

ارزیابی مدل یونسفر ایران بر مبنای پردازش مشاهدات GPS

ناصر عبدی^{۱*}، علیرضا آزموده اردلان^۲، روح الله کریمی^۳

^۱ دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
naser.abdi@ut.ac.ir

^۲ استاد دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران
a.a.ardan@ut.ac.ir

^۳ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران و نقشه‌برداری - دانشگاه تفرش
rkarimy@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۴، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۴)

چکیده

دانستن چگونگی رفتار یونسفر یک فاکتور مهم در تعیین موقعیت با GPS است. در این مقاله مشاهدات ۴۳ ایستگاه دائمی شبکه ژئودینامیک سراسری ایران (IPGN) به همراه مشاهدات حدود ۱۸۰ ایستگاه IGS توسط نرم افزار برنیز پردازش شدند و برای تولید کردن مدل‌های یونسفری که نمایشگر میزان محتوای مجموع الکترونی (TEC) هستند، از بسط به هارمونیک‌های کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ استفاده شد. در این مدل‌سازی فرض بر آن است که تمامی الکترونی‌های آزاد بر روی یک لایه کروی نازک که ارتفاع آن می‌تواند از ۲۵۰ تا ۴۵۰ کیلومتر متغیر باشد، واقع شده‌اند. نتایج برای ارتفاع ۴۵۰ کیلومتر با رزولوشن زمانی دو ساعته مطابق با استانداردهای IGS حاصل شده و مقادیر ماکزیمم TEC در جنوب ایران از حدود ۵ TECU (نیمه شب) تا ۲۲ TECU (نیمه روز) می‌باشند. این مقادیر برای روز ۲۲ ماه جون از سال ۲۰۰۹ است. سپس مقادیر TEC محاسبه شده برای تصحیح کردن داده‌های تک فرکانس در دو شیوه تعیین موقعیت مطلق و نسبی بکار گرفته شدند. در شیوه مطلق بهبود قابل توجهی در هر دو مولفه مسطحاتی و ارتفاعی در صورت استفاده از مدل IRIM نسبت به مدل IGS حاصل می‌شود. همچنین در شیوه نسبی، مقایسه بین راه حل‌های L_1 و عاری از اثر یونسفر (L_3) نشان می‌دهد که اثر یونسفر شبکه را دچار انقباض می‌کند. همچنین نتایج راه حل L_1 تصحیح شده با استفاده از مدل بهبود یافته در سطح ایران (IRIM) نسبت به استفاده از مدل جهانی IGS به نتایج راه حل L_3 نزدیکتر است و میزان این انحراف در مولفه مختصاتی افقی برای طول مبنای چند صد کیلومتری به طور متوسط بهتر از ۱۰ سانتی متر است.

واژگان کلیدی: تعیین موقعیت، نقشه‌های یونسفر، هارمونیک‌های کروی، GPS، IPGN، TEC، DCB

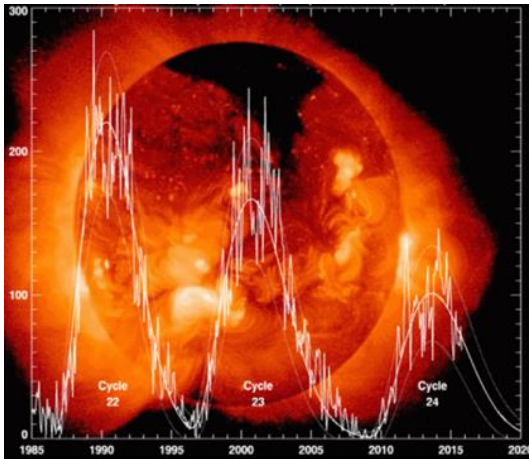
* نویسنده رابط

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 از الکترون‌های آزاد و یون‌هایی که در طی فعل و انفعالات ناشی از فرآیند یونیزاسیون تولید شده‌اند، تشکیل شده است. یونیزاسیون در مناطق مختلف موجب تفاوت غلظت تراکم الکترونی در لایه‌های مختلف یونسفر می‌شود. این لایه‌ها مناطق D، E و F نامیده می‌شوند [۱].

خورشید منبع اصلی یونیزاسیون برای یونسفر به‌شمار می‌رود، لذا طبیعی است که یونسفر 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 ۲ ساعت پس از ظهر اختصاص دارد، زیرا دوران اتمسفر با تأخیری ۲ ساعته نسبت به دوران زمین صورت می‌گیرد [۱].

افزایش دانسیته پلازما در یونسفر متناسب با تعداد لکه‌های خورشیدی است. فعالیت لکه‌های خورشیدی دارای یک پریود طولانی ۱۱ ساله می‌باشد، لذا غلظت یونسفر نیز از یک دوره ۱۱ ساله تبعیت می‌کند. یکی از شاخص‌های تعیین میزان فعالیت خورشیدی، شار عبوری یک موج رادیویی با طول موج ۱۰/۷ سانتی‌متری و فرکانس ۲/۸ گیگاهرتز (F10.7) است. این شار از سال ۱۹۴۷ به صورت روزانه اندازه‌گیری شده و در مدل‌های مختلف بررسی دانسیته اتمسفر بالا، یونسفر و اصطکاک ماهواره‌ها به عنوان ورودی استفاده می‌شود. همچنین از این شاخص برای تعیین تعداد لکه‌های خورشیدی استفاده شده که نتایج آن بسیار نزدیک و مشابه با تکنیک‌های دیگر است. در شکل ۱ می‌توانید وضعیت دو سیکل پایانی تعداد لکه‌های خورشیدی حاصل از این شاخص را مشاهده نمایید [۲].



شکل ۱- پیش‌بینی تعداد لکه‌های خورشیدی مربوط به سیکل‌های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ [۲]

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، در سیکل شماره ۲۳ بیشینه تعداد لکه‌های خورشیدی مربوط به حداصل سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ بوده و همچنین پیش‌بینی فعلی برای سیکل ۲۴ تعداد بیشینه حدودی ۱۰۱ را برای اواخر سال ۲۰۱۳ مطابق با نمودار هموار شده نشان می‌دهد. البته یک مقدار بیشینه ۱۱۶٫۴ در آوریل ۲۰۱۴ مشاهده شده که احتمالاً همین مقدار به عنوان مقدار بیشینه رسمی انتخاب می‌گردد. ماکزیمم اثر یونسفر بر روی سیگنال‌های GNSS^۱ در این ایام اتفاق خواهد افتاد [۲].

