

داده‌گواری منطقه‌ای مدل یونسفر مرجع بین‌المللی با استفاده از مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی

اعظم حبیب‌پناه^۱، یزدان عامریان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئودزی - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
a.habibpanah@yahoo.com

^۲ استادیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
amerian@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت آبان ۱۳۹۵، تاریخ تصویب بهمن ۱۳۹۵)

چکیده

مدل‌سازی لایه یونسفر جو و تعیین پارامتر محتوای الکترونی کلی (TEC) آن نقش مهمی در شناخت این لایه و کنترل اثرات آن بر فعالیت‌های بشری دارد. در این راستا انواع مدل‌ها و مشاهدات یونسفری به طور گسترده جهت پایش تغییرات یونسفر مورد استفاده قرار می‌گیرد که مدل‌سازی تک لایه یونسفر یا همان مدل‌سازی TEC همواره مورد توجه محققین این حوزه می‌باشد. پیچیدگی‌های مدل‌های نظری، عدم تأمین دقت مورد نیاز در کاربردهای دقیق توسط خروجی‌های مدل‌های تجربی، تأخیر ۲۴ ساعته در انتشار نقشه‌های یونسفری جهانی IGS و نیاز به اطلاعات دقیق یونسفری در کاربردهای آبی و نزدیک به آبی، سبب گسترش نوع جدیدی از مدل‌های یونسفری موسوم به مدل‌های حاصل از داده‌گواری گردیده است. در این مقاله داده‌گواری مدل تجربی یونسفر مرجع بین‌المللی (IRI) با استفاده از مقادیر دقیق TEC محاسبه شده از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه GPS در منطقه ایران در دو مرحله آنالیز و پیش‌بینی انجام شده است که هدف از آن افزایش دقت TEC حاصل از مدل تجربی IRI در مرحله آنالیز با استفاده از فیلتر کالمن و انجام پیش‌بینی‌های کوتاه مدت TEC با استفاده از فیلتر کالمن گاوس-مارکوف (GM-KF) در مرحله پیش‌بینی، برای کاربردهای نزدیک به آبی می‌باشد. در این راستا، مشاهدات ۴۰ ایستگاه شبکه دائم GPS ایران (IPGN) در روز سوم ماه می سال ۲۰۱۶ جهت محاسبه مقادیر TEC دقیق مورد نیاز در فرآیند داده‌گواری مدل IRI استفاده شده است. بررسی اختلاف بین مقادیر TEC حاصل از مدل IRI و مقادیر TEC حاصل از داده‌گواری مدل IRI با مقادیر TEC دقیق، نشان‌دهنده کاهش ریشه میانگین مربعات (RMS) این اختلافات در مرحله به‌روزرسانی داده‌گواری در ساعت $t=10$ UT از 9.8 TECU به 1.47 TECU، در ساعت $t=14$ UT از 3.16 TECU به 0.98 TECU و در ساعت $t=18$ UT از 4.59 TECU به 1.39 TECU می‌باشد. همچنین مقایسه نتایج حاصل از داده‌گواری و مقادیر حاصل از نقشه‌های یونسفری جهانی در منطقه ایران با مقادیر TEC دقیق نیز بیانگر دقت بالاتر نتایج حاصل از داده‌گواری نسبت به نقشه‌های یونسفری جهانی می‌باشد. در مرحله پیش‌بینی در ساعت $t=10$ UT و فواصل زمانی $\Delta t=0.5, 1$ h، بهبود ۹۰ درصدی در مقادیر داده‌گواری نسبت به مقادیر مدل IRI مشاهده می‌شود. که این بهبود در ساعت $t=14, 18$ UT و در فواصل زمانی $\Delta t=0.5, 1, 2$ به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد. با افزایش فاصله زمانی پیش‌بینی به $\Delta t=5$ h، دقت داده‌گواری به سمت دقت مدل زمینه میل می‌کند. در نتیجه مدل داده‌گواری شده دارای دقت خوبی در کاربردهای آبی و نزدیک به آبی می‌باشد.

واژگان کلیدی: داده‌گواری، مدل تجربی یونسفر مرجع بین‌المللی، سیستم تعیین موقعیت جهانی، فیلتر کالمن گاوس-مارکوف

۱- مقدمه

بیش از ۶۰ سال است که یونسفر به طور گسترده مورد مطالعه می‌باشد و اکنون به خوبی می‌دانیم که مشخصات یونسفری با تغییر طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع، زمان جهانی، دوره فعالیت خورشیدی، فصل و فعالیت مغناطیسی تغییر می‌نماید. این تغییرات نتیجه فرآیندهای تابشی، انتقالی و شیمیایی مختلف می‌باشد. تغییرات یونسفری و به دنبال آن اغتشاشات جوی می‌تواند اثرات زیانباری بر سیستم‌های نقشه‌برداری و ناوبری همچون سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱، سیستم‌های ارتباطی و سیستم‌های امنیتی داشته باشد. طول عمر ماهواره‌ها، مسیر ماهواره‌ها، شبکه‌های نیرو و خطوط لوله تحت تأثیر این اثرات هستند [۱].

از روش‌های متداول برای تصحیح اثرات یونسفر و نیز جهت پیش‌بینی اغتشاشات آب و هوایی^۲ ناشی از آن و اقلیم‌شناسی فضایی^۳، استفاده از مدل‌های یونسفری می‌باشد. اما از آنجا که اطلاعات کاملی که همه حالت‌های سیستم در یک زمان خاص را توصیف کند غالباً در دسترس نمی‌باشد و نیز مدل‌ها و اندازه‌گیری‌ها آغشته به خطاهای اتفاقی و اشتباه هستند، از روش‌هایی موسوم به داده‌گذاری^۴ یونسفری استفاده می‌شود [۲].

داده‌گذاری روشی است که در آن مشاهدات یونسفری در یک بازه زمانی در ترکیب با معادلات مربوط به مدل‌ها، برای رسیدن به تخمین بهینه از وضعیت مورد نظر، استفاده می‌شود [۳]. میزان موفقیت داده‌گذاری در ایجاد یک سیستم اقلیم‌شناسی فضایی جهت بررسی تغییرات یونسفری، وابسته به توانایی به دست آوردن اندازه‌گیری‌های پیوسته از پارامتر یونسفری مورد نظر و توانایی ترکیب این اندازه‌گیری‌های گوناگون در یک مدل زمینه می‌باشد.

پایش و پیش‌بینی در اقلیم‌شناسی فضایی، امروزه با پایش سنتی آب و هوا و پیش‌بینی تقریباً نیم قرن پیش که مشاهدات به لحاظ زمانی و مکانی منقطع بود و ترکیب آنها ابتدایی و ناقص بود، قابل مقایسه نیست. امروزه دسترسی به انواع مشاهدات حاصل از ماهواره‌های هواشناسی، یونوسوندها^۵، رادپوسوندها^۵، مشاهدات ایستگاه‌های GPS و

مشاهدات به دست آمده از رادیو آکولتیشن^۶ و سایر مشاهدات حاصل از روش‌های متنوع، یک پوشش جهانی بی‌سابقه از اتمسفر بالا و یونسفر را فراهم می‌نماید. توانایی به دست آوردن به موقع این مشاهدات و ارتقاء به صورت مدل‌های هواشناسی جهانی و الگوریتم‌های داده‌گذاری، از جمله فاکتورهای اصلی پیشرفت در مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا می‌باشد [۴].

