

آنالیز سری‌های زمانی TEC حاصله از نقشه‌های عددی GIM

محمود رجبی^{۱*}، علیرضا امیری سیمکویی^۲، جمال عسگری^۲، وهاب نفیسی^۳، سینا کیایی^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان
ma.rajabi@eng.ui.ac.ir

^۲ دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان
ar.amirisimkooei@surv.ui.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان
{asgari, nafisi}@eng.ui.ac.ir

^۴ کارشناس ارشد ژئودزی - دانشکده عمران و نقشه برداری - دانشگاه زنجان
sina.kiaei@iasbs.ac.ir

(تاریخ دریافت مرداد ۱۳۹۳، تاریخ تصویب آبان ۱۳۹۳)

چکیده

یکی از منابع مهم خطا بر روی امواج GNSS اثر یونسفر زمین است. این لایه از اتمسفر زمین مملو از ذرات باردار می‌باشد. اثر یونسفر بر روی امواج وابسته به میزان TEC در طول مسیر می‌باشد. در این مقاله از روش برآورد هارمونیک کمترین مربعات که یک روش آنالیز در حوزه فرکانس می‌باشد، جهت آنالیز سری‌های زمانی TEC استفاده می‌شود. داده‌های مورد استفاده مقادیر TEC قائم می‌باشد که از مدل های GIM (نقشه های TEC قائم یونسفری) به دست آمده و دارای پوشش جهانی می‌باشند. در اینجا از ۱۵ سال داده در بازه زمانی سال ۱۹۹۸ تا سال ۲۰۱۴ استفاده می‌شود. ابتدا روش هارمونیک تک متغیره و چند متغیره بر روی سری‌های زمانی اعمال، و فرکانس‌های مهم شناسایی می‌شود. آنالیز چند متغیره نشان می‌دهد که سیگنال‌های پرریودیک روزانه با پرریود روزانه و هارمونیک‌های بالاتر و همچنین پرریودهای سالیانه با هارمونیک‌های بالاتر در این سری‌ها وجود دارد. در ادامه توان طیفی برخی سیگنال‌های کشف شده در تمام نقاطی که داده موجود می‌باشد محاسبه و بررسی می‌گردد. نتیجه ای که برای هارمونیک‌های بالاتر پرریود روزانه یونسفر (یک سوم روزانه، یک چهارم و یک پنجم روزانه) دیده شد، گویای این مطلب است که بیشینه توان طیفی در استوای مغناطیسی (Dip equator) اتفاق می‌افتد، که یکی از دلایل وقوع این پرریودها می‌تواند میدان مغناطیسی زمین می‌باشد.

واژگان کلیدی: یونسفر، TEC، برآورد هارمونیک کمترین مربعات، آنالیز طیفی

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یونسفر را بهتر شناخت. نکته مهم دیگر برای شناخت یک پدیده، وجود داده کافی با پوشش زمانی مناسب است تا بتوان رفتار آن پدیده را به خوبی ارزیابی کرد.

مدل‌های GIM^۸ (نقشه جهانی TEC قائم یونسفری) نقشه‌هایی با پوشش جهانی می‌باشند. علاوه بر مقادیر TEC، دارای پوشش زمانی ۱۵ سال (۲۰۱۴-۱۹۹۸) و قدرت تفکیک زمانی ۲ ساعته برای کل زمین با فواصل ۵ درجه در طول جغرافیایی و ۲٫۵ درجه در عرض جغرافیایی می‌باشند. از همین رو داده‌های مناسبی برای بررسی و شناخت یونسفر هستند [۴].

از دیگر عوامل موثر در شناخت رفتار هر پدیده، انتخاب روش مناسب جهت پردازش و تحلیل داده‌ها می‌باشد. در این مقاله از برآورد هارمونیک کمترین مربعات^۹ استفاده شده است. از جمله مزایای این روش می‌توان به استفاده از مجموعه فرکانس‌های دلخواه در این روش، اعمال وزن داده‌ها، عدم نیاز به هم فاصله بودن داده‌ها، در نظر گرفتن رفتارهای هارمونیک، همچنین آنالیز تک متغیره^{۱۰} و چند متغیره^{۱۱} با استفاده از این روش اشاره کرد [۳و۵].

۲- تغییرات چگالی الکترون در یونسفر

چگالی الکترون با خصوصیت فیزیکی زمین و خورشید و حرکاتشان در ارتباط است، این امر باعث تغییرات چگالی الکترون در بازه زمان و مکان می‌گردد. در زیر به بررسی این فاکتورها خواهیم پرداخت.

۲-۱- تغییرات با زمین

لایه یونسفر باتوجه به برخی از خصوصیات فیزیکی و هندسی زمین دچار تغییر می‌شود. در ذیل به برخی از این خصوصیات اشاره می‌شود:

الف) ارتفاع: یونسفر را از لحاظ ارتفاعی به ۴ لایه $F2, F1, E, D$ تقسیم می‌کنند، که D کمترین و $F2$ دارای بیشترین چگالی الکترون می‌باشد. و لایه D در شب ناپدید و لایه $F1$ و $F2$ نیز در شب با هم ترکیب می‌شوند، و

مشاهدات GNSS^۱ مانند هر مشاهده دیگری دستخوش خطاهای تصادفی و سیستماتیک، مانند خطا-های مداری، ساعت (ماهواره و گیرنده)، تروپوسفر، یونسفر می‌باشند. سیگنال‌های ارسالی توسط ماهواره‌های GNSS از اتمسفر زمین (هوا کره) عبور می‌کنند. بنابراین بررسی تاثیر اتمسفر و شناخت آن از اهمیت بسزایی برخوردار است [۱و۱۷]. اتمسفر زمین را در تئوری انتشار امواج^۲، به تروپوسفر (بخش خنثی) و یونسفر (بخش باردار) تقسیم می‌کنند. تروپوسفر از سطح زمین تا ارتفاع ۸۰ کیلومتری زمین کشیده می‌شود، و یک محیط غیر متفرق کننده^۳ برای امواج GNSS می‌باشد. انتشار امواج در این لایه به فرکانس موج بستگی ندارد. بخش باردار که از ۸۰ کیلومتری تا ۱۰۰۰ کیلومتری را شامل می‌شود، شامل مخلوطی از ذرات باردار و خنثی است. این لایه برای امواج GNSS متفرق کننده [۲]، و وجود آن به دلیل تشعشعات خورشیدی است [۳]. تاخیر یونسفری امواج GNSS وابسته به فرکانس امواج و میزان TEC^۴ است.

به مجموع تعداد الکترون‌ها در مسیر ماهواره تا گیرنده در یک سطح مقطع به اندازه یک مترمربع TEC گویند، و واحد آن TECU^۵ است. استفاده از GNSS برای تخمین تعداد یون‌های لایه یونسفر، از چندین سال پیش آغاز شده و سرویس‌های جهانی مختلفی مانند JPL^۶, IGS^۷ این کار را به صورت مداوم انجام می‌دهند. نتیجه این اطلاعات داده‌های یونسفری با پوشش جهانی در مدت طولانی است. گرچه این اطلاعات، دقت روش‌های منطقه‌ای را ندارد، اما به دلیل طول مدت و جهانی بودن، می‌توانند برای بررسی یونسفر به صورت جهانی، مفید باشند. این اطلاعات امکان بررسی رفتار یونسفر را به صورت کلی در اختیار دانشمندان قرار می‌دهند.