همانطور که یونسفر می‌تواند اثر گذار روی امواج GNSS باشد، با توجه به تراکم و تعداد ایستگاه‌های دائمی GNSS در سراسر کره زمین، مشاهدات GNSS نیز می‌توانند سنسوری دقیق برای مطالعه یونسفر به حساب آیند. مدل‌های یونسفری که بدین طریق برآورد می‌شوند، می‌توانند در موارد زیر مورد استفاده قرار گیرند:

تعیین موقعیت نقطه‌ای دقیق

پیش پردازشها به منظور کشف مشاهدات اشتباه و جهش‌های فازی

رفع ابهام فاز به منظور در نظر گرفتن قیدی برای یونسفر تصویر کردن یونسفر و مطالعه یونسفر
البته موارد ۱ و ۲ در صورتی است که قصد استفاده از داده L3 (موج عاری از اثر یونسفر) را نداشته باشیم [۳].

در این راستا گروه کاری یونسفر در سرویس بین‌المللی GNSS (IGS)^۲ به طور رسمی فعالیت خود مبنی بر تولید مدل‌های ترکیبی محتوای مجموع الکترونی در راستای قائم

^۱ Global Navigation Satellite Systems

^۲ International GNSS Service

بهبود مدل یونسفر بین المللی (IRI)^۹ که یک مدل تجربی و فیزیک پایه است انجام گردید [۶، ۷ و ۸].
در این مقاله سعی بر آن است تا با استفاده از داده‌های IPGN یونسفر را به صورت دقیق‌تر در ایران مدل‌سازی کنیم و سپس کارایی این مدل را در پردازش مشاهدات تک فرکانس مورد بررسی قرار دهیم.

۲- انتشار امواج در یونسفر

یونسفر برای سیگنال‌های رادیویی یک محیط پخش به حساب می‌آید. به عبارت دیگر اثر یونسفر بر روی امواج بستگی به فرکانس آنها و همچنین تعداد الکترونهای واقع در مسیر سیگنال از گیرنده تا ماهواره (TEC) دارد. اثر یونسفر بر روی مشاهدات کد و فاز GNSS با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌گردد [۹].

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

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

محتوای مجموع الکترونی (TEC) از نظر عددی مقدار بزرگی است، بنابراین از واحد TECU برای بیان آن استفاده می‌شود که هر TECU معادل 1.0×10^{16} الکترون بر مترمربع است. همچنین f نمایانگر فرکانس سیگنال است.

۳- معادلات مشاهدات

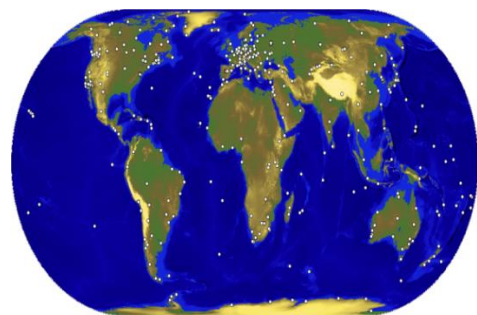
معادلات مشاهدات شبه فاصله (کد) و فاز موج حامل مربوط به یک گیرنده و یک ماهواره را می‌توان مطابق با روابط ۳ و ۴ بیان کرد [۷].

معادلات مشاهدات مربوط به موج L_1 :

$$P_1 = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + I_1 + b_1 + B_1 + d_{m/P_1} + \varepsilon(P_1) \quad (3)$$

$$L1 = \lambda_1 \Phi_1 = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - I_1 + \lambda_1 N_1 + b_{\Phi_1} - B_{\Phi_1} + d_{m/\Phi_1} + \varepsilon(\Phi_1) \quad (4)$$

(VTEC)^۱ را در ماه جون سال ۱۹۹۸ آغاز کرد. این فعالیت تا کنون به طور مستمر توسط چهار مرکز، یعنی مرکز تعیین مدار اروپا (CODE)^۲ مستقر در انستیتو نجوم دانشگاه برن سوئیس، مرکز فعالیتهای فضایی اروپا به عنوان بخشی از ESA (ESOC)^۳ مستقر در آلمان، لابرآتوار پیشرانس JET (JPL)^۴ مستقر در کالیفرنیا آمریکا و دانشگاه فنی کاتالونیا (UPC)^۵ مستقر در بارسلون اسپانیا انجام شده است. هر مرکز به طور مستقل و با شیوه‌ای متفاوت اما قالب خروجی یکسان اقدام به تولید مدل‌های یونسفری از نوع محصولات سریع و نهایی می‌کنند و منحصرًا CODE از مشاهدات GLONASS^۶ نیز استفاده می‌نماید. در نهایت مدل نهایی یونسفر که توسط IGS منتشر می‌شود یک میانگین وزن‌دار از مدل‌های فوق است [۴]. در شکل ۲ می‌توانید نمایی از پراکندگی ایستگاههای دائمی IGS را مشاهده کنید. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در ایران فقط از مشاهدات یک ایستگاه استفاده می‌شود. لذا این موضوع خود دلیلی خواهد بود بر تولید مدلی با استفاده از مشاهدات شبکه IPGN^۷ برای برطرف کردن کمبود تعداد ایستگاه در سطح ایران.