به عنوان یکی از اولین فعالیت‌های داده‌گذاری یونسفری، می‌توان به نگاشت داده‌گذاری شده از الکتروپدینامیک‌های یونسفری^۸ (AIME) که توسط کماید و ریچموند توسعه یافت، اشاره نمود [۵]. AIME می‌تواند بهترین تخمین از میدان الکتریکی در عرض‌های بالا، جریان و اغتشاشات مغناطیسی با استفاده از داده‌گذاری مشاهدات میدان مغناطیسی توسط ژئومغناطیس‌سنج‌های زمینی و میدان الکتریکی و جریان‌های مشاهده شده توسط ماهواره‌ها و رادارها را در یک مدل تجربی بر اساس تئوری بهترین تخمین در اختیار بگذارد. همچنین به عنوان یکی از اولین گام‌ها در این حوزه، می‌توان به داده-گذاری مدل مرجع بین‌المللی^۹ توسط بیلیترا و همکارانش با استفاده از اندازه‌گیری‌های یونوسوند جهت محاسبه اندکس‌های خورشیدی، اشاره نمود [۶].

بیشتر سیستم‌های داده‌گذاری یونسفری کاربردی در دانشگاه ایالتی یوتا [۸،۷] و نیز طی همکاری‌های بین دانشگاه کالیفرنیا جنوبی و آزمایشگاه پیش‌رانش جت^{۱۰} توسعه یافته‌اند [۹-۱۱]. لی و همکارانش اخیراً پروفیل چگالی الکترون را در یک مدل ترموسفر-یونسفری داده‌گذاری نمودند [۱۲]. توسعه مدل‌های حاصل از داده‌گذاری با گسترش ورود مدل‌های یونسفری تجربی در این روش، ادامه یافت [۴، ۱۳]. می‌توان به تحقیقات نیکل و همکارانش برای بهبود چگالی الکترونی منطقه E یونسفری اشاره نمود [۱۴]. یو و همکارانش نیز از داده‌های حاصل از روش‌های متنوع مشاهداتی همچون داده‌های حاصل از مشاهدات GPS و رادیو آکولتیشن جهت داده‌گذاری مدل IRI به منظور دستیابی به اطلاعات یونسفری دقیق، استفاده نمودند [۱۵-۱۷].

^۶ Radiosondes

^۷ Radio Occultation

^۸ Assimilative Mapping of Ionospheric Electrodynamics: AMIE

^۹ International Reference Ionosphere: IRI

^{۱۰} Jet Propulsion Laboratory : JPL

^۱ Global Positioning System: GPS

^۲ Space Weather

^۳ Climatology

^۴ Data Assimilation

^۵ Ionosondes

۲- مدل یونسفر مرجع بین‌المللی

مدل تجربی IRI، یک پروژه بین‌المللی و نتیجه همکاری کمیته تحقیقات فضایی^{۱۱} و اتحادیه بین‌المللی علوم رادیویی^{۱۲} می‌باشد. این سازمان‌ها یک گروه کاری در دهه ۶۰ میلادی را با هدف ایجاد یک استاندارد بین‌المللی برای تعیین پارامترهای یونسفری تحت عنوان مدل یونسفر مرجع بین‌المللی، راه اندازی نمودند. مدل تجربی IRI به عنوان یک مدل عددی برای اجتناب از پیچیدگی‌های مدل‌های نظری، بر اساس کلیه منابع داده موجود، توسعه یافت. از عمده‌ترین منابع داده مورد استفاده در مدل تجربی IRI می‌توان به شبکه جهانی یونسوند، رادارهای پراکنشی غیرهمبسته^{۱۳}، پروفیل‌سنج‌های نصب شده روی ماهواره‌ها و موشک‌ها، اندازه‌گیری‌های درجا^{۱۴} اشاره نمود [۱۹]. از جمله پارامترهای قابل ارائه توسط این مدل که اغلب به صورت میانگین‌های ماهیانه در دسترس قرار می‌گیرد عبارتند از: چگالی الکترونی، حرارت الکترون و یون، ترکیبات یونی ($O^+, H^+, He^+, N^+, NO^+, O_2^+$)، دریافت یون عمودی استوایی، محتوای الکترونی کلی عمودی^{۱۵}، مرزهای طلوعی^{۱۶} و آثار طوفان‌های یونسفری بر حداکثر چگالی ناحیه E و F یونسفر [۱۹]. مدل IRI پارامترهای یونسفری را در قالب برنامه‌های فرتن و متلب در ورژن‌های مختلف و نیز از طریق سایت مربوطه به صورت آنی در اختیار قرار می‌دهد [۲۰].

همانطور که اشاره گردید پارامترهای ارائه شده توسط مدل IRI به صورت میانگین ماهیانه در اختیار قرار می‌گیرد و نیز با توجه به اینکه این مدل یک مدل تجربی است، دقت آن در مناطق مختلف مستقیماً تحت تاثیر حجم مشاهدات استفاده شده می‌باشد. لذا جهت دستیابی به:

(۱) وضعیت دقیق یونسفری که در واقع یک پس‌پردازش به منظور ارائه داده‌های دقیق در کاربردهای علمی می‌باشد و

(۲) امکان انجام پیش‌بینی‌های یونسفری

اکنون چندین روش توسعه‌یافته و معروف داده‌گذاری همچون مدل یونسفری داده‌گذاری جهانی حاصل همکاری دانشگاه کالیفرنیا جنوبی و آزمایشگاه نیرو محرکه جت^۱ (JPL/USC GAIM) و مدل داده‌گذاری جهانی دانشگاه یوتا^۲ (USU GAIM) به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲، ۹].

در مدل JPL/USC GAIM دو روش داده‌گذاری به ترتیب زیر استفاده می‌شود:

- (۱) فیلتر کالمن^۳ برای به دست آوردن بهترین تخمین از چگالی الکترونی
- (۲) داده‌گذاری وردشی چهار بعدی^۴ جهت تخمین محرک‌های یونسفری^۵ مانند بادهای خنثی^۶ و سرعت میدان الکتریکی و تخمین بهینه کوتاه مدت

و در مدل USU GAIM از روش‌های داده‌گذاری:

- (۱) فیلتر کالمن گاوس-مارکوف^۷
 - (۲) فیلتر کالمن کاهش یافته^۸
- استفاده می‌شود [۱۸].

حجم بالای محاسبات و به دنبال آن تجهیزات ویژه پردازشی مورد نیاز و فرآیند محاسباتی زمانبر از یک سو و نیز دسترسی به انواع گوناگون داده با حجم متفاوت در مناطق مختلف، داده‌گذاری یونسفری جهانی را محدود می‌نماید، در نتیجه اجرای این روش به صورت منطقه‌ای و محلی ضروری به نظر می‌رسد [۸]. در این مقاله یک مدل داده‌گذاری یونسفری در منطقه ایران با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های GPS دو فرکانسه ایستگاه‌های شبکه GPS دائم ایران^۹ بر اساس فیلتر کالمن، جهت بهبود محتوای الکترونی کلی^{۱۰} حاصل از مدل IRI ارائه می‌شود. همچنین از فیلتر کالمن گاوس-مارکوف جهت پیش-بینی TEC در بازه‌های زمانی کوتاه جهت کاربردهای نزدیک به آنی، استفاده می‌شود.

^۱ Jet Propulsion Laboratory/University of Southern California
Global Assimilative Ionospheric Model: JPL/USC GAIM

^۲ Utah State University Global Assimilation of Ionospheric Measurements: USU GAIM

^۳ Kalman Filter

^۴ Four Dimensional Variational: 4DVAR

^۵ Ionospheric Drivers

^۶ Neutral Wind

^۷ Gauss-Markov Kalman Filter

^۸ Reduced Kalman Filter

^۹ Iranian Permanent GPS Network: IPGN

^{۱۰} Total Electron Content: TEC

^{۱۱} Committee on Space Research: COSPAR

^{۱۲} International Union of Radio Science: URSI

^{۱۳} Incoherent Scatter Radars

^{۱۴} In Situ Measurements

^{۱۵} Vertical Total Electron Content: VTEC

^{۱۶} Auroral Boundaries

در منطقه ایران، از نتایج حاصل از مدل IRI به عنوان داده زمینه که در واقع بیانگر کلیت تغییرات یونسفری می‌باشد استفاده نموده و اغتشاشات یونسفری را در فرآیند داده‌گذاری محاسبه، اعمال و نتایج را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.