شناخت هر پدیده نیازمند آشنایی با خصوصیات و ویژگی‌های آن پدیده می‌باشد. کمیت TEC یکی از پارامترهای یونسفری است که می‌توان به کمک آن رفتار

^۱ Global Navigation Satellite System.

^۲ propagation

^۳ Non-Dispersive

^۴ Total Electron Content

^۵ 1TECU=1016 [e/m²]

^۶ International GNSS Service

^۷ Jet Propulsion Laboratory

^۸ Global Ionospheric Maps

^۹ Least-Squares Harmonic Estimation (LS-HE)

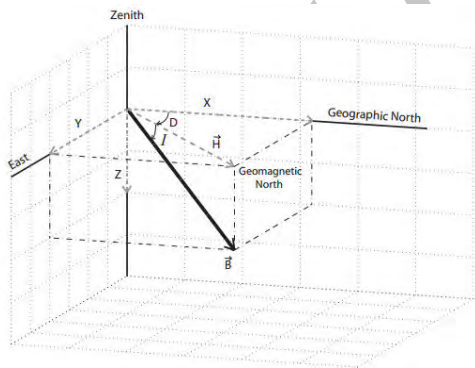
^{۱۰} Univariate

^{۱۱} Multivariate

بردار میدان مغناطیسی زمین \vec{B} وابسته به پارامترهای مغناطیسی (B, H, I, D, X, Y, Z) می باشد، که در آن (X, Y, Z) سه مولفه میدان در جهت شمال، شرق و پایین (جهت مخالف زینت)، B و H به ترتیب شدت کلی و افقی میدان با واحد تسلا، D انحراف مغناطیسی (زاویه بین شمال جغرافیایی با شمال مغناطیسی) و I زاویه \vec{B} با صفحه افقی (زاویه میل)^۲، می باشد (شکل ۱). و عرض ژئومغناطیسی^۳ نیز به صورت زیر تعریف می شود [۹].

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1}{2} \tan(I) \right) \quad (1)$$

ذرات باردار سه نوع حرکت را در حضور میدان مغناطیسی زمین تجربه می کنند [۸]. حرکت گردابی^۴ که در آن ذرات باردار به دور خطوط میدان مغناطیسی به دلیل نیروی لورنتز می گردند که تفسیری به عنوان نیروی میل به مرکز دارد. حرکت نوسانی^۵، به دلیل نزدیک شدن خطوط میدان مغناطیسی در قطبهای مغناطیسی است. ذرات باردار با این حرکت روی خطوط نیرو بین دو قطب حرکت می کنند. حرکت دیرپفت^۶، که ذرات باردار به دلیل وجود نیروهای خارجی که دارای مولفه عمود بر خطوط میدان مغناطیسی می باشند، در جهت شرقی-غربی حرکت می کنند.



شکل ۱- مولفه های میدان مغناطیسی زمین در یک نقطه واقع در نیم کره شمالی

همواره $F2$ به عنوان لایه ای با چگالی بیشینه در روز و شب شناخته می شود [۷و۶]. جدول ۱ تقسیم بندی لایه های مختلف یونسفر را بر حسب ارتفاع نشان می دهد.

جدول ۱ - تقسیم بندی ارتفاعی یونسفر

لایه	ارتفاع (km)	چگالی الکترون (e/m^3)	
		روز	شب
D	۸۰ - ۹۰	10^{10}	-
E	۹۰ - ۱۴۰	10^{11}	5×10^{10}
F1	۱۴۰ - ۲۰۰	5×10^{11}	-
F2	۲۰۰ - ۱۰۰۰	10^{12}	10^{11}

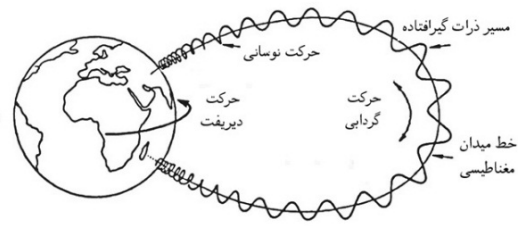
(ب) زاویه ساعتی خورشید: به دلیل پیرو روزانه زمین (چرخش زمین به دور خود) وابستگی به زمان در طول روز وجود دارد. ماکزیمم این تغییرات در بعد از ظهر محلی و مینیمم آن در شب رخ می دهد.

(پ) فصول: میل استوای زمین نسبت به اکلپتیک باعث دریافت میزان تشعشعات خورشیدی متفاوت در فصل های گوناگون و در نتیجه نوسان چگالی الکترون در فصول مختلف می شود (دوران زمین به دور خورشید). در بهار و پاییز، برخورد تشعشعات خورشیدی در استوای زمین قائم است که باعث ماکزیمم یونیزاسیون و در نتیجه ماکزیمم چگالی الکترون است. در تابستان و زمستان، یونیزاسیون کاهش می یابد و به طبع آن چگالی الکترون هم کاهش می یابد. همچنین، در تابستان در نیمکره شمالی، زمین در دورترین نقطه خود در مدار بیضوی اش به دور خورشید قرار می گیرد. در نتیجه در فصل تابستان میزان تشعشعات خورشیدی در نیمکره شمالی به طور قابل توجهی در مقایسه با نیمکره جنوبی کاهش می یابد که باعث کاهش چگالی الکترون در این زمان می شود [۸].

(ت) میدان مغناطیسی زمین^۱: میدان مغناطیسی دو قطبی زمین، ذرات باردار به خصوص الکترون های سبک را تحت تاثیر قرار می دهد. معمولاً زمین بر اساس فریم مرجع ژئومغناطیس به نواحی استوایی، عرض های میانی و قطبی تقسیم می شود. عموماً، در نواحی استوایی و قطبی، اندازه و تغییرات چگالی الکترون نسبتاً بزرگتر است [6].

^۲ Dip angle or magnetic inclination
^۳ geomagnetic latitude
^۴ Cyclotron Motion
^۵ Oscillatory (Bounce) Motion
^۶ Drift Motion

^۱ Geomagnetic field



شکل ۲- حرکت گردابی، نوسانی و دیررفت ذرات باردار به دام افتاده توسط میدان مغناطیسی [۱۰]

خورشیدی با سطح خورشید با پیرودی ۲۷ روزه دوران می‌کنند.

(پ) بادهای خورشیدی: پرتاب پیوسته‌ی ذرات بسیار پرانرژی از خورشید به اتمسفر زمین نفوذ کرده و در میدان مغناطیسی اختلال ایجاد می‌کند که باعث تغییر در چگالی الکترون‌ها می‌شود.

(ت) طوفان‌های خورشیدی: گاهی اوقات پرتاب ذرات پرانرژی خورشیدی به دلیل شارهای خورشیدی (CME) با شدت زیادی افزایش می‌یابد و منجر به اغتشاش در یونسفر و تغییرات خیلی سریع در چگالی الکترون‌ها می‌شود. معمولاً این پدیده در ناحیه شمالی^۵، جایی که ذرات روی خطوط میدان مغناطیسی جریان پیدا می‌کنند، رخ داده و به اتمسفر خنثی پایینی (ارتفاع‌های پایین‌تر) راه پیدا می‌کند، و شفق‌های قطبی^۶ را به وجود می‌آورند.

