نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال نهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۰

Vol.9, No.4, Winter 2022

۸۷ -۱۰۷

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]

[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

بهبود نقشه‌های جهانی مدل تجربی *IRI2016* با تلفیق مشاهدات **GPS** و **Swarm**

صدیقه کریمی[۱]، محمدعلی شریفی[۲*]، سعید فرزانه[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- دانشیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۰۴

چکیده

این مقاله مدلی برای بهبود نقشه‌های محتوای الکترون کلی قائم *(VTEC)* مدل مرجع بین‌المللی یونوسفر *2016 (IRI)* با استفاده از تلفیق مشاهدات *Swarm* با مشاهدات سیستم تعیین موقعیت جهانی *(GPS)* ارائه می‌دهد. مدل ارائه شده از دو بخش مدل زمینه و تصحیحات تشکیل شده است. در این مقاله مدل *IRI2016* به عنوان مدل زمینه انتخاب گردید و بخش تصحیحات با استفاده از توابع بسط هارمونیک‌های کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ در سیستم مختصات خورشید-ثابت *(Sun-fixed)* مدل‌سازی شده است. در ترکیب مشاهدات *VTEC* به دست آمده از *Swarm* و *GPS*، بایاس‌های سیستماتیک ماهواره‌های *Swarm* به عنوان ترم‌های ثابت مجهول در هر اپک زمانی در نظر گرفته شده‌اند. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن سطوح مختلف دقت گروه‌های مشاهداتی، از روش برآورد مولفه واریانس هلمرت استفاده شده است. جهت ارزیابی مدل پیشنهادی، نقشه‌های جهانی یونوسفری *(GIM)* ترکیبی دو بعدی در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ به ترتیب با ضرایب *Kp* (شاخص فعالیت خورشیدی) ۷ و ۱ ساخته شده‌اند. مقایسه نقشه‌های *GIM* ترکیبی به دست آمده با نقشه‌های *GIM* حاصل از خدمات بین‌المللی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی *(IGS)*، نشان می‌دهد که مدل ترکیبی سازگاری بیشتری با نقشه‌های *IGS* دارد و افزودن مشاهدات *Swarm* و *GPS* به مدل زمینه *IRI2016*، می‌تواند تا حد زیادی مدل *IRI2016* را به ویژه در مناطق اقیانوسی بهبود بخشد. نتایج نشان می‌دهد نقشه‌های جذر میانگین مربعات *(RMS)* و خطای جذر میانگین مربعات *(RMSE)* به ترتیب، حدود ۱۹ الی ۴۵ درصد و ۴۳ الی ۶۷ درصد برای روز با ضریب *Kp* بالا و حدود ۱۳ الی ۴۰ درصد و ۱۵ الی ۴۳ درصد برای روز با ضریب *Kp* پایین کاهش یافته‌اند.

کلید واژه‌ها : محتوای الکترون کلی ، *Swarm*، *GPS* ، مدل *IRI2016*، برآورد مولفه واریانس.

* نویسنده مکاتبه کننده: گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تلفن: ۰۲۱۶۱۱۱۴۵۱۷

Email: sharifi @ut.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از مهم ترین بخش‌های جو زمین لایه یونوسفر است که از ارتفاع ۶۰ تا ۱۵۰۰ کیلومتر از سطح زمین گسترش یافته است. این قسمت از جو گازهای یونیزه و الکترون‌های آزاد تولید می‌کنند که باعث تأخیر یونوسفری در مشاهدات ژئودتیکی می‌شود (به عنوان مثال مشاهدات سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی[۱] *(GNSS)*، مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای، مشاهدات تداخل‌سنجی راداری و تداخل‌سنجی خط پایه بسیار طولانی) [۱ و ۲]. استفاده از مشاهدات دو فرکانسه می‌تواند این اثر را تا ۹۵ درصد بر روی سیگنال‌های مایکروویو از بین ببرد [۳]. با این حال، برای کاربردهایی مانند تعیین موقعیت نقطه‌ای[۲]، کاهش زمان همگرایی تعیین موقعیت مطلق دقیق دو فرکانسه[۳] با معادلات غیر تفاضلی، مطالعه چرخه‌های خورشیدی و جو زمین، یا مطالعه مشاهدات محتوای الکترون کلی قائم[۴] *(VTEC)* برای زمین‌لرزه‌های بزرگ، به مدل‌های دقیق یونوسفری نیاز است [۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹ و ۱۰]. مدل‌سازی پارامترهای یونوسفری به سه روش فیزیکی، ریاضی و تجربی انجام می‌شود. مدل‌های فیزیکی از قوانین فیزیکی موجود برای مدل‌سازی یونوسفر استفاده می‌کنند [۱۱]. در مدل‌سازی ریاضی از مشاهدات فضایی برای مدل‌سازی پارامترهای یونوسفری استفاده می‌کنند (به عنوان مثال نقشه‌های جهانی یونوسفر[۵] *(GIM)*). یک رویکرد برای توسعه مدل‌های ریاضی جهانی که نمایانگر توزیع پارامترهای یونوسفر (به عنوان مثال محتوای الکترون کلی[۶] *(TEC)*، *TEC* قائم *(VTEC)* و چگالی الکترونی) می‌باشد، استفاده از توابع پایه ریاضی مانند هارمونیک‌های کروی، توابع پایه اسپیلاین یا توابع پایه موجک است که تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای یونوسفری را با استفاده از توابع پایه در نظر گرفته شده مدل‌سازی می‌کنند [۱۲، ۱۳، ۱۴ و ۱۵]. در مدل‌های تجربی از جمله مدل مرجع بین‌المللی یونوسفر[۷] *(IRI)* یا مدل کلوبوچار[۸] ، از پارامترهای زیادی حاصل از مجموعه اطلاعات موجود از سیستم‌های زمینی و ماهواره‌ای و تشعشعات خورشیدی برای مدل‌سازی تغییرات مکانی و زمانی چگالی الکترونی در یونوسفر استفاده می‌شود [۱۶ و ۱۷]. مدل *IRI*، یکی از پرکاربردترین مدل‌های استاندارد تجربی یونوسفر است. محتوای الکترون کلی *IRI* برای مطالعه رفتار یونوسفر و درک توزیع جهانی *TEC* بسیار مهم است زیرا به علت توضیع ناهمگن و عدم وجود ایستگاه‌های *IGS* در اقیانوس‌ها، اندازه‌گیری *TEC* در تمام مناطق جهان با استفاده از سیستم تعیین موقعیت جهانی[۹] *(GPS)* ایستگاه‌های خدمات بین‌المللی *GNSS*[۱۰] *(IGS)* ممکن نیست [۱۸]. مطالعات زیادی نحوه پیش‌بینی *TEC* یونوسفر توسط *IRI* را ارزیابی کرده‌اند که نتایج نشان می‌دهد که اغلب *TEC* جهانی پیش‌بینی شده توسط مدل *IRI* از داده‌های مشاهداتی به میزان قابل توجهی اختلاف دارد [۱۸، ۱۹، ۲۰ و ۲۱]. برای مثال در مقاله وانگ[۱۱] و همکاران (۲۰۰۶)، *TEC* جهانی *GPS* و *IRI-2012* را در سه ماه اول سال ۲۰۰۶ مقایسه کردند [۲۲]. نتایج آن‌ها نشان داد *TEC* حاصل از *IRI-2012* و *GPS* در عرض‌های جغرافیایی پایین در طول روز،

---

۱ *Global Navigation Satellite System*

۲ *Standard point positioning (SPP)*

۳ *Precise point positioning (PPP)*

۴ *Vertical total electron content*

۵ *Global Ionosphere Map*

۶ *Total Electron Content*

۷ *International Reference Ionosphere*

۸ *Klobuchar*

۹ *Global Positioning System*

۱۰ *International GNSS Service*

۱۱ *Wang*

اختلاف قابل توجهی دارند. هم چنین در مقاله شی[1] و همکاران (۲۰۱۹)، مقایسه پیش‌بینی‌های *TEC* نقشه‌های *IRI-2016* و *TEC* حاصل از *IGS* از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام شد. آن‌ها دریافتند که در طول فعالیت‌های خورشیدی کم سازگاری خوبی بین آن‌ها وجود دارد، اما در طول فعالیت خورشیدی شدید، مدل *IRI2016* مقادیر *TEC* را بسیار کمتر از مقادیر واقعی ارائه می‌دهد [۲۳]. در ادامه، رائو[2] و همکاران (۲۰۱۹)، *TEC* حاصل از *GPS* و *IRI-2016* را در چرخه خورشیدی ۲۴ مقایسه کردند و نشان دادند که مدل *IRI-2016* مقادیر *TEC* را در زمان ظهر و عرض جغرافیایی پایین بیش از حد ارزیابی می‌کند [۲۴]. در نتیجه، به منظور بهبود نقشه‌های جهانی *TEC* مدل *IRI*، می‌توان از مشاهدات *GNSS* استفاده نمود. در این روش مدل ارائه شده شامل یک بخش مدل زمینه و یک بخش تصحیحات است. در بخش مدل زمینه از مدل *IRI* استفاده شده و بخش تصحیحات بر حسب توابع پایه بسط داده خواهد شد. به منظور محاسبه مشاهدات *VTEC* اندازه‌گیری‌های *GNSS*، باید مقادیر بایاس داخل فرکانسی تفاضلی[3] *(DCB)* ماهواره‌ها و گیرنده‌ها مشخص باشد. با این حال، مقادیر *DCB* برای همه ایستگاه‌های *GNSS* در محصولات *IGS* در دسترس نیست. بسیاری از تحقیقات نشان دادند که وقتی مقدار *DCB* ماهواره و گیرنده در روش مدل‌سازی همراه با سایر پارامترهای مجهول مدل (وابسته به توابع پایه انتخاب شده برای مدل‌سازی) برآورد می‌شود، دقت برآورد افزایش می‌یابد [۲۵، ۲۶، ۲۷، ۲۸، ۲۹ و ۳۰]. باید در نظر داشت توزیع ایستگاه‌های *IGS* در سراسر جهان یکنواخت نیست و دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های جهانی یونوسفری در مناطق قاره‌ای تحت پوشش ایستگاه‌های مرجع نسبت به سایر مناطق، به ویژه در مناطق بزرگ اقیانوسی بیشتر می‌باشد. جهت افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های جهانی یونوسفری در مناطق جنوبی و اقیانوس‌ها می‌توان از مشاهدات ژئودتیکی فضایی مانند مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای یا مشاهدات اختفای رادیویی[4] استفاده نمود. به عنوان مثال، تودوروا[5] و همکاران (۲۰۰۸) داده‌های ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای را با داده‌های *GNSS* برای ایجاد *GIM*هایی با قدرت تفکیک زمانی دو ساعته ترکیب کردند و نتایج نشان داد که *GIM* های ترکیبی در مقایسه با *GIM* هایی که تنها با استفاده از داده‌های *GNSS* به دست آمده‌اند، دارای دقت و قابلیت اطمینان بالاتری در اقیانوس‌ها هستند [۲۵]. جهت تلفیق مشاهدات مختلف ژئودتیکی، با توجه به تفاوت‌های موجود در تعداد مشاهدات، توزیع‌های مکانی و زمانی متفاوت و همچنین حساسیت‌های مختلف مشاهدات ژئودتیکی، نیاز به در نظر گرفتن وزن نسبی بین گروه‌های مختلف مشاهدات است. وزن نسبی انواع مختلف مشاهدات را می‌توان از طریق وزن فیزیکی، وزن تجربی و وزن ریاضی (به عنوان مثال برآورد مولفه واریانس کمترین مربعات[6]، برآورد مولفه واریانس هلمرت[7]) به دست آورد [۲۶ و ۳۱]. علاوه بر این، بین مشاهدات مختلف ژئودتیکی نسبت به مشاهدات *GNSS*، بایاس سیستماتیک وجود دارد، که به دلیل ارتفاعات مختلف مدارات ماهواره‌های ژئودتیکی در پایش لایه یونوسفر می‌باشد[۳۲]. یک روش رایج برای حل این مسئله، تعیین پارامترهای بایاس به عنوان مجهول و برآورد آن‌ها در روند مدل‌سازی است. مطالعات بسیاری نشان دادند که با تلفیق مشاهدات

