

تلفیق مشاهدات GPS و ارتفاع سنجی ماهواره‌ای به منظور مدلسازی محلی یونسفر در ایران

ناصر عبدی^{۱*}، علیرضا آزموده اردلان^۲، روح‌الله 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
ardalan@ut.ac.ir

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

(تاریخ دریافت آبان ۱۳۹۵، تاریخ تصویب شهریور ۱۳۹۶)

چکیده

از مشاهدات غنی و متراکم ایستگاه‌های دائمی GPS که اغلب محدود به خشکی‌ها هستند، می‌توان برای مطالعه یونسفر و تولید نقشه‌های یونسفر استفاده نمود. این نقشه‌ها نمایشگر مقادیر محتوای مجموع الکترونی در راستای قائم (VTEC) بوده و کاربرد خاص آنها در موقعیت‌یابی دقیق با استفاده از مشاهدات گیرنده‌های تک فرکانس است. نقشه‌های جهانی یونسفر (GIM) که توسط مراکز مختلف IGS تولید می‌شوند، همگی نمایشگر مقادیر VTEC به ازای هر دو ساعت، با رزولوشن مکانی $2/5^\circ$ در راستای عرض جغرافیایی و 5° در راستای طول جغرافیایی و یا به صورت تابعی از ضرایب هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ و با رزولوشن زمانی دو ساعت هستند. کمبود ایستگاه‌های دائمی GPS در دریاها منجر به افت صحت و دقت این مدلها در آن مناطق شده و استفاده از مشاهدات دو فرکانس ارتفاع سنجی ماهواره‌ای به همراه مشاهدات GPS می‌تواند به عنوان راهکاری برای بهبود این مدلها در این مناطق محسوب گردد. در این مقاله به منظور تولید نقشه محلی یونسفر ایران (LIM)، مشاهدات ۲۱ ایستگاه دائمی GPS در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ (متناظر با بیشینه فعالیت خورشیدی) و توابع پایه بی-اسپلاین دو بعدی به عنوان توابع پایه مدلسازی استفاده شده‌اند. مقادیر مختلفی برای انتخاب سطح بهینه توابع پایه بی-اسپلاین در دو بعد مورد آزمون قرار گرفت و در نهایت، مدلسازی با سطح ۱ و ۲ به ترتیب در راستای طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی انجام شد. نتایج بدست‌آمده، اختلافات عمده‌ای را نسبت به GIM نشان می‌دهند. در ادامه، مشاهدات GPS به همراه مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای مربوط به ماهواره Jason-2 در فرآیند مدلسازی محلی یونسفر در نظر گرفته شدند و برای وزن دهی نسبی بین مشاهدات دو دسته، از تکنیک برآورد مولفه‌های واریانس کمترین مربعات (LS-VCE) استفاده گردید. در این قسمت علاوه بر ضرایب مدل یونسفر محلی و بایاسهای کد تفاضلی (DCB) گیرنده‌ها، بایاس دیگری بین مشاهدات GPS و ارتفاع سنجی ماهواره‌ای نیز برآورد شده و با نتایج مرحله قبلی مقایسه شدند. نتایج مقایسه نشان می‌دهند که در صورت استفاده از مشاهدات ارتفاع سنجی ماهواره‌ای به همراه مشاهدات GPS، دقت مدلسازی در سطح دریاها بهبود خواهند یافت.

واژگان کلیدی: B-Spline, DCB, GIM, LIM, LS-VCE, VTEC

* نویسنده رابط

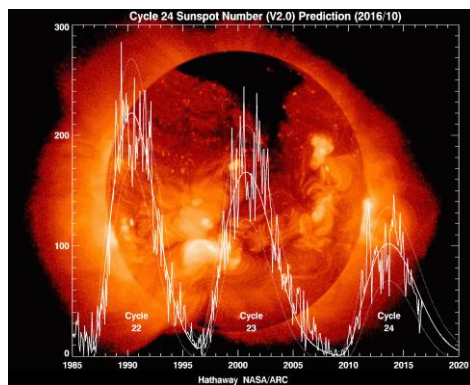
۱- مقدمه

ذرات باردار و الکترونیهای آزاد موجود در یونسفر، اثر گذار روی انتشار امواج الکترومغناطیسی، از جمله امواج GPS بوده و میزان این اثر بسته به نوع امواج و فرکانس آنها متفاوت خواهد بود. از این رو چنانچه اندازه‌گیریهای سیستمهای ماهواره‌ای، حداقل در دو فرکانس متفاوت صورت پذیرند، با استفاده از ترکیب مشاهدات دو فرکانس، می‌توان مشاهده دیگری موسوم به ترکیب خطی عاری از اثر یونسفر (IF^2) ایجاد نمود که برطرف کننده $9/99\%$ از این اثر سیستماتیک در کاربردهای GPS خواهد بود. در حال حاضر یونسفر عمده‌ترین منبع ایجاد خطا در مشاهدات GPS به شمار رفته، که مقدار اثر آن از چندین متر تا بیش از ۱۰۰ متر متغیر است. لذا در کاربردهای GPS با استفاده از مشاهدات تک فرکانس استفاده از یک مدل یونسفر دقیق می‌تواند در کاهش میزان اثر یونسفر و بهبود دقت موقعیت‌یابی مفید باشد. همچنین استفاده از یک مدل دقیق یونسفر در تصحیح کردن اثر تأخیر یونسفر در اندازه‌گیریهای ارتفاع سنجهای ماهواره‌ای تک فرکانس که می‌تواند متجاوز از ۲۰ سانتی‌متر گردد نیز ضروریست.

با ظهور و عملیاتی شدن سیستم تعیین موقعیت جهانی در سال ۱۹۹۳، توسعه و گسترش شبکه‌های ایستگاههای دائمی GPS و دسترسی مناسب به داده‌های آنها از طریق اینترنت، حوزه و فرصت جدیدی برای سنجش از دور یونسفر از طریق این داده‌ها ایجاد شد. مدل‌های یونسفری که بر مبنای مشاهدات GPS تولید می‌شوند اغلب به صورت دو بعدی بوده و نمونه‌هایی از آنها توسط محققین مختلفی مانند ویلد (۱۹۹۴)، ویلسون و همکاران (۱۹۹۵)، برونینی (۱۹۹۸)، شائر (۱۹۹۹)، گائو و همکاران (۲۰۰۲)، مائوتز و همکاران (۲۰۰۵) و اشمیت (۲۰۰۷) ارائه شده‌اند [۳]، [۴]، [۵]، [۶]، [۷]، [۸] و [۹]. در مدلسازی دوبعدی، یونسفر اغلب به عنوان لایه کروی با ضخامت فرضی صفر که کلیه الکترونها روی آن واقع شده‌اند و در ارتفاع متغیر بین ۳۵۰ تا ۴۵۰ کیلومتر (ارتفاع متناظر با بیشینه مقدار دانسیته الکترونی) واقع شده‌است، در نظر گرفته می‌شود. بعلاوه مقادیر محتوای مجموع الکترونی مایل (3STEC) با استفاده از یک تابع تصویر مناسب به مقادیر محتوای مجموع الکترونی قائم (4VTEC) تبدیل می‌شوند.

همچنین در این راستا گروه کاری ویژه‌ای تحت عنوان گروه کاری یونسفر در IGS^۵، در ماه ژوئن سال ۱۹۹۸

یونسفر لایه‌ای از اتمسفر زمین است که از ارتفاع ۸۰ تا ۱۲۰۰ کیلومتری، بالای سطح زمین گسترده شده و بین تروپوسفر خنثی و پلاسمای مغناطیسی تمام یونیزه واقع شده‌است. یونسفر از الکترون‌های آزاد و یون‌هایی که در طی فعل و انفعالات ناشی از فرآیند یونیزاسیون تولید شده‌اند، تشکیل شده‌است. 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. چگالی الکترون‌ها در شب به دلیل غیاب خورشید کمتر از چگالی آن‌ها در روز بوده و از این رو معمولاً حداکثر چگالی الکترونی حدوداً متناظر با ساعت ۱۴ به وقت محلی خواهد بود. (اتم‌سفر زمین با تأخیری ۲ ساعته نسبت به زمین دوران می‌کند) همچنین فعالیت لکه‌های خورشیدی با دوره تناوب ۱۱ ساله موجب افزایش فعل و انفعالات و در نهایت بالا رفتن چگالی الکترونیهای آزاد در یونسفر خواهد شد. لذا تغییرات یونسفر که متناسب با تعداد لکه‌های خورشیدی است دارای دوره تناوب ۱۱ ساله است [۱].