۲-۳- فاکتورهای متغیر

(الف) TIDs^۷: موج گونه‌ها یا موج‌هایی در چگالی الکترون یونسفر هستند که در جهت افقی منتشر می‌شوند. معمولاً در مقیاس بزرگ با پیرودهایی در بازه ۳۰ دقیقه تا ۳ ساعت و طول موج‌هایی بالغ بر ۱۰۰۰ کیلومتر، در مقیاس متوسط با پیرودهای ۱۰ دقیقه تا ۱ ساعت و طول موج‌های چند صد کیلومتر و در مقیاس کوچک با پیرودهای ۱۰ دقیقه و طول موج‌های چند ده کیلومتر دیده می‌شوند [۲].

(ب) نوسانات یونسفری: آشفتگی‌های کوچک مقیاس با پیرودهای ۱ الی ۱۵ ثانیه باعث تغییرات سریع چگالی الکترون در مسیر امواج می‌شود که باعث نوسان فاز و دامنه سیگنال‌های GPS می‌گردد. به ترتیب تغییرات ناگهانی در فاز می‌تواند رخ دهد (باعث Cycle slip می‌شود) و شدت سیگنال می‌تواند کاهش یابد.

(پ) جزر و مد جاذبی ماه: به واسطه دوران ماه، فشار اتمسفر زمین تغییر می‌کند و باعث فروپاشی یونسفر می‌شود. این اغتشاشات به طور منظم با پیرودهای تقریبی ۱۴،۷۷ روز رخ می‌دهد که مطابق با نصف ماه Synodical

نیروی که باعث حرکت دیررفت می‌شود نیروی جاذبه است که الکترون‌ها با آن به سمت شرق حرکت می‌کنند. میدان مغناطیسی به واسطه غیر هموزن بودنش (که شدت آن در ارتفاعات پایین زیاد می‌شود) و انحرافی که از میدان یکنواخت (منحنی بودن خطوط میدان مغناطیسی) دارد، باعث حرکت الکترون‌ها در جهت غرب و احتمال به وجود آمدن میدان الکتریکی می‌شود. اثر نهایی، دیررفت الکترون‌ها به سمت شرق در مگنتوسفر داخلی است که باعث جریان‌ات پلاسمایی بالارونده در اطراف استوا می‌شود و به چشمه‌های پلاسمایی استوایی^۱ معروف است. این امر باعث تفاوت چگالی الکترون در طول عرض‌های ژئومغناطیسی پایین با ماکزیممی در عرض ژئومغناطیسی ۱۵ درجه، معروف به انامولی استوایی یا انامولی اپلتون^۲ است [۷].

۲-۲- تغییرات با خورشید

همان گونه که قبلاً ذکر شد وجود یونسفر به دلیل تشعشعات خورشیدی می‌باشد در نتیجه خصوصیات خورشید، یونسفر را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. در ذیل به بررسی این عوامل می‌پردازیم.

(الف) چرخه خورشیدی^۳: تشعشعات خورشیدی با لکه‌های خورشیدی روی سطح خورشید که چرخه‌ای ۱۱ ساله دارند، در ارتباط است. و این عامل باعث به وجود آمدن پیرودهای ۱۱ ساله در یونسفر می‌شود.

(ب) دوران خورشید: سطح خورشید حدوداً هر ۲۵ روز در استوا و هر ۳۶ روز در قطب دوران می‌کند (تفاوت دوران، به دلیل حالت گازی خورشید است). لکه‌های

۴ Coronal Mass Ejection

۵ Arctic

۶ Aurora Borealis

۷ Traveling Ionospheric Disturbances

۱ Equatorial Plasma Fountain

۲ Appelton Anomaly

۳ Solar Cycle

طبیعت پیچیده یونسفر، روش‌های متنوعی برای مدل کردن یونسفر به وجود آورده است. در این راستا برای ساده‌سازی در مدل‌سازی یونسفر برخی از مدل‌ها را محدود به ارتفاع معین یا محدوده جغرافیایی مشخص و برخی دیگر را بر اساس پارامترهای یونسفری مانند VTEC^{۱۰}، NmF₂^{۱۱} و یا M(3000)F₂^{۱۲} طراحی می‌کنند. این مدل‌ها خصوصیات یونسفر، تغییرات زمانی و فصلی، دوره‌های خورشیدی و فعالیت‌های ژئومغناطیسی را که با اندیس Kp^{۱۳}، Ap^{۱۴}، بیان می‌گردند را تشریح می‌کنند. مدل‌های مختلف یونسفری را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی کرد:

الف) مدل‌های تجربی: این مدل‌ها بر مبنای اندازه‌گیری‌های یونسفر شکل می‌گیرند. داده‌های این گونه مدل‌ها عموماً در بازه‌های زمانی طولانی جمع‌آوری شده و سپس تابع تحلیلی و تجربی ساده‌ای به این داده‌ها برازش داده می‌شود. مدل Klobuchar یک مدل تجربی ساده یونسفری است که تأخیر یونسفری قائم را در زمان و مکان مشخص به صورت آنی برای گیرنده‌های تک فرکانسه سیستم GPS ارائه می‌کند. نمونه دیگر از این گونه مدل‌ها، مدل NeQuick می‌باشد که با هدف مدل کردن تأخیر یونسفری سیستم Galileo طراحی شده است [۹، ۲].

ب) مدل‌های فیزیکی: این مدل‌ها به طور مثال بر مبنای پاسخ معادله پیوستگی یا معادلات انرژی و گشتاور برای یون‌ها و الکترون‌ها تهیه می‌شوند. برای مثال، چگالی الکترون به عنوان تابعی از ارتفاع یا تابعی در طول خطوط میدان مغناطیسی به عنوان جواب معادلات ارائه می‌گردد.

پ) مدل‌های عددی: در مقیاس‌های جهانی و ناحیه‌ای مقدار پارامتر یونسفر TEC در یک شبکه منظم ارائه می‌شود. مدل GIM نمونه‌ای از مدل‌های عددی می‌باشد، سرویس بین‌المللی سیستم GNSS (IGS)، که وابسته به انجمن بین‌المللی ژئودزی (IAG) است، شبکه

است. این زمان برابر زمانی است که ماه برای Elongation ماکزیمم نیاز دارد [۲].