[1] *Shi*
[2] *Rao*
[3] *Differential Code Bias*
[4] *Radio Occultation*
[5] *Todorova*
[6] *Least Squares*
[7] *Helmert*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

مختلف ژئودتیکی، دقت نقشه‌های جهانی یونوسفر افزایش یافت. به عنوان نمونه، علیزاده و همکاران (۲۰۱۱)، برای ترکیب مشاهدات *GNSS*، ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای و اختفای رادیویی ماهواره‌های *COSMIC*، از وزن‌دهی تجربی استفاده کردند. پارامترهای بایاس به عنوان پارامترهای ثابت روزانه در نظر گرفته شده و همراه با ضرایب مجهول هارمونیک‌های کروی برآورد شده‌اند. آن‌ها نشان دادند که با ترکیب این مشاهدات با مشاهدات *GNSS*، دقت نقشه‌های جذر میانگین مربعات[۱] *(RMS)* مدل‌های ترکیبی جهانی یونوسفر افزایش یافت [۲۶]. در مطالعه دیگری، چن[۲] و همکاران (۲۰۱۴) جهت تعیین وزن نسبی گروه‌های مشاهدات مختلف ماهواره‌های *Jason-1*، *Jason-2*، *COSMIC* و مشاهدات *GNSS* از روش برآورد مولفه واریانس هلمرت استفاده کرده‌اند. بایاس‌های سیستماتیک ماهواره‌های ارتفاع‌سنجی و هر ماهواره *COSMIC* به عنوان مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند و پارامترهای مجهول بایاس سیستماتیک همزمان به همراه ضرایب مجهول هارمونیک‌های کروی و مقادیر مجهول *DCB* تخمین زده شده‌اند و *RMS* حداکثر ۷/۵ *TECU*[۳] (واحد اندازه‌گیری *TEC*) در مناطق اقیانوسی کاهش یافت [۲۷].

در این مطالعه، *VTEC* توسط روش ریاضی در مقیاس جهانی با استفاده از اندازه‌گیری‌های *GPS* و *Swarm* و با در نظر گرفتن مدل *IRI2016* به عنوان مدل زمینه به صورت دو بعدی مدل‌سازی شده است. مأموریت *Swarm* به منظور ارائه همزمان اطلاعات مکان-زمان از میدان ژئومغناطیسی زمین و سیستم‌های فعلی در یونوسفر و مگنتوسفر[۴] طراحی شده است [۳۳]. این مأموریت شامل سه ماهواره ارتفاع پایین[۵] است که توسط آژانس فضایی اروپا[۶] در نوامبر ۲۰۱۳ در مدارات تقریباً قطبی به فضا پرتاب شد. داشتن مدارهای تقریباً قطبی امکان پایش قطب‌ها با پوشش مشاهداتی مناسب را ممکن می‌سازد. از اندازه‌گیری‌های یونوسفری *Swarm* برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های یونوسفری و تشخیص تکه‌های کلاهک قطبی[۷] نیز استفاده کردند [۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷ و ۳۸]. جهت بهبود مدل *IRI2016*، اندازه‌گیری‌های ۴۸۵ ایستگاه *IGS* با مشاهدات *Swarm* تلفیق شده است. جهت مدل‌سازی دو بعدی *VTEC*، یک مدل تک‌لایه[۸] مورد نیاز است. در این مدل، تمام الکترون‌های آزاد در یک لایه بی‌نهایت نازک در بالای سطح زمین در ارتفاع ثابت متمرکز می‌شوند [۳۹]. برای نمایش جهانی *VTEC* ها، از توابع بسط هارمونیک‌های کروی با درجه و مرتبه ۱۵ استفاده شده است. برای اجرای روش مد نظر، یک روز با ضریب *Kp*[۹] (شاخص فعالیت خورشیدی) بالا در حدود ۷ (۲۸ سپتامبر سال ۲۰۱۷) و یک روز با ضریب *Kp* پایین در حدود ۱ (سوم ژانویه سال ۲۰۱۸) انتخاب شده است و مدل‌های جهانی یونوسفری در فرمت *IONEX*[۱۰] با قدرت تفکیک مکانی ۲٫۵ درجه در عرض جغرافیایی و ۵ درجه در طول جغرافیایی و با قدرت تفکیک زمانی ۲ ساعت در طول روز به دست آمده‌اند [۴۰]. بایاس سیستماتیک هر ماهواره *Swarm* به عنوان یک پارامتر ثابت در هر اپک زمانی در نظر گرفته شد. برای بدست آوردن وزن نسبی دقیق گروه‌های مشاهداتی یونوسفری از روش تخمین مولفه واریانس

[۱] *Root Mean Square*
[۲] *Chen*
[۳] *Total Electron Content Unit*
[۴] *Magnetosphere*
[۵] *Low Earth Orbit*
[۶] *European Space Agency (ESA)*
[۷] *Polar cap patches*
[۸] *Single Layer Model*
[۹] *Kp-index*
[۱۰] *IONosphere map EXchange Format*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

هلمرت استفاده شده است و بایاس‌های سیستماتیک ماهواره‌های *Swarm* همراه با مقادیر *DCB* گیرنده‌ها و ماهواره‌ها به عنوان مجهولات اضافی در روش مدل‌سازی برآورد می‌شوند.

در این مقاله، انواع مشاهدات و نحوه استخراج *VTEC* از اندازه‌گیری‌های *GPS* و *Swarm* در بخش (۲) ارائه شده است. روش انجام پژوهش که شامل نمایش جهانی دو بعدی *VTEC* با استفاده از بسط هارمونیک‌های کروی، برآورد بایاس‌های سیستماتیک ماهواره‌های *Swarm*، نحوه تلفیق مشاهدات مختلف و پارامترهای ارزیابی مدل در بخش (۳) معرفی شده است. نتایج حاصل از این مطالعه، نقشه‌های ترکیبی *GIM* و *RMS* به دست آمده و خطای جذر میانگین مربعات[۱] *(RMSE)* مدل‌سازی در بخش (۴) مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته شد و در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش (۵) ارائه شده است.

۲- مشاهدات

در این بخش، ابتدا مدل *IRI* به عنوان مدل زمینه منتخب، توصیف شده است. سپس نحوه استخراج *VTEC* از اندازه‌گیری‌های *GPS* و *Swarm* بیان شده است. جزئیات هر یک از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه در ادامه ارائه شده است.

۲-۱- مدل *IRI*

پروژه مدل مرجع بین‌المللی یونوسفر *IRI*، توسط کمیته تحقیقات فضایی[۲] و اتحادیه بین‌المللی علوم رادیویی[۳] در اواخر دهه شصت با هدف تهیه مدل استاندارد بین‌المللی برای تعیین پارامترهای پلاسما در یونوسفر زمین توسعه یافته است. این مدل مبتنی بر داده‌های شبکه جهانی یونوسوندها، رادارهای پراکنشی گسسته، ژرفاسنج‌ها و ابزارهای موجود در چندین ماهواره و موشک می‌باشد و میانگین ماهانه چگالی الکترونی، دمای الکترون، دمای یون و ساختار یون را در محدوده ارتفاعی ۶۰ کیلومتر تا ۲۰۰۰ کیلومتر ارائه می‌دهد. همچنین می‌توان پارامترهای *VTEC*، احتمال پراکندگی لایه *F* و اثرات طوفان‌های یونوسفری بر چگالی‌های بیشینه لایه‌های *F* و *E* را به دست آورد. پارامترهای ورودی مدل *IRI* شامل شاخص‌های خورشید ی[۴] ، شاخص یونوسفر ی[۵] و شاخص مغناطیسی[۶] می‌باشند که توسط مدل *IRI* برای تاریخ و ساعت مورد نظر کاربر مشخص می‌شوند [۴۱, ۴۲]. در این مطالعه، از نقشه‌های جهانی *VTEC* مدل *IRI-2016* استفاده شده است که دارای قدرت تفکیک یکسان با نقشه‌های *VTEC* حاصل از *IGS* در فرمت *IONEX* می‌باشند [۴۰].

۲-۲- مشاهدات *GPS*

در این بخش، جهت به دست آوردن محتوای الکترون کلی مایل[۷] *(STEC)* از ترکیب خطی "مستقل از هندسه[۸] " در اندازه‌گیری‌های شبه فاصله کد و فاز موج حامل دو موج حامل L_1 (با فرکانس ۱۵۷۵,۴۲ = f_1 مگاهرتز) و L_2 (با فرکانس ۱۲۲۷,۶۰ = f_2 مگاهرتز) *GPS* استفاده می‌شود. جهت حذف ابهام فاز و کم کردن نویز مشاهدات کد، نرم‌نمودن مشاهدات یونوسفری کد با استفاده از مشاهدات یونوسفری فاز، روش مناسبی برای استخراج *STEC* می‌باشد. با تفاضل مشاهده مستقل از هندسه فاز موج حامل از میانگین مجموع دو مشاهده مستقل از هندسه شبه‌فاصله کد و فاز موج حامل برای هر ماهواره و گیرنده، در کمان

---

۱ *Root Mean Square Error*

۲ *Committee on Space Research (COSPAR)*

۳ *International Union of Radio Science (URSI)*

۴ *Solar indices*

۵ *Ionospheric index*

۶ *Magnetic index*

۷ *Slant Total Electron Content*

۸ *Geometry-Free Linear Combination*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

پیوسته‌ای که در آن جهش فاز رخ نداده است، مشاهده یونوسفری کد نرم شده دقیق و مستقل از ابهام فاز حاصل می‌شود که توسط رابطه(۱) محاسبه می‌شود . [۴۳]

رابطه(۱)

$$\tilde{P}_4 = \langle P_4 + \Phi_4 \rangle_{arc} - \Phi_4 \approx I_1 - I_2 + br + bs + \langle \varepsilon_P \rangle_{arc} - \varepsilon_L$$

با جای‌گذاری تاخیر یونوسفری بر حسب *STEC* در رابطه (۱)، رابطه (۲) حاصل می‌شود و *STEC* طبق رابطه (۳) با واحد *TECU*، قابل برآورد خواهد بود.

