ۱۹ سال به صورت ماهانه و سالانه میانگین مداری ارائه شده است. شکل ۱ تمامی محورهای افقی، عرض‌جغرافیایی که از $87/5^{\circ}$ تا $87/5^{\circ}$ و محورهای عمودی مقدار TEC بر حسب TECU $0/1$ برای



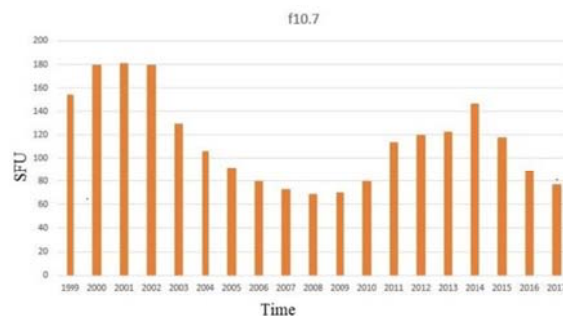
شکل ۱. مقادیر میانگین مداری TEC برای یک دوره ۱۹ ساله (۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷) را نشان می‌دهد. تمام محورهای افقی، عرض‌جغرافیایی از $87/5^{\circ}$ تا $87/5^{\circ}$ و محورهای عمودی مقدار TEC بر حسب TECU $0/1$ را نشان می‌دهد.

۲۳، سال ۲۰۰۱ بیشینه مقدار TEC و سال ۲۰۰۸ کمینه مقدار را داراست، در چرخه خورشیدی ۲۴ به ترتیب سال ۲۰۱۴ و ۲۰۰۹ بیشینه و کمینه مقدار TEC را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که میزان TEC در چرخه خورشیدی ۲۳ نسبت به چرخه خورشیدی ۲۴ بیشتر می‌باشد و یک روند صعودی و نزولی را دنبال می‌کنند. در ادامه ابتدا میانگین فصلی TEC و سپس برای روشن شدن جزئیات بیشتر میانگین هر ماه به صورت جداگانه ارائه می‌شود. در شکل ۳ میانگین فصلی TEC برای یک دوره ۱۹ ساله آورده شده‌است، در شکل‌های زیر محورهای افقی و محورهای عمودی همانند شکل ۱ می‌باشد. دیده می‌شود که بیشترین مقدار TEC در اعتدال بهاری (۰/۱ TECU) و کمترین آن در انقلاب تابستانی (۰/۱ TECU) است.

در چرخه خورشیدی فعلی که چرخه خورشیدی ۲۴ نام دارد، کمینه مقدار TEC در سال ۲۰۰۹ (۱۴ TECU) و بیشینه مقدار در سال ۲۰۱۴ (۴۴ TECU) می‌باشد، فاصله بین کمینه و بیشینه مقدار TEC تقریباً ۵ سال است. در تمامی سال‌ها در عرض پایین و میانه بیشینه مقدار TEC و در عرض بالا کمینه مقدار TEC مشاهده می‌شود که به دلیل زاویه تابش خورشید است. به نظر زاویه تابش و موقعیت زمین و خورشید و زاویه میل خورشید نقش غالب در اقلیم‌شناسی TEC دارد. در شکل ۲ تغییرات سالانه TEC برای بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ رسم شده‌است. محور افقی سال و محور عمودی مقدار TEC بر حسب ۰/۱ TECU را نشان می‌دهد. شکل ۲ تغییرات سالانه TEC در چرخه خورشیدی ۲۳ و ۲۴ را نشان می‌دهد. با توجه به شکل در چرخه خورشیدی



(ب)

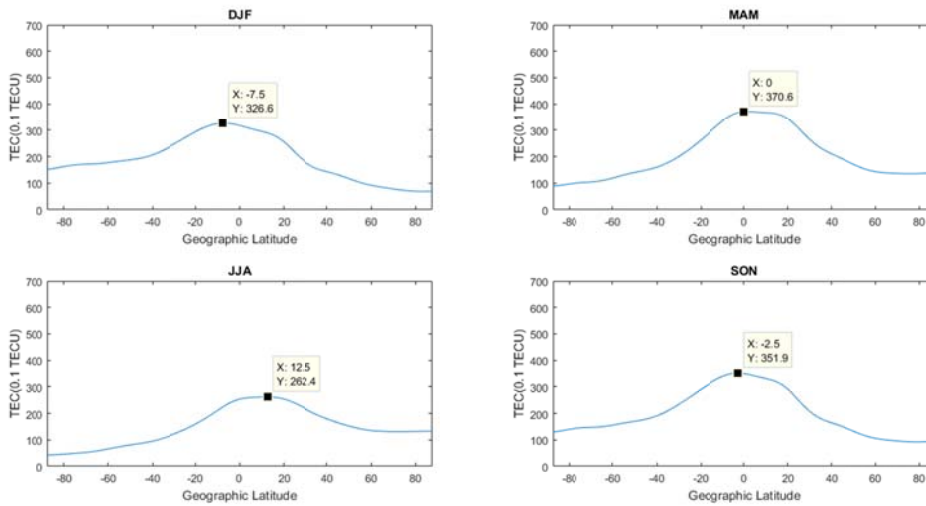


(الف)

