

# بررسی تغییرات زمانی - مکانی TEC در ایران با استفاده از مشاهدات GPS

ناصر عبدی\*<sup>۱</sup>، حمیدرضا نانکلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری ژئودزی - گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران  
naser.abdi@ut.ac.ir

<sup>۲</sup> دکتری ژئودزی - رئیس اداره ژئودزی و ژئودینامیک - سازمان نقشه برداری کشور  
nankali@ncc.org.ir

(تاریخ دریافت شهریور ۱۳۹۲، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۳)

## چکیده

طی سالیان گذشته، استفاده از GPS به عنوان یک ابزار منحصربه‌فرد، در مطالعه چگونگی گذر امواج الکترومغناطیس از لایه‌های مختلف اتمسفر به خصوص یونسفر مطرح بوده است. در حال حاضر یونسفر عمده‌ترین منبع خطا در موقعیت‌یابی با GPS محسوب گردیده و میزان تأثیر آن روی انتشار موج بستگی به مقدار TEC و فرکانس سیگنال دارد. در این مقاله تغییرات زمانی-مکانی TEC در ایران با استفاده از مشاهدات حدود ۴۰ ایستگاه IPGN مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مدلسازی منطقه‌ای یونسفر، برآورد مقادیر TEC و محاسبه DCB گیرنده‌ها با استفاده از توابع هارمونیک کروی تا درجه ۶ صورت گرفته و برای حذف اثرات هندسی همچون بایاس‌های ساعت ماهواره و گیرنده، تروپوسفر و ... از اختلاف مشاهدات کد هموارشده فرکانس اول و دوم استفاده شده است. کشف مشاهدات اشتباه و جهش‌های فازی و در نهایت هموارسازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز موج‌حامل در مراحل پیش‌پردازش انجام می‌شوند. در این مقاله مراحل محاسباتی و ترسیمی به ترتیب با نرم‌افزارهای برنیز و متلب انجام شده‌اند. پردازش‌های انجام شده مربوط به ۱۰ روز از سال ۲۰۱۲ و ۳ روز از سال ۲۰۱۳ مطابق با اول هر ماه از تقویم خورشیدی بوده که روزهای اول هر فصل را شامل شده و مطابق با نزدیکترین دوره بیشینه شدن اثر لکه‌های خورشیدی در افزایش مقادیر TEC هستند. نتایج محاسبات در بررسی تغییرات زمانی در نقاط مختلف ایران نشان می‌دهند که بیشترین و کمترین اثر یونسفر به ترتیب در فصل بهار و زمستان و بیشینه مقدار TEC در طول شبانه روز مربوط به حدود ساعت ۱۴ به وقت محلی است. همچنین در مطالعه تغییرات مکانی یونسفر، تغییرات زیاد مقدار TEC با تغییر عرض جغرافیایی به خوبی مشهود است. به عبارت دیگر بیشترین و کمترین مقدار TEC در ایران به ترتیب مربوط به پائین‌ترین و بالاترین عرض جغرافیایی هستند. همچنین در این تحقیق مقدار TEC حدود 100TECU در فصل بهار ۲۰۱۲ مشاهده شد که می‌تواند باعث حداکثر خطای به میزان ۷۵ متر روی طول ماهواره-گیرنده برای ماهواره نزدیک به افق و فرکانس دوم گردد.

واژگان کلیدی: یونسفر، GPS، TEC، TECU، DCB

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

یونسفر منطقه‌ای از پلاسمای یونیزه شده است که در ارتفاع ۸۰ تا ۱۲۰۰ کیلومتری بالای سطح زمین گسترده شده و بین تروپوسفر خنثی و پلاسمای مغناطیسی تمام-یونیزه واقع شده است. یونسفر حاوی الکترون‌های آزاد و یون‌های ناشی از فرآیند یونیزاسیون است. متفاوت بودن تراکم الکترونی در نقاط مختلف، لایه‌های یونسفر را پدید آورده که این لایه‌ها، D، E و F نام دارند [۱].

تغییرات زمانی- مکانی یونسفر که با تغییر در مقدار محتوای کلی الکترونی (TEC)<sup>۱</sup> مشخص می‌گردد، اثرگذار روی کاربردهای استاتیک و کینماتیک GPS<sup>۲</sup> و ناوبری خواهد بود. بنابراین بررسی این تغییرات موضوعی مهم در تحقیقات کاربردی GPS به‌شمار می‌رود.

همانطور که یونسفر می‌تواند اثرگذار روی انتشار امواج GPS باشد، با توجه به تراکم و تعداد ایستگاه‌های دائمی GPS در سراسر کره زمین، مشاهدات GPS نیز می‌توانند به‌عنوان داده‌های دقیقی برای مطالعه یونسفر به حساب آیند.

شیوه‌ها و روش‌های زیادی برای مدلسازی مقدار TEC، تعیین توزیع دانسیته الکترونی و استخراج پروفیل‌های TEC موجود است. به‌طوریکه مدل‌های ریاضی و تجربی متعددی برای یونسفر معرفی شده و در این فرآیند، یونوسوندها ابزاری موثر در جمع‌آوری داده محسوب می‌شوند. مدل شناخته‌شده یونسفر بین‌المللی مرجع (IRI)<sup>۳</sup> نمونه‌ای از مدل‌های تجربی است [۲].