۳- محاسبه TEC با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه GPS

مشاهدات ایستگاه‌های مجهز به گیرنده‌های دو فرکانسه GPS، شامل مشاهدات فاز موج حامل و شبه فاصله کد می‌باشد که در گیرنده ذخیره می‌شود. معادلات مشاهدات فاز موج حامل و شبه فاصله کد توسط روابط زیر حاصل می‌شود [۲۱]:

$$P_{k,j}^i = \rho_{0,j}^i + d_{ion,k,j}^i + d_{trop,j}^i + c(\tau^i - \tau_j) + d_{k,j}^i + \varepsilon_{P,k,j}^i \quad (۱)$$

$$L_{k,j}^i = \rho_{0,j}^i - d_{ion,k,j}^i + d_{trop,j}^i + c(\tau^i - \tau_j) - \lambda(b_{k,j}^i + N_{k,j}^i) + \varepsilon_{L,k,j}^i \quad (۲)$$

که در روابط (۱) و (۲)، $P_{k,j}^i$ اندازه‌گیری شبه فاصله کد (کد) GPS، $L_{k,j}^i$ مشاهدات فاز موج حامل، $\rho_{0,j}^i$ فاصله واقعی بین ماهواره و گیرنده، $d_{ion,k,j}^i$ تاخیر یونسفری، $d_{trop,j}^i$ تاخیر تروپوسفری، c سرعت نور، τ^i خطای ساعت ماهواره و τ_j خطای ساعت گیرنده، $d_{k,j}^i$ و d_k^i به ترتیب تأخیر سخت‌افزاری ماهواره و گیرنده در کد، $b_{k,j}^i$ تاخیر سخت‌افزاری ماهواره و گیرنده در فاز، $N_{k,j}^i$ ابهام فاز و $\varepsilon_{P,k,j}^i$ و $\varepsilon_{L,k,j}^i$ به ترتیب نویز اندازه‌گیری در مشاهدات کد و فاز می‌باشد. در این روابط $k=1,2$ و تعیین‌کننده فرکانس، i شماره ماهواره و j شماره گیرنده می‌باشد. در گیرنده‌های دو فرکانسه، تاخیر یونسفری با استفاده از ترکیب خطی مستقل از هندسه (روابط زیر) قابل محاسبه می‌باشد [۲۲]:

$$L_4 = L_{1,j}^i - L_{2,j}^i = -(d_{ion,1,j}^i - d_{ion,2,j}^i) - \lambda(b_{1,j}^i - b_{2,j}^i) - \lambda(N_{1,j}^i - N_{2,j}^i) \quad (۳)$$

$$P_4 = P_{1,j}^i - P_{2,j}^i = (d_{ion,1,j}^i - d_{ion,2,j}^i) + DCB^i + DCB_j$$

$$DCB_j = d_{1,j}^i - d_{2,j}^i \quad (۴)$$

$$DCB^i = d_1^i - d_2^i$$

که DCB^i و DCB_j در روابط (۴) به ترتیب اریب تداخل فرکانسی تفاضلی^۱ ناشی از تاخیر سخت‌افزاری ماهواره و گیرنده در مشاهدات شبه فاصله کد می‌باشد. از آنجا که سطح نویز اندازه‌گیری‌های یونسفر توسط مشاهدات کد بسیار بالاست می‌توان از مشاهدات فاز برای هموارسازی مشاهدات کد با استفاده از روابط زیر استفاده نمود [۲۳]:

$$P_{4,sm} = \omega_t P_4(t) + (1 - \omega_t) P_{4,prd}(t) \quad (۵)$$

$$P_{4,prd}(t) = P_{4,sm}(t-1) + [L_4(t) - L_4(t-1)] \quad , (t > 1)$$

که $P_{4,sm}$ مشاهدات شبه فاصله مستقل از هندسه هموار شده با مشاهدات فاز (مشاهده یونسفری^۲)، t شماره اپک و $\omega_t = 1/t$ فاکتور وزن در اپک t می‌باشد [۲۴]. مشاهدات فاز قبل از ورود به مرحله هموارسازی مشاهدات کد، طی یک فرآیند پالایش، عاری از اشتباه شده و خطای جهش فاز نیز تعیین می‌شود. یونسفر برای سیگنال‌های رادیویی یک محیط پاشنده^۳ می‌باشد و اثر یونسفر بر روی امواج بستگی به فرکانس آنها (f) و همچنین تعداد الکترون‌های واقع در مسیر سیگنال از گیرنده تا ماهواره (STEC)^۴ دارد و به صورت زیر بیان می‌شود [۲۲]:

$$d_{ion} = \frac{40.3}{f^2} STEC \quad (۶)$$

با جایگذاری رابطه (۶) در رابطه (۴) خواهیم داشت:

$$P_{4,sm} = 40.3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) STEC + DCB^i + DCB_j \quad (۷)$$

بعد از هموارسازی، DCB های دقیق تری با استفاده از داده‌های GPS قابل استخراج می‌باشد. با توجه به رابطه (۷) استخراج $STEC$ از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه GPS تحت رابطه زیر امکان پذیر می‌باشد، که DCB ها از جنس زمان هستند.

$$STEC = -\frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} (P_{4,sm} - cDCB_j - cDCB^i) \quad (۵)$$

یونسفر از ارتفاع ۶۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر از سطح زمین گسترده شده است. با فرض تمرکز همه الکترون‌ها در سطح

^۱ Differential Code Bias: DCB

^۲ Ionospheric Observable

^۳ Dispersive

^۴ Slant Total Ionospheric Electron Content: STEC

ثابت نقطه IPP و λ طول ژئوسنتریک می‌باشد. a_{nm} و b_{nm} ضرایب مدل یونسفری منطقه‌ای و یا جهانی و $\bar{P}_{nm}$ چند جمله‌ای‌های نرمالیزه شده توابع لژاندر می‌باشند [۲۵].

با جایگذاری روابط (۸)، (۱۰) و (۱۱) در رابطه (۹) خواهیم داشت:

$$MF \left[-\frac{f_1^2 f_2^2}{40.3(f_1^2 - f_2^2)} (P_{4,sm} - cDCB_j - cDCB_i) \right] \quad (12)$$

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

a_{nm} و b_{nm} و اربب تفاضلی کد ماهواره و گیرنده پارامترهای مجهول رابطه فوق هستند که برآورد می‌شوند. درجه هارمونیک‌های کروی رابطه فوق، به گستردگی منطقه مورد مطالعه وابسته می‌باشد که معمولاً برای مطالعات محلی، قاره‌ای و جهانی به ترتیب تا درجات ۴، ۸ و ۱۵ در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

۴- داده‌گذاری با فیلتر کالمن

توسعه روش‌های داده‌گذاری از درونیایی چندجمله‌ای و خطی به درونیایی بهینه^۴ فعلی، داده‌گذاری‌های وردشی سه بعدی^۵ و چهار بعدی و انواع فیلتر کالمن، چندین سال به طول انجامید. به طور عمده و به لحاظ تئوری، دو دسته روش‌های داده‌گذاری به شرح ذیل وجود دارد [۲۷]:

(۱) بر اساس تئوری‌های تخمین آماری مانند درونیایی بهینه و فیلتر کالمن

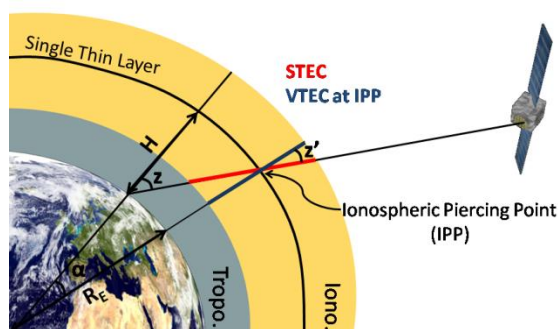
(۲) بر اساس تئوری تغییر مانند داده‌گذاری وردشی سه بعدی و داده‌گذاری وردشی چهار بعدی

در میان انواع روش‌های داده‌گذاری، فیلتر کالمن به عنوان ابزاری توانمند برای تولید یک تصویر بهینه و همچنین ایجاد یک تخمین بهینه از انواع سیستم‌های دینامیکی، در کاربردهای دقیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. فیلتر کالمن یک علم حساب جدید است که توسط کالمن در سال ۱۹۶۰ ارائه گردیده است و از دو بخش آنالیز به منظور به‌روزرسانی^۶ و پیش‌بینی^۷ تشکیل شده است و توسط روابط زیر بیان می‌شود [۲۷]:

یک پوسته در ارتفاع H و در واقع استفاده از مدل تک لایه^۱، می‌توان محتوای الکترونی کلی در راستای عمودی تحت عنوان VTEC را تحت نگاشت زیر به دست آورد [۲۵]:

$$VTEC = MF(z) \cdot STEC \quad (9)$$

$$MF = \cos(z') = \cos(\arcsin(\frac{R_E}{R_E + H} \sin(\alpha z))) \quad (10)$$



شکل ۱- هندسه مدل تک لایه [۲۵]

که در آن MF تابع تصویر، z' زاویه زنیته ماهواره در نقطه نفوذ یونسفری^۲، z زاویه زنیته ماهواره در محل گیرنده، R_E شعاع کره زمین، H ارتفاع پوسته کروی که معمولاً ماکزیمم ارتفاع لایه F_2 در نظر گرفته می‌شود و ضریب $\alpha=0.9782$ می‌باشد [۲۵].

محاسبه STEC از رابطه (۸) مستلزم معلوم بودن مقادیر اربب تفاضلی کد ماهواره و گیرنده می‌باشد. این مقادیر به عنوان یکی از محصولات IGS برای تمام ماهواره‌های GPS و گیرنده‌های GPS ایستگاه‌های شبکه IGS منتشر می‌شود. برای سایر گیرنده‌ها که در شبکه IGS قرار ندارند، در قالب یک پردازش قبلی و یا در حین مدل‌سازی یونسفر و به همراه سایر مجهولات برآورد می‌شود. به طور مثال در رابطه (۱۱) که مدل‌سازی تک لایه یونسفر برحسب هارمونیک‌های کروی است، خواهیم داشت:

$$VTEC(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \bar{P}_{nm}(\sin\beta) (a_{nm} \cos ms + b_{nm} \sin ms) \quad (11)$$

$$\lambda_0 = 180 - UT * 15$$

$$s = \lambda - \lambda_0$$

β عرض ژئوسنتریک نقطه تقاطع امتداد گیرنده و ماهواره با پوسته کروی در مدل‌سازی تک لایه^۳، s طول خورشید

^۴ Optimal Interpolation

^۵ Tree Dimensional Variational : 3DVAR

^۶ Update

^۷ Prediction

^۱ Single Layer Model: SLM

^۲ Ionospheric Piercing Point: IPP

^۳ Ionospheric Pierse Point: IPP

(۱) به‌روزرسانی

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_t^a &= \mathbf{x}_t^b + \mathbf{K}(\mathbf{y}_t - \mathbf{H}\mathbf{x}_t^b) \\ \mathbf{K} &= \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\ \mathbf{P}_t^a &= \mathbf{P}_t^b - \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T (\mathbf{H} \mathbf{P}_t^b \mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{H} \mathbf{P}_t^b \end{aligned} \quad (13)$$

که در روابط فوق، $\mathbf{x}^b$ مقدار حاصل از مدل زمینه، $\mathbf{y}$ بردار مشاهدات، $\mathbf{H}$ نگاشتی که ارتباط پارامتر زمینه و پارامتر مشاهده شده را تعیین می‌نماید (اپراتور مشاهده)، $\mathbf{P}^b$ کواریانس خطای مدل زمینه و $\mathbf{R}$ کواریانس خطای مشاهدات و $\mathbf{K}$ نیز بهره‌کالمن^۱ می‌باشد که وضعیت اولیه را با استفاده از نزدیک‌ترین مشاهدات تصحیح می‌نماید. بر اساس $\mathbf{P}^b$ و $\mathbf{R}$ و بردار مشاهدات می‌توان، کواریانس خطای پردازش را محاسبه نمود.

(۲) پیش‌بینی

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{t+1} &= \mathbf{Q}(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t+1}) \mathbf{x}_t^a \\ \mathbf{P}_{t+1} &= \mathbf{Q}(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t+1}) \mathbf{P}_t^a \mathbf{Q}(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t+1})^T \end{aligned} \quad (14)$$

که در روابط فوق، $\mathbf{x}_{t+1}$ بردار وضعیت و $\mathbf{P}_{t+1}$ بردار کواریانس خطا در زمان $t+1$ و $\mathbf{Q}(\mathbf{x}_t, \mathbf{x}_{t+1})$ ماتریس انتقال وضعیت می‌باشد که بیانگر تاثیر وضعیت در زمان t بر وضعیت سیستم در زمان $t+1$ می‌باشد [۲۷]. در استفاده از فیلتر کالمن به علت:

(۱) پردازش حجم بالای داده‌های ورودی

(۲) محاسبات مربوط به انتشار کوواریانس خطا

(۳) خطی کردن مدل فیزیکی در مدل‌سازی سیستم‌های دینامیکی نظیر سیستم‌های مورد استفاده در اقیانوس‌نگاری و هواشناسی که در آنها به جای یک وضعیت ثابت، به دنبال تخمین یک مجموعه‌ای از وضعیت‌ها، در زمان‌های مختلف هستیم،

تجهیزات قدرتمند پردازشی جهت کاهش زمان محاسبات و نیز ذخیره نتایج مورد نیاز می‌باشد، از این رو انواع گوناگون فیلتر کالمن مانند فیلتر کالمن بخش‌بندی شده^۲، محدود شده^۳ و یکجای^۴ و گاوس-مارکوف^۵ با توجه به وسعت منطقه مورد مطالعه، پارامترهای مجهول، حجم مشاهدات در دسترس و دقت مورد نیاز، گسترش یافته‌اند [۲۸].