رابطه(۲)

$$\tilde{P}_4 = STEC\,40.3\left(\frac{f_2^2 - f_1^2}{f_1^2 f_2^2}\right) + br + bs + \langle \varepsilon_P \rangle_{arc} - \varepsilon_L$$

رابطه(۳)

$$STEC = \left(\tilde{P}_4 - br - bs - \langle \varepsilon_P \rangle_{arc} + \varepsilon_L\right) \frac{f_1^2 f_2^2}{40.3\left(f_2^2 - f_1^2\right)}$$

در رابطه (۳)، *br* و *bs* بایاس داخل فرکانسی تفاضلی ناشی از تاخیر سخت‌افزاری ماهواره و گیرنده *GPS* در مشاهدات شبه‌فاصله کد، I_1 و I_2 تأخیرهای یونوسفری در *L1* و *L2*، P_4 و Φ_4 ترکیب خطی مستقل از هندسه مشاهدات شبه‌فاصله کد و فاز موج حامل، در کمان پیوسته‌ای که در آن جهش فاز رخ نداده است می‌باشند. ε_P و ε_L به ترتیب اثرات نویز و چند مسیری مشاهدات شبه فاصله کد و فاز موج حامل می‌باشند. رابطه(۳) نشان‌دهنده تأثیر *DCB*های گیرنده و ماهواره بر *STEC*های حاصل از اندازه‌گیری‌های *GPS* است [۴۴] که به عنوان پارامترهای مجهول اضافی در روش مدل‌سازی در نظر گرفته می‌شوند (روابط (۲۲) تا (۲۵)).

برای مدل‌سازی دو بعدی *VTEC* مطلق با استفاده از مشاهدات *GPS*، *STEC* باید در راستای قائم در نظر گرفته شود و مقادیر *STEC* با استفاده از تابع تصویر، به *VTEC* تبدیل شوند. برای این منظور، تابع تصویر تک‌لایه اصلاح شده[۱] *(MSLM)*، از مرکز تعیین مدار در اروپا[۲] مطابق رابطه (۴) و (۵) استفاده شده است.

رابطه(۴)

$$mf(z) = \frac{STEC}{VTEC} = \frac{1}{\cos z'}$$

به طوری که:

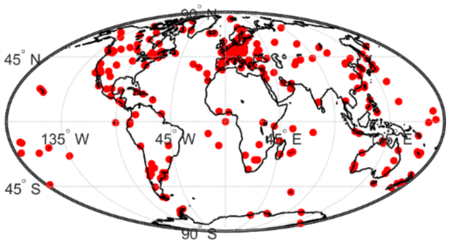
رابطه(۵)

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

در روابط(۴) و (۵)، *H* = ۵۰۶/۷ کیلومتر، α = ۰/۹۷۸۲، *R* = ۶۳۷۱ کیلومتر، *z* زاویه زنیتی ماهواره *GPS* در ایستگاه زمینی است و *z'* زاویه زنیتی ماهواره *GPS* در نقطه نفوذ یونوسفری[۳] *(IPP)* است (*IPP* تقاطع بین مسیر سیگنال ارسال شده از ماهواره *GPS* به گیرنده و ارتفاع پوسته‌ی لایه یونوسفری می‌باشد) [۳۹و۴۵].

برای محاسبه نقشه‌های *GIM* در هر روز، از اندازه‌گیری‌های ۴۸۵ ایستگاه *IGS* با فاصله نمونه‌برداری ۳۰ ثانیه و زاویه ارتفاعی بیشتر از ۱۰ درجه استفاده شده است.

شکل(۱) توزیع جهانی ایستگاه‌های منتخب را در این مطالعه نشان می‌دهد.



شکل۱: توزیع جهانی ایستگاه‌های *IGS* مورد استفاده در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸

[۱] *Modified Single Layer Model*

[۲] *Center for Orbit Determination in Europe (CODE)*

[۳] *Ionosphere precise point*

۲-۳- مشاهدات ماهواره‌های Swarm

ماموریت *Swarm* شامل سه ماهواره *Swarm-A*، *Swarm-B* و *Swarm-C* توسط آژانس فضایی اروپا در اواخر سال ۲۰۱۳، پرتاب شده است. اهداف اصلی مأموریت *Swarm* مطالعه میدان ژئومغناطیسی، جریان‌های الکتریکی در مگنتوسفر و یونوسفر و تأثیر باد خورشیدی بر دینامیک جو فوقانی است [۳۳, ۴۶]. ماهواره‌های *Swarm* در مدارات تقریباً قطبی به دور زمین می‌چرخند. به طور خاص، ماهواره‌های *A* و *C* در دو مدار بسیار نزدیک به هم در یک ارتفاع حدود ۴۶۲ کیلومتری با زاویه میل ۸۷/۳۵ درجه (با فاصله ۱/۴ درجه در طول جغرافیایی) و ماهواره *B* در ارتفاع حدود ۵۱۱ کیلومتری با زاویه میل ۸۷/۷۵ درجه پرواز می‌کنند. همه ماهواره‌های *Swarm* به ابزارهای یکسانی متشکل از گیرنده‌های *GPS* و سنسورهایی با قدرت تفکیک بالا برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی و الکتریکی و تراکم پلاسما مجهز هستند [۳۷و۴۷]. مأموریت *Swarm* در محصولات سطح ۲ (*Level 2 products*)، پارامتر *TEC* را ارائه می‌دهد که شامل *STEC* و *VTEC* مشاهده شده برای هر سه ماهواره است. در این کار، ما از اندازه‌گیری‌های *TEC* سطح ۲ داده‌های *Swarm* استفاده کردیم که به صورت رایگان در *https://swarm-diss.eo.esa.int* قابل دسترسی می‌باشد. سیگنال‌های ارسال‌شده توسط ماهواره‌های *GNSS* قبل از رسیدن به آنتن *GNSS* ماهواره‌های *Swarm* توسط الکترون‌های یونوسفر به تأخیر می‌افتند. از تاخیر سیگنال *GNSS*، می‌توان *STEC* نسبی را در راستای خط دید از ماهواره‌های *Swarm* به ماهواره‌های *GNSS*، به صورت رابطه (۶) برآورد کرد [۴۸]. در رابطه(۶)، f_1 و f_2 فرکانس‌های دو موج حامل سیگنال‌های *GNSS*، L_1 و L_2 مشاهدات فاز موج حامل با ابهام فاز تصحیح شده هستند. پس از اعمال بایاس داخل فرکانسی تفاضلی کد از فرستنده‌های ماهواره *GNSS* و گیرنده‌های *Swarm*، *STEC* نسبی تبدیل به *STEC* مطلق می‌شود. سپس، *VTEC* مطلق را می‌توان با توجه به روابط(۷) تا (۹) برآورد نمود:

رابطه(۶)
$$STEC = \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\frac{L_1 - L_2}{K}$$

رابطه(۷)
$$VTEC = STEC \times M(e)$$

رابطه(۸)
$$M(e) = \frac{H_{mapping}}{R_{Sw} + H_{mapping}}\left[\cos\left(\sin^{-1}\left(r \times \cos e\right)\right) - r \times \sin e\right]^{-1}$$

رابطه(۹)
$$r = \frac{R_{Sw}}{R_{Sw} + H_{mapping}}$$

در روابط(۷) تا (۹)، $M(e)$ تابع تصویر، R_{Sw} شعاع ماهواره *Swarm*، e زاویه ارتفاعی ماهواره *GNSS* به ماهواره *Swarm* می‌باشد. همچنین $H_{mapping}$ معادل با ۴۰۰ کیلومتر درنظر گرفته شده است [۴۸ و ۴۹] .

باید در نظر داشت مقادیر *VTEC* به دست آمده از محصولات سطح ۲ ماهواره‌های *Swarm* کمتر از مقادیر *VTEC* دریافت شده از مشاهدات *GPS* می‌باشد. زیرا بر خلاف *GPS*، ماهواره‌های *Swarm* به دلیل ارتفاع پایین مدار و نمونه‌برداری از پارامترهای یونوسفر در راستای

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

خط دید از ماهواره *Swarm* به ماهواره‌های *GPS*، توانایی پایش لایه *F2* یونوسفر را به صورت کامل ندارند. تفاوت بین *VTEC* های حاصل از *Swarm* و *GPS* به عنوان بایاس سیستماتیک شناخته می‌شود. در این مطالعه، هر ماهواره *Swarm* به عنوان یک گروه مشاهده در نظر گرفته شده است و سه ماهواره سه پارامتر مجهول را به عنوان ضرایب بایاس سیستماتیک در روش مدل‌سازی اضافه می‌کنند. همچنین نحوه برآورد *VTEC* ها برای *GPS* و *Swarm*، وابسته به نوع تابع تصویر می‌باشد. برای حل این مسئله، *STEC* های مطلق محصولات سطح ۲ را می‌توان با استفاده از تابع تصویر *MSLM* به *VTEC* مطلق تبدیل کرد (رابطه(۴)). با این کار تفاوت‌های جزئی بین *VTEC* های سطح ۲ و *VTEC* های به دست آمده از *MSLM* در محدوده *[۰/۰۳ ، ۲/۹۰] TECU* حاصل می‌شود که می‌توان این تفاوت‌ها را به عنوان بخشی از بایاس سیستماتیک بین *GPS* و *Swarm* برآورد و اصلاح نمود [۵۰].

۳- روش

در این بخش، نقشه‌های جهانی یونوسفر ترکیبی (*GIM* های ترکیبی) با استفاده از مشاهدات *VTEC* حاصل از *GPS* و ماموریت *Swarm* با در نظر گرفتن مدل *IRI2016* به عنوان مدل زمینه ساخته شده است. این قسمت از سه بخش کلی تشکیل شده است : در بخش (۳-۱)، روابط مدل‌سازی اختلاف بین *VTEC* های حاصل از *GPS* و *Swarm* و مدل زمینه *IRI2016* با استفاده از بسط هارمونیک‌های کروی نشان داده می‌شود، سپس نحوه اضافه شدن دیگر پارامترهای مجهول مدل‌سازی به روابط در بخش (۳-۲) بیان می‌شوند، در بخش (۳-۳)، نحوه تلفیق مشاهدات با استفاده از روش تخمین پارامترهای مجهول ارائه می‌شود و در نهایت در بخش (۳-۴) روابط ارزیابی دقت نتایج مدل‌سازی، بیان می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی VTEC ها بر اساس بسط هارمونیک‌های کروی

برای ایجاد یک مدل جهانی یونوسفری، *VTEC* باید به عنوان تابعی از طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و زمان، یا مطابق تعریف سیستم مختصات خورشید-ثابت (*Sun-fixed*)، به عنوان تابعی از عرض ژئومغناطیسی β و طول *Sun-fixed* نمایش داده شود. جهت مدل‌سازی ابتدا مطابق رابطه (۱۰)، *VTEC* به دو بخش معلوم($VTEC_{ref}$) و بخش تصحیحات ($\Delta VTEC$) تقسیم می‌شود. بخش معلوم *VTEC* از مدل تجربی *IRI2016*استخراج شده و بخش تصحیحات مطابق رابطه (۱۱) مدل‌سازی می‌شود.

با اعمال بسط هارمونیک‌های کروی به $\Delta VTEC$ در سیستم مختصات *Sun-fixed*، مدل‌سازی مطابق با رابطه(۱۱) انجام می‌شود؛ به طوری که n و m درجه و مرتبه بسط با حداکثر مقادیر $n_{\max}$ و $m_{\max}$، $\tilde{P}_{nm} = N_{nm}P_{nm}$ تابع لژاندر نرمال شده از درجه n و مرتبه m، N_{nm} تابع نرمالیزه، P_{nm} تابع لژاندر کلاسیک و a_{nm} و b_{nm} ضرایب هارمونیک‌های کروی هستند و واحد *VTEC* بر حسب *TECU* می‌باشد [۳۹].

در این مطالعه قدرت تفکیک نقشه‌های *GIM* ترکیبی با هارمونیک‌های کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ کنترل می‌شود و قدرت تفکیک زمانی دو ساعت می‌باشد [۵۱].