۳- روش‌های سنجش و مدل‌های یونسفری

روش‌های سنجش شامل یونوسوند^۱، ژرفاسنجی فوقانی^۲، رادار پراکنده‌ساز ناهمبسته (ISR)^۳، رادار پراکنده‌ساز همبسته (CSR)^۴، روش‌های اندازه‌گیری در محل^۵، استفاده از ایستگاه‌های زمینی سامانه جهانی تعیین موقعیت GPS^۶ و آکالتیش رادیویی^۷ می‌باشند [۱۱ و ۱۲ و ۱۳]. از بین روش‌های ذکر شده توضیحی مختصر درباره روش GPS که روش مورد استفاده برای تهیه نقشه‌های GIM می‌باشد، داده می‌شود. خطای یونسفری بعد از خطای عمدی SA^۸ که از سال ۲۰۰۰ خاموش شده است، بیشترین اثر را روی مشاهدات GPS دارد. سیگنال‌های این سامانه در مسیر خود از ماهواره تا گیرنده دچار شکست می‌شوند و همین موضوع سبب ایجاد خطای یونسفری می‌شود. اما همین منبع خطا امکان مطالعه یونسفر و مدل‌سازی آن را با استفاده از مشاهدات GPS فراهم می‌کند. با استفاده از خاصیت پاشندگی یونسفر به روش‌های مختلفی می‌توان TEC را با ترکیبات مختلف مشاهدات شبه فاصله کد و فاز به ترتیب برای دو موج L1 و L2 برآورد کرد [۲]. با مشاهدات شبه فاصله کد می‌توان TEC مطلق را به دست آورد ولی در این روش خطای نویز گیرنده و چند مسیری باعث کاهش دقت می‌شوند. همچنین با وجود ابهام فاز در مشاهدات فاز از این روش برای به دست آوردن TEC نسبی استفاده می‌شود. یک روش بهینه، هموارسازی^۹ TEC مطلق و غیر دقیق به دست آمده از شبه‌فاصله توسط TEC نسبی و دقیق به دست آمده از فاز است. از مزایای این سیستم می‌توان به سهولت در برآورد TEC، پیوستگی در برداشت داده‌ها، وجود شبکه‌های گسترده، و جمع‌آوری ساده داده‌ها اشاره کرد.

۱۰ Vertical TEC

۱۱ بیشینه چگالی لایه F2

۱۲ پارامتر انتقال لایه F2

۱۳ پارامتر اندازه‌گیری فعالیت‌های ژئومغناطیسی که هر سه ساعت محاسبه می‌گردد.

۱۴ پارامتر اندازه‌گیری فعالیت‌های ژئومغناطیسی که به صورت روزانه برآورد می‌شود.

۱ Ionosonde

۲ Topside sounding

۳ Incoherent Scatter Radar

۴ Coherent Scatter Radar

۵ In-situ

۶ Global Positioning System

۷ Radio Occultation

۸ Selective Availability

۹ Smoothing

۴- برآورد کمترین مربعات هارمونیک (LS-HE)

برآورد کمترین مربعات هارمونیک (LS-HE) ابتدا توسط (Amiri-Simkooei, 2007) و (Amiri-Simkooei et al, 2007) توسعه و برای آنالیز سری‌های زمانی مختصات GPS، سپس (Amiri-Simkooei and Asgari, 20012) برای بررسی یونسفر استفاده شد. در این روش قسمت تابعی مدل با شناخت و در نظر گرفتن توابع هارمونیک بهبود داده می‌شود. به مدل خطی معادلات مشاهدات زیر توجه کنید:

$$E(y) = Ax, D(y) = Q_y \quad (2)$$

که در آن A ماتریس ضرایب به ابعاد $m \times n$ ، Q_y ماتریس کواریانس^۴ با ابعاد $m \times m$ ، x بردار مجهولات با n درایه، y بردار مشاهدات با m درایه و D و E به ترتیب اپراتور کواریانس و امید می باشند. مدل خطی فوق نیازمند بهبود با شناسایی برخی الگوهای پریودیک از مشاهدات (سری‌های زمانی) است. برای مثال این الگوهای پریودیک را می‌توان به وسیله سیگنال‌های سینوسی در کمترین مربعات هارمونیک بیان کرد. این روش تعمیم آنالیز طیفی فوریه می‌باشد، که محدودیت‌های روش فوریه را ندارد، از ایرادات وارده به روش فوریه این است که آن نیازمند داده‌های با میانگین صفر، هم فاصله و با نویز سفید می‌باشد. ولی داده‌های سری‌های زمانی عمدتاً گپ دارند همچنین این داده‌ها وابستگی زمانی دارند که به معنای وجود نویز رنگی در مشاهدات می‌باشد، از طرفی هم آنالیز طیفی فوریه به فرکانس‌های صحیح محدود می‌باشد. بنابراین به روشی جامع‌تر برای آنالیز طیفی داده‌ها نیازمندیم [۵ و ۳].

۴-۱- آنالیز هارمونیک تک متغیره

برآورد هارمونیک (HE) برای شناسایی اثرات پریودیک مدله نشده مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساده‌ترین ساختار سری‌ها را می‌توان به صورت یک ترم مثلثاتی مثل $y(t) = a_k^1 \cos \omega_k t + a_k^2 \sin \omega_k t$ که یک موج سینوسی با یک فاز اولیه می‌باشد بیان کرد. پس مدل

جهانی ردگیری سیستم GNSS را که شامل بیش از ۲۰۰ گیرنده می‌باشد، نگهداری می‌کند. IGS با در اختیار داشتن تعداد زیادی گیرنده‌های دو فرکانسه دائم سیستم GNSS، که در کل سطح زمین پراکنده شده‌اند، امکان تهیه نقشه‌های جهانی TEC قائم یونسفری (GIM) را ایجاد می‌کند. چهار مرکز پردازش مشاهدات یونسفری CODE، ESA، JPL و UPC به صورت مستقل روزانه نقشه‌های یونسفری را که با روش‌های متفاوتی پردازش می‌شوند، ارائه می‌کنند [۱۵]. محصول رسمی IGS، نقشه یونسفری ترکیبی است که از پردازش نقشه‌های چهار مرکز پردازش IGS به دست می‌آید. فایل‌های GIM به صورت روزانه توزیع می‌گردند، این مدل‌ها مقدار TEC قائم (VTEC) را هر دو ساعت از ساعت صفر UT^۱ تا UT^{۲۴} در شبکه منظمی از نقاط ارائه می‌کنند. قدرت تفکیک این نقشه‌ها ۵ درجه در طول جغرافیایی از ۱۸۰- تا ۱۸۰ درجه و ۲٫۵ درجه در عرض جغرافیایی می‌باشد. این نقشه‌ها با فرمت استاندارد IONEX ارائه می‌شوند [۴]. این نقشه‌ها در دو نسخه ارائه می‌گردند: محصول سریع که هر ساعت به روز می‌شود و محصول نهایی که بین ۴ تا ۱۱ روز بعد منتشر می‌شود. علاوه بر موارد فوق، ثابت روزانه (اریب تفاضلی کد) ماهواره‌ها و گیرنده‌های ایستگاه‌های IGS در فایل IONEX وجود دارد. دانستن نکات زیر علاوه بر مطالب فوق در مورد فایل IONEX ضروری است: ۱- نقشه‌های TEC در یک فریم مرجع زمین مرکز و بسته به زمین ECEF ارائه می‌شوند. ۲- نقشه‌های TEC در سیستم مختصات کروی ارائه می‌شوند. ۳- نقشه‌های TEC در زمان جهانی و اپک مشخص ارائه می‌شوند. ۴- نقشه‌ها TEC در ارتفاع مشخصی تهیه می‌شوند. ۵- انحراف معیار نقشه‌ها در فایل وجود دارد.

ت) مدل‌های تحلیلی: بر اساس برازش تابع قائم بر روی خروجی‌های به دست آمده از مدل‌های عددی تهیه می‌شوند. نقشه‌های foF2، M(3000)F2 که توسط CCIR^۳ تهیه شده‌اند؛ نقشه‌هایی با استفاده از توابع متعامد یک و کروی لژاندر می‌باشند.