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

همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود، اگرچه بیشینه تعداد لکه‌های خورشیدی در سیکل ۲۴ (بر اساس نمودار هموار شده) عدد ۱۰۱ و مربوط به اواخر سال ۲۰۱۳ می‌باشد اما مقدار بیشینه $116/4$ که در آوریل ۲۰۱۴ مشاهده شده را می‌توان به عنوان مقدار نهایی برای این سیکل در نظر گرفت [۲]. ماکزیمم اثر یونسفر بر روی سیگنالهای GPS^۱ در این ایام اتفاق خواهد افتاد.

^۲ Ionosphere Free

^۳ Slant Total Electron Content

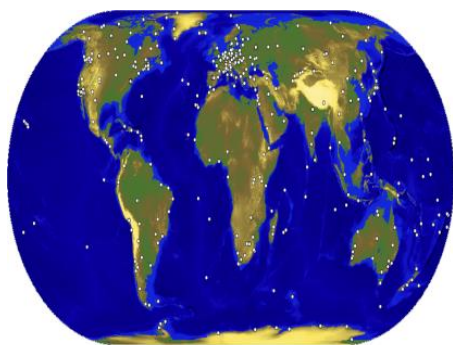
^۴ Vertical Total Electron Content

^۵ International GNSS Service

^۱ Global Positioning System

همچنین در شکل ۳ می توانید نقشه پراکندگی ایستگاههای دائمی IGS را مشاهده کنید. همانطور که در این شکل دیده می شود، در سطح ایران، حداکثر از مشاهدات ایستگاه دائمی تهران (TEHN) در تولید مدلهای جهانی یونسفر استفاده می شود. لذا تولید مدل محلی یونسفر در ایران با استفاده از مشاهدات یک شبکه متراکم داخلی که ارائه کننده دقت بهتری نسبت به مدلهای IGS باشد، ضروریست.

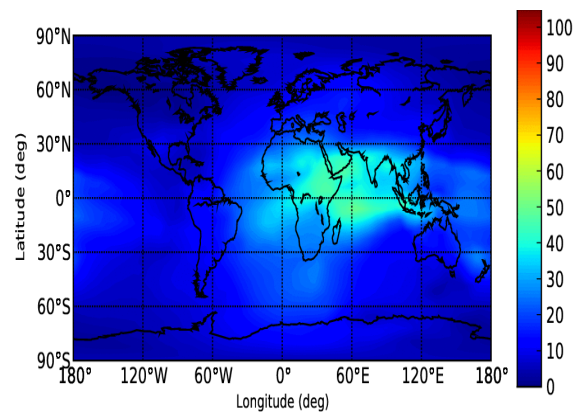
همچنین در حال حاضر مدلهای جهانی یونسفر، تنها با استفاده از مشاهدات گیرنده های دو فرکانس GNSS^۸ تولید شده، و استفاده از مشاهدات دو فرکانس ارتفاع سنجی راداری فقط به منظور اعتبار سنجی این مدلهای مرسوم است. تودوراوا (۲۰۰۸) از تلفیق مشاهدات GNSS و ارتفاع سنجی راداری برای تولید مدلهای جهانی استفاده کرد [۱۲]. همانطور که می دانیم توزیع و پراکندگی ایستگاههای دائمی GNSS به گونه ای نیست که در کل کره با داده های منظم سروکار داشته باشیم و در مناطقی به خصوص در سطح دریاها با کمبود یا فقدان داده مواجه هستیم. لذا مشاهدات ارتفاع سنجی راداری می توانند ضمن بالا بردن دقت مدلهای تولید شده، مشکل فقدان داده در سطح دریاها را برطرف سازد. استفاده از تلفیق مشاهدات فضایی از قبیل مشاهدات GNSS، ارتفاع سنجی راداری و آکولتیشن رادیویی، و توابع پایه بی-اسپلاین در مدلسازی منطقه ای یونسفر، توسط دترمینگ و همکاران (۲۰۱۱) نیز صورت گرفته است [۱۴].



شکل ۳- پراکندگی ایستگاههای شبکه جهانی IGS [۱۳]

مشاهدات شبکه ایستگاههای دائمی GPS ایران (IPGN)^۹، با بیش از ۱۳۰ ایستگاه و متشکل از ۴ زیر شبکه به نامهای شبکه آذربایجان، شبکه تهران، شبکه

ایجاد شد و تولید مدلهای جهانی یونسفر (GIM^۱) را با استفاده از مشاهدات GPS آغاز نمود. 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^۳ (ESOC)^۴ مستقر در آلمان، لابراتوار پیشرانس جت (JPL)^۵ مستقر در کالیفرنیا آمریکا و دانشگاه فنی کاتالونیا^۶ (UPC) مستقر در بارسلون اسپانیا انجام شده است. هر مرکز به طور مستقل و با شیوه ای متفاوت، اما قالب خروجی یکسان نقشه های یونسفری را تولید می کند. این نقشه ها همگی نمایشگر مقادیر VTEC به ازای هر دو ساعت، با رزولوشن مکانی ۲/۵° در راستای عرض جغرافیایی و ۵° در راستای طول جغرافیایی هستند. همچنین مدل جهانی یونسفر به صورت تابعی از ضرایب هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ و با رزولوشن زمانی دو ساعت برای هر روز ارائه می گردد. در نهایت مدل نهایی یونسفر که توسط IGS منتشر می شود میانگینی وزن دار از تمامی مدلهای فوق است [۱۰]. VTEC دارای مقادیر بزرگی بوده و برای بیان مقدار آن از واحدی به نام TECU^۷ استفاده می گردد. هر TECU معادل ۱۰^{۱۶} الکترون بر متر مربع است. در شکل ۲ نمونه ای از نقشه جهانی یونسفر که توسط JPL تولید شده است و مربوط به ساعت ۱۱ UTC و تاریخ ۱۰ اکتبر ۲۰۱۶ است را می توان مشاهده نمود.



شکل ۲- نمونه ای از نقشه یونسفر JPL مربوط به ساعت ۱۱ UTC و

۱۰ اکتبر ۲۰۱۶ (مقادیر VTEC به واحد TECU هستند) [۱۱]

^۱ Global Ionosphere Maps

^۲ Center for Orbit Determination in Europe

^۳ European Space Agency

^۴ European Space Operations Center of ESA

^۵ Jet Propulsion Laboratory

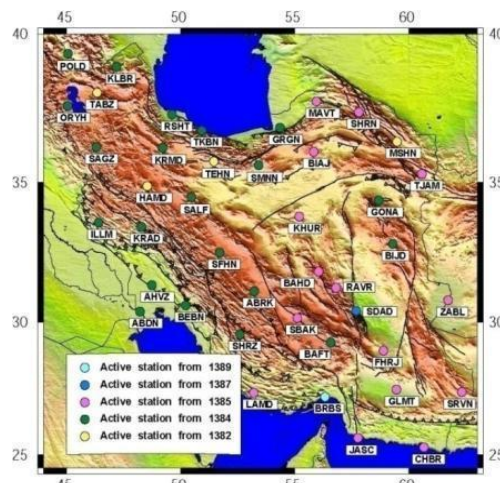
^۶ Technical University of Catalonia

^۷ TEC Unit

^۸ Global Navigation Satellite Systems

^۹ Iranian Permanent GNSS Network

خراسان و شبکه خوزستان، منبعی با ارزش برای تولید مدل محلی یونسفر در سطح ایران قلمداد می‌شوند. در شکل ۴ می‌توان پراکندگی ایستگاههای شبکه سراسری ایران، متشکل از حدوداً ۴۰ ایستگاه دائمی GPS و با توزیعی تقریباً یکنواخت در سطح ایران را مشاهده نمود.