۳-۲- سایر پارامترهای مجهول مدل ارائه شده

همانطور که در بخش (۲-۲) گفته شد، به دلیل ارتفاعات مداری متفاوت *GPS* و *Swarm*، بایاس سیستماتیک *VTEC* مربوط به ماهواره‌های *Swarm* باید در نظر گرفته شود. بایاس سیستماتیک *Swarm* به صورت رابطه(۱۲) بیان می شود. در رابطه(۱۲)، $VTEC_{obs}^{satellite}$، *VTEC* مشاهداتی حاصل از ماهواره‌های *Swarm* می‌باشد. $Bias^{satellite}$ بایاس سیستماتیک است. مطابق رابطه (۱۰)، *VTEC* های مشاهداتی به دو بخش معلوم و تصحیح تقسیم می‌شوند (رابطه(۱۳). در

رابطه(۱۳)، $Bias^{satellite}$ و $\Delta VTEC_{obs}^{satellite}$ به ترتیب، بایاس سیستماتیک و اختلاف VTEC مشاهداتی ماهواره‌های Swarm از مدل IRI می‌باشند.

$$VTEC(\varphi,\lambda) = VTEC_{ref}(\varphi,\lambda) + \Delta VTEC(\varphi,\lambda) \quad \text{رابطه(۱۰)}$$

$$\Delta VTEC(\beta,s) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{n} \tilde{P}_{nm}(\sin\beta)\left(a_{nm}\cos(ms) + b_{nm}\sin(ms)\right) \quad \text{رابطه(۱۱)}$$

$$VTEC^{satellite}(\beta,s) = VTEC_{obs}^{satellite}(\beta,s) + Bias^{satellite}(\beta,s) \quad \text{رابطه(۱۲)}$$

$$\Delta VTEC^{satellite}(\beta,s) = \Delta VTEC_{obs}^{satellite}(\beta,s) + Bias^{satellite}(\beta,s) \quad \text{رابطه(۱۳)}$$

در این مطالعه، بایاس‌های سیستماتیک به عنوان پارامترهای ثابت در هر اپک مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه بایاس‌های سیستماتیک سه ماهواره Swarm و DCB های گیرنده‌ها و ماهواره‌های GPS به عنوان دیگر پارامترهای مجهول مدل‌سازی در نظر گرفته شده‌اند (با اعمال شرط میانگین صفر (Zero-mean condition) بر روی DCB ماهواره‌ها [۳۱]). این مجهولات به همراه سایر مجهولات مدل‌سازی (ضرایب هارمونیک‌های کروی مدل) با استفاده از روش تخمین مولفه واریانس هلمرت، برآورد شده‌اند (بخش ۳-۳).

۳-۳- تخمین مولفه واریانس هلمرت

همانطور که قبلاً اشاره کردیم، هدف از این مطالعه ادغام مشاهدات VTEC حاصل از GPS و Swarm جهت افزایش دقت و صحت مدل IRI است. از آنجایی که این منابع VTEC از نظر مشاهده و دقت متفاوت هستند، تعیین وزن نسبی بین انواع مختلف مشاهدات ماهواره‌ای مهم است. یکی از رویکردهایی که در تلفیق مشاهدات چند سنسور استفاده می‌شود، روش تخمین مولفه واریانس (*Variance Component Estimation* (*VCE*)) است. روش کمترین مربعات، هلمرت و حداکثر احتمال (*Maximum Likelihood Estimation* (*MLE*))، از جمله روش‌های متفاوت تخمین مولفه واریانس هستند [۵۲]. در این تحقیق، تخمین مولفه واریانس هلمرت به عنوان روشی برای تلفیق VTEC ها و برآورد پارامترهای مجهول در نظر گرفته شده است. همچنین برای افزایش سرعت محاسبه، ستون‌های صفر ماتریس‌های طرح حذف شده‌اند [۲۷ و ۲۸]. روابط روش برآورد مجهولات طبق روابط(۱۴) تا (۱۶) است.

$$N_{COMB} = \frac{1}{\sigma_{GPS}^2} A_{GPS}^{'} A_{GPS} + \frac{1}{\sigma_{Swarm-A}^2} A_{Swarm-A}^{'} A_{Swarm-A} + \frac{1}{\sigma_{Swarm-B}^2} A_{Swarm-B}^{'} A_{Swarm-B} + \frac{1}{\sigma_{Swarm-C}^2} A_{Swarm-C}^{'} A_{Swarm-C} \quad \text{رابطه(۱۴)}$$

$$L = \frac{1}{\sigma_{GPS}^2} A_{GPS}^{'} y_{GPS} + \frac{1}{\sigma_{Swarm-A}^2} A_{Swarm-A}^{'} y_{Swarm-A} + \frac{1}{\sigma_{Swarm-B}^2} A_{Swarm-B}^{'} y_{Swarm-B} + \frac{1}{\sigma_{Swarm-C}^2} A_{Swarm-C}^{'} y_{Swarm-C} \quad \text{رابطه(۱۵)}$$

$$x = N^{-1}{}_{comb} L$$ رابطه(۱۶)

در روابط(۱۴) تا (۱۶)، A_{GPS}، $A_{Swarm-A}$، $A_{Swarm-B}$ و $A_{Swarm-C}$، به ترتیب ماتریس‌های طرح مشاهدات GPS و $Swarm$ هستند (رابطه‌های (۱۷) تا (۲۰)). σ^2_{GPS}، $\sigma^2_{Swarm-A}$، $\sigma^2_{Swarm-B}$ و $\sigma^2_{Swarm-C}$ واریانس هر گروه مشاهده و y_{GPS}، $y_{Swarm-A}$، $y_{Swarm-B}$ و $y_{Swarm-C}$ به ترتیب مشاهدات $\partial\Delta VTEC$ هر نوع (اختلاف $VTEC$ حاصل از GPS و $Swarm$ از مدل زمینه IRI) هستند.

همچنین x برآوردی از پارامترهای مجهول است. ماتریس‌های طرح هر دسته از مشاهدات به صورت روابط(۱۷) تا (۲۰) است.
برای $VTEC$ های مشاهداتی (GPS و سه ماهواره $Swarm$)، ماتریس طرح ضرایب هارمونیک‌های کروی (M_1) مطابق رابطه (۲۱) محاسبه می‌شود.

$$A_{GPS} = \left[M_1 \quad | M_2 \quad M_3 \right]$$ رابطه(۱۷)

$$A_{Swarm-A} = \left[M_1 \quad | Bias_1 \right]$$ رابطه(۱۸)

$$A_{Swarm-B} = \left[M_1 \quad | Bias_2 \right]$$ رابطه(۱۹)

$$A_{Swarm-C} = \left[M_1 \quad | Bias_3 \right]$$ رابطه(۲۰)

$$M_1 = \left[\frac{\partial \Delta VTEC}{\partial a_{nm}} \quad \cdots \quad \frac{\partial \Delta VTEC}{\partial b_{nm}} \right]$$ رابطه(۲۱)

برای $VTEC$ های مشاهداتی GPS ($\Delta VTEC$ در رابطه(۱۱))، ماتریس‌های طرح DCB ها (M_2 و M_3) به صورت روابط (۲۲) و (۲۳) تعیین می‌شوند.

در یک روش تکراری، واریانس با واحد $TECU^2$ را می‌توان به صورت رابطه(۲۶) تعیین کرد.

$$M_2 = \left[\frac{\partial \Delta VTEC}{\partial br_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial \Delta VTEC}{\partial br_{Nr}} \right]$$ رابطه(۲۲)

$$M_3 = \left[\frac{\partial \Delta VTEC}{\partial bs_1} \quad \cdots \quad \frac{\partial \Delta VTEC}{\partial bs_{NS}} \right]$$ رابطه(۲۳)

به طوری که:

$$\frac{\partial VTEC}{\partial br} = -\frac{f_1^2 f_2^2}{40.3\left(f_2^2 - f_1^2\right)} \times \cos\left(z'\right)$$ رابطه(۲۴)

$$\frac{\partial VTEC}{\partial bs} = -\frac{f_1^2 f_2^2}{40.3\left(f_2^2 - f_1^2\right)} \times \cos\left(z'\right)$$ رابطه(۲۵)

$$\sigma_i^2 = \frac{e_i^t p_i e_i}{df}$$ رابطه(۲۶)

در روابط(۲۲) تا (۲۶)، e_i بردار باقیمانده برای هر نوع مشاهدات، p_i ماتریس وزن مربوطه و df درجه آزادی است. در ابتدا وزن نسبی اولیه مشاهده برابر با یک در نظر گرفته می‌شود و سپس، در هر تکرار، وزن نسبی

انواع مختلف مشاهده با استفاده از رابطه (۱۴) به روز می‌شود. و پس از محاسبه ماتریس نرمال ترکیبی (N_{COMB} و L)، پارامترهای مجهول برآورد می‌شوند [۵۲]. این روند تکراری تا رسیدن به همگرایی در وزن نسبی (اختلاف دو وزن نسبی متوالی کمتر از 10^{-6}) ادامه می‌یابد. گروه مشاهدات با مقادیر بیشتر در وزن نسبی، نشان دهنده تاثیر بیشتر آن گروه مشاهدات در برآورد پارامترهای مجهول بوده و منجر به بردار باقی‌مانده کمتری می‌شود.

۳-۴- پارامترهای ارزیابی

جهت محاسبه دقت پارامتر برآورد شده $\Delta V\hat{TEC}$ در رابطه (۱۱)، از اعمال قانون انتشار واریانس- کوواریانس به بسط هارمونیک‌های کروی استفاده شده است. با در نظر گرفتن مقدار برآورد شده $\Delta V\hat{TEC}$ و تکرار رابطه(۱۱) داریم (رابطه(۲۷)):

رابطه(۲۷)

$$\Delta V\hat{TEC}(\beta,s)=\sum_{n=0}^{n_{max}}\sum_{m=0}^{n}\tilde{P}_{nm}(\sin\beta)\left(\hat{a}_{nm}\cos(ms)+\hat{b}_{nm}\sin(ms)\right)$$

با توجه به خطی بودن رابطه (۲۷) نسبت به مجهولات، می‌توان رابطه بالا را در فرم ماتریسی به صورت رابطه(۲۸) نوشت:

$$\Delta V\hat{TEC}(\beta,s)=Fx \qquad \text{(۲۸)رابطه}$$

به طوری که:

رابطه(۲۹)

$$F^T=\begin{bmatrix}\cdots & \dfrac{\partial\Delta V\hat{TEC}}{\partial\hat{a}_{nm}} & \dfrac{\partial\Delta V\hat{TEC}}{\partial\hat{b}_{nm}} & \cdots\end{bmatrix}_{1\times(n+1)^2}$$

$$x=\begin{bmatrix}\cdots & \hat{a}_{nm} & \hat{b}_{nm} & \cdots\end{bmatrix}_{1\times(n+1)^2} \qquad \text{(۳۰)رابطه}$$

در روابط بالا، x بردار پارامترهای مجهول و F بردار مشتقات جزئی است. با اعمال قانون انتشار واریانس- کوواریانس برای رابطه (۲۸)، خواهیم داشت:

$$C_{V\hat{TEC}}=F^T\hat{C}xF \qquad \text{(۳۱)رابطه}$$

که در رابطه(۳۱)، $C_{\hat{x}}$ ماتریس کوواریانس پارامترهای مجهول سرشکن شده مدل مطابق رابطه(۳۲) می‌باشد:

$$C_{\hat{x}}=\hat{\sigma}^2_{Comb}N^{-1}_{Comb} \qquad \text{(۳۲)رابطه}$$

در نهایت، جذر میانگین مربعات $C_{V\hat{TEC}}$ که اصطلاحاً *RMS* شناخته می‌شود، از رابطه(۳۳) به دست می‌آید:

$$RMS_{V\hat{TEC}}=\sqrt{F^T\hat{C}xF} \qquad \text{(۳۳)رابطه}$$

مقدار $RMS_{V\hat{TEC}}$ در هر نقطه بیانگر دقت $\Delta V\hat{TEC}$ برآورد شده در آن نقطه است. مقادیر *RMS* معمولاً در نقشه‌های جهانی شبکه‌ای معروف به نقشه‌های *RMS* بوده و همراه با نقشه‌های جهانی مقادیر برآورد شده ارائه می‌شوند [۵۳].