^۱ Universal Time

^۲ فرکانس بحرانی لایه F2

^۳ Comite Consultatif International des Radiocommunications

^۴ Covariance Matrix

ساختار ماتریس A_j همانند ماتریس A_k می باشد با این تفاوت که جایگزین ω_k می شود. از آن جایی که برآورد تحلیلی فرکانس ها از رابطه بالا پیچیده است در عمل از روش های عددی استفاده می شود. برای این منظور، مقادیر طیفی $P(\omega_j)$ ، به ازای مقادیر مختلف ω_j ترسیم و از فرکانسی که مقدار طیفی متناظرش ماکزیمم باشد در تشکیل A_k استفاده می شود. برای اینکه تمام ω_j ها در نظر گرفته شود و فرکانسی را از دست ندهیم از رابطه ی بازگشتی زیر استفاده می کنیم:

$$T_j = (1 + \alpha \frac{T_{j-1}}{T}) T_{j-1}, \omega_j = \frac{2\pi}{T_j} \quad (12)$$

در این رابطه α یک ضریب کوچک می باشد به طوری که تمام فرکانس ها را پوشش دهد، و T_I زمان مربوط به فرکانس نایکویست^۱ در نظر گرفته می شود، همچنین $j=1, 2, \dots$ و T طول بازه سری می باشد. حال پس از یافتن ω_k باید با توجه به فرض های آماری که ذکر شد تست شود تا ω_k کارآمد مشخص شود. آماره این تست به فرم ذیل است:

$$T_2 = \hat{e}_0^T Q_y^{-1} A_k (A_k^T Q_y^{-1} p_A^+ A_k)^{-1} A_k^T Q_y^{-1} \hat{e}_0 \quad (13)$$

اگر Q_y معلوم باشد آنگاه آماره ما از توزیع کای اسکور با دو درجه آزادی $T_2 \sim \chi^2(2,0)$ تبعیت می کند. حالت خاص و ساده آن این است که $Q_y = I$ یعنی ماتریس یکه باشد. که در این صورت:

$$P(\omega_j) = \hat{e}_0^T A_j (A_j^T A_j)^{-1} A_j^T \hat{e}_0 \quad (14)$$

۴-۲- آنالیز هارمونیک چند متغیره

روند انجام آنالیز هارمونیک کمترین مربعات چند متغیره شبیه به حالت تک متغیره می باشد. از آنالیز هارمونیک کمترین مربعات چند متغیره به منظور آنالیز همزمان چند سری زمانی (r تا) استفاده می شود. سری های زمانی که در این روش آنالیز می شوند باید طول برابر داشته باشند و زمان مشاهدات در آنها کاملاً منطبق باشد پس ابتدا داده های متناظر زمان های مشترک در مشاهدات چند سری زمانی را به عنوان مجموعه داده های

خطی مذکور در رابطه (۲) را می توان به صورت گسترش یافته ذیل نوشت:

$$E(y) = Ax + A_k x_k, D(y) = Q_y \quad (3)$$

که A_k از دو ستون وابسته به فرکانس ω_k تابع سینوسی تشکیل شده است.

$$A_k = \begin{bmatrix} \cos \omega_k t_1 & \sin \omega_k t_1 \\ \cos \omega_k t_2 & \sin \omega_k t_2 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \omega_k t_m & \sin \omega_k t_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$x_k = \begin{bmatrix} a_k^1 \\ a_k^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ω_k ، x_k مجهولات می باشند. فرکانس مجهول ω_k در این ماتریس توسط HE برآورد می شود، برای این منظور دو فرض صفر H_0 (عدم وجود تاثیرات پیرودیک) و فرض مخالف H_a را در نظر می گیریم:

$$H_0: E(y) = Ax \quad (6)$$

$$H_a: E(y) = Ax + A_k x_k \quad (7)$$

این تست آماری به صورت تکراری برای فرکانسهای مختلف انجام می شود و رد فرض صفر در آن معادل وجود فرکانس ω_k در سری زمانی مورد بررسی است. با قبول هر ω_k ترم سینوسی و کسینوسی مربوط به آن را $(A_k x_k)$ به فرض صفر اضافه کرده و تست را برای فرکانس های بعدی از سر می گیریم. ω_k مربوط به هر مرحله از رابطه ی پیشینه سازی ذیل به دست می آید.

$$\omega_k = \arg \max_{\omega_j} P(\omega_j) \quad (8)$$

که در اینجا توان طیفی فرکانس ω_j می باشد و از رابطه زیر بدست می آید.

$$P(\omega_j) = \hat{e}_0^T Q_y^{-1} A_j (A_j^T Q_y^{-1} p_A^+ A_j)^{-1} A_j^T Q_y^{-1} \hat{e}_0 \quad (9)$$

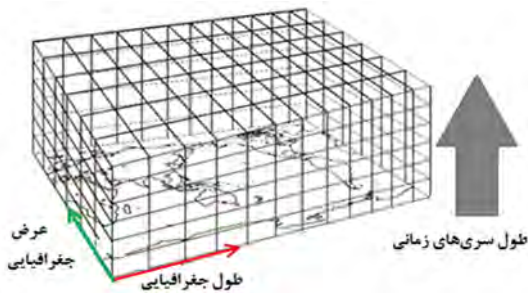
\hat{e}_0 باقی مانده های کمترین مربعات و p_A^+ تصویرگر - قائم می باشند و به طریق زیر از فرض صفر بدست می آیند.

$$\hat{e}_0 = P_A^+ y \quad (10)$$

$$P_A^+ = I - A(A^T Q_y^{-1} A)^{-1} A^T Q_y^{-1} \quad (11)$$

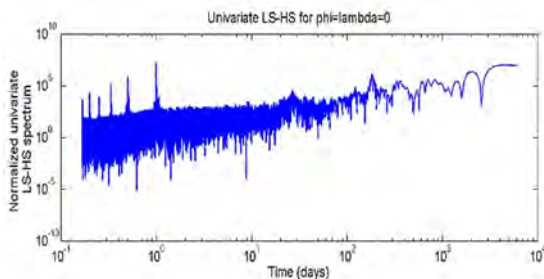
^۱ Nyquist Frequency

یک از نقاط ساخته شده است. در شکل ۳ تصویری گرافیکی از تشکیل سری زمانی بر روی زمین نشان داده شده است.



شکل ۳- نمایی شماتیک از سری‌های زمانی ساخته شده، که در آن سطرها نشان دهنده یک اپک زمانی برای تمام نقاط و هر ستون گویای طول سری زمانی مربوط به یک نقطه می‌باشد.

در ابتدا به آنالیز یکی از سری‌ها یعنی آنالیز تک متغیره پرداخته می‌شود. برای این منظور در معادله (۱۲) $\alpha = 0.1$ قرار داده می‌شود تا تمام فرکانس‌ها در نظر گرفته شوند. همچنین $T_1 = 4$ قرار داده می‌شود، فرکانس این دوره همان فرکانس نایکویست می‌باشد. نتایج حاصل از این آنالیز در شکل ۴ و جدول ۲ آمده است.