از زمان شروع به کار GPS مدل‌های دقیق و دقیق‌تری نسبت به قبل، مانند مدل کلوبوچار و GIM<sup>۴</sup> معرفی شدند که اساس این مدل‌ها استفاده از داده‌های GPS است. همچنین استفاده از مشاهدات GPS ماهواره‌های LEO<sup>۵</sup> برای تولید مدل‌های سه‌بعدی نزدیک به‌آنی نیز مرسوم است [۲].

در این مقاله، برای تعیین مقادیر دقیق TEC از روشی بر مبنای داده‌های GPS استفاده می‌گردد که مراحل آن عبارتند از:

۱. پیش‌پردازش داده‌ها با هدف آشکارسازی اشتباهات، جهش‌های فاز و سرانجام کمان‌های پیوسته از داده‌ها.
  ۲. هموارسازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز در هر کمان با هدف کاهش سطح نویز داده‌های کد.
  ۳. تعیین بایاس کد تفاضلی و ضرایب هارمونیک کروی مدل به صورت همزمان با استفاده از مشاهدات کد هموار شده و فاز موج حامل.
  ۴. تولید نقشه‌های یونسفری بر اساس مقادیر TEC در مکان و زمان خاص و بررسی تغییرات مکانی- زمانی آن [۳].
- بعد از تشریح تئوری مدلسازی یونسفر و تعیین مقادیر TEC مطابق با مراحل قبل، نتایج تجربیات متعددی با استفاده از داده‌های واقعی GPS در ایران ارائه می‌گردد.

## ۲- تئوری مدلسازی یونسفر و تعیین مقادیر TEC

### ۲-۱- انتشار امواج در یونسفر

یونسفر برای سیگنال‌های رادیویی یک محیط پاشنده<sup>۶</sup> به حساب می‌آید. به عبارت دیگر اثر یونسفر روی امواج، بستگی به فرکانس آنها و همچنین تعداد الکترون‌های واقع در مسیر سیگنال (TEC) دارد. اثر یونسفر بر روی مشاهدات کد و فاز در GPS به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد [۱].

$$\Delta_{gr}^{ion} = + \frac{40.3}{f^2} STEC \quad (1)$$

$$\Delta_{ph}^{ion} = - \frac{40.3}{f^2} STEC \quad (2)$$

در این روابط STEC و f به ترتیب نمایانگر محتوای کلی الکترونی در مسیر گیرنده-ماهواره و فرکانس موج هستند. به دلیل بزرگ بودن مقدار TEC، از واحد TECU<sup>۷</sup> که معادل با  $10^{16}$  الکترون بر مترمربع است برای بیان آن استفاده می‌شود.

### ۲-۲- تغییرات مکانی - زمانی مقدار TEC

تغییرات مکانی یونسفر متأثر از میدان مغناطیس زمین بوده و خورشید منبع اصلی یونیزاسیون برای یونسفر به-

۱ Total Electron Content  
 ۲ Global Positioning System  
 ۳ International Reference Ionospheremodell  
 ۴ Global Ionosphere Model  
 ۵ Low Earth Orbiters

۶ Dispersive  
 ۷ TEC Unit

در این روابط:  $P_i$  مشاهده شبه فاصله کد،  $\Phi_i$  مشاهده شبه فاصله فاز موج حامل،  $I_i$  تأخیر یونسفری،  $\lambda_i$  طول موج و  $N_i$  ابهام فاز موج حامل مربوط به فرکانس  $i$  ام بوده و  $\rho$  فاصله هندسی بین گیرنده- ماهواره،  $c$  سرعت موج در خلأ،  $dt$  خطای ساعت ماهواره،  $dT$  خطای ساعت گیرنده،  $d_{orb}$  خطای اطلاعات مداری،  $d_{trop}$  تأخیر تروپوسفری،  $b$  بایاس سخت‌افزاری ماهواره،  $B$  بایاس سخت‌افزاری گیرنده،  $d_m$  تأثیر خطای چندمسیری و  $\varepsilon$  نویز اندازه‌گیری هستند. همچنین ترکیبهای خطی با روابط زیر:

$$P_4 = P_1 - P_2 \quad (5)$$

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (6)$$

مستقل از اثرهای هندسی (خطاهای ساعت ماهواره و گیرنده، اطلاعات مداری، مختصاتهای ایستگاهی) می‌باشند. این ترکیبهای خطی دارای ترم تأخیر یونسفری و ابهام در فاز بوده و می‌توانند برای تعیین مدل‌های یونسفری و مقادیر TEC مورد استفاده قرار گیرند [۵]. با استفاده از روابط ۱ تا ۶ داریم:

$$P_4 = 40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot STEC + b_{P_1-P_2} - B_{P_1-P_2} + \varepsilon_{P_4} \quad (7)$$

$$L_4 = -40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot STEC + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + b_{L_1-L_2} - B_{L_1-L_2} + \varepsilon_{L_4} \quad (8)$$

در این روابط  $b_{P_1-P_2}$ ،  $B_{P_1-P_2}$  به ترتیب بیانگر بایاس سخت‌افزاری یا بایاس کد تفاضلی (DCB)<sup>۲</sup> ماهواره و گیرنده نامیده می‌شوند. اگرچه این بایاسها در واقع وابسته به زمان هستند، اما در عمل مقدار آنها در یک بازه زمانی چندین روز تا یک ماه بسیار پایدار است و می‌توان آنها را در فرآیند مدل‌سازی یونسفر و تعیین مقدار TEC به عنوان مقادیر ثابت در نظر گرفت. مقدار این بایاس برای ماهواره‌ها در حدود چندین نانوثانیه بوده و در مورد گیرنده‌ها می‌تواند به بیشتر از ۱۰ نانوثانیه نیز برسد [۳].