برای مقایسه نقشه‌های *GIM* به‌دست آمده با نقشه‌های *GIM* حاصل از *IGS* و در نتیجه بررسی میزان بهبود دقت مدل *IRI2016*، از پارامتر *RMSE* استفاده گردیده است که توسط رابطه(۳۴) محاسبه می‌شود:

رابطه(۳۴)

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(VTEC_{i,GIM}-VTEC_{i,ref}\right)^2}$$

در رابطه(۳۴)، $VTEC_{i,GIM}$، *VTEC* حاصل از نقشه‌های جهانی توسط مدل ارائه شده، $VTEC_{i,ref}$ مشاهدات *VTEC* نقشه‌های *GIM* حاصل از *IGS*، *N* تعداد کل *VTEC* برآورد شده در بازه زمانی دو ساعته است [۲۹].

۴- بحث و نتایج

در این بخش خروجی‌های روش پیشنهادی برای ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ (روز از سال[۱] *(DOY)* ۲۷۱) و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ (۰۰۳ *DOY*) که به ترتیب دارای ضرایب *Kp* ۷ و ۱ می‌باشند، آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب مشاهدات دو ماموریت می‌تواند به طور موثری مدل تجربی *IRI2016* را بهبود داده و مقادیر خطای مدل‌سازی را به ویژه در مناطق جنوبی و اقیانوس‌ها کاهش دهد.

۴-۱- مشاهدات *GPS*

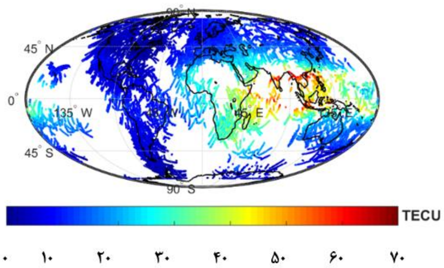
توزیع جهانی نقاط *IPP* اندازه‌گیری‌های *GPS* بین ساعت ۰۸:۰۰ تا ۱۰:۰۰ *UT* روز ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷،

[۱] *Day Of Year*

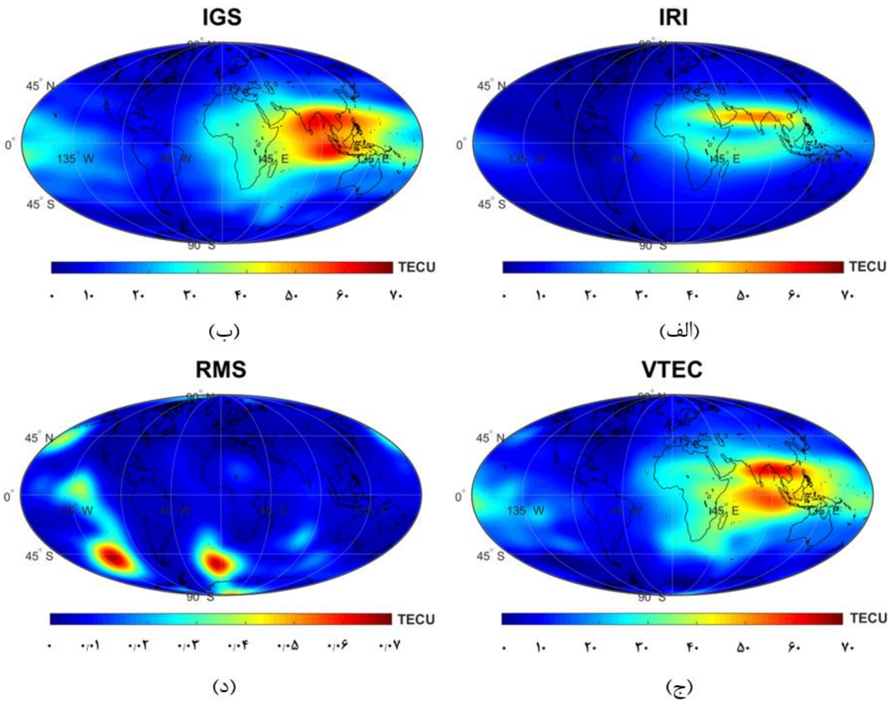
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

در شکل(۲) نشان داده شده است. کمبود مشاهدات *TEC* حاصل از *GPS* در اقیانوس‌ها و مناطق جنوبی، منجر به دقت پایین‌تر مدل‌سازی *VTEC* در این مناطق نسبت به سایر مناطق می‌شود.

شکل(۳) نشان‌دهنده نقشه *GIM* حاصل از مشاهدات *GPS* به همراه نقشه *RMS* مربوطه، مدل *IRI2016* به عنوان مدل زمینه و نقشه *GIM* حاصل از *IGS* در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ در ساعت ۰۹:۰۰ *UT* است. بر اساس این شکل، دقت نقشه حاصل از مدل‌سازی در اقیانوس‌ها و مناطق جنوبی در شکل (۳-د) کمتر است، زیرا هیچ ایستگاه *IGS* در آن مناطق وجود ندارد. حداکثر خطای *RMS* ۰٫۶۸ *TECU* با میانگین ۰٫۱۰ *TECU* است. همچنین خطای *RMSE* مدل از ۸٫۵۲ *TECU* به ۳٫۰۱ *TECU* کاهش یافته است و با افزودن مشاهدات *GPS*، مدل تجربی *IRI2016* به طور چشمگیری بهبود یافت.



شکل ۲: توزیع نقاط *IPP* برای یک فاصله زمانی دو ساعته بین ۰۸:۰۰ *UT* تا ۱۰:۰۰ *UT* در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷



شکل ۳: الف) مدل *IRI2016* ، ب)نقشه *GIM* حاصل از *IGS*، ج)نقشه *GIM* حاصل از مدل‌سازی با استفاده از مشاهدات *GPS* و د) نقشه *RMS* مدل‌سازی در ساعت ۰۹:۰۰ *UT* در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷.

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

۴-۲- مشاهدات *GPS* و *Swarm*

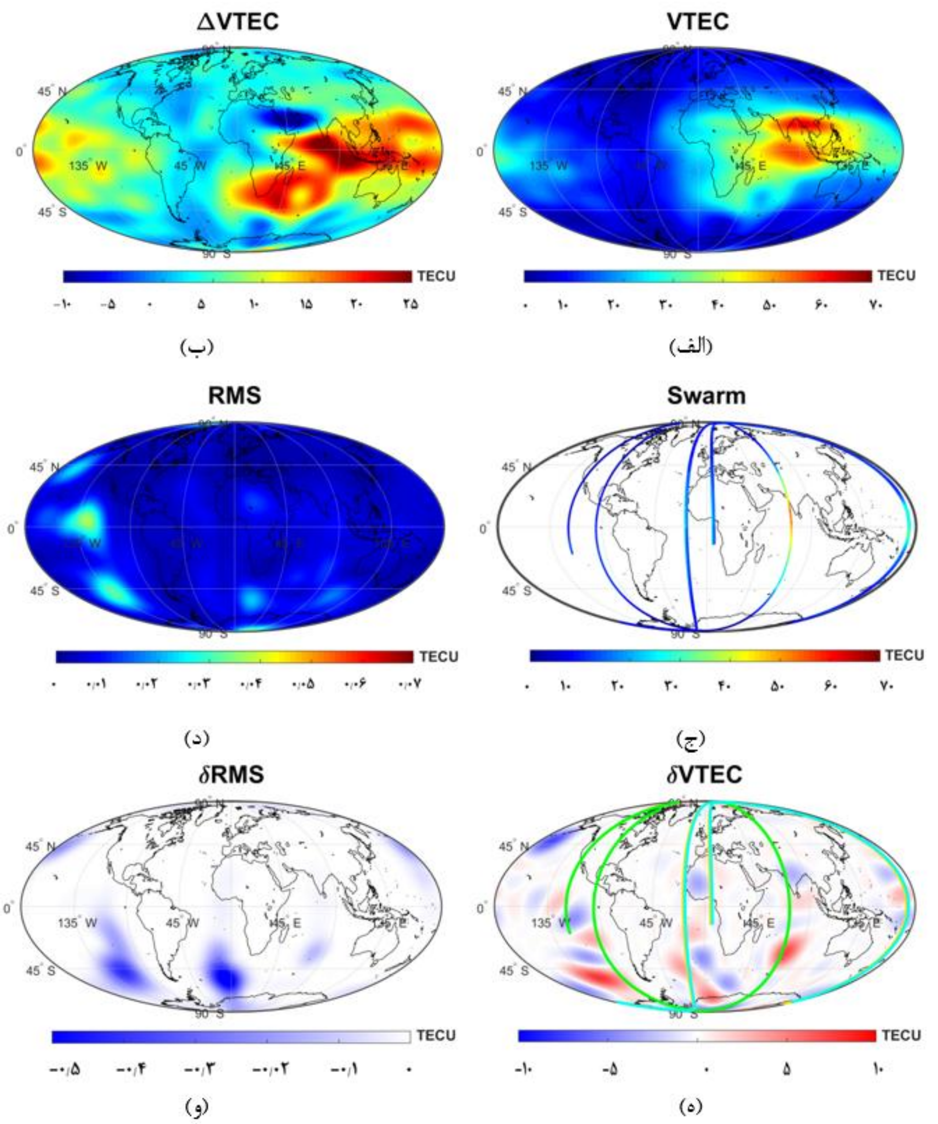
در این بخش، مشاهدات یونوسفری *Swarm* و *GPS* با استفاده از روش تخمین مولفه واریانس هلمرت برای محاسبه نقشه‌های *GIM* ترکیبی در روز تلفیق شده‌اند. همانطور که در بخش (۳-۲) ذکر شد، بایاس‌های سیستماتیک به عنوان پارامترهای ثابت در هر اپک مدل‌سازی در نظر گرفته شده و با سایر پارامترهای مجهول مدل (ضرایب هارمونیک‌های کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ و مقادیر *DCB* ها) تخمین زده شده‌اند. وزن نسبی *GPS* و سه ماهواره *Swarm* به ترتیب ۰٫۲۲، ۰٫۲۳، ۰٫۱۴ و ۰٫۲۵، با واحد $1/TECU^2$ به دست آمده‌اند. شکل (۴) نقشه‌های *GIM* و *RMS* ترکیبی، نقشه $\Delta VTEC$ تخمین زده شده (بخش تصحیح)، مقادیر *VTEC* ماهواره‌های *Swarm* با بایاس سیستماتیک اعمال شده به همراه تغییرات نقشه‌های *GIM* و *RMS* را بین دو حالت مدل‌سازی با تلفیق مشاهدات *GPS* و *Swarm* به طور همزمان جهت بهبود مدل *IRI2016* و مدل‌سازی با داده‌های *GPS* به تنهایی جهت بهبود مدل *IRI2016* در ۰۹:۰۰ *UT* در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۴-ه) مشاهده می‌شود، افزودن مشاهدات *Swarm* علاوه بر مشاهدات *GPS* می‌تواند مقادیر *VTEC* را در اقیانوس‌ها و مناطقی که مشاهدات *Swarm* در دسترس است تغییر دهد. حداکثر کاهش مقادیر *VTEC* حدود ۹ *TECU* در جنوب اقیانوس اطلس و حداکثر افزایش حدود ۸ *TECU* در قطب جنوب است. در شکل (۴-و)، میانگین کاهش *RMS* حدود ۰٫۰۳ *TECU* و حداکثر کاهش ۰٫۵۳ *TECU* در مناطق جنوبی برآورد شده است. همچنین مقدار خطای *RMSE* تقریبا ۰٫۵۷ *TECU* کاهش یافت. ارزیابی‌های عددی نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند مدل *IRI* را با ادغام داده‌های *Swarm* و *GPS* بهبود بخشد.