شکل ۴- نقشه پراکندگی ایستگاههای شبکه سراسری ایران [۱۵]

استفاده از توابع پایه هارمونیک کروی که دارای محمل جهانی هستند در مدلسازی دو بعدی یونسفر (مانند مدل جهانی CODE) به طور گسترده مرسوم است. اما همانطور که می‌دانیم این توابع پایه، برای مدلسازی تابع هدفی مناسب می‌باشند که منطقه مدلسازی، پوشاننده کل کره بوده و داده‌ها به صورت منظم روی این کره توزیع شده باشند. اشکال استفاده از این توابع پایه در مدلسازی منطقه‌ای و یا استفاده از داده‌های با توزیع ناهمگون در فرآیند مدلسازی توسط چمبودات و همکاران (۲۰۰۵)، مائوتز و همکاران (۲۰۰۵) و اشمیت و همکاران (۲۰۰۷) مورد بررسی قرار گرفته است [۱۶]، [۸] و [۹]. به عنوان راه‌حلی جایگزین، استفاده از توابع پایه بی-اسپلاین به دلیل دارا بودن محمل فشرده، ابزار مناسبی هستند. این توابع در مدلسازی یونسفر توسط محققین مختلفی مانند اشمیت و همکاران (۲۰۰۷)، زیلهوفر (۲۰۰۸)، نوهوتکو و همکاران (۲۰۰۸)، زیلهوفر و همکاران (۲۰۰۹) استفاده شده است [۹]، [۱۷]، [۱۸] و [۱۹].

از سوابق مدلسازی یونسفر در ایران می‌توان به مدلسازی منطقه‌ای توزیع چگالی الکترونی در لایه یونسفر با استفاده از آنالیز موجک و مشاهدات GPS اشاره نمود که در سال ۱۳۹۱ در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد. عامریان در رساله دکتری خود، مدل‌سازی

یونسفر به صورت تک لایه و چند لایه و با استفاده از مشاهدات IPGN و بر حسب توابع پایه بی-اسپلاین چندبعدی، جهت بهبود مدل یونسفر بین المللی (IRI) که یک مدل تجربی و فیزیک پایه است انجام گردید [۲۰]، [۲۱] و [۲۲].

همچنین فرزانه در سال ۱۳۹۵، رساله دکتری خود با موضوع مدلسازی مکانی-زمانی تغییرات محلی یونسفر، به صورت دو بعدی و سه بعدی با استفاده از تکنیکهای مختلف و بر پایه توابع اسپین کروی را در دانشگاه تهران، انجام داد [۲۳].

در این مقاله می‌خواهیم پس از تولید مدل محلی یونسفر با استفاده از مشاهدات شبکه ایستگاههای دائمی GPS ایران (IPGN) و بر مبنای توابع پایه بی-اسپلاین دو بعدی، اثر اضافه کردن مشاهدات ارتفاعسنجی در مدلسازی را مورد مطالعه قرار دهیم. در این تحقیق برای پایداری ماتریس طرح از تکنیک تیخونوف و برای تشکیل ماتریس کوفاکتور از تکنیک برآورد مولفه‌های واریانس کمترین مربعات (LS-VCE) استفاده خواهیم کرد.

۲- مدلسازی دوبعدی یونسفر با استفاده از مشاهدات GPS

یونسفر برای امواج رادیویی یک محیط پخش^۲ 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 (STEC) دارد. اثر یونسفر روی مشاهدات کد و فاز GPS به ترتیب با استفاده از روابط ۱ و ۲ محاسبه می‌گردند.

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

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

در این روابط $a = 40.3 \times 10^{16} ms^{-2} TECU^{-1}$ و f فرکانس سیگنال است.

معادلات مشاهدات کد و فاز موج حامل مربوط به یک گیرنده و یک ماهواره را می‌توان به شکل زیر بیان کرد.

^۱ International Reference Ionosphere

^۲ Least Squares-Variance Components Estimation

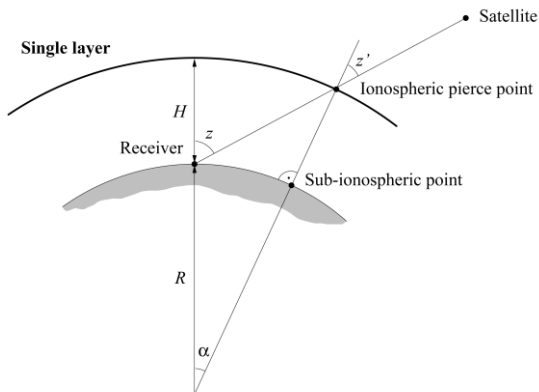
^۳ Dispersive

در واقع وابسته به زمان هستند، اما در عمل مقدار آنها در یک بازه زمانی چندین روز تا یک ماه بسیار پایدار است و می توان 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 می تواند به بیشتر از ۱۰ نانوثانیه در مورد گیرندهها نیز برسد. از رابطه ۸ که موسوم به رابطه اندازه گیری یونسفر است، برای تخمین مقادیر STEC و در نهایت تولید نقشه های یونسفر استفاده می گردد. لازم به ذکر است که سطح نویز اندازه گیریهای یونسفر توسط مشاهدات کد بسیار بالاست. لذا می توان از مشاهدات فاز موج حامل، برای هموارسازی مشاهدات کد و کاهش سطح نویز آنها استفاده نمود. اندازه گیری یونسفر با استفاده از مشاهدات کد هموار شده به مراتب دارای دقت بیشتری خواهد بود. روابط ۹ و ۱۰ مربوط به تکنیک هموار سازی استفاده شده هستند [۲۴].

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

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

در این روابط، $\bar{P}_f(t)$ 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 جهش های فازی نیز به منظور محاسبه کمانهای پیوسته مشاهداتی تعیین می شوند.



شکل ۵- مدل تک لایه ای یونسفر (SLM) [۲۴]

$$P_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + \gamma I_1 + b_i + B_i + d_{m/P_i} + \varepsilon(P_i) \quad (3)$$

$$L_i = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} - \gamma I_1 + \lambda_i N_i + b_{\phi_i} - B_{\phi_i} + d_{m/\phi_i} + \varepsilon(\Phi_i) \quad (4)$$

در این روابط:

P_i	مشاهده کد مربوط به فرکانس i
L_i	مشاهده فاز موج حامل مربوط به فرکانس i
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 تروپوسفر
I_1	تأخیر یونسفری برای فرکانس اول
N	ابهام فاز موج حامل
γ	$\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 = \left(\frac{1575.42}{1227.6}\right)^2 = \left(\frac{77}{60}\right)^2$
b	تأخیر سخت افزاری ماهواره
B	تأخیر سخت افزاری گیرنده
d_m	اثر خطای چندمسیری

خواهند بود.

با استفاده از روابط ۵ و ۶ ترکیبهای خطی عاری از اثرات هندسی ($dt, dT, d_{orb}, d_{trop}$) به ترتیب برای مشاهدات شبه فاصله و فاز موج حامل بدست می آیند.

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

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

با جایگذاری رابطه ۳ در رابطه ۵ خواهیم داشت:

$$P_4 = \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_2^2} I_1 + b_{P_1 - P_2} + B_{P_1 - P_2} + \varepsilon_{P_4} \quad (7)$$

$$P_4 = a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) STEC + b_{P_4} + B_{P_4} + \varepsilon_{P_4} \quad (8)$$

در این روابط B_{P_4}, b_{P_4} بیانگر بایاس سخت افزاری یا بایاس کد تفاضلی (DCB) بین فرکانسهای اول و دوم، به ترتیب برای ماهواره و گیرنده می باشند. اگرچه این بایاسها

۱ Differential Code Biases

در این روابط، $MF(z)$ تابع تصویر تبدیل کننده $VTEC$ به $STEC$ بر حسب زاویه زینتی ماهواره (z) بوده و $VTEC(\beta, s)$ همان TEC قائم (بر حسب TECU) به عنوان تابعی از عرض جغرافیایی یا ژئومغناطیسی β و طول خورشید ثابت s است. مقدار s با استفاده از رابطه ۱۳ تعیین می‌گردد.

$$s = t + \lambda - \pi \quad (۱۳)$$

در این رابطه همان اپک مشاهداتی است.