همچنین  $b_{L_1-L_2}$ ،  $B_{L_1-L_2}$  به ترتیب بیانگر بایاس سخت‌افزاری یا بایاس فاز تفاضلی (DPB)<sup>۳</sup> ماهواره و گیرنده نامیده می‌شوند. بایاس‌های فاز تفاضلی وابسته به

شمار می‌رود، لذا طبیعی است که میزان تراکم الکترونها با تغییر زمان در روز، تغییر فصل و نیز با تغییر موقعیت جغرافیایی تغییر کند. تغییرات یونسفر در طول شبانه روز ناشی از دوران زمین است. در غیاب خورشید، سرعت بازترکیب افزایش یافته و در نتیجه غلظت الکترونی نیز کاهش می‌یابد. از این رو غلظت الکترون‌ها در شب کمتر از غلظت آن‌ها در روز خواهد بود. معمولاً حداکثر غلظت الکترونی در روز به حدود ۲ ساعت پس از ظهر به وقت محلی اختصاص دارد، زیرا دوران اتمسفر با تأخیری ۲ ساعته نسبت به دوران زمین صورت می‌گیرد [۱].

تغییرات زمانی یونسفر با دوره تناوب بالا بستگی به میزان فعالیت خورشیدی دارد. یک شاخص اساسی برای مشخص کردن میزان فعالیت خورشیدی تعداد لکه‌های خورشیدی<sup>۱</sup> بوده که افزایش دانسیته پلازما در یونسفر متناسب با این پارامتر است. لکه‌های خورشیدی مناطقی هستند که دمای آنها نسبت به اطرافشان کمتر بوده و لذا در سطح خورشید به صورت لکه‌های تاریک مشاهده می‌شوند [۴].

این لکه‌ها مناطق مغناطیسی با قدرت میدانی هزاران برابر قوی‌تر از میدان مغناطیسی زمین هستند و همبستگی بالایی بین تعداد آنها و فعالیت خورشیدی وجود دارد. فعالیت لکه‌های خورشیدی دارای یک پیوند طولانی ۱۱ ساله می‌باشد، لذا غلظت یونسفر نیز از یک دوره ۱۱ ساله تبعیت می‌کند. آخرین سیکل (سیکل شماره ۲۳) ماکزیمم تعداد لکه‌های خورشیدی مربوط به حداقل سالهای ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ بوده و انتظار می‌رود سیکل شماره ۲۴ در سالهای ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ اتفاق افتد. ماکزیمم اثر یونسفر بر روی سیگنال‌های GPS در این ایام اتفاق خواهد افتاد [۱].

## ۲-۳- معادلات مشاهدات

معادلات مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل در حالت غیر تفاضلی را می‌توان به ترتیب با استفاده از روابط ۳ و ۴ بیان کرد [۵].

$$P_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + I_i + b_{P_i} - B_{P_i} + d_{m/P_i} + \varepsilon(P_i) \quad (3)$$

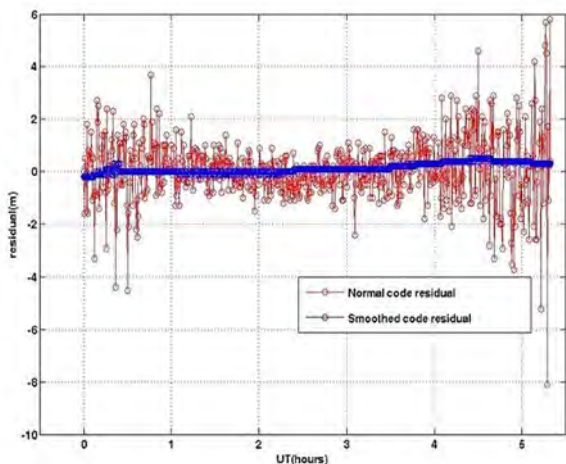
$$L_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - I_i + \lambda_i N_i + b_{L_i} - B_{L_i} + d_{m/L_i} + \varepsilon(L_i) \quad (4)$$

<sup>۲</sup> Differential Code Bias

<sup>۳</sup> Differential Phase Bias

<sup>۱</sup> Sun Spots

کد هموار شده در اپک t و فرکانس f بوده و  $\bar{P}_f$  و  $\bar{L}_f$  به ترتیب میانگین مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل در یک کمان پیوسته مشاهداتی هستند. شایان ذکر است که قبل از ورود به مرحله هموارسازی، در مراحل پیش-پردازش، مشاهدات اشتباه حذف و جهش فازها آشکار، و سرانجام کمانهای مشاهداتی پیوسته مشخص می شوند. یک کمان مشاهداتی پیوسته، مجموعه مشاهدات بدون قطعی و جهش فاز برای هر ماهواره است. مشاهدات کد هموار شده بر خلاف مشاهدات کد همبسته بوده و دارای سطح نویزی به میزان  $\sqrt{n}$  مرتبه (n تعداد اپکهای واقع در یک کمان) بهتر از سطح نویز مشاهدات کد بوده و در اینجا مشاهدات فاز در برابر مشاهدات کد، عاری از نویز فرض می شوند [۱۱]. در شکل ۱ نمونه ای از باقیمانده مشاهدات کد و مشاهدات کد هموار شده را مشاهده می نمائید. این باقیمانده ها حاصل از تعیین موقعیت مطلق ایستگاه تهران در روز ۱۷۳ از سال ۲۰۰۹ و مربوط به ماهواره شماره ۱۴ هستند. به سطح نویز در دو حالت توجه کنید.