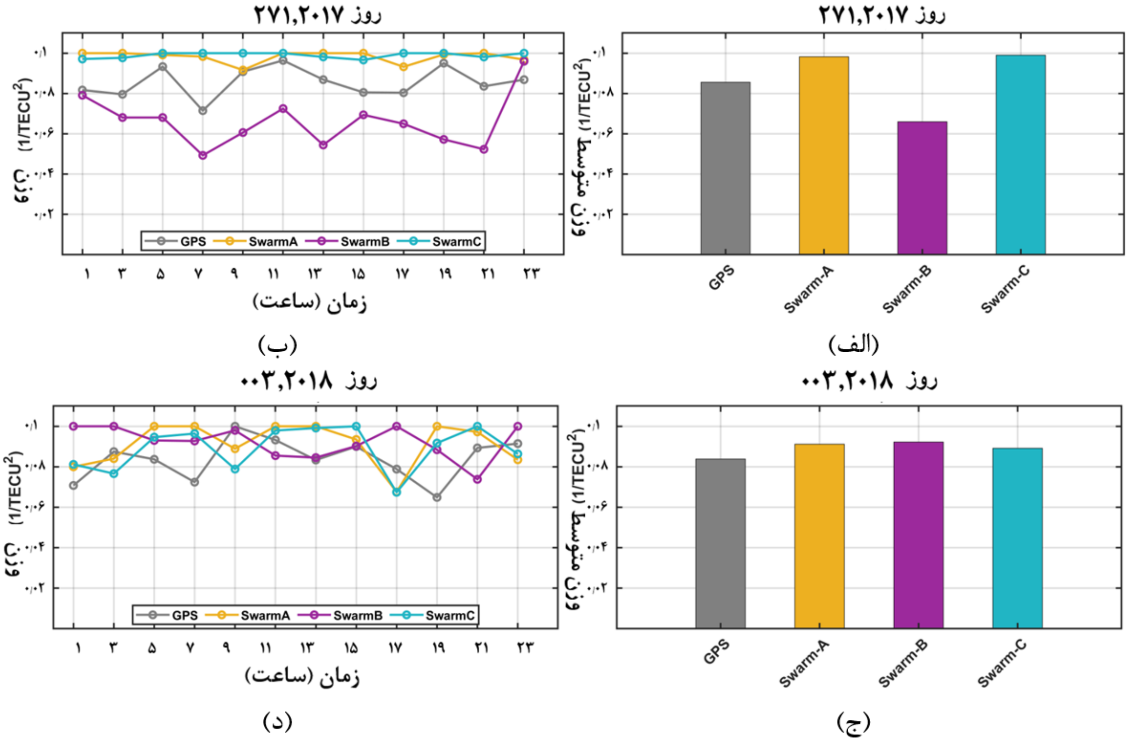
شکل (۵) وزن نسبی مشاهدات نرمالیز شده *GPS* و سه ماهواره‌ی *Swarm* را با روش مدل سازی ارائه شده در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ نشان می‌دهد.
از مقایسه وزن‌های محاسباتی چهار گروه مختلف (شامل سه ماهواره *Swarm* و *GPS*) با استفاده از روش تخمین مولفه واریانس هلمرت، می‌توان دریافت که *Swarm-C* و *Swarm-B* به ترتیب دارای بیشترین و کمترین وزن نسبی نرمالیز در رور ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ می‌باشند. همچنین *Swarm-B* و *GPS* به ترتیب دارای بیشترین و کمترین وزن نسبی نرمالیز در روز ۳ ژانویه ۲۰۱۸ می‌باشند. وزن نسبی نرمالیز بیشتر ماهواره‌های *Swarm* نشان می‌دهد که نقشه‌های نهایی *GIM* ترکیبی در مناطقی که مشاهدات *Swarm* حضور دارند، بیشتر تحت تأثیر داده‌های *Swarm* قرار می‌گیرند و بردار باقی مانده مشاهدات *Swarm* کوچکتر خواهد بود[۲۶].

میانگین مقادیر *RMS* برای ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ در شکل (۶) نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با تلفیق مشاهدات *Swarm* با مشاهدات *GPS*، سری زمانی میانگین *RMS* نسبت به حالت مدل‌سازی با استفاده از مشاهدات *GPS*، به صورت میانگین ۰٫۰۳۰ *TECU* معادل ۳۴ درصد در روز ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۰٫۰۲۷ *TECU* معادل ۳۰ درصد در روز ۳ ژانویه ۲۰۱۸، کاهش یافت. در نتیجه تلفیق مشاهدات *Swarm* با *GPS*، می‌تواند دقت و قابلیت اطمینان نقشه‌های جهانی یونوسفر و در نتیجه دقت و قابلیت اطمینان مدل *IRI2016* را افزایش دهد.

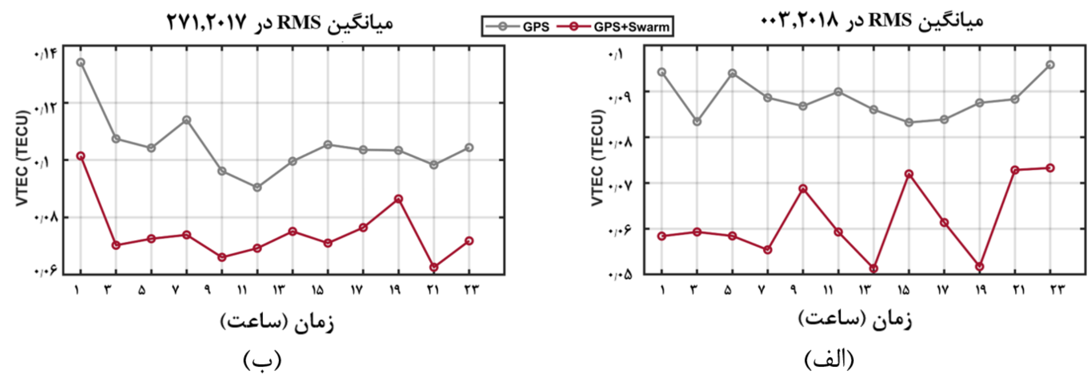
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]



شکل ۴: الف) نقشه *GIM* ترکیبی ، ب) *ΔVTEC* تخمین زده شده، ج) مقادیر *VTEC* ماهواره های *Swarm* با بایاس سیستماتیک اعمال شده، د) نقشه *RMS* ترکیبی، ه) اختلاف نقشه‌های *GIM* و د) اختلاف نقشه‌های *RMS* بین حالت مدل‌سازی با تلفیق داده‌های *Swarm* و *GPS* و حالت مدل‌سازی با داده‌های *GPS* در ساعت ۰۹:۰۰ *UT* در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ (در شکل (۴-ج)، رنگ زرد، سبز و فیروزه‌ای به ترتیب ردپاهای ماهواره‌های *Swarm-A*، *Swarm-B* و *Swarm-C* بین ساعت ۸:۰۰ تا ۱۰:۰۰ *UT* می‌باشند).



شکل ۵: الف) وزن نسبی نرمالیز شده چهار گروه مشاهداتی و ب) میانگین وزن نسبی هر گروه مشاهداتی طی ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷، ج) وزن نسبی نرمالیز شده چهار گروه مشاهداتی و د) میانگین وزن نسبی هر گروه مشاهداتی طی ۳ ژانویه ۲۰۱۸.



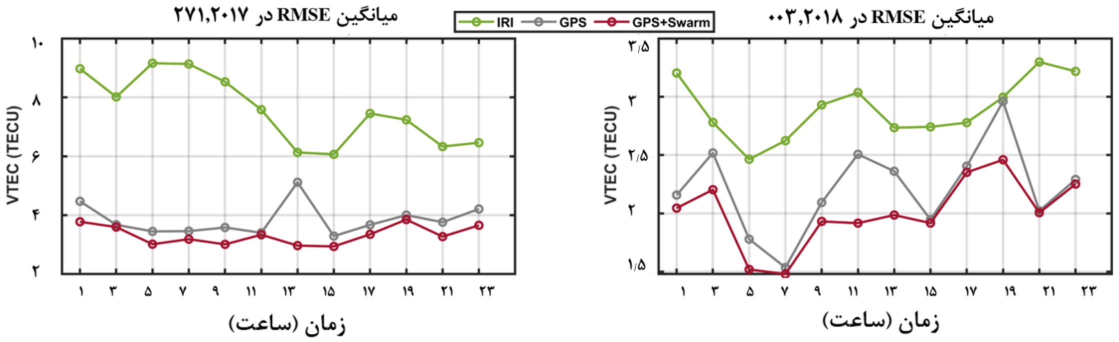
شکل ۶: الف) سری زمانی میانگین مقادیر *RMS* در روز ۳ ژانویه (*DOY* ۰۰۳) ۲۰۱۸ و ب) سری زمانی میانگین مقادیر *RMS* در روز ۲۸ سپتامبر (*DOY* ۲۷۱) ۲۰۱۷.

شکل (۷) مقادیر *RMSE* را در طول ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. مطابق این شکل، استفاده از داده‌های *GPS* و *Swarm* به صورت همزمان، می‌تواند دقت و صحت مدل *IRI2016* را تا ۶/۱۴ *TECU* در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۱/۲۹ *TECU* در ۳ ژانویه ۲۰۱۸ افزایش دهد.

شکل (۸) درصد بهبود میانگین *RMS* با افزودن مشاهدات *Swarm* به مشاهدات *GPS* و درصد بهبود

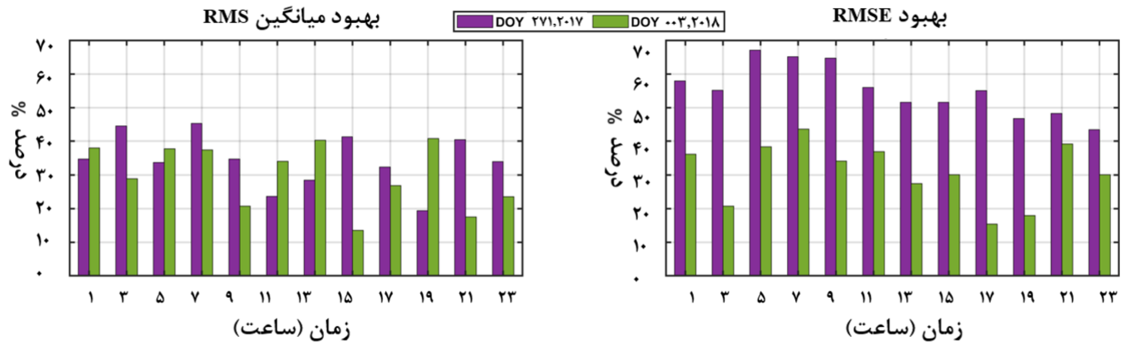
[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

RMSE نقشه‌های *GIM* ترکیبی نسبت به مدل *IRI2016* را در ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ نشان می‌دهد.