در این تحقیق، در مرحله آنالیز از روابط (۱۳) و برای انجام پیش‌بینی‌های کوتاه مدت جهت کاهش زمان محاسبات و امکان اجرای فیلتر با استفاده از امکانات پردازشی موجود، از فیلتر کالمن گاوس-مارکوف استفاده می‌شود. مرحله پیش‌بینی در مدل فیلتر کالمن گاوس-مارکوف همانند مرحله آنالیز فیلتر کالمن (رابطه (۱۳))، از دو بخش موقعیت تقریبی یونسفری حاصل از یک مدل زمینه و تعیین اغتشاشات و تغییرات یونسفری حاصل از مشاهدات دقیق، تشکیل شده است. در این روش برای پیش‌بینی مقدار TEC در هر نقطه خواهیم داشت:

$$\text{TEC}^{t+1} = \text{TEC}_{\text{Back}}^{t+1} + \text{TEC}_{\text{Pert}}^{t+1} \quad (15)$$

که در رابطه فوق TEC_{Back} مقدار TEC حاصل از مدل زمینه است و برای TEC_{Pert} خواهیم داشت:

$$\text{TEC}_{\text{Pert}}^{t+1} = L \cdot \text{TEC}_{\text{Pert}}^t \quad (16)$$

$$L = \exp(-\Delta t / \tau) \quad (17)$$

در این روش فرض بر اینست که تصحیح مدل زمینه با زمان به صورت نمایی کاهش می‌یابد. در مقایسه با مدل‌های تئوری این مدل ساده‌تر بوده و گاهی نیز ممکن است منجر به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر شود.

$$\begin{aligned} x_{t+1}^a &= x_{t+1}^b + L \cdot K(y_t - Hx_t^b) \\ L_{i,j} &= \begin{cases} \exp(-\Delta T / \tau) & , i = j \\ 0 & , i \neq j \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

که در این روابط x_{t+1}^b حاصل از مدل زمینه و L یک ماتریس قطری است و بیانگر کاهش اثر تصحیح با افزایش زمان و ΔT فاصله زمانی مورد نظر جهت پیش‌بینی و $\tau=5$ پارامتر موسوم به طول وابستگی زمانی یونسفر می‌باشد [۸]. دقت کواریانس خطای مدل زمینه و مشاهدات به طور مستقیم فرآیند داده‌گواری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین تعیین دقیق کوواریانس خطای مدل زمینه، کار تقریباً پیچیده‌ای است و برای تعیین آن فرض بر اینست که:

- کوواریانس خطای مدل زمینه ارتباط مستقیم با مقادیر استخراج شده از مدل زمینه در نقاط مورد

نظر دارد و

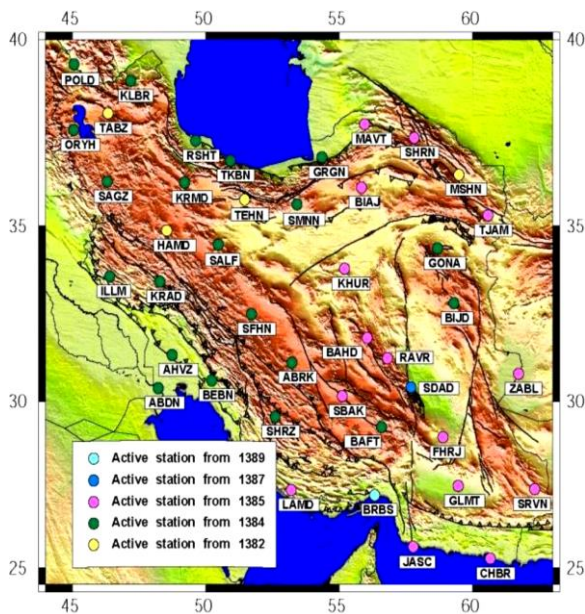
^۱ Kalman Gain

^۲ Partitioned Kalman Filter

^۳ Band-Limited Kalman Filter

^۴ Ensemble Kalman Filter

^۵ Gauss-Maikov Kalman Filter



شکل ۲- ایستگاه‌های IPGN [۳۱]

۵-۱- مرحله آنالیز

بر اساس مشاهدات حاصل از ایستگاه‌های GPS و روابط ارائه شده در بخش (۳)، مقادیر TEC در نقاط IPP، در سه زمان جهانی^۱ $t=10, 14, 18$ به عنوان مقادیر دقیق محاسبه گردید. سپس میزان TEC در مختصات IPP ها و در زمان های ذکر شده از مدل تجربی IRI استخراج و به عنوان مقادیر زمینه با استفاده از روابط (۱۳) و (۲۰) و TEC دقیق حاصل از مشاهدات GPS، وارد مرحله آنالیز سیستم داده‌گذاری شد و میزان TEC پس‌پردازش شده (به‌روز شده) در منطقه ایران محاسبه گردید. ریشه میانگین مربعات خطاها (باقیمانده‌ها) و مقدار متوسط باقیمانده‌ها برای نتایج حاصل، با استفاده از مشاهدات دقیق حاصل از گیرنده‌های دو فرکانسه و از روابط زیر به دست آمد، که در این روابط، n تعداد مشاهدات می‌باشد [۳۲].

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum (y_i - x_i^a)^2}{n}} \quad (21)$$

$$Mean = \frac{\sum (y_i - x_i^a)}{n} \quad (22)$$

اختلاف بین مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مقادیر TEC حاصل از نقشه‌های یونسفری جهانی^۲ و مقادیر TEC حاصل از داده‌گذاری مدل IRI در مرحله آنالیز داده‌گذاری

- وابستگی بین نقاط با یک توزیع گاوسی بیان می‌شود و این بدان معنی است که کواریانس مدل به صورت نمایی با افزایش فاصله بین دو نقطه کاهش می‌یابد. کواریانس خطای مشاهدات و مدل زمینه با استفاده از روابط زیر بیان می‌شود:

$$R_{i,j} = \eta_a y^2 \delta_{ij} \quad (19)$$

$$P_{i,j} = \eta_b x_i^b x_j^b e^{-d_{ij}/l}$$

در رابطه فوق η_a و η_b ضرایب تجربی، x_i^b و x_j^b مقادیر حاصل از مدل زمینه در نقاط i و j ، y بردار مشاهدات، δ_{ij} دلتای کرونکر، d_{ij} فاصله بین نقاط i و j و l طول همبستگی می‌باشد. مشاهدات در یک زمان مشخص و برای نقاطی که دارای موقعیت مکانی یکسان می‌باشند، دارای وابستگی ۱۰۰ درصد و مشاهدات در نقاط با موقعیت‌های مکانی متفاوت دارای عدم وابستگی می‌باشد. بنابراین با توجه به روابط (۱۹) کواریانس خطای مشاهدات یک ماتریس قطری است و عناصر خارج از قطر اصلی صفر و متناسب با مجذور مقدار مشاهدات شده در هر نقطه می‌باشد [۲۸، ۲۹].

تعیین ضرایب η_a و η_b برای کواریانس خطای مشاهدات و مدل زمینه پیچیده و اهمیت نسبت این دو ضریب η_b/η_a از مقدار مطلق هر کدام از آنها بیشتر است. معمولاً نسبت ضرایب ۱۰ در نظر گرفته می‌شود و این به معنی وجود اطمینان بیشتر به مشاهدات نسبت به مقادیر مدل زمینه می‌باشد [۲۹، ۳۰]. همچنین l طول همبستگی را برابر با ۱۰۰ کیلومتر در نظر می‌گیریم و روابط را به صورت زیر بازنویسی می‌نماییم [۳۰].

$$R_{i,j} = 0.01 y^2 \delta_{ij} \quad (20)$$

$$P_{i,j} = 0.1 x_i^b x_j^b e^{-d_{ij}/100}$$

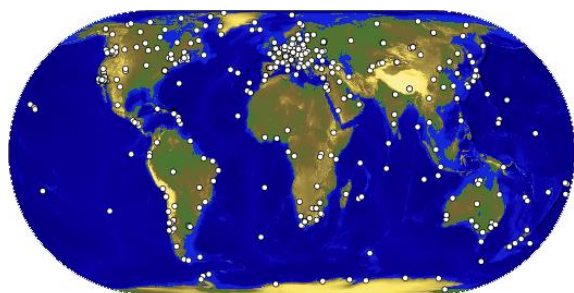
۵- داده‌گذاری مدل IRI

در این مقاله داده‌گذاری مدل IRI با استفاده از مشاهدات روز سوم ماه می سال ۲۰۱۶ ایستگاه‌های شبکه دائم GPS ایران با پراکندگی مطابق با شکل (۲) انجام شد.