شکل ۱- باقیمانده های غیر هموار (رنگ قرمز) و هموار شده (رنگ آبی) مشاهدات کد ماهواره ۱۴ حاصل از تعیین موقعیت مطلق ایستگاه TEHN

## ۲-۵- مدل سازی یونسفر با استفاده از داده های GPS

مدل های یونسفری بدست آمده از مشاهدات GPS، بیانگر بخش قابل تعیین یونسفر بوده و معمولاً بر اساس مدل تک لایه ای SLM<sup>۱</sup> می باشند، که در شکل ۲ نشان داده شده است. این مدل بر پایه این فرض بنا شده که تمامی الکترون های موجود در یونسفر بر روی لایه ای با ضخامت بسیار کم قرار دارند. تابع تصویر اصلاح شده مدل

زمان بوده اما مقدار آنها با در نظر گرفتن تغییراتشان متجاوز از چند سانتی متر نخواهد بود. و چون امکان تعیین آنها به صورت جدا از هم در داده ها امکان پذیر نیست با پذیرفتن خطایی در سطح سانتی متر آنها را در مدل نادیده می گیریم [۶ و ۷].

همچنین  $\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$  با یاس ثابت در واحد متر است که وابسته به ابهام فازهای اولیه  $N_1$  و  $N_2$  و طول موج های متناظر آنهاست. برای هر گیرنده و ماهواره حداقل یک پارامتر  $\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$  محاسبه می گردد.

## ۲-۴- هموار سازی مشاهدات کد

سطح نویز مقادیر TEC بر آورده شده توسط مشاهدات کد بسیار بالاست، لذا می توان از تکنیکهای هموار سازی برای رفع این مشکل استفاده نمود. دو روش معمول هموار سازی شامل:

۱. محاسبه مقادیر TEC با استفاده از مشاهدات شبه فاصله هموار شده با مشاهدات فاز موج حامل
۲. تعیین مقادیر TEC به صورت جداگانه، یکبار با مشاهدات شبه فاصله و سپس با مشاهدات فاز موج حامل و سپس هموار سازی با استفاده از یک الگوریتم، موجود است.

بر اساس تحقیقات انجام شده توسط [۸ و ۹]، تفاوت قابل ملاحظه ای بین نتایج دو روش بالا نیست. در ادامه به تشریح روش اول پرداخته می شود. در این روش از مشاهدات فاز موج حامل که معادله آن در رابطه ۴ آمده است، برای هموار سازی مشاهدات کد و کاهش سطح نویز استفاده می شود. مدل سازی یونسفر و تعیین مقدار TEC با استفاده از مشاهدات کد هموار شده به مراتب دارای دقت بیشتری خواهد بود. تکنیک هموار سازی مشاهده کد با استفاده از مشاهده فاز موج حامل در روابط ۹ و ۱۰ آورده شده است [۱۰].

$$\tilde{p}_1(t) = L_1(t) + \bar{p}_1 - \bar{L}_1 + 2 \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ((L_1(t) - \bar{L}_1) - (L_2(t) - \bar{L}_2)) \quad (9)$$

$$\tilde{p}_2(t) = L_2(t) + \bar{p}_2 - \bar{L}_2 + 2 \cdot \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} ((L_1(t) - \bar{L}_1) - (L_2(t) - \bar{L}_2)) \quad (10)$$

در روابط ۹ و ۱۰،  $P_f(t)$  مشاهده شبه فاصله کد،  $L_f(t)$  مشاهده شبه فاصله فاز موج حامل و  $\tilde{P}_f(t)$  مشاهده

<sup>۱</sup> Single Layer Model

( $L_4$ )، که شامل اطلاعات یونسفری هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند. با استفاده از رابطه ۱۱ می‌توان روابط ۷ و ۸ را به صورت روابط ۱۳ و ۱۴ بازنویسی کرد.

$$P_4 = +40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_1(z) E_V(\beta, s) + b_4 - B_4 \quad (13)$$

$$L_4 = -40.3 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_1(z) E_V(\beta, s) + \hat{B}_4 \quad (14)$$

در این روابط  $\hat{B}_4$  برابر با رابطه زیر است.

$$\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + b_{L_1-L_2} - B_{L_1-L_2} \quad (15)$$

رابطه مدلسازی TEC به صورت جهانی که برای کاربردهای منطقه‌ای نیز همین رابطه بکار می‌رود می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$E_V(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad (16)$$

در این رابطه  $n_{max}$  حداکثر درجه بسط هارمونیک کروی و  $\tilde{P}_{nm} = \Lambda(n, m) P_{nm}$  تابع لژاندر نرمال شده با درجه  $n$  و مرتبه  $m$  است که بر اساس تابع نرمالیزاسیون  $\Lambda(n, m)$  و توابع لژاندر  $P_{nm}$  تعریف می‌شود.  $a_{nm}, b_{nm}$  ضرایب مجهول هارمونیک‌های کروی هستند که ضرایب مدل یونسفری منطقه‌ای بوده و باید به شیوه کمترین مربعات تخمین زده شوند [۱۰ و ۱۱].