شکل ۴- پرلودگرام آنالیز هارمونیک تک متغیره مربوط به نقطه با طول و عرض صفر

جدول ۲- پرلودهای کشف شده توسط آنالیز تک متغیره در طول و عرض صفر

توان طیفی	فرکانس ($1/Days$)	پرلود (Days)
4304	6	1/6
1.61×10^4	5	1/5
8226	4	1/4
1.22×10^5	3	1/3
6.39×10^5	2	1/2
1.629×10^7	1	1
3.721×10^4	0.0374	26.7
1.262×10^6	0.0054	183.1
2.564×10^5	0.0027	366.1
9.271×10^6	2.3×10^{-4}	4238

ورودی استخراج می‌کنیم. این امر باعث یکسان شدن ماتریس ضرایب A در مدل تابعی می‌شود. برای حالت چند متغیره مدل تابعی به صورت ذیل تغییر پیدا می‌کند.

$$E(\text{Vec}(Y)) = (I_r \otimes A) \text{Vec}(X) + (I_r \otimes A_k) \text{Vec}(X_k) \quad (15)$$

$$D(\text{Vec}(Y)) = \Sigma \otimes Q = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_{1r} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{1r} & \dots & \sigma_r^2 \end{bmatrix} \otimes Q \quad (16)$$

که ضرب کرونکر \otimes ، Vec اپراتور برداری است که ماتریس را به بردار تبدیل می‌کند. برای انجام آنالیز هارمونیک کمترین مربعات چند متغیره نیز از روش عددی استفاده می‌شود. روند کار مشابه حالت تک متغیره می‌باشد و مقادیر طیفی از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P(\omega_j) = \text{tr} \left(\hat{E}^T Q^{-1} A_j (A_j^T Q^{-1} p_A^+ A_j)^{-1} A_j^T Q^{-1} \hat{E} \Sigma^{-1} \right) \quad (17)$$

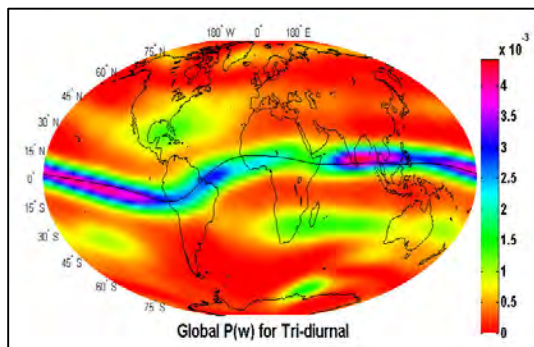
که \hat{E} باقی ماده می‌باشد. آماره ای که برای انجام آزمون فرض ها در حالت چند متغیره استفاده می‌شود $T_2 = P(\omega_k)$ می‌باشد که تحت فرض صفر از توزیع کای اسکور $T_2 \sim \chi^2(2r, 0)$ تبعیت می‌کند [۵۳].

۵- آماده سازی و آنالیز داده‌ها

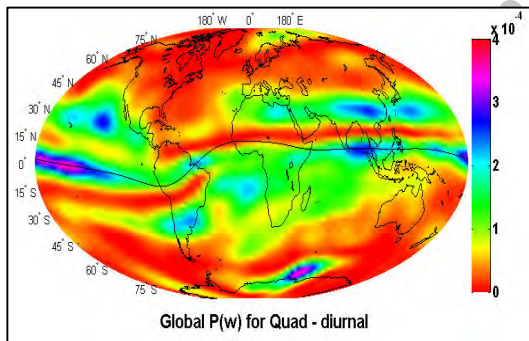
داده‌های مورد استفاده از آدرس اینترنتی ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ion_ex که متعلق به سازمان فضایی آمریکا است، استخراج شده است. دسترسی به این داده‌ها برای عموم آزاد است.

ابتدا به بررسی فایل‌های دانلود شده پرداخته و فایل‌های V مواقعی که داده برای برخی از نقاط در هر اپک موجود نباشد، ۹۹۹۹ قرار داده شده است و چون مقادیر $VTEC$ باید بین صفر تا ۲۵۰ باشند این مقادیر از داده‌ها حذف شده‌اند تا خللی در فرآیند آنالیز ایجاد نکنند. در اینجا با توجه به توضیحات داده شده برای نقشه‌های GIM در هر ۲ ساعت، در طول جغرافیایی، ۷۳ مقدار برای کمیت $VTEC$ در فواصل ۵ درجه‌ای و ۷۱ مقدار در عرض جغرافیایی به فواصل ۲٫۵ درجه وجود دارد. این بدین معناست که در هر اپک زمانی، تعداد (73×71) داده موجود می‌باشد. با در نظر گرفتن همه اپک‌ها برای ۱۵ سال سری زمانی ارزشمندی از مقادیر $VTEC$ برای هر

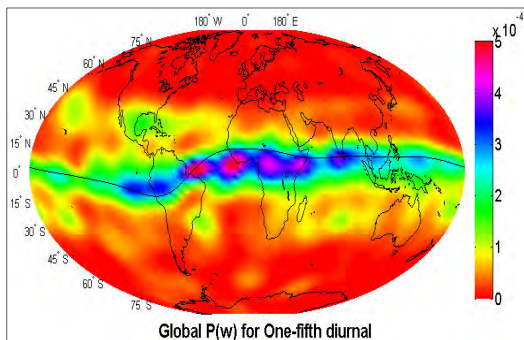
نتایج فوق برای دو طول جغرافیایی متفاوت نشان دهنده این موضوع می‌باشد که پریودهای روزانه، نیم روزانه، یک‌سوم روزانه، یک‌چهارم روزانه، یک‌پنجم روزانه، یک ششم روزانه، ۱۴ روزه، ۲۷ روزه، سالانه، نیم سالانه، یک‌سوم سالانه (۱۲۱ روزه)، یک‌چهارم سالانه (فصلی)، ۱۱٫۶ ساله در یونسفر موجود می‌باشد. در ادامه به بررسی پریودها در تک تک نقاط پرداخته شده که با این عمل توان طیفی نرمالیزه شده هر پریود، بر روی کل کره زمین محاسبه شده، که حاصل این محاسبات می‌تواند کمک شایانی به یافتن دلایل پریودها کند.



شکل ۷- مقدار توان طیفی پریود یک‌پنجم روزانه یونسفر به صورت جهانی



شکل ۸- مقدار توان طیفی پریود یک چهارم روزانه یونسفر به صورت جهانی

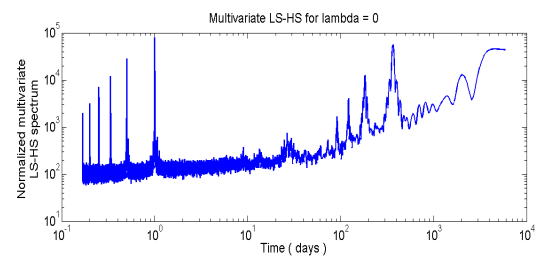


شکل ۹- مقدار توان طیفی پریود یک‌سوم روزانه یونسفر به صورت جهانی

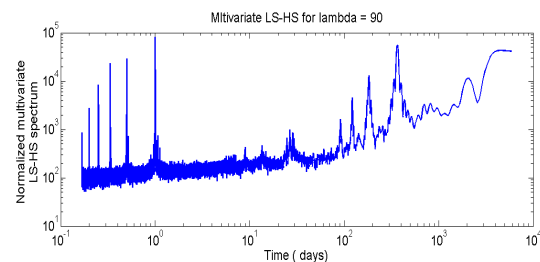
از آنجایی که با سری زمانی یک نقطه نمی‌توان به تحلیل رفتار یونسفر پرداخت، برای کشف پریودهای یونسفر به آنالیز چند متغیره پرداخته می‌شود. با توجه به توضیحاتی که در مورد داده‌ها داده شد، در هر طول جغرافیایی ۷۱ سری زمانی مربوط به عرض‌های جغرافیایی مختلف موجود می‌باشد، و به آنالیز طیفی توام این سری‌ها پرداخته می‌شود، که پریودهای غالب در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳- پریودهای کشف شده توسط آنالیز چند متغیره در طول صفر و ۹۰ درجه و عرض‌های مختلف