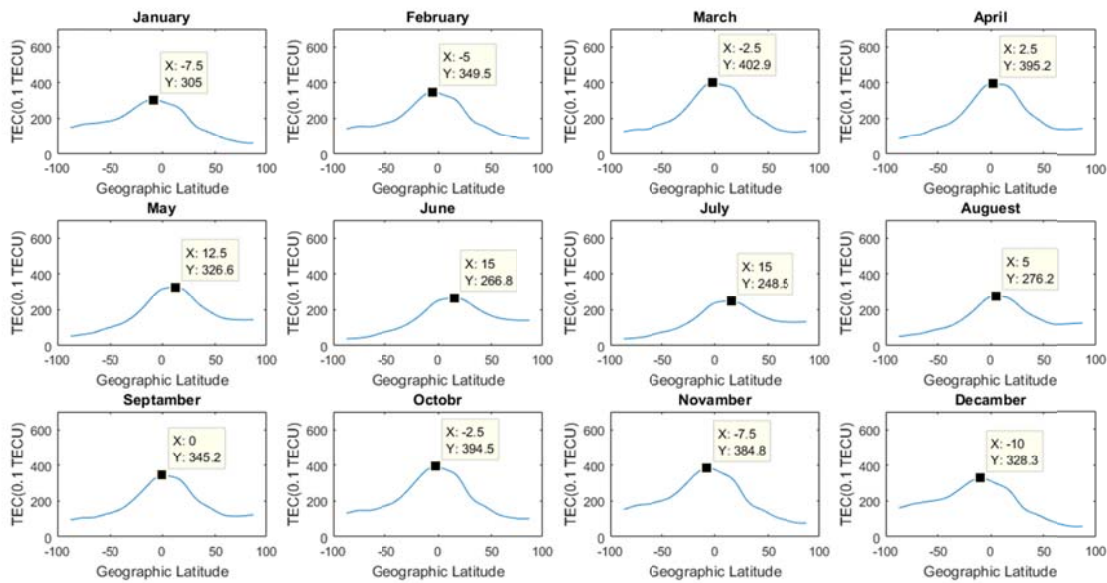
شکل ۲. تغییرات میانگین سالانه الف) شار خورشیدی F10.7 بر حسب واحد شار خورشیدی و ب) TEC بر حسب ۰/۱ TECU در بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷.

جدول ۱. مقادیر بیشینه TEC در فصول زمستان، تابستان، اعتدال بهاری و اعتدال پاییزی (نیم‌کره شمالی).

| فصل (نیم‌کره شمالی) | پاییز | زمستان | بهار | تابستان |
|---------------------------------------|-------|--------|-------|---------|
| بیشینه مقدار TEC (بر حسب 0.1TECU) | ۳۵۱/۹ | ۳۲۶/۶ | ۳۷۰/۶ | ۲۶۲/۴ |
| عرض جغرافیایی بیشینه مقدار TEC (درجه) | -۲/۵ | -۷/۵ | ۰/۰ | ۱۲/۵ |



شکل ۳. توزیع نصف‌النهاری از میانگین فصلی TEC از بالا سمت راست MAM (اعتدال بهاره)، DJF (انقلاب زمستانی)، SON (اعتدال پاییزی) و JJA (انقلاب تابستانی).



شکل ۴. میانگین مداری ماهانه TEC از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷. مقادیر بیشینه روی هر نمودار مشخص شده است و نام ماه مورد نظر بالای آن آمده است.

نیم کره جنوبی قرار دارد. تقریباً مقدار بیشینه نمودار پاسخ مناسبی به زاویه میل خورشید می‌دهد. در سه ماه ژوئن، جولای و آگوست که تابستان نیم کره شمالی می‌باشد، بیشینه مقدار TEC در نیم کره شمالی قرار دارد و کمینه در نیم کره جنوبی بیشتر است. البته فاصله زمین تا خورشید که در تابستان نیم کره شمالی بیشتر است اثر خود را روی مقادیر بیشینه نشان می‌دهد و بیشینه انقلاب تابستانی از

در شکل ۴ میانگین ماهانه TEC برای یک دوره ۱۹ ساله آورده شده است، در شکل‌های زیر محورهای افقی و محورهای عمودی همانند شکل ۱ می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود برای سه ماه دسامبر، فوریه و ژانویه که زمستان نیم کره شمالی می‌باشد، مقدار بیشینه TEC در نیم کره جنوبی است چون قطب جنوب خورشید را می‌بیند و البته مقدار بیشینه نمودار در

نیم کره جنوبی بیشتر است. البته فاصله زمین تا خورشید که در تابستان نیم کره شمالی بیشتر است اثر خود را روی مقادیر بیشینه نشان می دهد و بیشینه انقلاب تابستانی از بیشینه انقلاب زمستانی کمتر است.