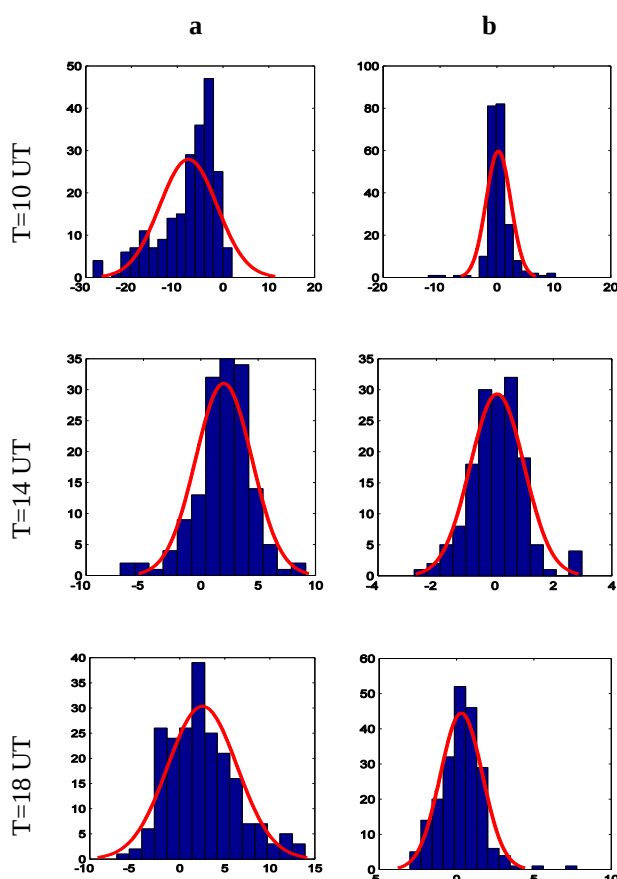
^۱ Universal Time: UT

^۲ Global Ionospheric Map: GIM

مقادیر دقیق TEC حاصل از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه در ساعت مختلف نشان داده شده است. که نشان دهنده کاهش اختلاف بین TEC حاصل از مدل IRI با مقادیر دقیق TEC پس از داده‌گذاری است و بیانگر اینست که TEC حاصل از داده‌گذاری به طور موثر و قابل قبولی به مقادیر دقیق TEC حاصل از مشاهدات ایستگاه‌های GPS مجهز به گیرنده‌های دو فرکانسه نزدیک می‌شود. توزیع خطاها حول مقدار صفر پس از داده‌گذاری افزایش یافته است.



شکل ۳- ایستگاه‌های شبکه IGS [۳۳]



شکل ۴- اختلاف بین مقادیر TEC حاصل از مدل IRI با مقادیر دقیق (ستون سمت چپ) و اختلاف بین مقادیر TEC حاصل از مرحله آنالیز داده‌گذاری با مقادیر دقیق TEC (ستون سمت راست)

با مقادیر دقیق TEC حاصل از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه محاسبه گردید. میانگین و ریشه میانگین مربعات این اختلافات در جدول (۱) آورده شده است. نتایج حاصل نشان‌دهنده کاهش ریشه میانگین مربعات اختلاف بین TEC حاصل از مدل IRI و مقادیر TEC حاصل از داده‌گذاری مدل IRI با مقادیر دقیق TEC حاصل از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه در ساعت $t=10$ UT از 3.16 TECU به 1.47 TECU، در ساعت $t=14$ UT از 4.59 TECU به 0.98 TECU و در ساعت $t=18$ UT از 1.39 TECU به 1.39 TECU می‌باشد. همچنین بررسی اختلاف بین مقادیر حاصل از نقشه‌های یونسفری جهانی در منطقه ایران و مقادیر حاصل از فیلتر داده‌گذاری مدل IRI با مقادیر دقیق TEC حاصل از مشاهدات گیرنده‌های دو فرکانسه نیز بیانگر دقت بالاتر نتایج حاصل از داده‌گذاری نسبت به نقشه‌های یونسفری جهانی در منطقه ایران می‌باشد. که علت این امر را می‌توان پراکندگی غیرهمگن شبکه مشاهداتی IGS در سراسر جهان (شکل (۳)) و عدم پوشش این شبکه در مناطقی مانند ایران دانست.

نقشه‌های روزانه جهانی یونسفری توسط گروه کاری یونسفر در سرویس بین‌المللی GNSS^۱ و با استفاده از مشاهدات ایستگاه‌های شبکه جهانی مربوطه با پراکندگی مطابق با شکل (۳)، توسط چهار مرکز، یعنی مرکز تعیین مدار اروپا^۲ مستقر در انستیتو نجوم دانشگاه برن سوئیس، مرکز فعالیت‌های فضایی اروپا به عنوان بخشی از ESA^۳ مستقر در آلمان، لابراتوار پیش‌رانش JET مستقر در کالیفرنیا آمریکا و دانشگاه فنی کاتالونیا^۴ مستقر در بارسلون اسپانیا به طور مستمر تولید می‌شود. هر مرکز به طور مستقل و با شیوه ای متفاوت اما با فرمت خروجی یکسان اقدام به تولید محصولات از نوع سریع و نهایی می‌کنند. در نهایت مدل نهایی یونسفر که توسط IGS منتشر می‌شود یک میانگین وزن دار از مدل‌های فوق است. این نقشه‌ها به صورت روزانه در فرمت IONEX^۵ در دسترس کاربران قرار می‌گیرد [۳۳].

در شکل (۴) توزیع فراوانی اختلاف بین TEC حاصل از مدل IRI و مقادیر TEC حاصل از داده‌گذاری مدل IRI با

^۱ International GNSS Services: IGS

^۲ Center for Orbit Determination in Europe: CODE

^۳ European Space Operations Center of ESA: ESOC

^۴ Technical University of Catalonia: TUC

^۵ IONospheric map EXchange: IONEX

۵-۲- مرحله پیش‌بینی

مشاهده می‌شود که این بهبود در $t=14,18$ UT و در فواصل $\Delta T=0.5,1,2$ h به بیش از ۵۰ درصد می‌رسد. با افزایش فواصل زمانی پیش‌بینی، دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد، به طوریکه در $\Delta T=5$ h به سمت دقت مدل زمینه IRI میل می‌کند. مقایسه مقادیر ریشه میانگین مربعات اختلاف مقادیر TEC حاصل از مدل GIM و مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق در فواصل $\Delta T=0.5,1,2$ h نیز نشان دهنده بهبود بیش از ۵۰ درصدی در مقادیر TEC داده‌گذاری شده نسبت به مقادیر TEC حاصل از مدل GIM می‌باشد. می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر TEC حاصل از داده‌گذاری تا فاصله زمانی ۲ ساعت از مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مدل GIM دقیق‌تر می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۸) ملاحظه می‌شود، میزان اختلاف مقادیر TEC حاصل از مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق با افزایش فاصله زمانی پیش‌بینی، افزایش یافته و توزیع آن از حول مقدار صفر منحرف می‌شود.

مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با استفاده از فیلتر کالمن گاوس-مارکوف انجام شد. در این مرحله مقادیر TEC در ساعت‌های $t=10,14,18$ UT و در بازه‌های زمانی $\Delta T=0.5,1,2,5$ h پیش‌بینی گردید. به این ترتیب که جهت انجام پیش‌بینی، مقادیر TEC در فاصله زمانی مورد نظر از سه زمان $t=10,14,18$ UT از مدل تجربی به عنوان مقادیر زمینه وارد معادلات (۱۸) شده و سپس تصحیح بخش آنالیز با یک ضریب نمایی که با افزایش فاصله زمانی کاهش می‌یابد، به مقادیر زمینه اعمال می‌گردد.