شکل ۲- پراکندگی ایستگاههای شبکه جهانی IGS [۵]

از سوابق مدل‌سازی یونسفر در ایران می‌توان به مدل‌سازی منطقه‌ای توزیع چگالی الکترونی در لایه یونسفر با استفاده از آنالیز موجک و مشاهدات GPS^۸ اشاره نمود که در سال ۲۰۱۳ در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد. در این رساله مدل‌سازی یونسفر به صورت تک لایه و چند لایه و با استفاده از مشاهدات IPGN و بر حسب توابع پایه بی-اسپلاین، جهت

^۱ Vertical Total Electron Content

^۲ Center for Orbit Determination in Europe

^۳ European Space Operations Center of ESA

^۴ Jet Propulsion Laboratory

^۵ Technical University of Catalonia

^۶ GLObal NAVigation Satellite System

^۷ Iranian Permanent GNSS Network

^۸ Global Positioning System

^۹ International Reference Ionosphere

معادلات مشاهدات مربوط به موج L_2 :

$$P_2 = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + \gamma I_1 + b_2 + B_2 + d_{m/P_2} + \varepsilon(P_2) \quad (5)$$

$$L_2 = \lambda_2 \Phi_2 = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - \gamma I_2 + \lambda_2 N_2 + b_{\Phi_2} - B_{\Phi_2} + d_{m/\Phi_2} + \varepsilon(\Phi_2) \quad (6)$$

که در این روابط:

P_1, P_2 : مشاهدات شبه فاصله مربوط به امواج L_1 و L_2
 Φ_1, Φ_2 : مشاهدات فاز موج حامل مربوط به L_1 و L_2 در واحد سیکل

ρ : فاصله هندسی بین گیرنده و ماهواره

c : سرعت نور در خلأ

dt : خطای ساعت ماهواره نسبت به زمان GPS

dT : خطای ساعت گیرنده نسبت به زمان GPS

d_{orb} : خطای اطلاعات مداری ماهواره

d_{trop} : تأخیر تروپوسفری

I_1 : تأخیر یونسفری برای فرکانس L_1

λ : طول موج است، که عبارتند از:

$$\lambda_2 = c/f_2 \approx 0.24m, \lambda_1 = c/f_1 \approx 0.19m$$

N : ابهام فاز موج حامل

γ : مجذور نسبت فرکانس‌های L_1 و L_2

$$\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 = \left(\frac{1575.42}{1227.6}\right)^2 = \left(\frac{77}{60}\right)^2$$

b : تأخیر سخت‌افزاری ماهواره

B : تأخیر سخت‌افزاری گیرنده

d_m : تأثیر خطای چندمسیری

$\varepsilon()$: نویز اندازه‌گیری خواهند بود

همچنین ترکیبات خطی با روابط زیر:

$$P_4 = P_1 - P_2 \quad (7)$$

$$L_4 = L_1 - L_2 \quad (8)$$

مستقل از اثرات ساعتهای ماهواره و گیرنده و همچنین اثرات هندسی (مداری، مختصاتهای ایستگاهی) می‌باشند. این ترکیبات خطی دارای ترم تأخیر یونسفری و ابهام در فاز بوده و می‌توانند برای تخمین مدلهای یونسفری مورد استفاده قرار گیرند [۹].

با استفاده از روابط ۳ تا ۶ داریم:

$$P_4 = P_1 - P_2 = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} I_1 + b_{P_1-P_2} + B_{P_1-P_2} + \varepsilon(P_1 - P_2) \quad (9)$$

$$P_4 = a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) \cdot \text{TEC} + b_{P_4} + B_{P_4} + \varepsilon_{P_4} \quad (10)$$

در این روابط $a = 4.03 \times 10^{17} \text{ms}^{-2} \text{TECU}^{-1}$ می‌باشد. b_{P_4}, B_{P_4} بیانگر بایاس سخت‌افزاری مربوط به فرکانسهای L_1 و L_2 بوده و اغلب به عنوان بایاس بین فرکانسهای L_1/L_2 و یا بایاس کد تفاضلی (DCB) به ترتیب 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 به عنوان مقادیر ثابت در نظر گرفت. مقدار این بایاسها در ارتباط با ماهواره‌ها در حدود چندین نانوثانیه بوده و این در صورتی است که مقدار آنها در مورد گیرنده‌ها می‌تواند به بیشتر از ۱۰ نانوثانیه نیز برسد [۹].

۴- هموارسازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز

سطح نویز اندازه‌گیریهای یونسفر توسط مشاهدات کد بسیار بالاست. لذا می‌توان از مشاهدات فاز که معادلات مربوط به آنها در روابط ۴ و ۶ آمده است، برای هموارسازی مشاهدات کد و کاهش سطح نویز استفاده نمود. اندازه‌گیری یونسفر با استفاده از مشاهدات کد هموار شده به مراتب دارای دقت بیشتری خواهد بود. روابط ۱۱ و ۱۲ مربوط به تکنیک هموارسازی می‌باشند.

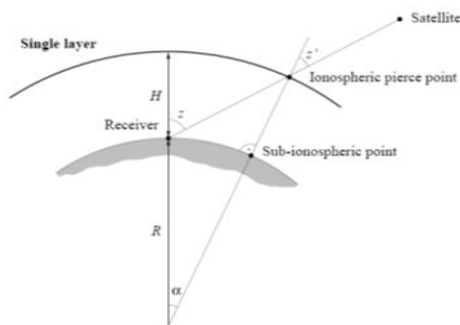
$$\begin{aligned} \bar{p}_1(t) = & L_1(t) + \bar{p}_1 - \bar{L}_1 \\ & + 2 \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} ((L_1(t) - \bar{L}_1) \\ & - (L_2(t) - \bar{L}_2)) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{p}_2(t) = & L_2(t) + \bar{p}_2 - \bar{L}_2 \\ & + 2 \cdot \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} ((L_1(t) - \bar{L}_1) \\ & - (L_2(t) - \bar{L}_2)) \end{aligned} \quad (12)$$

$$F_1(z) = \frac{E}{E_V} = \frac{1}{\cos \hat{z}} \quad (13)$$

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

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



شکل ۴- مدل تک لایه‌ای (SLM) [۳]

با توجه به شکل ۴ مشهود است که زاویه ژئوسنتریک α 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 (دانشیته سطحی لایه) تابعی از عرض جغرافیایی یا ژئومغناطیسی β و طول خورشید ثابت S فرض می‌شود. تابع تصویر SLM اصلاح شده شامل یک ثابت اضافی α نیز است [۳].

$$\sin \hat{z} = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z) \quad (14)$$