۳- برآورد مقادیر VTEC با استفاده از مشاهدات ارتفاع سنج راداری

ارتفاع سنجی ماهواره ای یک روش اندازه‌گیری فاصله است که در آن فاصله قائم بین ماهواره تا سطح دریا اندازه‌گیری می‌شود. یکی از مشخصه‌های این روش، عدم نیاز به ایستگاه زمینی بوده و اندازه‌گیریها به طور مستقیم توسط ارتفاع سنج نصب شده روی ماهواره صورت می‌گیرد. این فاصله با اندازه‌گیری مدت زمان رفت و برگشت موج راداری حاصل شده و بهترین کارایی را در سطح دریاها دارد، چرا که سطح آبها بهترین منعکس کننده این امواج راداری است. فرکانس سیگنال ارسال، حدود ۱۴ گیگاهرتز و طول پالس آنها در حد چند نانومتر ثانیه می‌باشد که قدرت تفکیک $0/1$ تا ۱ متر را نتیجه می‌دهد و بعد از تصحیح کردن اثرات یونسفر و تروپوسفر می‌توان این دقت را تا سطح ۲۰ میلی‌متر نیز افزایش داد. با استفاده از این روش می‌توان جدایی لحظه ای سطح آبها از بیضوی مرجع زمین را اندازه‌گیری کرد که این فاصله موسوم به ارتفاع سطح آب (SSH^۴) می‌باشد. دقت اندازه‌گیری ارتفاع از سطح بیضوی در این روش حدود ۳۰ میلی‌متر است. با اینکه هدف اولیه این روش، اندازه‌گیری ارتفاع سطح لحظه ای آب است، اما ارسال سیگنال در دو فرکانس، فرصتی را برای جمع آوری اطلاعات در رابطه با محتوای مجموع الکترونی (VTEC) حاصل می‌کند [۱۲].

از جمله مأموریت‌های ارتفاع سنجی راداری می‌توان به مأموریت ماهواره TOPEX/POSEIDON (سال ۱۹۹۲)، JASON-2 ERS-2 (سال ۱۹۹۵)، و در ادامه مأموریت ماهواره JASON-2 (سال ۲۰۰۱) و در ادامه مأموریت ماهواره JASON-2 (سال ۲۰۰۱) و در ادامه مأموریت ماهواره JASON-2 (سال ۲۰۰۱)

مدل‌های یونسفری بدست آمده از مشاهدات GPS، بیانگر بخش قابل تعیین یونسفر بوده و معمولاً بر اساس مدل تک لایه‌ای (SLM) می‌باشند که بطور اجمالی در شکل ۵ 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 [۲۴]. در این مدل، ارتفاع لایه مذکور متناظر با ماکزیمم دانسیته الکترونی در یونسفر در نظر گرفته می‌شود (۳۵۰ تا ۴۵۰ کیلومتر). مراحل استخراج مقادیر STEC با استفاده از مشاهدات GPS عبارتند از:

- آماده سازی داده‌های ورودی شامل:
 - فایل‌های مشاهداتی GPS در قالب Rinex^۲
 - اطلاعات مداری دقیق ماهواره‌ها
 - مقادیر DCB ماهواره‌ها
- پیش پردازش مشاهدات GPS به منظور کشف مشاهدات اشتباه، جهش‌های فازی و تشکیل کمانهای پیوسته مشاهداتی
- هموار سازی مشاهدات کد با استفاده از مشاهدات فاز (کاهش سطح نویز مشاهدات کد)
- محاسبه آزیموت و ارتفاع هر ماهواره در هر اپک و در نهایت محاسبه مختصات محل تلاقی امتداد گیرنده-ماهواره با لایه یونسفر (IPP^۳)
- محاسبه مقدار تابع تصویر برای تبدیل VTEC به STEC (رابطه ۱۱)
- تشکیل مشاهده کد هموار شده عاری از اثرات هندسی (مشاهده یونسفر) در هر اپک و تصحیح کردن آنها با استفاده از مقادیر DCB ماهواره‌ها (رابطه ۱۲)
- محاسبه ضرایب مجهول توابع پایه مورد استفاده در بسط VTEC به همراه مقادیر DCB گیرنده‌ها و تولید نقشه‌های یونسفری

$$MF(z) = \frac{STEC}{VTEC} = \frac{1}{\cos z} \quad (۱۱)$$

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

$$\bar{P}_4 - b_4 = a \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) MF(z) \times VTEC(\beta, s) - B_4 \quad (۱۲)$$

^۱ Single Layer Model

^۲ Receiver Independent Exchange Format

^۳ Ionospheric Pierce Point

^۴ Sea Surface Height

که مقادیر VTEC حاصل از روش ارتفاع سنجی، دارای مقادیر کوچکتری باشند. زیرا مدار این ماهواره ها پایینتر از مدار ماهواره های GPS بوده و اندازه گیریهای ارتفاع سنجی ماهواره‌ای شامل اثر بخش بالایی یونسفر نمی گردند. اما در عمل و طی مطالعاتی روی اندازه گیریهای TOPEX و JASON-1 معلوم شده است که اندازه گیریهای ارتفاع سنجی، مقادیر VTEC را حدود ۳ تا ۴ TECU از مقادیر تابید شده GPS بزرگتر نشان می دهند که ناشی از یک اثر سیستماتیک دستگاهی بوده و می توان آن را به عنوان بایاس در نظر گرفت و در فرآیند مدلسازی یونسفر به عنوان یک مجهول در کنار باقی مجهولات برآورد نمود [۱۲].

۴- مدلسازی یونسفر با استفاده از توابع پایه بی-اسپلاین

استفاده از توابع پایه بی-اسپلاین به خاطر دارا بودن محمل فشردگی در مدلسازی پدیده ها به صورت محلی و منطقه ای توصیه می شود. قبل از توصیف شیوه مدلسازی، محدوده مورد نظر برای کار را در یک چارچوب مرجع زمین - ثابت به صورت زیر در نظر می گیریم.

$$[\lambda_{min}, \lambda_{max}] \times [\varphi_{min}, \varphi_{max}] \quad (15)$$

همچنین فرض بر این است که مدلسازی در بازه زمانی $[t_{min}, t_{max}]$ صورت می گیرد. تابع بی-اسپلاین نرمال شده $N_{j,k}^m$ بصورت تکراری با استفاده از رابطه ۱۶ محاسبه می شود [۱۸].

$$N_{j,k}^m(x) = \frac{x-t_k^j}{t_{k+m}^j-t_k^j} N_{j,k}^{m-1}(x) + \frac{t_{k+m+1}^j-x}{t_{k+m+1}^j-t_{k+1}^j} N_{j,k+1}^{m-1}(x) \quad (16)$$

همچنین شروع فرآیند تکرار با استفاده از رابطه آغازین زیر صورت می پذیرد.

$$N_{j,k}^0(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } t_k^j \leq x \leq t_{k+1}^j \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

در این روابط j سطح نام دارد و $t_0^j, t_1^j, t_2^j, \dots, t_{mj+2}^j$ یک دنباله غیر نزولیست که اعضای آن گره نامیده شده و تعداد آنها برابر با $k+1$ و $m_j=2j+2$ است. به منظور مدلسازی منطقه‌ای، درونیایی روی بازه $[0,1]$ صورت گرفته و برای اجتناب از اثر لبه ها مقدار اولین سه گره

(۲۰۰۸) اشاره نمود. در تمامی مأموریت‌های فوق، ارتفاع سنج نصب شده روی ماهواره در دو باند فرکانسی سیگنال ارسال می کنند، که بدین ترتیب امکان جمع آوری اطلاعات در رابطه با VTEC در مسیر حرکت ماهواره و در راستای عمود بر سطح دریاها میسر می گردد. ارتفاع سنج های راداری ماهواره های TOPEX و JASON-1 که توسط ناسا تولید شده اند، در دو فرکانس ۱۳/۶ گیگاهرتز (باند Ku) و ۵/۳ گیگاهرتز (باند C) به طور همزمان کار می کنند و اولین ارتفاع سنجهای راداری ماهواره ای بودند که امکان اندازه گیری VTEC را میسر ساختند [۲۵].