### ۳- نتایج

#### ۳-۱- تعیین مقادیر TEC

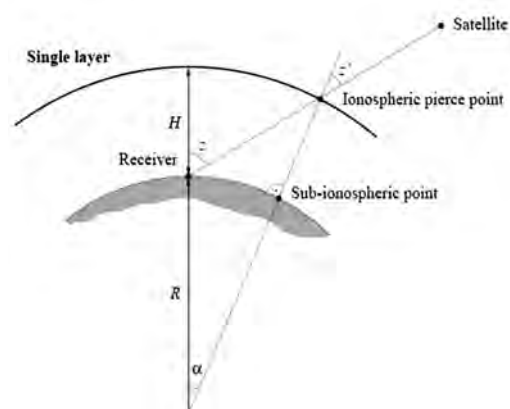
در این تحقیق، داده‌های جمع‌آوری شده توسط گیرنده‌های GPS دو فرکانس حدود ۴۰ ایستگاه شبکه سراسری ژئودینامیک ایران (IPGN) <sup>۲</sup> برای ۱۰ روز از سال ۲۰۱۲ و ۳ روز از سال ۲۰۱۳ مطابق با اول هر ماه از تقویم خورشیدی که روزهای اول هر فصل را نیز شامل می‌شوند، توسط نرم‌افزار برنیز پردازش شدند. در شکل ۳ پراکندگی شبکه سراسری ایستگاههای دائمی GPS ایران دیده می‌شود.

تک‌لایه‌ای برای تصویر کردن مقادیر TEC از راستای قائم به راستای مایل ( $F_1$ )، مطابق با رابطه ۱۱ تعریف می‌شود [۱۰].

$$F_1(z) = \frac{E}{E_V} = \frac{1}{\cos z} \quad (11)$$

$$\sin \hat{z} = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z)$$

در این روابط  $\hat{z}$  و  $z$  فواصل زینتی،  $R$  شعاع متوسط زمین و  $H$  ارتفاع لایه یونسفری،  $E$  همان TEC در راستای مایل و  $E_V$  نیز TEC در راستای قائم می‌باشند. [۱۰]



شکل ۲- مدل تک لایه‌ای (SLM) [۸]

با توجه به شکل ۲ مشهود است که زاویه ژئوسنتریک  $\alpha$  برابر با  $z - \hat{z}$  است. همچنین ارتفاع این لایه براساس ارتفاعی که انتظار می‌رود دارای بیشترین غلظت الکترونی باشد تعیین می‌گردد. غلظت الکترونی  $E$  (دانسیته سطحی لایه) تابعی از عرض جغرافیایی یا ژئومغناطیسی  $\beta$  و طول خورشید ثابت  $S$  فرض می‌شود [۱۰].

$$S = UT + \lambda - 12(\text{hour}) \quad (12)$$

در این رابطه  $UT$  عبارتست از زمان خورشیدی جهانی و  $\lambda$  طول جغرافیایی محل است.

برای تعیین نقاط حاصل از تقاطع امتداد گیرنده-ماهواره با لایه یونسفر  $IP_1$ ، می‌توان ارتفاع لایه را ۴۵۰ کیلومتر، مطابق با مدل‌های جهانی در نظر گرفت. به منظور تعیین مقادیر TEC، ترکیب‌های خطی مستقل از اثرات هندسی کد ( $P_4$ ) و مستقل از اثرات هندسی فاز موج‌حامل

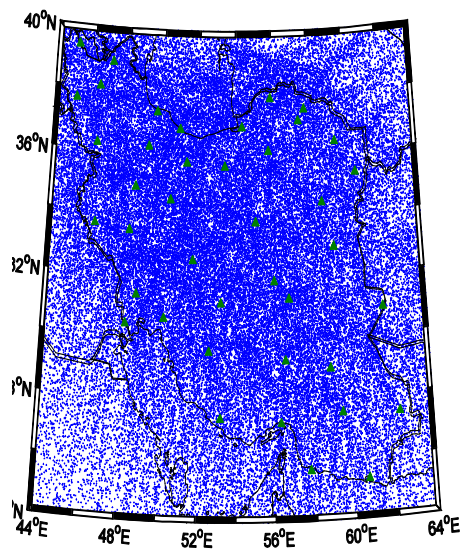
<sup>۲</sup> Iranian Permanent GPS Network

<sup>۱</sup> Ionospheric Pierce Point

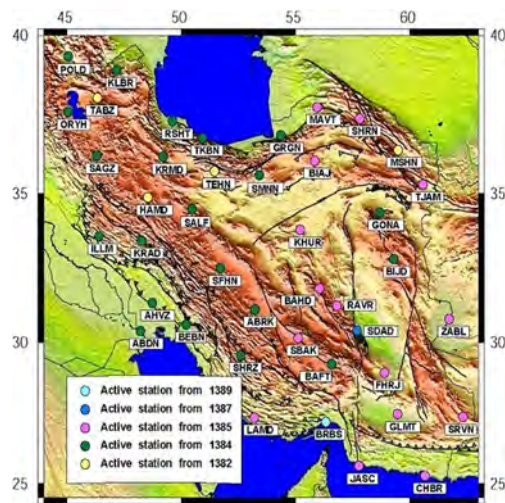
از ترکیب خطی  $L_3$  و فرکانس  $L_1$  به همراه اعمال مدل یونسفری حاصل می‌شود [۱۳ و ۳].