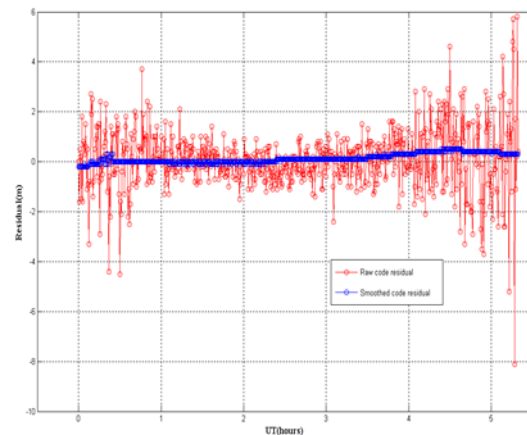
برای محاسبه نقاط محل تقاطع امتداد گیرنده- ماهواره با لایه یونسفر (IPP)^۲، می‌توان ارتفاع لایه را ۴۵۰ کیلومتر مطابق با مدل‌های جهانی فرض کرد. به منظور تهیه نقشه TEC، ترکیب خطی مستقل از هندسه که شامل اطلاعات یونسفری است، مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. معادلات مشاهدات غیر تفاضلی برای مشاهدات کد و فاز برای این ترکیب به شکل زیر نوشته می‌شوند:

$$L_4 = L1 - L2 = -a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_1(z) E_V(\beta, s) + B_4 \quad (15)$$

^۲ Ionospheric Pierse Point

در روابط ۱۱ و ۱۲، $\hat{p}_f(t)$ اندازه گیری کد هموار شده در اپک t و فرکانس f بوده و $L_f(t)$ اندازه گیری فاز موج حامل در اپک t و فرکانس f است. همچنین $\bar{p}_f - \bar{L}_f$ اختلاف متوسط بین تمامی کدهای پذیرفته شده و اندازه-گیریهای فاز موج حامل در کمان مشاهداتی جاری و فرکانس f است. باید توجه نمود که قبل از وارد شدن به مرحله هموارسازی طی یک فرآیند پالایش، مشاهدات کد و فاز، عاری از اشتباه شده و جهش‌های فازی نیز به منظور محاسبه کماتها کشف می‌شوند [۳].

در شکل ۳ نمونه‌ای از باقیمانده مشاهدات کد غیرهموار و مشاهدات کد هموار شده را مشاهده می‌نمائید. این باقیمانده‌ها حاصل از تعیین موقعیت مطلق ایستگاه تهران در روز ۱۷۳ سال ۲۰۰۹ و مربوط به ماهواره شماره ۱۴ هستند. به سطح نویز در دو حالت توجه کنید.



شکل ۳- باقیمانده‌های غیرهموار و هموار شده مشاهدات کد ماهواره ۱۴ حاصل از تعیین موقعیت مطلق ایستگاه TEHN

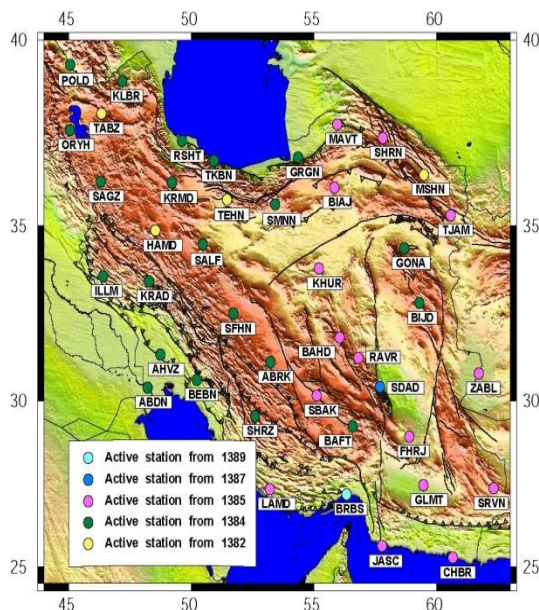
۵- مدل سازی منطقه‌ای یونسفر با استفاده از داده‌های GPS

مدل‌های یونسفری بدست آمده از مشاهدات GNSS، بیانگر بخش قابل تعیین یونسفر بوده و معمولاً بر اساس مدل تک‌لایه‌ای (SLM)^۱ می‌باشند که بطور اجمالی در شکل ۲ نشان داده شده است. این مدل بر پایه این فرض بنا شده است که تمامی الکترون‌های موجود در یونسفر بر روی لایه‌ای با ضخامت بسیار کم قرار دارند. تابع تصویر مدل تک‌لایه‌ای (FI)، به شکل زیر تعریف می‌شود [۳].

^۱ Single Layer Model

۶- بهبود مدل جهانی یونسفر در سطح ایران

به منظور بهبود مدل جهانی یونسفر در سطح ایران با دقتی بهتر، داده‌های جمع‌آوری شده توسط گیرنده‌های دو فرکانس ۴۳ ایستگاه (شکل ۵) شبکه سراسری ژئودینامیک ایران (IPGN) به همراه نزدیک به ۱۸۰ ایستگاه دائمی IGS در روز ۱۷۳ از سال ۲۰۰۹ توسط نرم‌افزار برنیز آنالیز و پردازش شدند.



شکل ۵- تراکم ایستگاه‌های شبکه سراسری IPGN [۱۱]

این پردازش به ترتیب شامل مراحل زیر است:

- ۱) هموارسازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل
- ۲) تعیین بایاس‌های کد تفاضلی (DCB) برای گیرنده‌ها
- ۳) برآورد ضرایب مدل هارمونیک کروی
- ۴) تولید نقشه‌های یونسفری

لازم به ذکر است که قبل از هموارسازی مشاهدات کد، مشاهدات به منظور کشف جهش‌های فازی و مشاهدات اشتباه، مورد پیش‌پردازش و پالایش قرار می‌گیرند. در مدل‌سازی یونسفر به این شیوه، مطابق با استانداردهای IGS مقادیر برآورد شده TEC هر دو ساعت یکبار توسط توابع هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ بسط داده می‌شوند. به عبارت دیگر ضرایب هارمونیک کروی هر دو ساعت یکبار تعیین خواهند شد. اما به دلیل استفاده از داده‌های مترکم در منطقه ایران انتظار می‌رود که دقت این ضرایب در ایران بهتر بوده و نتایج بهتری را حاصل کند که خوشبختانه در

$$P_4 = P_1 - P_2 = a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_1(z) E_V(\beta, s) + b_4 - B_4 \quad (16)$$

P_4 و L_4 به ترتیب مشاهدات فاز و کد مستقل از هندسه (برحسب متر)، $F_1(z)$ تابع تصویر و $E_V(\beta, s)$ همان TEC قائم (برحسب TECU) به عنوان تابعی از عرض جغرافیایی یا ژئومغناطیسی β و طول خورشید ثابت S هستند. همچنین وابسته به ابهام فازهای اولیه B_1 و B_2 و طول موج‌های متناظر آنهاست. برای هر گیرنده و ماهواره حداقل یک پارامتر B_4 محاسبه می‌شود. و در نهایت b_4, B_4 بایاس تفاضلی کدها به ترتیب برای گیرنده و ماهواره هستند [۳].
رابطه مدل‌سازی TEC به صورت جهانی که برای کاربردهای منطقه‌ای نیز همین رابطه بکار می‌رود می‌تواند به صورت زیر نوشته شود.