مشابه با اندازه گیریهای GPS تأثیر یونسفر روی اندازه گیری های ارتفاع سنجی ماهواره‌ای با مقدار VTEC و معکوس مجذور فرکانس سیگنال راداری تناسب دارند. در باند Ku حساسیت فاصله به تأخیر یونسفر به مقدار $2/2 \text{ mm/TECU}$ است، که می تواند منجر به بلندتر شدن فاصله به میزان ۲ تا ۳۰ سانتی متر گردد [۱۲].

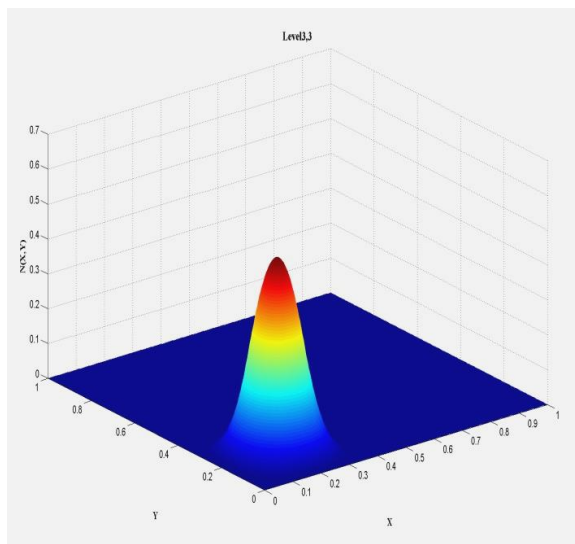
تأخیر یونسفری (dR) بدست آمده از اندازه گیریهای ارتفاع سنجی راداری از مشاهدات دو فرکانس، در واحد میلی متر حاصل شده و بدون نیاز به تابع تصویر و از طریق رابطه ۱۴ تبدیل به واحد TECU می گردند. عدم نیاز به تابع تصویر به دلیل قائم بودن اندازه گیریها نسبت به سطح دریا خود یک دلیل بالا رفتن دقت تعیین مقدار VTEC در این روش است، چرا که در فرآیند محاسبه مقدار VTEC با استفاده از اندازه گیریهای GPS در ابتدا STEC بدست می آید و سپس باید توسط یک تابع تصویر تبدیل به VTEC شود و این موضوع خود می تواند منشأ تولید خطا گردد [۲۵].

$$VTEC_{att} = -dR \cdot 10^{-3} \frac{f_{Ku}^2}{40.28 \times 10^{16}} [TECU] \quad (14)$$

اغلب مقادیر VTEC بدست آمده از اندازه گیریهای GPS و اندازه گیریهای ارتفاع سنجی راداری به عنوان یک روش اعتبارسنجی، با یکدیگر مقایسه می شوند. بدین منظور باید مقادیر VTEC در راستای حرکت ماهواره های ارتفاع سنجی راداری از مدلهای حاصل از اندازه گیریهای GPS درونیایی شده و سپس با مقادیر VTEC حاصل از ارتفاع سنجی ماهواره ای مقایسه شوند. بطور کلی توافق خوبی بین دو مقدار با در نظر گرفتن خطاهای سیستماتیک و نکات لازم برقرار است. از نقطه نظر تئوری انتظار می رود

$$\phi_{j_1 j_2, k_1 k_2}(s, \varphi) = \phi_{j_1, k_1}(s) \phi_{j_2, k_2}(\varphi) \quad (19)$$

در اینجا نیز به منظور نمایش و بیان جزئیات بیشتر VTEC باید سطح را بالا برده و طبیعتاً بالا بردن سطح باعث بالا رفتن تعداد ضرایب می‌شود [9]. در شکل ۷ نمونه‌ای از توابع مقیاس دو بعدی را مشاهده می‌نمایید.



شکل ۷- تابع مقیاس بی-اسپلاین دوبعدی سطوح ۳ و ۳

همانطور که قبلاً گفته شد مقادیر x برای توابع پایه $\phi_{j,k}(x)$ باید بین صفر و یک باشند. بنابراین مختصاتهای s و φ باید به مختصاتهای x و y از طریق روابط زیر تبدیل شوند.

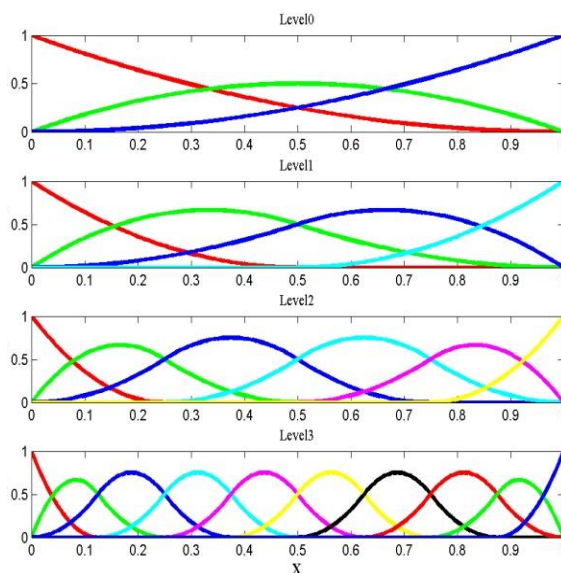
$$x = \frac{s - s_{min}}{s_{max} - s_{min}}, \quad y = \frac{\varphi - \varphi_{min}}{\varphi_{max} - \varphi_{min}} \quad (20)$$

بطوریکه کمیت‌های s_{min} , s_{max} , φ_{min} , φ_{max} بیانگر مختصاتهای محدوده مدلسازی در یک چارچوب مرجع خورشید ثابت هستند. s_{min} و s_{max} با استفاده از رابطه ۱۳ و λ_{min} , λ_{max} و t_{min} و t_{max} محاسبه می‌شوند.

۴-۱- پایدارسازی

دستگاه معادلات خطی $E(L) = Ax$ برای تعیین ضرایب مجهول مدل یونسفر با استفاده از توابع پایه بی-اسپلاین، ممکن است به دلیل غیر یکنواخت بودن توزیع داده‌ها بدوضع باشد (E اپراتور امید ریاضی می‌باشد). به عبارت دیگر ممکن است مشاهدات به قدر کافی برای تعیین ضرایب مجهول در یک راه حل قابل اعتماد متراکم نباشند. در چنین دستگاه معادلاتی، روش کمترین مربعات ذاتاً به خطای موجود در مشاهدات حساس خواهد بود و

صفر و مقدار آخرین سه گره در نظر گرفته می‌شود و باقیمانده گره‌ها به صورت مساوی فاصله‌بندی می‌شوند [9]. همچنین m مرتبه بی-اسپلاین نامیده شده که برای بی-اسپلاینهای کوادراتیک این عدد برابر با ۲ می‌باشد. در شکل ۶ توابع پایه بی-اسپلاین کوادراتیک یک بعدی برای سطوح $j=0, j=1, j=2$ و $j=3$ نمایش داده شده‌اند. همانطور که در شکل دیده می‌شود یک بی-اسپلاین دارای محمل فشرده می‌باشد، یعنی مقدار آن خارج از یک محدوده مشخص صفر خواهد بود. همچنین هرچه سطح بی-اسپلاین بالاتر می‌رود این توابع باریکتر شده، لذا جزئیات بیشتری از مقادیر VTEC قابل بیان و نمایش خواهد بود.