با بررسی مقادیر TEC مشاهده شد که مقدار TEC در طول فصل بهار و پاییز بیشتر است و پس از آن فصل زمستان و تابستان قرار دارد. این نتایج با تحقیقاتی که برای عرض پایین (ایستگاه هند) انجام دادند، همخوانی دارد (پاتل و همکاران، ۲۰۱۷). در نتیجه با توجه به کمبود داده های جو بالا در منطقه جنوب غرب آسیا و همخوانی مقادیر اقلیم شناختی TEC حاصل از ایستگاه های GNSS با ایستگاه های سنجش زمینی و فضایی یونسپهر، ادامه پژوهش های اقلیم شناسی و مطالعه موردی با این داده ها پیشنهاد می شود. این پژوهش در یافتن مقادیر پریشیدگی سری زمانی TEC در مطالعات موردی، می تواند استفاده شود. یافتن پریشیدگی های آماری مرتبه های بالاتر و همبستگی TEC با سایر پارامترهای خورشیدی برای ادامه کار پیشنهاد می شود.

مراجع

سبزه ای، ف.، شریفی، م. ع.، آخوندزاده، م. و فرزانه، س.، ۱۳۹۴، پیش بینی محتوای کلی الکترون قائم یونسپهری با شبکه عصبی برای یک موقعیت خاص و مقایسه با مدل مرجع یونسپهری بین المللی، م. فیزیک زمین و فضا، ۴۱(۳)، ۴۷۳-۴۸۵.

Ataç, T., Özgüç., A. and Pektaş, R., 2009, The variability of foF2 in different phases of solar cycle 23. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(5), 583-588.
Baumjohann, W. and Treumann, R. A. 1997, *Basic space plasma physics*, Imperial College Press, London.
García, R., 2007, Tracking solar gravity modes: the dynamics of the solar core, *Science*. 316 (5831), 1591-1593.
Guo, J., Li, W., Liu, X., Kong, Q., Zhao, C. and Guo, B., 2015, Temporal-Spatial Variation of Global GPS-Derived Total Electron Content,

بیشینه انقلاب زمستانی کمتر است.

بیشترین میزان TEC در ماه مارس، آوریل و اکتبر (بهار و پاییز نیم کره شمالی) و کمترین مقدار در ماه ژوئن، جولای و آگوست (تابستان نیم کره شمالی) می باشد.

۵. بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق که با هدف اقلیم شناختی پریشیدگی های یونسپهری با استفاده از داده های شبکه ای GPS برای بازه زمانی ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ صورت گرفت، مشاهده شد که تغییرات TEC با تغییرات چرخه خورشیدی مشابه است و مقدار TEC از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۲ روند صعودی و از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ روند نزولی را دنبال می کند (مشابه فعالیت خورشید). به دنبال آن از سال ۲۰۰۹ مقدار TEC زیاد شده تا سال ۲۰۱۴ که به حداکثر مقدار رسیده و پس از آن روند نزولی را طی می کند، فاصله بین کمینه و بیشینه مقدار TEC تقریباً ۵ تا ۷ سال می باشد. میزان TEC در چرخه خورشیدی ۲۳ میزان بیشتری نسبت به چرخه خورشیدی ۲۴ دارد.

در بررسی داده های TEC از سال ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۷ دیده می شود که در ماه های اکتبر، مارس و آوریل مقدار TEC نسبت به سایر ماه ها بیشتر می باشد.

با توجه به این که خورشید در ماه های ژوئن، جولای و آگوست در نیم کره شمالی تابش بیشتری دارد بیشینه نمودار در این نیم کره می باشد. تقریباً مقدار بیشینه نمودار پاسخ مناسبی به زاویه میل خورشید می دهد. با این که بیشینه مقدار TEC در نیم کره شمالی قرار دارد و کمینه در

1999-2013, *PLoS One*. 20; 10(7), e0133378. doi: 10.1371/journal.pone.0133378.

Gurtner, W. and Estey, L., 2007, RINEX The receiver independent exchange format version 3.00. *Astronomical Institute, University of Bern, Bolulder, Colorado*.

Liao, X., 2000, Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network. *M.Sc. Thesis, Univ. of Calgary, Canada*.