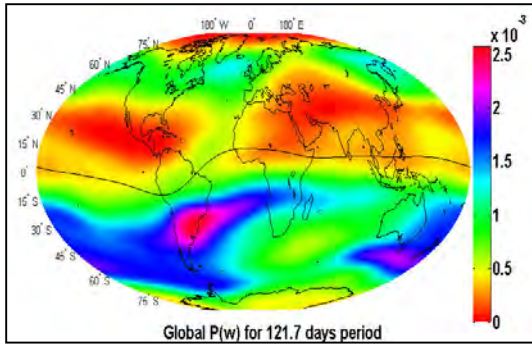
توان طیفی		فرکانس (1/Days)	پریود (Days)
Lambda=90	Lambda=0		
831	1978	6	1/6
2729	3132	5	1/5
8256	7090	4	1/4
2.21×10^4	1.11×10^4	3	1/3
2.95×10^4	2.80×10^4	2	1/2
8.07×10^4	7.89×10^4	1	1
469.4	342.7	0.074	13.51
984.4	751	0.0377	26.5
1625	1659	0.011	91.36
4525	3999	0.008	121.7
1.28×10^4	1.27×10^4	0.005	183.1
5.49×10^4	5.56×10^4	0.0027	364.5
4.25×10^4	4.51×10^4	2.35×10^{-4}	4238



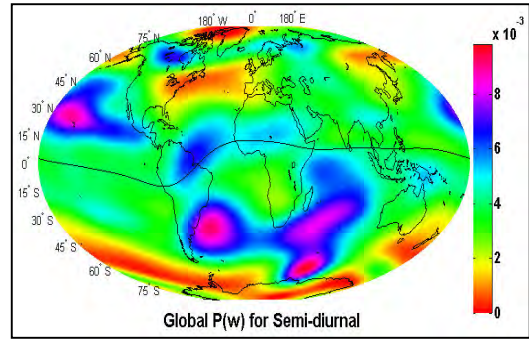
شکل ۵- پریودگرام آنالیز هارمونیک چند متغیره مربوط به نقاط با طول جغرافیایی صفر درجه در عرض‌های مختلف



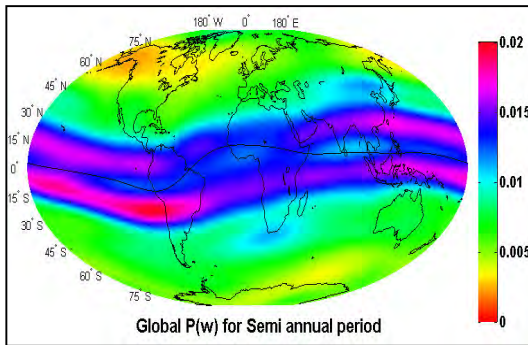
شکل ۶- پریودگرام آنالیز هارمونیک چند متغیره مربوط به نقاط با طول جغرافیایی ۹۰ درجه در عرض‌های مختلف



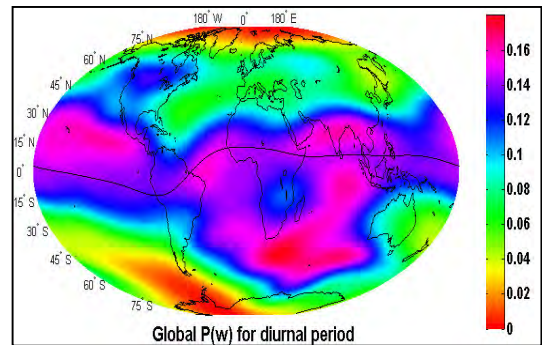
شکل ۱۴- مقدار توان طیفی پریود یک‌سوم سالانه یونسفر به صورت جهانی



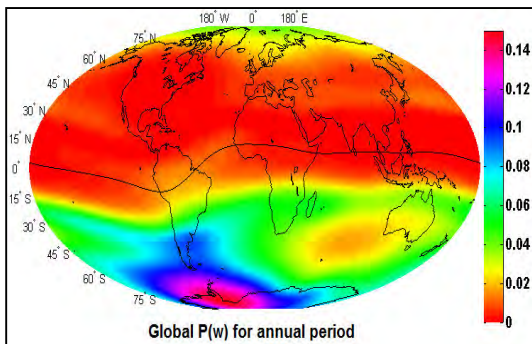
شکل ۱۰- مقدار توان طیفی پریود نیم روزانه یونسفر به صورت جهانی



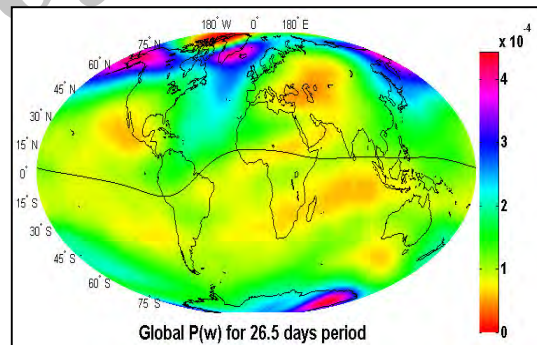
شکل ۱۵- مقدار توان طیفی پریود نیم سالانه یونسفر به صورت جهانی



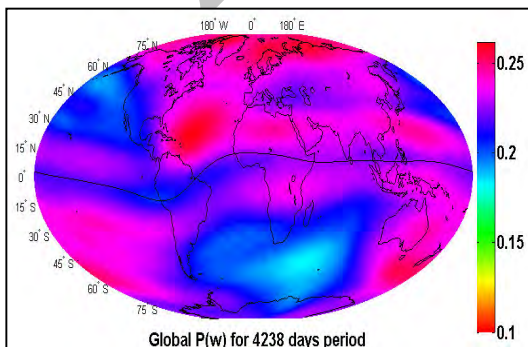
شکل ۱۱- مقدار توان طیفی پریود روزانه یونسفر به صورت جهانی



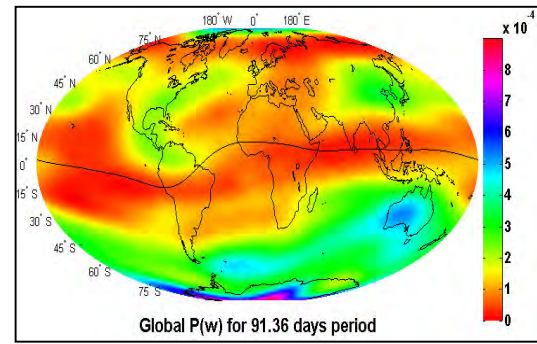
شکل ۱۶- مقدار توان طیفی پریود سالانه یونسفر به صورت جهانی



شکل ۱۲- مقدار توان طیفی پریود ۲۷ روزه خورشیدی در یونسفر به صورت جهانی



شکل ۱۷- مقدار توان طیفی پریود ۴۲۳۸ روزه یا همان ۱۱ سالانه چرخه خورشیدی در یونسفر به صورت جهانی