(الف) (ب)

شکل ۷: الف) سری زمانی مقادیر *RMSE* در روز ۳ ژانویه ۲۰۱۸ (*DOY* ۰۰۳) و ب) سری زمانی مقادیر *RMSE* در روز ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ (*DOY* ۲۷۱)



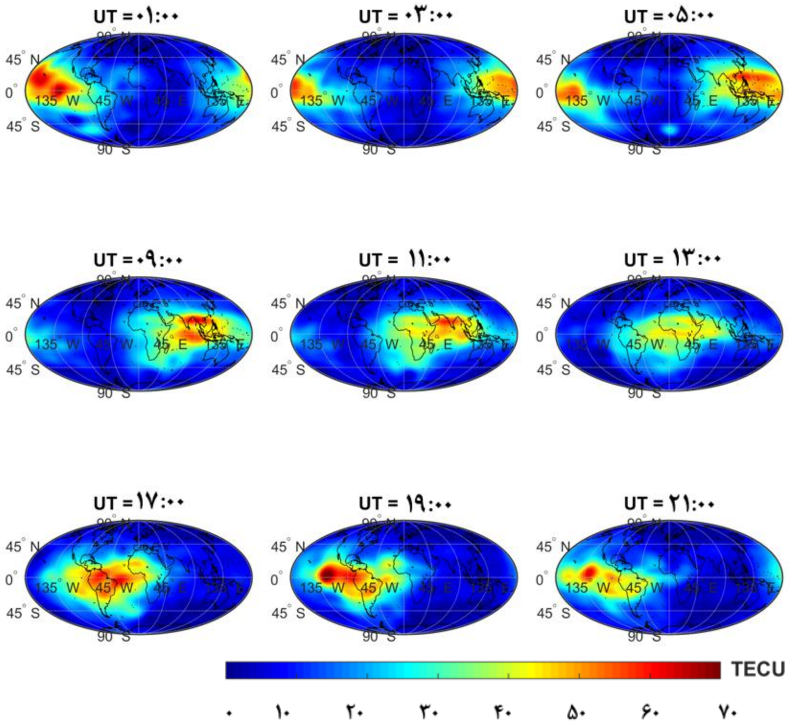
(الف) (ب)

شکل ۸: الف) درصد بهبود مقادیر *RMSE* و ب) درصد بهبود میانگین مقادیر *RMS* در طول ۲۸ سپتامبر (*DOY* ۲۷۱) ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه (*DOY* ۰۰۳) ۲۰۱۸

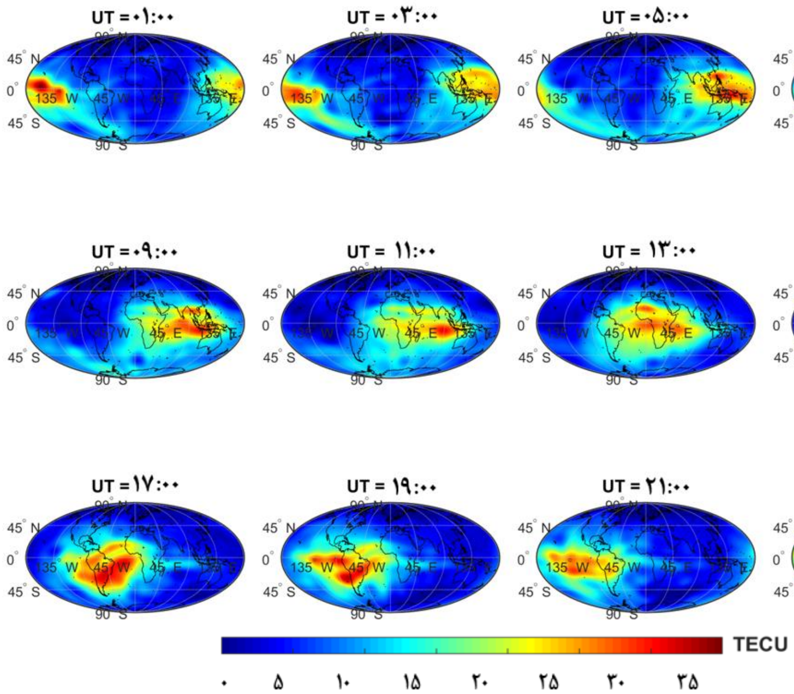
بر اساس نتایج آماری ارائه شده در این شکل، استفاده از مشاهدات دو ماموریت در مقایسه با استفاده از مشاهدات *GPS* به تنهایی، می‌تواند میانگین مقادیر *RMS* را در محدوده [۱۹٫۳۳ ، ۴۵٫۲۸] درصد و [۱۳٫۴۷ ، ۴۰٫۸۱] درصد به ترتیب طی ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و تا ۳ ژانویه ۲۰۱۸ کاهش دهد. همچنین خطای *RMSE* نقشه‌های *GIM* ترکیبی نسبت به خطای *RMSE* مدل *IRI2016*، در محدوده [۴۳٫۳۹ ، ۶۷٫۰۷] درصد در طول ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و [۱۵٫۳۵ ، ۴۳٫۶۱] درصد در ۳ ژانویه ۲۰۱۸ کاهش یافت که بیانگر بهبود دقت مدل *IRI2016* می‌باشد.

با توجه به کاهش مقدار *RMS* و *RMSE* مطابق شکل‌های (۶) تا (۸)، افزایش دقت و صحت مدل *IRI2016* با استفاده از مشاهدات *GPS* و *Swarm* مشهود است. در ادامه نقشه‌های *GIM* ترکیبی دو ساعته با استفاده از تلفیق مشاهدات *GPS* و *Swarm* در طول ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۳ ژانویه ۲۰۱۸ به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است.

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]



شکل ۹: نقشه های جهانی یونوسفر ترکیبی در طول ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷



شکل ۱۰: نقشه های جهانی یونوسفر ترکیبی در طول ۳ ژانویه ۲۰۱۸

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، از مشاهدات *VTEC* به دست آمده از *GPS* و *Swarm* برای بهبود دقت و صحت نقشه‌های جهانی یونوسفر *IRI2016* در دو روز با ضریب *Kp* بالا حدود ۷ (میانگین خطای *RMSE* برابر ۷/۵۸ *TECU*) و ضریب *Kp* پایین حدود ۱ (میانگین خطای *RMSE* برابر ۲/۹۰ *TECU*) استفاده شده است. در مجموع از اندازه‌گیری‌های ۴۸۵ ایستگاه *IGS* استفاده شده و مقادیر *DCB* ماهواره‌ها و گیرنده‌ها به عنوان مقادیر مجهول در نظر گرفته شده است. که این فرضیه امکان استفاده از اندازه‌گیری‌های ایستگاه‌های *GNSS* بیشتری را فراهم می‌کند. بایاس‌های سیستماتیک سه ماهواره *Swarm* به عنوان مقادیر مجهول ثابت در هر فاصله دو ساعته (قدرت تفکیک زمانی مدل) در نظر گرفته شده اند. مقادیر *DCB* ماهواره‌ها و گیرنده‌ها و بایاس‌های سیستماتیک همراه با پارامترهای مجهول مدل با روش سرشکنی کمترین مربعات تخمین زده می‌شوند. هم چنین، برای تعیین وزن نسبی دقیق گروه‌های مختلف مشاهده‌ای، از روش تخمین مولفه واریانس هلمرت استفاده شده است و وزن‌های نسبی ماهواره‌های *Swarm* بیشتر از وزن نسبی *GPS* به دست آمده است. در این مطالعه، برای اولین بار، از *VTEC* های حاصل از اندازه گیری‌های *Swarm* برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان *IRI2016* استفاده شده است. مقایسه بین نقشه‌های *GIM* ترکیبی و نقشه‌های *GIM* به دست آمده با استفاده از داده‌های *GPS*، نشان داد که در عرض‌های جغرافیایی مختلف، میانگین مقادیر *RMS* در بازه *[۱۹/۳۳ ، ۴۵/۲۸]* درصد در روز با ضریب *Kp* بالا و *[۱۳/۴۷ ، ۴۰/۸۱]* درصد در روز با ضریب *Kp* پایین کاهش یافتند. علاوه بر این، با تلفیق مشاهدات *Swarm* با مشاهدات *GPS*، سری زمانی میانگین *RMS* نسبت به حالت مدل‌سازی با استفاده از مشاهدات *GPS*، به صورت میانگین ۰/۰۳۰ *TECU* معادل ۳۴ درصد در روز ۲۸ سپتامبر ۲۰۱۷ و ۰/۰۲۷ *TECU* معادل ۳۰ درصد در روز ۳ ژانویه ۲۰۱۸، کاهش یافت که بیانگر تاثیر مشاهدات *Swarm* در افزایش دقت و صحت نقشه‌های *GIM* ترکیبی و در نتیجه مدل *IRI2016* خواهد بود. همچنین خطای *RMSE* نقشه‌های *GIM* ترکیبی نسبت به مدل *IRI2016*، در محدوده *[۴۳/۳۹ ، ۶۷/۰۷]* درصد در روز ضریب *Kp* بالا و *[۱۵/۳۵ ، ۴۳/۶۱]* درصد در روز ضریب *Kp* پایین کاهش یافت. با توجه به نتایج آماری، می‌توان گفت مدل ترکیبی ارائه شده دقت و صحت مدل *IRI2016* را افزایش می‌دهد. در ادامه این مطالعه، می‌توان جهت افزایش دقت و صحت مدل *IRI*، از سایر مشاهدات ژئودتیکی همانند مشاهدات ارتفاع‌سنجی ماهواره‌ای با پوشش مناسب در اقیانوس‌ها و یا مشاهدات ماهواره‌های *COSMIC* با پوشش مناسب جهانی استفاده نمود.

مراجع

[1] N. Blaunstein, and E. Plohotniuc, "Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar", CRC press, 2008.

[2] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and E. Wasle, " GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more",Springer Science & Business Media, 2007.

[3] J. S. Subirana, J. J. Zornoza, and M. Hernández-Pajares, " Gnss data processing. volume 1: Fundamentals and algorithms", ESA Communications ESTEC, PO Box, vol. 299, p. 2200, 2013.

[4] K. Su, S. Jin, and M. M. Hoque, " Evaluation of ionospheric delay effects on multi-GNSS positioning performance", Remote Sensing, vol. 11, no. 2, p. 171, 2019.

[5] L. Liu, and Y. Chen, " Statistical analysis on the solar activity variations of the TEC derived at JPL from global GPS observations", J. Geophys. Res, vol. 114, p. A10311, 2009.

[6] O. Maltseva, N. Mozhaeva, O. Poltavsky,

[DOR: 20.1001.1.20089635.1400.9.4.6.9]
[DOI: 10.52547/jgit.9.4.87]

and G. Zhbankov,“ Use of TEC global maps and the IRI model to study ionospheric response to geomagnetic disturbances”, Advances in Space Research, vol. 49, no. 6, pp. 1076-1087, 2012.