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin \beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad (17)$$

در این رابطه حداکثر درجه بسط هارمونیک کروی و n_{max} تابع لژاندر نرمالایز 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 هارمونیک-های کروی هستند که پارامترهای مدل یونسفری منطقه‌ای بوده و باید به شیوه کمترین مربعات تخمین زده شوند [۱۰].
رابطه ۱۸ مربوط به تابع نرمالیزاسیون $\Lambda(n, m)$ می‌باشد.

$$\Lambda(n, m) = \sqrt{2 \frac{2n+1}{1+\delta_{0m}} \frac{(n-m)!}{(n+m)!}} \quad (18)$$

$\Lambda(0,0) = 1$

در رابطه ۱۸ منظور از δ_{0m} همان دلتای کرونیکر است. همچنین طول جغرافیایی خورشید ثابت s نیز با استفاده از رابطه ۱۹ تعیین می‌شود.

$$s = t + \lambda - \pi \quad (19)$$

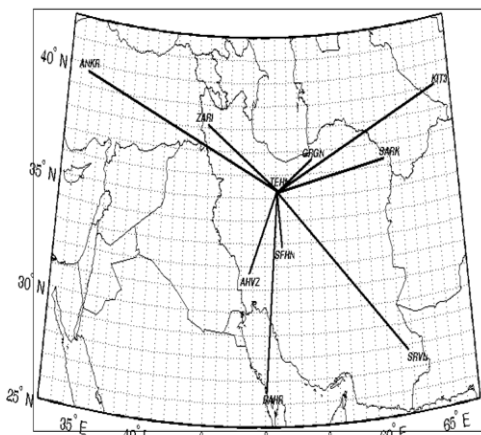
در این رابطه t بیانگر اپک مشاهداتی می‌باشد.

۷- ارزیابی مدل IRIM و ارائه نتایج

در تعیین موقعیت با GPS به طور معمول برای حذف اثر یونسفر، در روش تعیین موقعیت نسبی در طول مبنای بلند و در روش تعیین موقعیت مطلق به طور کلی، از ترکیب خطی عاری از اثر یونسفر (L_3) استفاده می‌گردد. برای تشکیل دادن این ترکیب، دسترسی به داده‌های دو فرکانس ضروری خواهد بود. اما زمانی که فقط مشاهدات تک فرکانس در دسترس باشند، استفاده از تصحیحات یونسفری که از طریق مشاهدات دو فرکانس یک شبکه حاصل شده‌اند سودمند خواهد بود [۳].

برای ارزیابی مدل IRIM، شبکه‌ای را متشکل از ۱۰ ایستگاه GPS مطابق با شکل ۷، به منظور مطالعه و آنالیز اثر یونسفر روی راه‌حلهای داده تک فرکانس GPS استفاده می‌کنیم. در این آزمایش مشاهدات L_1 یکبار به تنهایی و بار دیگر با اعمال تصحیحات یونسفری پردازش شده و سپس با نتایج راه‌حل L_3 که به عنوان راه حل مرجع در نظر گرفته می‌شوند، مقایسه می‌گردند [۱۲].

این پردازش در دو حالت مطلق و نسبی انجام شده و طول مبنای پردازش شده از ۳۰۰ تا ۱۷۰۰ کیلومتر متغیر هستند.



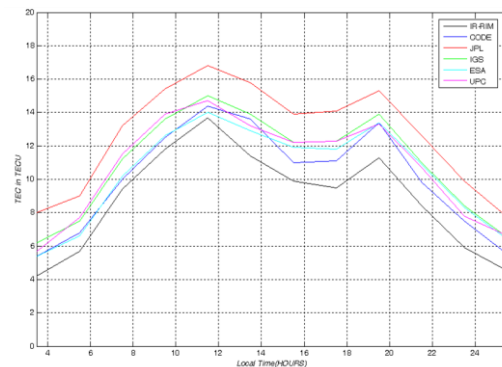
شکل ۷- طول مبنای انتخاب شده برای ارزیابی مدل یونسفری IRIM

در این آزمایش، تصحیحات یونسفری مربوط به مدل CODE و IRIM بوده که به ترتیب مدل‌های جهانی و منطقه‌ای به حساب می‌آیند و برای تصحیح کردن اثر یونسفر روی مولفه‌های مختصاتی و طول مبنای و مقایسه کردن آنها بکار برده می‌شوند.

شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۱ مربوط به شیوه تعیین موقعیت مطلق بوده و نشان می‌دهند که بکار نبردن مدل

قسمت ارزیابی مدل یونسفر IRIM همانطور که در بخش بعدی خواهید دید، این انتظار برآورده شد.

در ادامه، مدل یونسفر ایران (IRIM)^۱ را با دیگر مدل‌های یونسفری که در چهار مرکز مختلف IGS یعنی CODE، JPL، UPC، ESOC تولید می‌شوند مقایسه می‌کنیم. برای مقایسه این مدل‌ها میزان TEC را در روز ۱۷۳ از سال ۲۰۰۹ در ایستگاه تهران (TEHN) با استفاده از ضرایب هر مدل محاسبه می‌کنیم. که نتیجه این محاسبات در شکل ۶ آمده است. تمامی مدل‌های یونسفری مربوط به این چهار مرکز، با اینکه از شیوه‌های متفاوتی در مدلسازی یونسفر استفاده می‌کنند، اما همگی نقشه‌های یونسفری را در بازه‌های زمانی ۲ ساعته و با نرخ ۵ درجه در طول جغرافیائی و ۲/۵ درجه در عرض جغرافیائی منتشر می‌کنند.