Liu, L., Wan, W. Ning, B. and Zhang, M.-L., 2009, Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps, *J. Geophys. Res.*, 114,

- A06308, doi:10.1029/2009JA014244.
- Mukhtarov, P., Pancheva, D. Andonov, B. and Pashova, L., 2013, Global TEC maps based on GNSS data: 1. Empirical background TEC model, *J. Geophys. Space Physics*, 118, doi:10.1002/jgra.50413.
- Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O. and Erol, C. B., 2007, Total Electron Content estimation with Reg-Est. *Geophys. Res.* 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459.
- Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S. and Miyazaki, S., 2002, A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. *Earth*
- Patel, N. C., Karia, S. P. and Pathak, K. N., 2017, GPS-TEC Variation during Low to High Solar Activity Period (2010-2014) under the Northern Crest of Indian Equatorial Ionization Anomaly Region. *Positioning*, 8, 13-35. <https://doi.org/10.4236/pos.2017.82002>.
- Schaer, S., 1999, Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system. Ph.D. Thesis, Univ. of Berne, Berne, Switzerland.
- Schaer, S., Werner, G. and Feltens, J., 1998, IONEX: The Ionosphere Map Exchange Format Version 1. Proceedings of the IGS Analysis Centers workshop, Darmstadt, Germany. February 9–11, 233–247.

Climatology of the Total Electron Content (TEC) Derived from GNSS Station Network

Joghataei, M.^{1*}, Jooyande, N.² and Memarian, M. H.¹

1. Assistant Professor, Department of Space Physics, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

2. M.Sc. Student, Department of Space Physics, Faculty of Physics, Yazd University, Yazd, Iran

(Received: 26 Aug 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

Summary

The Earth's ionosphere is one of the important layers of the atmosphere, starting from 60 kilometers extending up to about 1000 kilometers. Even though the layer contains less than 1% of the total mass of the atmosphere; however, it has very important effects on the solar radiation and transmission of radio waves. The ionosphere is formed under effect of solar extreme ultraviolet (EUV), solar X-ray radiation, and electron precipitation of solar winds. The lower atmosphere also contributes to the variability of the ionosphere. In other words, ionosphere is under effects of both lower atmosphere dynamics from below and solar radiation from above boundary. Therefore, the amount of changes of particles in the ionosphere depend largely on many parameters such as time, radiation pattern, Sun-Earth geometry, ion chemistry, and solar activity. Sun's variability is most important origin of the ionosphere long term change, so that the amount of change in the ionosphere layers depends largely on the time and mode of radiation, the Earth-Sun status, and the solar activity. Variety of periodic and nonperiodic variations should be considered in the ionosphere, which makes serious impacts on satellite and ground communication, precise navigation and radio broadcasting. In this research, the relationship between solar activity and total electron content (TEC) is investigate with gridded global TEC data.

Total electron content (TEC) data are important ionosphere parameter that can be derived from time delay of radio wave transmitted from satellite to ground base station. The maps of TEC are given with the resolution of 5° in longitude and with the resolution of 2.5° in latitude, 12 times every day (one map in every two hours at UTC time). In the other word, each IONEX file includes 13 maps in which one map has overlap with next day. Longitude ranges from -180 to 180 degrees that includes 73 points resolution. Latitude ranges from -87.5 to 87.5 degrees that indicates 71 points with the resolution of 2.5°. We use F10.7 index for determination of solar activity. This parameter is indicative of radio emission of sun in 10.7 cm radio wave. This index has a good correlation with sun spot number and nowadays it is used in many research as solar activity parameter.

In this investigation, we used 19-years data IONEX for the period 1999 – 2017 for both 23 and 24 solar cycles. At first, we calculated zonal mean of data (in all longitudes, for every latitude) every day, then for every month and finally for every year. We had the mean data of TEC for every day, month and year of these 19 years. In the 23 solar cycle that began in August 1996 and continued to December 2008, minimum amount of TEC was 14 TECU in 2008, and maximum amount was about 57 TECU in 2000 and 2002. In this solar cycle, the time gap between minimum and maximum was 6 to 8 years. In the current solar cycle, solar cycle 24, with minimum amount of TEC was 14 TECU in 2009 and with maximum 44 TECU in 2014. The time gap between both extremes was about 5 years. In all years, maximum amount of TEC was in low and middle latitude, and minimum was in high latitude. Results indicated that maximum TEC was in southern hemisphere in December, January and February. In June, July and August, maximum TEC is located in northern hemisphere. Maximum amount of TEC was in March, April and October, and minimum was in June, July and August. It seems that maximum position and value depend on solar declination, Earth-Sun position and geometry.

Keywords: Ionosphere, TEC, GNSS, Solar Cycle, F10.7.

* Corresponding author:

mjoghataei@yazd.ac.ir