[7] N. Dashora, and S. Suresh, “ Characteristics of low - latitude TEC during solar cycles 23 and 24 using global ionospheric maps (GIMs) over Indian sector” , Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 120, no. 6, pp. 5176-5193, 2015.

[8] S. Jin, R. Jin, and H. Kutoglu,“ Positive and negative ionospheric responses to the March 2015 geomagnetic storm from BDS observations”, Journal of Geodesy, vol. 91, no. 6, pp. 613-626, 2017.

[9] C. Gao, S. Jin, and L. Yuan,“ Ionospheric Responses to the June 2015 Geomagnetic Storm from Ground and LEO GNSS Observations”, Remote Sensing, vol. 12, no. 14, p. 2200, 2020.

[10] M. Karki, et al. ,“ GPS Observations of Ionospheric TEC Variations during 2015 Mw 7.8 Nepal Earthquake”, Earth and Space Science Open Archive ESSOAr, 2020.

[11] R. W. Schunk et al. ,“ Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM) ”, Radio Science, vol. 39, no. 1, 2004.

[12] J. Ping et al. ,“ Regional ionosphere map over Japanese Islands”, Earth, planets and space, vol. 54, no. 12, pp. e13-e16, 2002.

[13] M. Schmidt,“ Wavelet modelling in support of IRI”, Advances in Space Research, vol. 39, no. 5, pp. 932-940, 2007.

[14] M. Schmidt, D. Dettmering, M. Mößmer, Y. Wang, and J. Zhang,“ Comparison of spherical harmonic and B spline models for the vertical total electron content”, Radio Science, vol. 46, no. 6, 2011.

[15] E. Erdogan, M. Schmidt, F. Seitz, and M. Durmaz,“ Near real-time estimation of ionosphere vertical total electron content from GNSS satellites using B-splines in a Kalman filter”, in Annales Geophysicae, 2017, vol. 35, no. 2: Copernicus GmbH, pp. 263-277.

[16] D. Bilitza,“ International reference ionosphere 2000”, Radio Science, vol. 36, no. 2, pp. 261-275, 2001.

[17] J. A. Klobuchar,“ Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users”, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, no. 3, pp. 325-331, 1987.

[18] S. Kumar, E. L. Tan, and D. S. Murti,“ Impacts of solar activity on performance of the IRI-2012 model predictions from low to mid latitudes”, Earth, Planets and Space, vol. 67, no. 1, pp. 1-17, 2015.

[19] P. Bhuyan, and R. R. Borah,“ TEC derived from GPS network in India and comparison with the IRI”, Advances in Space Research, vol. 39, no. 5, pp. 830-840, 2007.

[20] P. Coisson, S. Radicella, L. Ciraolo, R. Leitinger, and B. Nava,“ Global validation of IRI TEC for high and medium solar activity conditions”, Advances in space research, vol. 42, no. 4, pp. 770-775, 2008.

[21] O. Olwendo, P. Baki, P. Cilliers, C. Mito, and P. Doherty,“ Comparison of GPS TEC variations with IRI-2007 TEC prediction at equatorial latitudes during a low solar activity (2009–2011) phase over the Kenyan region”, Advances in Space Research, vol. 52, no. 10, pp. 1770-1779, 2013.

[22] X. Wang, Q. Wan, T. Maruyama, G. Ma, J. Li, and J. Fan,“ Comparison of global TEC between IRI TEC and GPS TEC in the spring of 2006”, in 2017 XXXIInd General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (URSI GASS), 2017: IEEE, pp. 1-3.

[23] C. Shi, T. Zhang, C. Wang, Z. Wang, and L. Fan,“ Comparison of IRI-2016 model with IGS VTEC maps during low and high solar activity period”, Results in Physics, vol. 12, pp. 555-561, 2019.

[24] S. Rao, M. Chakraborty, S. Kumar, and A. Singh," Low-latitude ionospheric response from GPS, IRI and TIE-GCM TEC to Solar Cycle 24", Astrophysics and Space Science, vol. 364, no. 12, pp. 1-14, 2019.

[25] S. Todorova, T. Hobiger, and H. Schuh," Using the global navigation satellite system and satellite altimetry for combined global ionosphere maps", Advances in Space Research, vol. 42, no. 4, pp. 727-736, 2008.

[26] M. Alizadeh, H. Schuh, S. Todorova, and M. Schmidt," Global ionosphere maps of VTEC from GNSS, satellite altimetry, and Formosat-3/COSMIC data", Journal of Geodesy, vol. 85, no. 12, pp. 975-987, 2011.

[27] P. Chen, W. Yao, and X. Zhu," Combination of ground-and space-based data to establish a global ionospheric grid model", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 53, no. 2, pp. 1073-1081, 2014.

[28] P. Chen, Y. Yao, and W. Yao," Global ionosphere maps based on GNSS, satellite altimetry, radio occultation and DORIS", GPS solutions, vol. 21, no. 2, pp. 639-650, 2017.

[29] Y. Yao, L. Liu, J. Kong, and C. Zhai," Global ionospheric modeling based on multi-GNSS, satellite altimetry, and Formosat-3/COSMIC data", GPS Solutions, vol. 22, no. 4, pp. 1-12, 2018.

[30] W. Liang, M. Limberger, M. Schmidt, D. Dettmering, and U. Hugentobler," Combination of ground-and space-based GPS data for the determination of a multi-scale regional 4-D ionosphere model", in IAG 150 Years: Springer, 2015, pp. 751-758.

[31] S. Todorova," Combination of space geodetic techniques for global mapping of the ionosphere", 2008.

[32] C. Brunini, A. Meza, and W. Bosch," Temporal and spatial variability of the bias between TOPEX-and GPS-derived total electron content", Journal of Geodesy, vol. 79, no. 4-5, pp. 175-188, 2005.

[33] E. Friis-Christensen, H. Lühr, and G. Hulot," Swarm: A constellation to study the Earth's magnetic field", Earth, planets and space, vol. 58, no. 4, pp. 351-358, 2006.

[34] L. Goodwin, et al. ," Swarm in situ observations of F region polar cap patches created by cusp precipitation", Geophysical Research Letters, vol. 42, no. 4, pp. 996-1003, 2015.

[35] A. T. Chartier, C. N. Mitchell, and E. S. Miller," Annual occurrence rates of ionospheric polar cap patches observed using Swarm", Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 123, no. 3, pp. 2327-2335, 2018.

[36] M. Pezzopane, and A. Pignalberi," The ESA Swarm mission to help ionospheric modeling: a new NeQuick topside formulation for mid-latitude regions", Scientific reports, vol. 9, no. 1, pp. 1-12, 2019.

[37] O. A. AbuElezz, P. J. Cilliers, A. M. Mahrous, A. M. Yassen, and M. Youssef," A proposed method for improving the IRI2016 model by means of Swarm over the American Sector during the event of 5–11 September 2017", Advances in Space Research, 2021.

[38] A. Fæhn Follestad, L. B. N. Clausen, W. J. Miloch, J. van den IJssel, and R. Haagmans, " Two - Dimensional Reconstruction of Ionospheric Plasma Density Variations Using Swarm" , Space Weather, vol. 18, no. 6, p. e2019SW002406, 2020.

[39] S. Schaer," Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System", Bern, 1999.

[40] M. Hernández-Pajares, et al. ," The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998", Journal of Geodesy, vol. 83, no. 3-4, pp. 263-275, 2009.

[41] D. Bilitza, L.-A. McKinnell, B. Reinisch, and T. Fuller-Rowell," The international

reference ionosphere today and in the future", Journal of Geodesy, vol. 85, no. 12, pp. 909-920, 2011.

[42] D. Bilitza, et al. ," The International Reference Ionosphere 2012–a model of international collaboration", Journal of Space Weather and Space Climate, vol. 4, p. A07, 2014.

[43] L. Ciraolo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, and S. Radicella," Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS", Journal of Geodesy, vol. 81, no. 2, pp. 111-120, 2007.

[44] A. Mannucci, B. Wilson, D. Yuan, C. Ho, U. Lindqwister, and T. Runge," A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements", Radio science, vol. 33, no. 3, pp. 565-582, 1998.

[45] U. Hugentobler, et al. ," CODE IGS analysis center technical report 2002", ed.

[46] N. Olsen et al. ," The Swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and Swarm data products", Earth, Planets and Space, vol. 65, no. 11, pp. 1189-1200, 2013.

[47] F. Yin, H. Lühr, J. Park, and L. Wang, " Comprehensive analysis of the magnetic signatures of small - scale traveling ionospheric disturbances, as observed by Swarm " , Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 124, no. 12, pp. 10794-10815, 2019.

[48] G. Kervalishvili," Swarm L2 TEC product description", SW-TR-GFZ-GS-0007, rev. 4. Technical report, European Space Agency (ESA ..., 2017.

[49] M. Noja, C. Stolle, J. Park, and H. Lühr," Long-term analysis of ionospheric polar patches based on CHAMP TEC data", Radio Science, vol. 48, no. 3, pp. 289-301, 2013.

[50] D. Dettmering, M. Schmidt, R. Heinkelmann, and M. Seitz," Combination of different space-geodetic observations for regional ionosphere modeling", Journal of Geodesy, vol. 85, no. 12, pp. 989-998, 2011.

[51] G. Jee, H. B. Lee, Y. Kim, J. K. Chung, and J. Cho," Assessment of GPS global ionosphere maps (GIM) by comparison between CODE GIM and TOPEX/Jason TEC data: Ionospheric perspective", Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 115, no. A10, 2010.

[52] A. Amiri-Simkooei," Least-squares variance component estimation: theory and GPS applications", 2007.

[53] M. Alizadeh," Multi-Dimensional modeling of the ionospheric parameters, using space geodetic techniques", Techn. Univ. Wien, 2013.

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.9, No.4, Winter 2022

Research Paper

The Improvement of IRI2016 global maps by the integration of Swarm and GPS observations

Sedigheh Karimi[1], Mohamad Ali Sharifi[2], Saeed Farzaneh[3]*

1- MSc student, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Associate professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

This paper presents a model, the International Reference Model 2016 (IRI), in order to improve the vertical total electron content (VTEC) maps by combining Swarm observations with global positioning system (GPS) ones. The proposed model consists of two parts: the background model and the corrections. In this paper, the IRI2016 model was selected as the background model and the corrections were modeled by spherical harmonic expansion functions up to the degree and rank 15 in a Sun-fixed reference frame. In the combination of VTECs derived from Swarm and GPS, the systematic biases of Swarm satellites are considered as unknown constant parameters in each epoch of modeling. Besides, in order to take the different accuracy levels of observational groups into consideration, the Helmert variance component estimation method is used. To evaluate the proposed model, the two-dimensional combined global ionosphere maps (GIMs) are constructed on the 28th of September 2017 and the 3rd of January 2018 with 7 and 1 kp-indices values, respectively. The comparison of the combined GIM maps with the International GNSS Service (IGS) GIM maps, shows that the combined model is more compatible with IGS maps, and adding Swarm and GPS observations to the IRI2016 background model can significantly improve the IRI2016 model, especially in oceanic regions. The results show that the root mean square (RMS) and root mean square error (RMSE) maps are decreased about 19% to 45% and 43% to 67% for the day with high Kp-index and about 13% to 40% and 15% to 43% for the day with low kp-index, respectively.

Key words: *Total electron content (TEC), Swarm, GPS, IRI2016 model, variance component estimation.*

***Correspondence Address** : Geodesy Group, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.*
***Tel**: +98 61114517*
***Email**: sharifi @ut.ac.ir*