جهت ارزیابی مرحله پیش‌بینی، میانگین و ریشه میانگین مربعات اختلاف مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مدل GIM و مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق محاسبه گردید که نتایج آن در جداول (۲)، (۳) و (۴) ملاحظه می‌گردد. در ساعت $t=10$ UT و در فواصل زمانی $\Delta T=0.5,1$ h بهبود ۹۰ درصدی در مقادیر TEC داده‌گذاری شده نسبت به مقادیر TEC حاصل از مدل IRI

جدول ۱- میانگین و ریشه میانگین مربعات اختلاف مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مدل GIM و مرحله آنالیز داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق

Time	IRI		GIM		Assimilated IRI	
	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS
10 UT	-7.58	9.8	2.20	3.18	0.21	1.48
14 UT	2.00	3.16	1.11	2.18	0.08	0.92
18 UT	2.51	4.59	2.97	3.80	0.31	1.39

جدول ۲- میانگین و ریشه میانگین مربعات اختلاف مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مدل GIM و مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق در ساعت $t=10$ UT

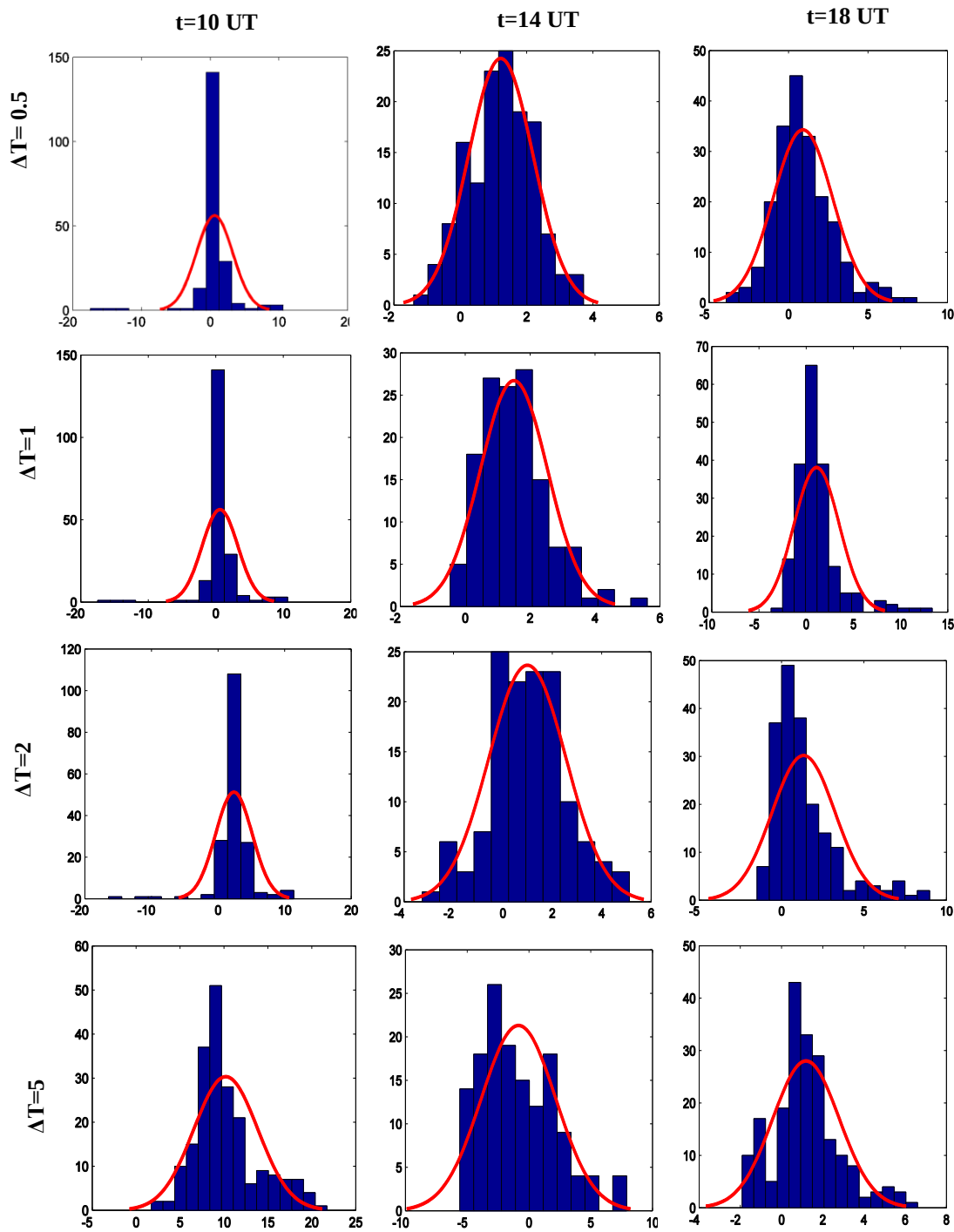
Time	IRI		GIM		Assimilated IRI	
	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS
$\Delta T = 0.5$	-6.28	8.00	-2.01	2.39	0.48	0.11
$\Delta T = 1$	-5.16	6.66	-2.03	2.29	0.66	1.23
$\Delta T = 2$	-3.19	5.26	-1.44	2.19	2.39	2.71
$\Delta T = 5$	3.13	3.77	-4.66	6.21	7.00	7.84

جدول ۳- میانگین و ریشه میانگین مربعات اختلاف مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مدل GIM و مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق در ساعت $t=14$ UT

Time	IRI		GIM		Assimilated IRI	
	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS
$\Delta T = 0.5$	2.32	4.48	-3.96	4.20	0.90	2.00
$\Delta T = 1$	2.20	4.55	-3.56	4.22	1.33	2.33
$\Delta T = 2$	2.25	3.97	-4.08	4.46	1.11	2.64
$\Delta T = 5$	1.75	2.95	-4.41	4.55	1.48	3.05

جدول ۴- میانگین و ریشه میانگین مربعات اختلاف مقادیر TEC حاصل از مدل IRI، مدل GIM و مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق در ساعت $t=18$ UT

Time	IRI		GIM		Assimilated IRI	
	Mean	RMS	Mean	RMS	Mean	RMS
$\Delta T = 0.5$	3.05	3.49	-1.60	2.88	1.22	1.55
$\Delta T = 1$	3.35	3.67	-2.95	4.23	1.50	1.82
$\Delta T = 2$	2.68	2.98	-3.14	3.42	0.99	1.85
$\Delta T = 5$	1.01	2.77	-4.15	4.38	-0.85	3.12



شکل ۸- اختلاف مقادیر TEC حاصل از مرحله پیش‌بینی داده‌گذاری با مقادیر TEC دقیق

۶- نتیجه گیری

دقت بالاتر نتایج حاصل از داده‌گذاری نسبت به نقشه‌های یونسفری جهانی در منطقه ایران می‌باشد. نتایج پیش‌بینی TEC تا فواصل زمانی ۱ ساعت، نشان دهنده بهبود تا ۹۰ درصد در مقادیر داده‌گذاری نسبت به مقادیر مدل IRI می‌باشد که این بهبود در فواصل زمانی ۲ ساعت به ۵۰ درصد می‌رسد و با افزایش فاصله زمانی پیش‌بینی به ۵ ساعت، دقت داده‌گذاری به سمت دقت مدل زمینه میل می‌کند. استفاده از سایر منابع داده علاوه بر مشاهدات ایستگاه‌های زمینی GPS و به کارگیری الگوریتم‌های کارآمدتر در داده‌گذاری یونسفر، زمینه تحقیقات آتی خواهد بود.