شکل ۶- توابع مقیاس کوادراتیک یک بعدی بی-اسپلاین

در مدلسازی دوبعدی، یونسفر در یک بازه زمانی مشخص $[t_{min}, t_{max}]$ و در یک چارچوب مرجع خورشید - ثابت، استاتیک فرض می‌شود [۱۸].

$$VTEC(s, \varphi) = \sum_{k_1=0}^{m_{j_1}-1} \sum_{k_2=0}^{m_{j_2}-1} d_{j_1 j_2, k_1 k_2} \phi_{j_1 j_2, k_1 k_2}(s, \varphi) \quad (18)$$

در این رابطه $\phi_{j_1 j_2, k_1 k_2}(s, \varphi)$ توابع مقیاس دوبعدی از سطوح j_1 و j_2 نسبت به طول جغرافیایی خورشید ثابت (s) و عرض جغرافیایی (φ) می‌باشند. $d_{j_1 j_2, k_1 k_2}$ ضرایب مقیاس مجهول هستند. توابع مقیاس دوبعدی را می‌توان با استفاده از ضرب تنسوری، یعنی جداسازی توابع مقیاس با ابعاد بالاتر به توابع مقیاس یک بعدی به صورت زیر محاسبه کرد.

$$E(\underline{L}) = Ax; \quad D(\underline{L}) = Q_l = \sum_{k=1}^p \sigma_k Q_k \quad (22)$$

که در آن \underline{L} بردار مشاهدات با بعد m بردار x مجهولات با بعد n ماتریس طرح با ابعاد $m \times n$ ، Q_l ماتریس کوواریانس مشاهدات با ابعاد $m \times m$ و E و D به ترتیب عملگرهای امید ریاضی و پراکنش می باشند. همچنین ساختار ماتریس کوواریانس مشاهدات تا حدودی معلوم است، بدین معنا که می توان آن را به صورت ترکیب خطی مجهول از ماتریسهای کوفاکتور معلوم (Q_k) بیان کرد. در این تحقیق از روش برآورد مولفه های کوواریانس کمترین مربعات، برای برآورد مولفه های مجهول کوواریانس ($\hat{\sigma}_k$) استفاده می شود. [۲۸]

روش برآورد کمترین مربعات مولفه های واریانس، یک روش قدرتمند برای برآورد پارامترهای مجهول کوواریانس در مدل تصادفی، با استفاده از روش حل تکراری و به شکل $\hat{\sigma} = N^{-1}l$ بوده که در آن ماتریس N با ابعاد $p \times p$ بردار L با بعد p و بردار $\hat{\sigma}$ بردار مجهولات کوواریانس برآورد شده به شکل $\hat{\sigma}_k = [\hat{\sigma}_1 \dots \hat{\sigma}_p]$ با بعد p می باشند.

عناصر ماتریس نرمال N و بردار L به ترتیب با استفاده از روابط ۲۳ و ۲۴ به دست می آیند. [۲۸]

$$n_{ij} = \frac{1}{2} tr(Q_i Q_l^{-1} P_A^\perp Q_j Q_l^{-1} P_A^\perp) \quad (23)$$

$$L_i = \frac{1}{2} \hat{e}^t Q_l^{-1} Q_i Q_l^{-1} \hat{e} \quad (24)$$

که در آن $P_A^\perp = I_m - A(A^t Q_l^{-1} A)^{-1} A^t Q_l^{-1}$ تصویرگر قائم و \hat{e} بردار باقیمانده های برآورد شده با بعد m می باشند. ماتریس کوواریانس مجهولات برآورد شده به روش برآورد مولفه های واریانس کمترین مربعات به شکل معکوس ماتریس نرمال $Q_{\hat{\sigma}} = N^{-1}$ می باشد.

$Q_{\hat{\sigma}}$ ماتریسی با ابعاد $p \times p$ بوده و عناصر قطری این ماتریس نشانگر دقت مجهولات مولفه های کوواریانس برآورد شده است. [۲۸]

واضح است در صورتی که ابعاد ماتریس A بزرگ باشد زمان زیادی برای محاسبات LS-VCE نیاز است. یکی از ساده ترین راهکارها برای کاهش زمان و حجم محاسبات، استفاده از اپکهای مشاهداتی کمتر می باشد. این روش تضمینی برای رسیدن به دقت مورد انتظار در برآورد

خطای کوچکی در مشاهدات ممکن است منجر به خطای فاحشی در نتایج گردد. برای رفع این مشکل روشهای پایدارسازی باید به کار گرفته شوند. همانطور که می دانیم طبق شروط هادامارد مسئله ای را خوش وضع می نامند که:

۱. مسئله دارای جواب باشد (شرط وجود)
۲. جواب یکتا داشته باشد (شرط یکتایی)
۳. جواب مسئله بر حسب مشاهدات پیوسته باشد (شرط پایداری)

اگر برای هر دستگاه معادلات فقط یکی از شروط فوق برقرار نباشد، مسئله را بدوضع می نامند. در این حالت با توجه به غیر صفر بودن مقادیر منفرد، ماتریس A معکوس پذیر بوده، لذا مسئله دارای جواب یکتاست. اما با توجه به بزرگ بودن عدد شرط ماتریس، خطائی کوچک در مشاهدات باعث ایجاد خطای بزرگی در جواب مسئله می گردد. لذا در اینجا شرط سوم هادامارد برقرار نبوده و باید به سراغ روشهای پایدارسازی برای حل مسئله برویم [۲۶] و [۲۷].

یکی از روشهای پایدارسازی روش تیخونوف است. در این روش، جواب پایدار شده جوابی است که تابع زیر را مینیمم می کند.

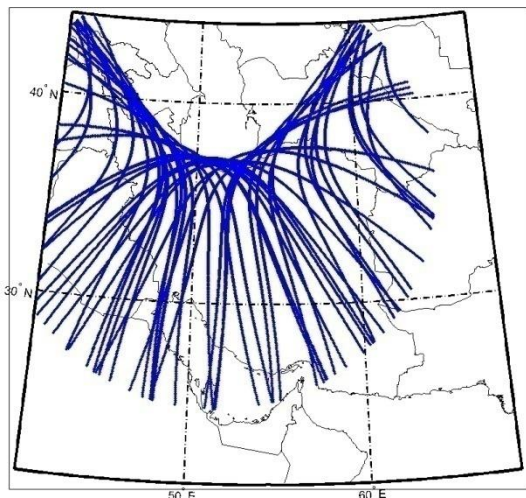
$$\|Ax - \underline{L}\|_2^2 + \lambda^2 \|\underline{x}\|_2^2 \quad (21)$$

λ پارامتر پایدارسازی تیخونوف نامیده می شود. در اثر استفاده از پارامتر پایدارسازی λ برای بدست آوردن مجهولات، بایستی در نتایج به وجود خواهد آمد که برای کنترل کردن آن باید پارامتر بهینه ای برای λ انتخاب نمود. یکی از ابزارهای مورد استفاده بدین منظور منحنی ال می باشد. اساس روش منحنی ال که یک روش گرافیکی است یافتن نقطه با حداکثر انحنا در نمودار نرم بردار جواب بر حسب نرم بردار باقیمانده ها در مقیاس لگاریتمی است. علت انتخاب این نقطه برقراری تعادل بین اغتشاش ناشی از پایدارسازی و اغتشاش ناشی از خطای مشاهدات است [۲۴] و [۲۵].

۴-۲- روش برآورد کمترین مربعات مولفه های واریانس کمترین مربعات

سیستم معادلات مشاهدات ۲۲ را در نظر بگیرید:

همچنین در شکل ۹ توزیع نمونه‌گیری از یونسفر توسط ایستگاه دائمی تهران (TEHN) را مشاهده می‌کنید.



شکل ۹- توزیع نمونه‌گیری از یونسفر توسط مشاهدات ایستگاه دائمی TEHN در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴

در این تحقیق، مقادیر DCB برای ماهواره‌ها به عنوان کمیت‌های معلوم فرض شده و به همراه اطلاعات مداری دقیق ماهواره‌ها از سایت‌های IGS دریافت شدند. همچنین محدوده مورد نظر برای مدل‌سازی یونسفر دارای عرض جغرافیایی ۲۲ تا ۴۲ درجه و طول جغرافیایی ۴۰ تا ۶۵ درجه و به گونه‌ای که در برگیرنده کل ایران باشد، در نظر گرفته شد. از نقطه نظر زمانی نیز محدوده ساعت ۱۳ تا ۱۵ بعد از ظهر به وقت محلی متناظر با بیشینه مقدار اثر یونسفر به عنوان بازه زمانی مدل‌سازی انتخاب شده و ارتفاع لایه یونسفر همانند مدل‌های جهانی برابر با ۴۵۰ کیلومتر انتخاب گردید.