### ۲-۳- تغییرات مکانی TEC در ایران

همانطور که در بخش قبل بیان شد، در این تحقیق، مجموعه مشاهدات ایستگاههای دائمی GPS، هر ۲۴ ساعت یکبار برای تعیین ضرایب مدل یونسفر و تعیین مقادیر TEC مورد استفاده قرار می‌گیرند. شکل ۴ نمایانگر توزیع نمونه‌گیری از یونسفر توسط مشاهدات GPS در ایران است. این تصویر برای یک ۲۴ ساعت و نرخ نمونه‌گیری ۳۰۰ ثانیه است. همچنین شکل ۵، تغییرات TEC در طول و عرض جغرافیائی مختلف در محدوده ایران را نشان می‌دهد. این نقشه مربوط به ساعت حدود ۱۴ به وقت محلی، مطابق با ماکزیمم مقدار TEC، در روز ۸۰ از سال ۲۰۱۲ یعنی اول بهار در ایران است. همچنین در شکل ۶ می‌توانید نقشه مربوط به دقت تعیین مقادیر TEC را مشاهده کنید.



شکل ۴- نقشه توزیع نمونه‌گیری از یونسفر توسط مشاهدات GPS



شکل ۳- تراکم ایستگاه‌های شبکه سراسری ایران (IPGN)

این پردازش به ترتیب شامل مراحل زیر است:

۱. پیش‌پردازش داده‌ها به منظور آشکارسازی مشاهدات اشتباه، جهش‌ها و کمابهای پیوسته مشاهداتی
۲. هموارسازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل
۳. تعیین بایاس کد تفاضلی برای گیرنده‌ها و برآورد ضرایب مدل هارمونیک کروی
۴. تولید نقشه‌های یونسفری

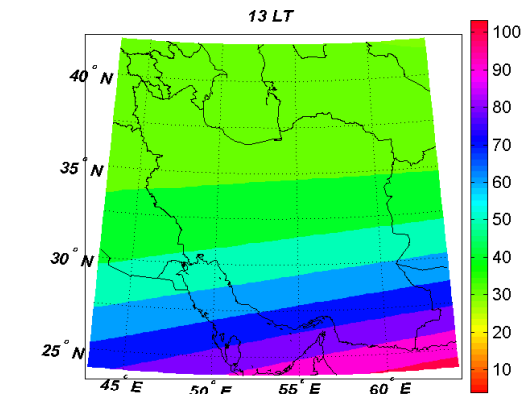
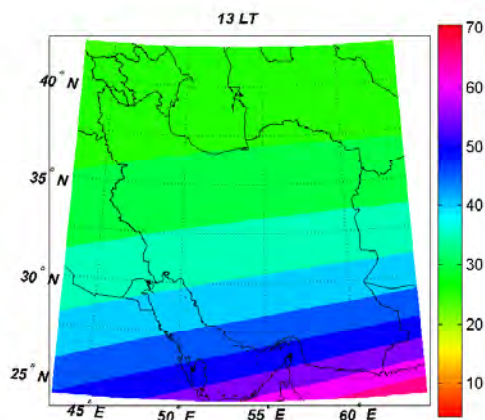
در مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر به این شیوه، ضرایب هارمونیک کروی به صورت روزانه و تا درجه و مرتبه ۶ به همراه مقادیر DCB گیرنده‌ها تعیین خواهند شد. به عبارت دیگر در مدل‌سازی منطقه‌ای یونسفر انتخاب درجه و مرتبه ۶ برای توابع هارمونیک کروی و تعیین ضرایب به صورت روزانه مناسب است [۱۱ و ۱۰].

لازم به ذکر است که در این پردازشها مقادیر DCB ماهواره‌ها معلوم در نظر گرفته می‌شوند. این مقادیر قابل دسترس از سایت مرکز تعیین مدار اروپا CODE<sup>۱</sup> می‌باشند. بدین طریق پارامترهای DCB ماهواره‌ها در دستگاه معادلات ریاضی دیگر مجهول نبوده و مقدار آنها در معادلات تصحیح می‌گردند [۷].

همچنین با انتخاب درجه و مرتبه ۶ برای مدل یونسفری ایران نسبت به درجات بالاتر، نتایج بهتری از مقایسه بین تعیین موقعیت نسبی در دو حالت استفاده

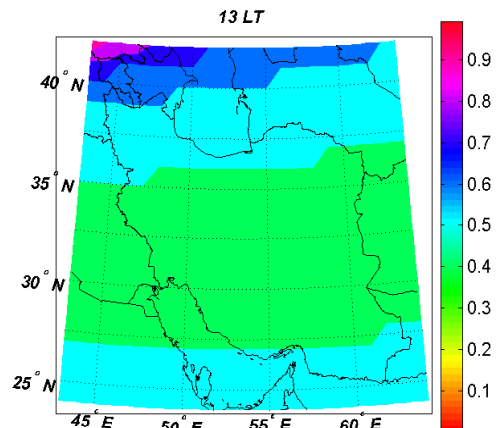
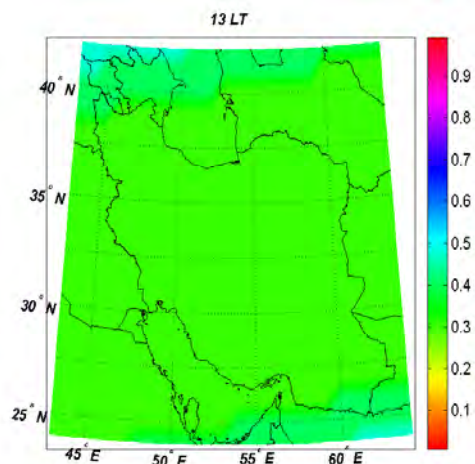
<sup>۱</sup> Center for Orbit Determination in Europe (CODE)

عرض جغرافیائی مقدار TEC کاهش یافته و کمترین مقدار آن مربوط به شمال شرقی ایران است.