شکل ۶- مقادیر بدست آمده TEC در ایستگاه TEHN از مدل IRIM و مدل‌های یونسفری (روز ۱۷۳ از سال ۲۰۰۹)

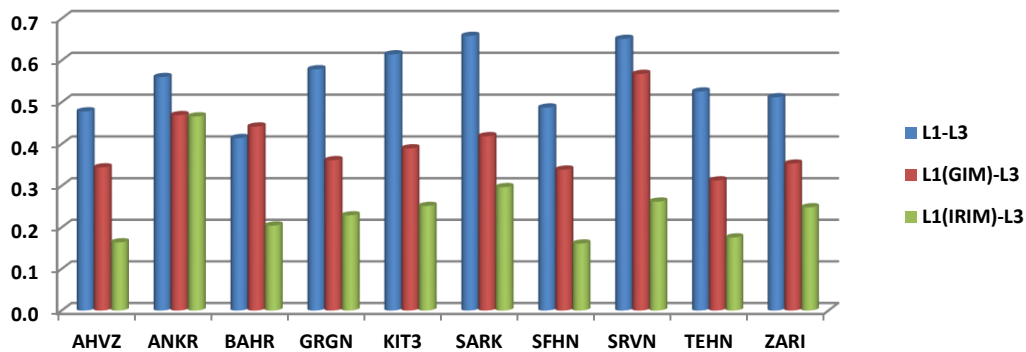
همانطور که از شکل ۶ نیز بر می‌آید اختلاف بین مدل IRIM و دیگر مدل‌ها کمتر از ۶ TECU بوده و همچنین میزان اختلاف با مدل CODE از همه کمتر است. دلیل این موضوع را می‌توان اینطور بیان نمود که شیوه مدلسازی IRIM مشابه با شیوه مدلسازی CODE بوده و اختلاف دو مدل ناشی از آن است که مدل CODE از داده‌های هیچ ایستگاهی در ایران استفاده ننموده است. در مدل IRIM همانند مدل CODE ارتفاع لایه یونسفری را ۴۵۰ کیلومتر در نظر می‌گیریم و مدلسازی را انجام می‌دهیم. در راستای مدلسازی یونسفر با استفاده از هارمونیک‌های کروی، مقادیر بایاس تفاضلی کدها (DCB) را نیز باید برای ماهواره‌ها و گیرنده‌ها برآورد نمود. البته می‌توان مقادیر DCB ماهواره‌ها را از سایت CODE دانلود کرده و در پردازش استفاده کرد. ولی DCB گیرنده‌ها را باید در حین مدلسازی برآورد کنیم.

^۱ Iran Ionosphere Model

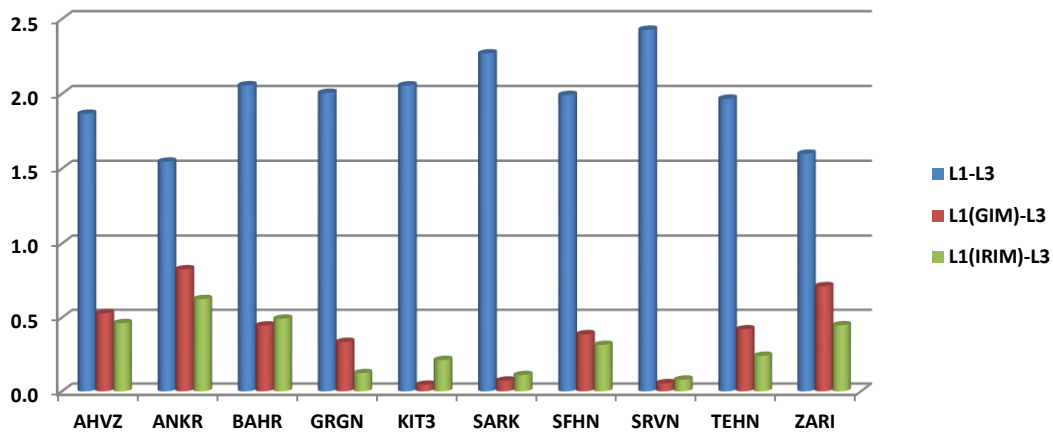
در صورت استفاده از مدل یونسفری بهبود یافته در سطح ایران (IRIM) این مقادیر به ترتیب عبارت خواهند بود از ۱۶ تا ۴۷ سانتی‌متر در حالت مسطحی و ۸ تا ۶۳ سانتی‌متر در حالت ارتفاعی.

یونسفری در پردازش داده L_1 باعث انحراف نتایج مسطحاتی به میزان ۴۱ تا ۶۶ سانتی‌متر و انحراف نتایج ارتفاعی به میزان ۱/۵۵ تا ۲/۴۳ متر نسبت به راه حل L_3 شده است.

در صورت بکار بردن مدل یونسفری جهانی این مقادیر به ترتیب بین ۳۱ تا ۴۷ سانتی‌متر و ۵ تا ۸۳ سانتی‌متر قرار می‌گیرند.



شکل ۸- انحراف نتایج مسطحاتی راه حل‌های مختلف نسبت به راه حل L_3 (تعیین موقعیت مطلق)



شکل ۹- انحراف نتایج ارتفاعی راه حل‌های مختلف نسبت به راه حل L_3 (تعیین موقعیت مطلق)

جدول ۱- مقادیر اثر یونسفر روی مولفه‌های مختصاتی در شیوه تعیین موقعیت مطلق.

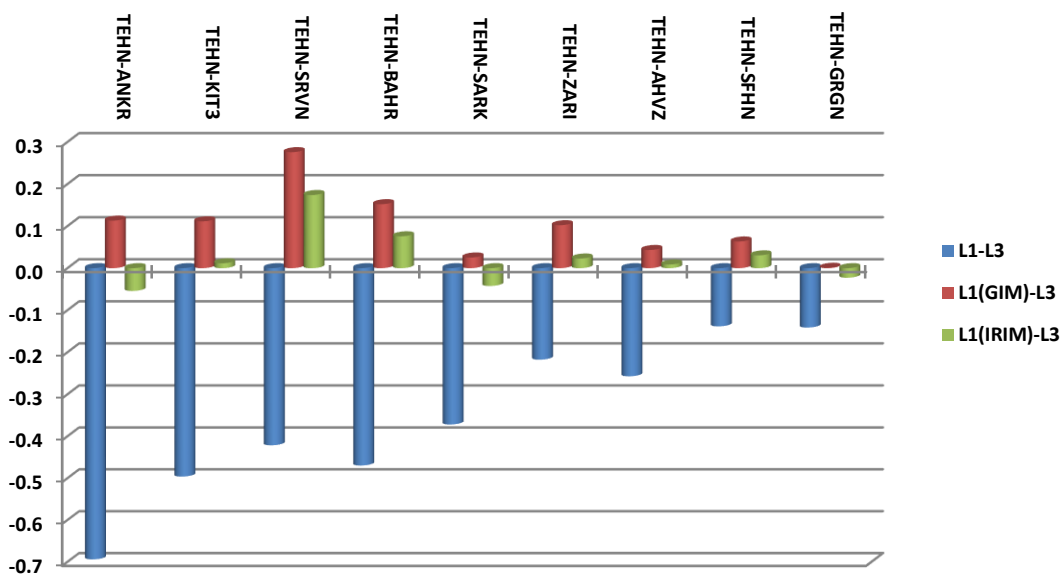
سمت راست (ارتفاعی) و سمت چپ (مسطحاتی)