در ادامه با استفاده از سطوح مختلف توابع پایه بی-اسپلاین دوبردی، ضرایب مجهول مدل یونسفر به همراه مقادیر DCB گیرنده‌ها برآورد شده و در نهایت با معیار قرار دادن کمترین ریشه میانگین مربعات باقیمانده‌ها، سطح ۱ در راستای طول جغرافیایی و سطح ۲ در راستای عرض جغرافیایی برای توابع پایه بی-اسپلاین که معادل ۲۴ ضریب می‌باشد، انتخاب گردیدند.

محاسبه دقیق مقادیر DCB گیرنده‌ها یکی از نکات مهم در فرآیند مدل‌سازی یونسفر با استفاده از مشاهدات GPS می‌باشد. صحت و سازگاری این مقادیر خود نشانه‌ای از موفق بودن فرآیند مدل‌سازی خواهد بود. مقادیر DCB برآورد شده برای کلیه ایستگاه‌های استفاده شده در این

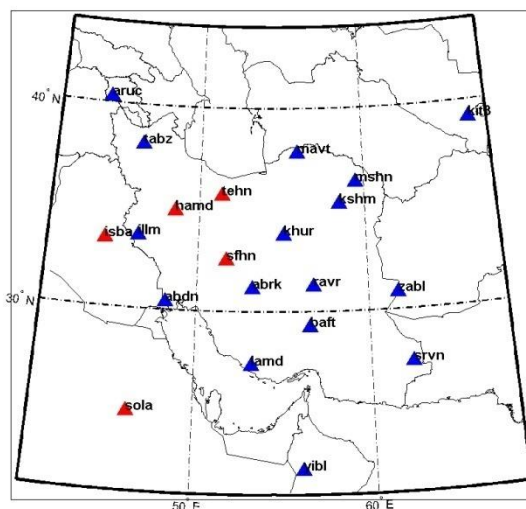
مجهولات نخواهد داشت. بنابراین به منظور استفاده از کلیه اطلاعات در دسترس و نیز کاهش زمان و حجم محاسبات می‌توان بردار مشاهدات l با بعد m را به r گروه یا دسته تقسیم کرد. در این صورت با فرض تکرار مدل تصادفی $Q_l = \sum_{k=1}^p \sigma_k Q_k$ در هر گروه، می‌توان پارامترهای مجهول کووریانس را در آن گروه به صورت مجزا برآورد کرد. در این صورت خواهیم داشت:

$$\hat{\sigma}_k = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \hat{\sigma}_k^{(i)} ; k = 1, \dots, p \quad (25)$$

که در آن $\hat{\sigma}_k^{(i)}$ مولفه کووریانس k ام در گروه i ام و r تعداد گروه‌های مشاهداتی می‌باشند. توضیحات بیشتر مربوط به این روش را می‌توانید در [۲۸] مشاهده کنید.

۵- نتایج

به منظور مدل‌سازی محلی یونسفر در ایران، مشاهدات ۱۶ ایستگاه دائمی از شبکه سراسری ایران (IPGN) و ۵ ایستگاه دائمی از شبکه جهانی IGS که در اطراف ایران واقع شده‌اند استفاده شد. این داده‌ها با فاصله نمونه‌گیری ۳۰ ثانیه و زاویه ارتفاعی حداقل ۱۰ درجه مربوط به روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ متناظر با آخرین تاریخ بیشینه فعالیت خورشیدی هستند. شکل ۸ توزیع مکانی ایستگاه‌های مذکور را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های مشخص شده با رنگ آبی دارای گیرنده‌هایی از نوع C1/P2 و رنگ قرمز از نوع P1/P2 می‌باشند.

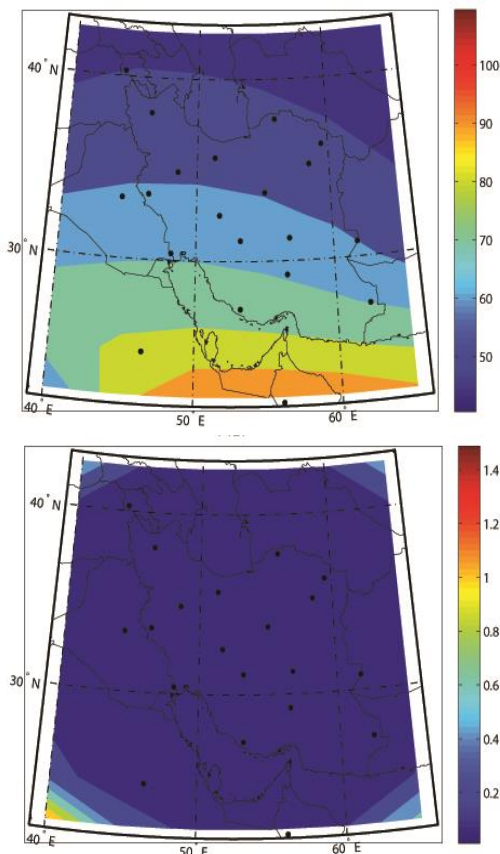


شکل ۸- توزیع مکانی ایستگاه‌های GPS مورد استفاده در این تحقیق

در جدول ۲ مقادیر DCB سه ایستگاه IGS، در دو حالت مدل‌سازی جهانی (قابل دسترس از سایت‌های IGS) و مدل‌سازی محلی (حاصل از این مطالعه) به منظور مقایسه آورده شده است. لازم به ذکر است که در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ تنها از مشاهدات این سه ایستگاه در مدل‌سازی جهانی یونسفر استفاده شده است. ریشه میانگین مربعات اختلافات در این سه ایستگاه برابر با ۱/۶۰۸ نانو ثانیه می‌باشد.

جدول ۲- اختلاف مقادیر DCB در دو حالت مدل‌سازی جهانی (GIM) و مدل‌سازی محلی (LIM) (مقادیر به واحد نانوثانیه هستند)

Station	GIM_DCB (ns)	LIM_DCB (ns)	Diff. (ns)
ISBA	-۶/۷۷۳	-۸/۱۱۰	-۱/۳۳۷
KIT3	۸/۴۱۸	۵/۹۸۰	-۲/۴۳۸
YIBL	-۱۴/۰۹۵	-۱۳/۹۴۸	۰/۱۴۷



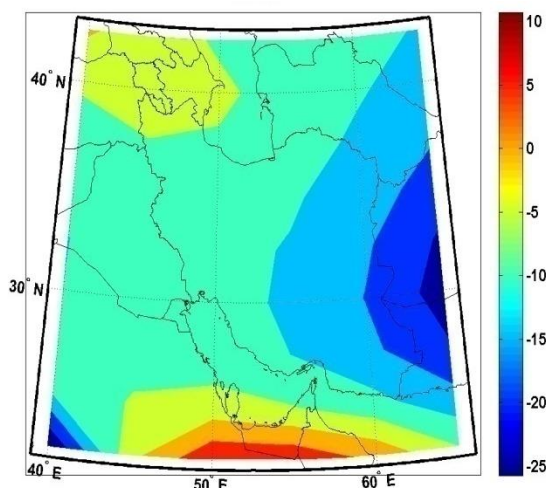
شکل ۱۰- نقشه‌های VTEC (بالا) و RMS (پایین) با در نظر گرفتن $J_1=1, J_2=2$ برای ساعت ۱۴ به وقت محلی در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ (مقادیر به واحد TECU هستند)

همچنین در شکل ۱۰ نقشه VTEC و RMS برای ساعت ۱۴ به وقت محلی دیده می‌شود. مطابق با این شکل بیشترین مقدار VTEC در ایران در روز ۱۰۷ از سال

مدلسازی در جدول ۱ به همراه مقادیر RMS آنها آورده شده است. همانطور که در این جدول دیده می‌شود مقادیر DCB گیرنده‌های از نوع C1/P2 به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از مقادیر DCB مربوط به گیرنده‌های نوع P1/P2 هستند، که این موضوع با توجه به تفاوت کیفیت مشاهدات C1 و P1 طبیعی است. در مورد گیرنده‌های نوع C1/P2 اعمال کردن هر دو مقدار DCB_P1P2 و DCB_P1C1 ماهواره‌ها به مشاهدات عاری از اثرات هندسی ضرورت دارد، این در حالیست که در مورد مشاهدات گیرنده‌های نوع P1/P2 فقط اعمال کردن اثر DCB_P1P2 ماهواره‌ها مورد نیاز است.