شکل ۵- نقشه توزیع TEC در ایران مربوط به روز ۸۰ از سال ۲۰۱۲ مطابق با اول بهار در ایران (مقادیر TEC در واحد TECU هستند)

شکل ۷- نقشه توزیع TEC در ایران مربوط به روز ۸۱ از سال ۲۰۱۳ مطابق با اول بهار در ایران (مقادیر TEC در واحد TECU هستند)



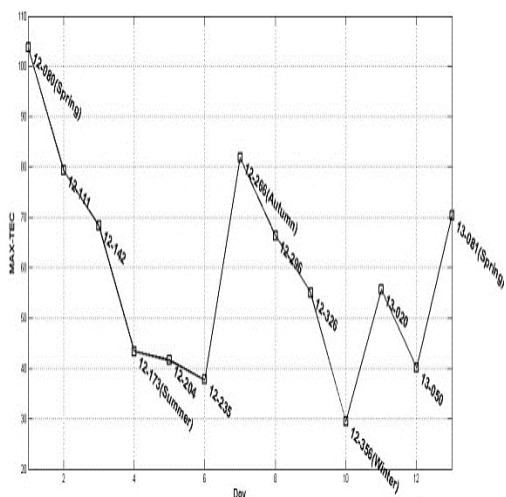
شکل ۶- نقشه توزیع دقت مقادیر TEC در ایران مربوط به روز ۸۰ از سال ۲۰۱۲ مطابق با اول بهار در ایران (مقادیر دقت در واحد TECU هستند)

شکل ۸- نقشه توزیع دقت مقادیر TEC در ایران مربوط به روز ۸۱ از سال ۲۰۱۳ مطابق با اول بهار در ایران (مقادیر دقت در واحد TECU هستند)

### ۳-۳- مقایسه تغییرات روزانه TEC در روزها و فصل‌های مختلف

در این تحقیق، نقطه با طول و عرض جغرافیائی به- ترتیب ۶۴ و ۲۴ درجه واقع در جنوب شرق ایران متناظر با بحرانی‌ترین نقطه از نظر تأثیر پذیری، به‌منظور نمایش تغییرات روزانه TEC انتخاب شدند. شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب نمایانگر این تغییرات هستند. در شکل ۱۱ مقادیر بیشینه TEC در هر روز به منظور مقایسه آورده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشهود است مقدار

مطابق شکل ۵، بیشینه مقدار TEC در ایران، در روز اول بهار در سال ۲۰۱۲ و حدود ساعت ۱۴ به وقت محلی، مربوط به جنوب شرقی ایران (نزدیکترین نقطه به استوای مغناطیسی) بوده و مقدار آن حدود ۱۰۰ TECU یعنی برابر با خطای ۷۵ متر، روی فاصله گیرنده تا ماهواره برای ماهواره نزدیک به افق و فرکانس دوم است. البته می‌توان گفت که تاریخ ذکر شده نزدیک به دوره تناوب بیشینه شدن فعالیت خورشیدی است. چرا که مقدار TEC در همین ساعت و در همین نقطه برای روز اول بهار در سال ۲۰۱۳ برابر با ۷۰ TECU می‌باشد. نقشه توزیع مکانی TEC در ایران و در این روز را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. همچنین در شکل ۵ و ۷ مشهود است که با افزایش



شکل ۱۱- تغییرات روزانه بیشینه مقدار TEC که حدوداً متناظر با ساعت ۱۴ به وقت محلی می‌باشد.

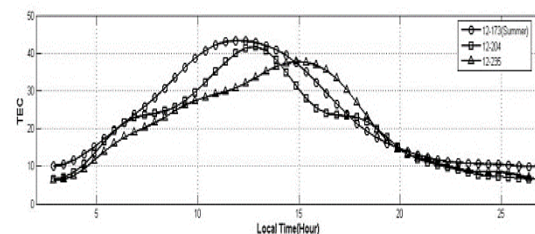
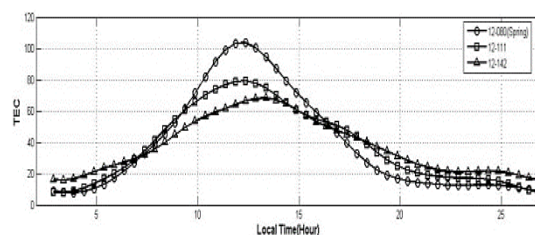
#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله برای برآورد مقادیر TEC از مشاهدات فاز موج حامل برای کاهش دادن میزان نویز مشاهدات شبه فاصله با استفاده از یک روش هموارسازی استفاده شد. سپس از مشاهدات شبه‌فاصله هموار شده به همراه مشاهدات فاز موج حامل برای تعیین ضرایب مدل یونسفر بر اساس توابع هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۶ و تعیین بایاس کد تفاضلی گیرنده‌ها استفاده شده و مقادیر TEC در سطح ایران برای ۱۰ روز از سال ۲۰۱۲ و ۳ روز از سال ۲۰۱۳ مطابق با اول هر ماه از تقویم شمسی تعیین شدند. در نهایت بر اساس نقشه TEC تولید شده تغییرات مکانی و براساس پروفیل‌های TEC در یک نقطه تغییرات زمانی TEC مورد مطالعه قرار گرفت. لازم به ذکر است که در این تحقیق مقدار TEC برابر با ۱۰۰ TECU در جنوب شرق ایران مشاهده شد که این مقدار TEC می‌تواند باعث بوجود آمدن خطایی معادل با ۷۵ متر روی فاصله گیرنده - ماهواره برای ماهواره نزدیک به افق و فرکانس دوم شود. همچنین مشاهده شد که مقدار TEC در فصل بهار دارای مقدار بیشینه و در زمستان دارای مقدار کمینه بوده و ماکزیمم مقدار TEC در طول روز حدوداً مربوط به ساعت ۱۴ به وقت محلی می‌باشد.