ایستگاه	L1-L3	L1(GIM)-L3	L1(IRIM)-L3
AHVZ	0.478	0.344	0.164
ANKR	0.560	0.469	0.466
BAHR	0.414	0.442	0.204
GRGN	0.579	0.361	0.229
KIT3	0.614	0.390	0.251
SARK	0.658	0.419	0.297
SFHN	0.487	0.339	0.161
SRVN	0.651	0.568	0.262
TEHN	0.525	0.313	0.176
ZARI	0.512	0.353	0.248

ایستگاه	L1-L3	L1(GIM)-L3	L1(IRIM)-L3
AHVZ	1.866	0.529	0.462
ANKR	1.546	0.827	0.626
BAHR	2.057	0.446	0.492
GRGN	2.006	0.335	0.123
KIT3	2.056	0.045	0.212
SARK	2.270	0.072	0.110
SFHN	1.992	0.387	0.314
SRVN	2.428	0.055	0.079
TEHN	1.967	0.421	0.241
ZARI	1.599	0.713	0.448

دریافت که اختلاف بین طول مبناهای حاصل شده از راه حل‌های L_1 و L_3 منفی هستند. بنابراین می‌توان گفت که اثر یونسفر مدل نشده روی داده‌های تک فرکانس GPS، انقباض ظاهری را در شبکه نتیجه خواهد داد و لذا نادیده گرفتن اثر یونسفر روی راه‌حل شبکه‌ای بایاسی از نوع مقیاس را در شبکه حاصل می‌کند. این موضوع به تفصیل در [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است.

همچنین شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و جداول ۳ و ۲ مربوط به نتایج پردازش و اعمال مدل‌های یونسفری روی راه حل L_1 و مقایسه آنها با راه حل L_3 هستند. همانطور که ملاحظه می‌شود، بکار نبردن مدل یونسفری در پردازش داده L_1 در شیوه تعیین موقعیت نسبی باعث انحراف نتایج در طول مبنایها به میزان ۱۴ تا ۶۹ سانتی‌متر شده است که این انحرافات دارای همبستگی با بلندی طول مبنایها می‌باشند. همچنین با توجه به شکل ۱۰ و مقادیر جدول ۲ می‌توان



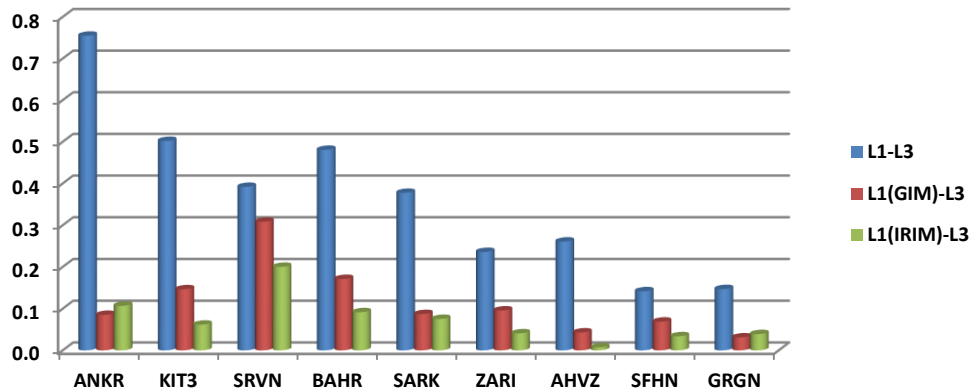
شکل ۱۰- اثر یونسفر روی بلندی طول مبنایها (اعداد محور ارتفاعی در واحد متر هستند)

جدول ۲- مقادیر اثر یونسفر روی بلندی طول مبنایها

طول مبنا	فاصله دقیق	L1-L3	L1(GIM)-L3	L1(IRIM)-L3
TEHN-ANKR	1692648.721	-0.694	0.113	-0.054
TEHN-KIT3	1423736.320	-0.496	0.111	0.012
TEHN-SRVN	1387229.869	-0.421	0.276	0.174
TEHN-BAHR	1053111.438	-0.470	0.152	0.076
TEHN-SARK	887490.056	-0.372	0.025	-0.042
TEHN-ZARI	675632.433	-0.218	0.102	0.023
TEHN-AHVZ	539301.466	-0.257	0.043	0.009
TEHN-SFHN	354385.006	-0.138	0.064	0.031
TEHN-GRGN	301091.878	-0.141	0.001	-0.023

مدل CODE میزان اختلافها از ۰ تا ۲۸ سانتی‌متر متغیر خواهند بود. شکل ۱۱ نشان‌دهنده اثر یونسفر روی مولفه مسطحاتی بوده و انحرافات را در هر قسمت نسبت به راه حل مرجع L_3 نمایش می‌دهند. همچنین مقادیر مربوط را می‌توانید در جدول ۳ مشاهده کنید.