شکل ۱۳- مقدار توان طیفی پریود یک‌چهارم سالانه (فصلی) یونسفر به صورت جهانی

نتایج در جدول ۲ قابل مشاهده است. ایرادی که به این روش آنالیز وارد می‌باشد، این است که نمی‌توان رفتار کلی یونسفر را با آن بررسی کرد. برای رفع مشکل مذکور به آنالیز کمترین مربعات چند متغیره در طول جغرافیایی صفر و ۹۰ درجه پرداخته شد. از آنالیز هارمونیک کمترین مربعات چند متغیره به منظور آنالیز همزمان چند سری زمانی که در این تحقیق ۷۱ سری در هر طول می‌باشد، استفاده شد. نتیجه این آنالیز در جدول ۳ آمده است. نتایج جدول ۳ برای دو طول جغرافیایی متفاوت نشان می‌دهد که پریودهای روزانه، نیم روزانه، یک سوم روزانه، یک چهارم روزانه، یک پنجم روزانه، یک ششم روزانه، ۱۴ روزه، ۲۷ روزه خورشیدی، سالانه، نیم سالانه، یک سوم سالانه، یک چهارم سالانه (فصلی)، ۱۱، ساله (چرخه خورشیدی) است. در انتها به بررسی پریودهای حاصله از روش چند متغیره در تک تک نقاط (کل کره زمین) پرداخته شد. این عمل نشان دهنده این است که هر کدام از پریودها نتیجه عوامل فیزیکی خاصی می‌باشند. نتیجه مهمی که در این تحقیق می‌توان به آن اشاره کرد، این است که یکی از دلایل اتفاق هارمونیک‌های بالاتر پریود روزانه یونسفر (یک سوم روزانه، یک چهارم و یک پنجم روزانه)، میدان مغناطیسی زمین است. همچنین از عمده دلایل فیزیکی وقوع پریودهای کشف شده در روش هارمونیک، می‌توان به میدان مغناطیسی، طوفان‌ها و بادهای خورشیدی، دوران روزانه و سالانه زمین و جزر و مد ماه اشاره کرد. در نهایت پیشنهاد می‌شود با استفاده از این پریودهای کشف شده، مدلی ساخته شود و توسط آن به بررسی رفتارهای منظم یونسفر با همان آنومالی‌های یونسفر پرداخته شود.

همان طور که مشاهده می‌شود، در شکل های ۷ و ۸ که مربوط به پریودهای یک پنجم و یک سوم روزانه یونسفر می‌باشند، بیشینه توان طیفی در استوای مغناطیسی رخ می‌دهد و در دیگر نواحی ناچیز است. در شکل ۹ نیز پریود یک چهارم روزانه، بیشتر در نواحی استوا و قطبین مغناطیسی نمایان است. بنابر این میدان مغناطیسی زمین می‌تواند یکی از دلایل وقوع این پریودها باشد. همچنین در شکل ۱۰ پریود یک دوم روزانه، بیشتر در نیم کره جنوبی و قطبین مغناطیسی نمایان است. شکل ۱۱ مربوط به پریود روزانه یونسفر است و بیشتر در نواحی استوایی و قطبین مغناطیسی دیده می‌شود. شکل ۱۲ نشانگر این است که پریود ۲۷ روزه در نواحی قطبی نیم کره شمالی نسبت به نیم کره جنوبی بیشتر اتفاق می‌افتد. شکل ۱۳ گویای این است که پریود فصلی بیشتر در نیم کره جنوبی و بیشینه آن در قطب جنوب می‌باشد شکل ۱۵ و ۱۶ مربوط به تغییرات نیم سالانه و سالانه یونسفر می‌باشند. بهترین دلیل برای توجیه دلیل وقوع این پریودها، بادهای خورشیدی (پرتاب پیوسته ذرات بسیار پر انرژی از خورشید به اتمسفر زمین) می‌باشد. اما در تئوری های معاصر رفتار مگنوتسفر مانع توضیح رفتار این مکانیسم می‌باشد. در واقع یک مکانیسم انتقال انرژی در مگنوتسفر می‌باشد که دلیل و توضیحی برای این دو آنامولی می‌باشد [۱۶]. شکل ۱۷ نشان دهنده این است که پریود ۱۱ ساله یونسفر در تمام نقاط رخ می‌دهد و کمینه آن در استوا و قطبین مغناطیسی می‌باشد. دلیل اتفاق این پریود نیز چرخه ۱۱ ساله خورشیدی است.

۶- بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا به آنالیز کمترین مربعات هارمونیک بر روی سری زمانی TEC حاصله از نقشه‌های GIM برای نقطه‌ای با طول و عرض صفر پرداخته شد. که

مراجع

- [1] Hugentobler U., Schaer S., and P. Fridez., (2001) "Bernese GPS Software," Astronomical Institute, University of Bern.
- [2] Schaer S., (1999) "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System," Ph.D thesis, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland.
- [3] Amiri-Simkoei A. R., and Asgari J., (2012) "Harmonic analysis of total electron contents time series:," GPS Solut, p. 77-88.

- [4] Schaer S., Gurtner W., and J. Feltens.,(1998a) "IONEX: The IONosphere Map EX-change Format," Version 1.
- [5] Asgari J., and Amiri-Simkooei A. R.,(2011) "Analysis and Prediction of GNSS Estimated Total Electron," Journal of the Earth & Space Physics, vol. 37, pp. 11-24.
- [6] Odijk D.(2002)., "Fast Precise GPS positioning in the presence of Ionospheric Delays," PhD thesis, Delft University of Technology.
- [7] Schunk R. W., and Nagy A. F.,(2000) "Ionospheres Physics, Plasma Physics, and Chemistry," Cambridge University Press,.
- [8] Prölss G. W.(2004) "Physics of the Earth's Space Environment. An Introduction," Springer Berlin Heidelberg New York.
- [9] Memarzadeh Y.,(2009) "Ionospheric modeling for precise GNSS applications," PhD thesis, Delft University of Technology,.
- [10] Tascione T. F.,(1994) "Introduction to the space environment," Krieger Publishing company, Malabar, FL, USA. 2nd edition.
- [11] Garcia Fernandez M.,(2004) "Contributions to the 3D ionospheric sounding with GPS data," PhD thesis, Research group of Astronomy and Geomatics (gACE), Universitat Pol itecnica de.
- [12] Hargreaves J. K.,(1992) "The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace – the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere," Cambridge University Press, Cambridge.
- [13] Kelley M. C.,(2009) "The earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics" Academic Press, United States of America.
- [14] Lee L. C., Rocken C., and Kursinski R.,(2001) "Applications of Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate," Springer-Verlag, Hong Kong.
- [15] Wienia R. J.,(2008) "Use of Global Ionospheric Maps for Precise Point Positioning," Msc Scriptie, Delft University of Technology.
- [16] Azpilicueta F. R. and Brunini C. L., (2010)"A new concept regarding the cause of," Journal of Geophysical Research,.

[۱۷] آزموده ع. ر. اردلان و باعث م., "مدل سازی خطای یونسفر با استفاده از تصحیح مولفه های مختصات و بردار موقعیت," نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران. جلد ۳۸، شماره ۶، اسفند ۱۳۸۳

[۱۸] شریفی م. ع., صفری ع. ا. و معصومی س., "مروری بر سنجنده های یونسفر," نشریه علمی-ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی, دوره سوم, شماره ۲, خرداد ۱۳۹۱