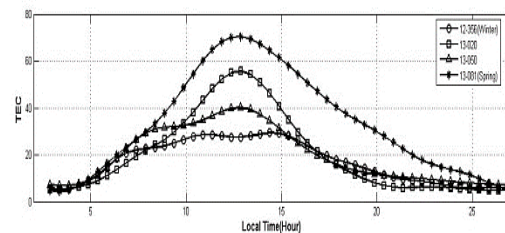
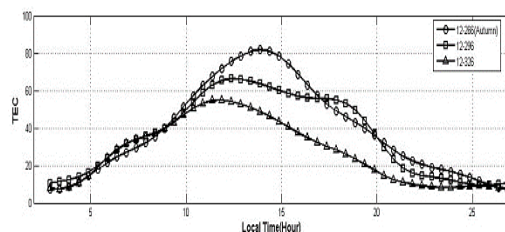
#### سپاسگزاری

بدینوسیله از مسئولین محترم سازمان نقشه‌برداری کشور و همکاران گرامی در مرکز محاسبات ژئودینامیک که شرایط انجام این تحقیق را برای نویسندگان فراهم آوردند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

بیشینه TEC برای نقطه جنوب شرق ایران مربوط به اول بهار، و مقدار کمینه آن مربوط به اول زمستان است. همین‌طور در این شکل ملاحظه می‌گردد که مقدار TEC در اول بهار سال بعد کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و این موضوع می‌تواند مبین نزدیک‌تر بودن اول بهار سال ۲۰۱۲ به مقدار بیشینه فعالیت خورشیدی اخیر باشد. همچنین در این شکل ملاحظه می‌شود که مقدار بیشینه TEC در طول روز بین ساعات ۱۲ تا ۱۴ به وقت محلی اتفاق می‌افتد.



شکل ۹- تغییرات ساعتی TEC در یک روز در روزها و فصلهای مختلف برای نقطه‌ای در جنوب شرق ایران



شکل ۱۰- تغییرات ساعتی TEC در یک روز در روزها و فصلهای مختلف برای نقطه‌ای در جنوب شرق ایران



- [1] Opperman BDL (2007), Reconstructing ionospheric TEC over south africa using signals from a regional GPS network, Rhodes University, Pierre Cilliers
- [2] Ouyang G, Wang J, Wang J and Cole D (2007). "Analysis on Temporal-Spatial Variations of Australian TEC." Proceedings of the 2007 IAG, 133, pp.751-758, Michael G.Sideris, Perugia, Italy
- [3] Dekkiche H, Kahlouche S, Kadri CB and Mir R (2007). "Ionospheric Modelling in the North of Algeria.", Proceedings of the 2007 IAG, 133, pp.679-689, Michael G.Sideris, Perugia, Italy
- [4] Alizadeh MM (2013), "Multi-Dimensional modeling of the ionospheric parameters, using space geodetic techniques", PhD thesis, Vienna University of Technology.
- [5] Gao Y and Liu ZZ (2002), "Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data.", Journal of Global Positioning Systems, 1, pp. 18-24
- [6] Jong CDD (1998), "A unified approach to real-time integrity monitoring of single- and dual-frequency gps and glonass observations.", Acta Geod. Geoph. Hung. 33, 247-257
- [7] Memarzadeh Y (2009), "Ionospheric Modeling for Precise GNSS Applications.", PhD thesis, Delft University of Technology.
- [8] Liu Z, Skone S, Gao Y, Komjathy A (2005a), "A study of smoothed TEC measurements.", Earth Planets Space, 57, 999-1007
- [9] Z. Liu, S. Skone, Y. Gao, A. Komjathy, (2005b), "Ionospheric modeling using GPS data.", GPS Solution, 9, 63-66
- [10] Beutler G, Bock H, Dach R, Fridez P, Gade A, Hugentobler U, Jaggi A, Meindl M, Mervart L, Prange L, Schaer S, Springer T, Urschl C, Walser P (2007), "Manual Bernese GPS Software Version 5.0.", University of Bern, Astronomical Institute
- [11] Schaer S (1999), "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using The GPS.", University of Bern, Astronomical Institute
- [12] Le AQ, Tiberius CCJM, van der Marel H and Jakowski N (2007), "Use of Global and Regional Ionosphere Maps for Single-Frequency Precise Point Positioning.", Proceedings of the 2007 IAG, 133, pp.759-769, Michael G.Sideris, Perugia, Italy

[۱۳] عبدی ن، توکلی ف، نانکلی ح ر، "مدلسازی منطقه‌ای یونسفر در ایران با استفاده از داده‌های IPGN." بیستمین همایش و نمایشگاه ژئوماتیک ۹۲، هادی واعظی، اشرف السادات قریشی، سازمان نقشه‌برداری کشور، اردیبهشت ۱۳۹۲