همانطور که در شکل ۱۰ مشهود است در صورت استفاده از مدل IRIM برای اعمال کردن اثر یونسفر روی راه حل تک فرکانس، بهبود قابل ملاحظه‌ای در نتایج حاصل می‌شود. یعنی اختلافها نسبت به راه حل L_3 از ۱ تا ۱۷ سانتی‌متر متغیر هستند و این موضوع در صورتی است که در صورت استفاده از



شکل ۱۱- اختلاف مولفه مسطحاتی در راه حل‌های مختلف با راه حل L_3

جدول ۳- مقادیر اختلاف مولفه مسطحاتی در راه حل‌های مختلف با راه حل L_3

ایستگاه	L1-L3	L1(GIM)-L3	L1(IRIM)-L3
ANKR	0.755	0.085	0.107
KIT3	0.502	0.146	0.062
SRVN	0.392	0.308	0.200
BAHR	0.481	0.171	0.091
SARK	0.377	0.087	0.075
ZARI	0.236	0.096	0.041
AHVZ	0.261	0.043	0.007
SFHN	0.142	0.069	0.034
GRGN	0.147	0.031	0.039

۸- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله، برای محاسبه نقشه‌های بهبود یافته TEC در ایران، استفاده از داده‌های دو فرکانس GPS که توسط یک شبکه محلی (IPGN) فراهم شده‌اند، علاوه بر مشاهدات شبکه IGS پیشنهاد گردید. نتایج حاصل شده نشان دادند که مقدار ماکزیمم TEC در جنوب ایران در هنگام ظهر یعنی زمان نزدیک شدن خورشید به قائم در حدود ۲۲ TECU و کمترین مقدار TEC در همین ناحیه مربوط به نیمه شب و در حدود ۵ TECU است. برای کاهش دادن اختلاف ایجاد شده در اثر یونسفر، بین راه حل GPS با داده‌های تک فرکانس و راه حل عاری از اثر یونسفر (L_3) که به عنوان راه حل مرجع در نظر گرفته می‌شود، استفاده از مدل تصحیحات یونسفری در دو شیوه تعیین موقعیت مطلق و نسبی پیشنهاد می‌گردد. نتایج بدست آمده در شیوه تعیین موقعیت مطلق بهبود قابل توجه در هر دو مولفه مسطحاتی و ارتفاعی را در

صورت استفاده از مدل IRIM نسبت به مدل IGS نشان داده و همچنین نتایج پردازش در شیوه تعیین موقعیت نسبی نشان می‌دهند که به طور متوسط انحراف بهتر از ۱۰ سانتی متر در مولفه افقی در اثر اعمال تصحیحات یونسفری IRIM روی راه حل GPS تک فرکانس برای طول مبنای چند صد کیلومتری حاصل می‌شوند. یادآوری می‌کنیم که نادیده گرفتن اثر یونسفر در راه حل‌های GPS تک فرکانس باعث بوجود آمدن یک انقباض ظاهری در شبکه می‌شود. لازم به ذکر است که تمامی آنالیزها و نتایج حاصل شده در این مقاله بر مبنای پردازش داده‌های یک روز (۲۲ جون ۲۰۰۹) بوده و به منظور رسیدن به درک بهتر از رفتار یونسفر و اثر آن بر روی راه حل داده‌های تک فرکانس GPS، استفاده از داده‌های با پیوند بلندتر در کارهای بعدی توصیه می‌گردد. ضمناً مدلسازی یونسفر به صورت آبی برای استفاده در راه حل‌های کینماتیک آبی برای کارهای بعدی توصیه می‌شود. این مدلها می‌توانند مورد استفاده در DGPS و RTK باشند.

سپاسگزاری

از مسئولین محترم سازمان نقشه برداری کشور و مخصوصاً مهندسین اداره ژئودزی و ژئودینامیک، که شرایط انجام این تحقیق را میسر کردند کمال تشکر و قدردانی را می‌نمایم. همچنین از جناب آقای مهندس حامد مرادیان که در ویرایش چکیده لاتین بنده را یاری کردند، تشکر می‌نمایم.

مراجع

- [1] Opperman, B. (2007). "Reconstructing ionospheric TEC over south africa using signals from a regional GPS network." Rhodes University, Pierre Cilliers

- [2] Solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml
- [3] 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
- [4] <https://igsceb.jpl.nasa.gov/projects/iono/>
- [5] <https://igsceb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>
- [6] Amerian, Y., Voosoghi, B., Mashhadi Hossainali, M. (2013). "Regional modeling of the ionospheric electron density using wavelet analysis and GPS observations." Ph.D thesis, K.N Toosi University of technology, Tehran
- [7] Amerian, Y., Voosoghi, B., Mashhadi Hossainali, M. (2013). "Regional ionosphere modeling in support of IRI and wavelet using GPS observations." *Acta Geophysica*, 61(5), 1246-1261. doi: 10.2478/s11600-013-0121-5
- [8] Amerian, Y., Mashhadi Hossainali, M., Voosoghi, B. (2013). "Regional improvement of IRI extracted ionospheric electron density by compactly supported base functions using GPS observations." *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 92, 23-30. doi: 10.1016/j.jastp.2012.09.011
- [9] Gao, Y., Liu, Z.Z. (2002). "Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data." *Journal of Global Positioning Systems*, 1, pp. 18-24
- [10] Schaer, S., Beutler, G., Mervart, L., Rothacher, M., Wild, U. (1995). "Global and Regional Ionosphere Models Using the GPS Double Difference Phase Observable." *Proceedings of the IGS Workshop on Special Topics and New Directions*, Potsdam, Germany, May 15–17, 1995, pp. 77–92.
- [11] <http://ipgn.ncc.org.ir>
- [12] Le, A.Q., Tiberius, C.C.J.M., van der Marel, H., Jakowski, N. (2007). "Use of Global and Regional Ionosphere Maps for Single-Frequency Precise Point Positioning." *Proceedings of the 2007 IAG,133, Italy*, pp.759-769
- [13] Beutler, G., Bauer's'ima, I., Gurtner, W., Rothacher, M., Schildknecht, T., Geiger, A. (1988). "Atmospheric refraction and other important biases in GPS carrier phase observations, in *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements*." Monograph 12, pp. 15–43, School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia
- [14] Ouyang, G., Wang, J., Cole, D. (2007). "Analysis on Temporal-Spatial Variations of Australian TEC." *Proceedings of the 2007 IAG,133, Italy*, pp.751-758
- [15] Dekkiche, H., Kahlouche, S., Kadri C.B., Mir, R. (2007). "Ionospheric Modelling in the North of Algeria." *Proceedings of the 2007 IAG,133, Italy*, pp.679-689
- [16] Abdi, N., Nankali, H. (2014). "Analysis on Temporal-Spatial Variations of Iranian TEC Using GPS Data." *JGST*. 2014; 4 (2) :113-121