مدل‌های نظری یونسفر دارای پیچیدگی در استفاده از آنها می‌باشند، مدل‌های تجربی یونسفر نیز دارای دقت کافی نیستند و ویرایش سریع نقشه‌های یونسفری جهانی IGS نیز با تاخیر ۲۴ ساعته منتشر می‌شوند که این نقشه‌ها در مناطقی به مانند ایران به دلیل کمبود ایستگاه‌های IGS، فاقد دقت کافی می‌باشد. در این مقاله داده‌گذاری مدل تجربی IRI با هدف افزایش دقت TEC حاصل از مدل تجربی IRI و همچنین پیش‌بینی‌های کوتاه مدت TEC برای کاربردهای نزدیک به آنی انجام گردید. مقایسه نتایج حاصل از داده‌گذاری و مقادیر حاصل از نقشه‌های یونسفری جهانی با مقادیر TEC دقیق، بیانگر

مراجع

- [1] Hajj, G., Wilson, B.D., Wang, C., Pi, X. and Rosen, I.G. (2004). "Data assimilation of ground GPS total electron content into a physics-based ionospheric model by use of the Kalman filter", Radio Science, 2004. 39 (1).
- [2] Schunk, R.W., Scherliess, L., Sojka, J., Thompson, D.C., Anderson, D.N., Codrescu, M., Minter, C., Fuller-Rowell, T.J., Heelis, R.A. and Hairston, M. (2004). "Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM)", Radio Science, 2004. 39 (1).
- [3] Bouttier, F. and Courtier, P. (2002). "Data assimilation concepts and methods March 1999", Meteorological training course lecture series. ECMWF, 2002.
- [4] Bust, G., Garner, T. and Gaussiran, T. (2004). "Ionospheric Data Assimilation Three-Dimensional (IDA3D): A global, multisensor, electron density specification algorithm", Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2004. 109 (A11).
- [5] Richmond, A.D. and Kamide, Y. (1988). "Mapping electrodynamic features of the high-latitude ionosphere from localized observations: Technique", Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1988. 93(A6): p. 5741-5759.
- [6] Bilitza, D., Bhardwaj S., and Koblinsky C. (1997). "Improved IRI predictions for the GEOSAT time period", Advances in Space Research, 1997. 20(9): p. 1755-1760.
- [7] Schunk, R., Scherliess, L., Sojka, J., Thompson, D.C. and Zhu, L. (2005). "Ionospheric weather forecasting on the horizon", Space Weather, 2005. 3 (8).
- [8] Scherliess, L., Schunk, R.W., Sojka, J., Thompson, D.C. and Zhu, L. (2006). "Utah State University Global Assimilation of Ionospheric Measurements Gauss-Markov Kalman filter model of the ionosphere: Model description and validation", Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2006, 111 (A11).
- [9] Wang, C., Hajj, G., Pi, X., Rosen, I.G. and Wilson, B. (2004). "Development of the global assimilative ionospheric model", Radio Science, 2004. 39 (1).
- [10] Runge, T.F. and Akopian, V. (2009). "Assimilative Modeling of Ionospheric Disturbances with FORMOSAT-3/COSMIC and Ground-Based GPS Measurements", Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO), Vol. 20, No. 1, 273-285, February 2009.
- [11] Komjathy, A., Wilson, B., Pi, X., Akopian, V., Dumett, M., Iijima, B. and Verkhoglyadova, O. (2010). "JPL/USC GAIM: On the impact of using COSMIC and ground-based GPS measurements to estimate ionospheric parameters", Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2010. 115(A2).
- [12] Lee, I., Matsuo, T., Richmond, A.D., Liu, J.Y., Wang, W., Lin, C.H., Anderson, J.L. and Chen, M.Q. (2012). "Assimilation of FORMOSAT-3/COSMIC electron density profiles into a coupled thermosphere/ionosphere model using ensemble Kalman filtering", Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2012. A10.117

- [13] Bust, G., Crowley, G., Garner, T.W., Gaussiran, T.L., Meggs, R.W., Mitchell, C.N., Spencer, P.S.J., Yin, P. and Zapfe, B. (2007). "Four-dimensional GPS imaging of space weather storms", *Space Weather*, 2007. 5 (2).
- [14] Nicolls, M., Rodrigues, F.S., Bust, G.S. and Chau, J.L. (2009). "Estimating E region density profiles from radio occultation measurements assisted by IDA4D", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009. 114(A10).
- [15] Yue, X., Schreiner, W.S., Hunt, D., Rocken, C. and Kuo, Y. (2011). "Quantitative evaluation of the low Earth orbit satellite based slant total electron content determination", *Space Weather*, 2011. 9(9).
- [16] Yue, X., Schreiner, W.S., Lin, Y.C., Rocken, C., Kuo, Y.H. and Zhao, B. (2011). "Data assimilation retrieval of electron density profiles from radio occultation measurements", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011. 116(A3).
- [17] Yue, X., Schreiner, W.S., Kuo, Y., Hunt, D., Wang, W., Solomon, S.C., Burns, A.G., Bilitza, D., Liu, J.Y. and Wan, W. (2012). "Global 3-D ionospheric electron density reanalysis based on multisource data assimilation", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012. 117(A9).
- [18] Bust, G.S. and Mitchell, C.N. (2008). "History, current state, and future directions of ionospheric imaging", *Reviews of Geophysics*, 2008. 46 (1).
- [19] Bilitza, D., Altadill, D., Zhang, Y., Mertens, C., Truhlik, V., Richards, P., McKinnell, L. and Reinisch, B. (2014). "The International Reference Ionosphere 2012—a model of international collaboration", *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014. 4: p. A07.
- [20] <http://IRImodel.org>
- [21] Hoffman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E. (2008). "GNSS-Global navigation satellite systems." GPS, GLONASS, Galileo and more. Wien: Springer-Verlag.
- [22] Amerian, Y. (2013). "Regional Modeling of the Ionospheric Electron Density Using Wavelet Analysis and GPS Observations", Ph.D. Thesis in Geodesy, 2013, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran (in Persian).
- [23] Liu, J., Chen, J., Zhang, Y., Li, Y. and Ge, M.R. (1998). "The theory and method of wide area differential GPS", *Surveying and Mapping Press*, Beijing, 1998.
- [24] Maybeck, P.S. (1979). "Mathematics in science and engineering: Vol. 141", *Stochastic models, estimation, and control*, 1979. 1.
- [25] http://gnss.be/ionosphere_tutorial.php
- [26] Evensen, G. (2003). "The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation", *Ocean dynamics*, 2003. 53(4): p. 367-433.
- [27] Faragher, R. (2012). "Understanding the basis of the Kalman filter via a simple and intuitive derivation", *IEEE Signal processing magazine*, 2012. 29(5): p. 128-132.
- [28] Scherliess, L., Thompson, D.C. and Schunk, R.W. (2009). "Ionospheric dynamics and drivers obtained from a physics-based data assimilation model", *Radio Science*, 2009. 44 (1).
- [29] Yu, T., Mao, T., Wang, Y.G., Zeng, Z.C., Wang, J.S. and Fang, H. (2014). "Using the GPS observations to reconstruct the ionosphere three-dimensionally with an ionospheric data assimilation and analysis system (IDAAS)", *Science China Technological Sciences*, 2014. 57(11): p. 2210-2219.
- [30] Yue, X., Wan, W. and Liu, L. (2010). "Development of an Ionospheric Numerical Assimilation Nowcast and Forecast System Based on Gauss-Markov Kalman Filter—an Observation Simulation Experiment taking Example for China and Its Surrounding Area", *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53, p. 209-217.
- [31] <http://ipgn.ncc.org.ir>
- [32] Moon, Y. (2004). "Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National And Regional GPS Networks", MSc Thesis in Geomatics Engineering, 2004, University of Calgary, p.67.
- [33] <https://igscb.jpl.nasa.gov/projects/iono>