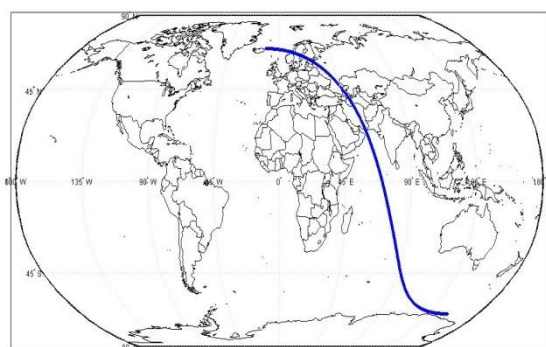
جدول ۱- مقادیر برآورد شده DCB گیرنده‌ها در فرآیند مدل‌سازی محلی یونسفر با استفاده از توابع پایه بی-اسپلاین

Station	DCB(ns)	RMS(ns)	Receiver Type
ABDN	-۳/۶۰۱	۰/۰۲۷	P1/P2
ABRK	-۲/۰۶۸	۰/۰۲۸	P1/P2
ARUC	-۴/۴۱۸	۰/۰۳۴	P1/P2
BAFT	-۰/۷۶۸	۰/۰۲۹	P1/P2
HAMD	-۱۰/۳۳۲	۰/۰۲۸	C1/P2
ILLM	-۶/۹۹۷	۰/۰۲۸	P1/P2
ISBA	-۸/۱۱۰	۰/۰۲۸	C1/P2
KHUR	-۰/۷۶۷	۰/۰۲۹	P1/P2
KIT3	۵/۹۸۰	۰/۰۴۱	P1/P2
KSHM	-۱۰/۷۲۲	۰/۰۲۹	P1/P2
LAMD	-۲/۱۹۵	۰/۰۲۹	P1/P2
MAVT	-۱/۳۵۴	۰/۰۳۰	P1/P2
MSHN	-۷/۷۷۱	۰/۰۲۹	P1/P2
RAVR	-۸/۲۱۷	۰/۰۲۸	P1/P2
SFHN	-۱۳/۲۰۳	۰/۰۲۸	C1/P2
SOLA	۴۲/۷۰۲	۰/۰۳۱	C1/P2
SRVN	-۴/۹۹۶	۰/۰۳۰	P1/P2
TABZ	-۶/۶۱۲	۰/۰۲۹	P1/P2
TEHN	-۳/۸۰۵	۰/۰۲۹	P1/P2
YIBL	-۱۳/۹۴۸	۰/۰۴۱	C1/P2
ZABL	-۲/۶۸۹	۰/۰۲۹	P1/P2



شکل ۱۲- اختلاف مدل یونسفر ایران بر مبنای توابع پایه بی-اسپلاین (LIM) و مدل جهانی (GIM) در ساعت ۱۴ روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ (مقادیر به واحد TECU هستند)

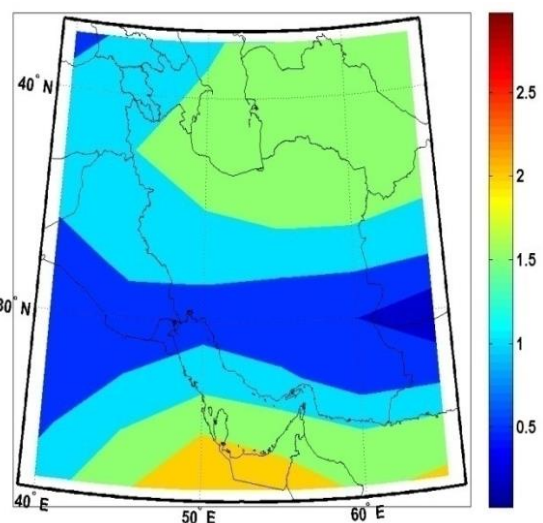
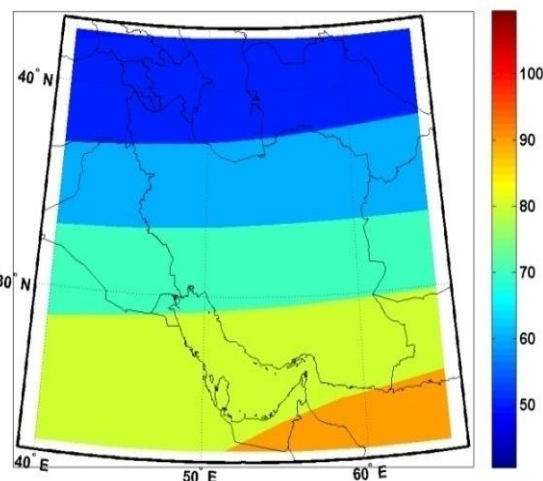
در این بخش می‌خواهیم با اضافه کردن مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره‌ای مربوط به ماهواره Jason-2 سیکل ۲۱۳ و عبور ۹۲ در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴، که بخشی از مشاهدات آن جنوب شرق ایران در دریای عمان تا شمال در دریای خزر را شامل می‌شود و تلفیق آن با مشاهدات GPS مدل یونسفر ترکیبی را تولید کنیم. مسیر عبور ۹۲ از سیکل ۲۱۳ ماهواره Jason-2 در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.



شکل ۱۳- مسیر عبور ۹۲ از سیکل ۲۱۳ ماهواره Jason-2 در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴

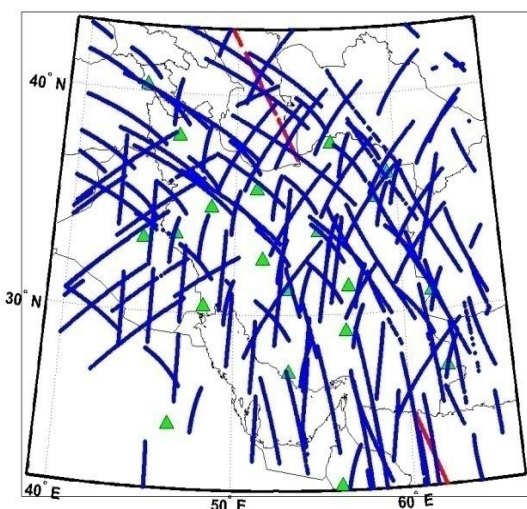
بدین منظور پس از دریافت فایل‌های باینری مربوط به مشاهدات ارتفاعسنجی Jason-2 و تبدیل آنها به فایل‌های مشاهده‌ای، بخش مربوط به اثر یونسفر را از آن جدا کرده و با استفاده از فیلتر median ۲۰ نقطه‌ای آنها را هموار می‌کنیم. اثر یونسفر در این حالت مربوط به اختلاف در دو فرکانس، ناشی از یونسفر بوده که به واحد متر در شکل ۱۴ (قسمت بالا) مربوط به دریای خزر با رنگ آبی و مقادیر فیلتر شده با رنگ قرمز و در شکل ۱۴ (قسمت پایین)

۲۰۱۴ برابر با $100/12$ TECU و مربوط به جنوب ایران است. به منظور مقایسه مقادیر بدست آمده با مدل جهانی (GIM) نقشه مقادیر VTEC و RMS آنها با استفاده از مدل CODE مربوط به ساعت ۱۴ روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ در شکل ۱۱ آورده می‌شود. لازم به ذکر است این مدل با استفاده از بسط به هارمونیک‌های کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ و با رزولوشن $2/5$ درجه در عرض جغرافیایی و ۵ درجه در طول جغرافیایی و بازه‌های زمانی دوساعته تولید شده است. همچنین در شکل ۱۲ میزان اختلاف دو مدل را می‌توانید مشاهده کنید. مقدار این اختلاف از -25 تا $+10$ TECU در مکانهای مختلف متفاوت است. مقدار میانگین این اختلافات در سطح ایران برابر با $-8/40$ TECU با انحراف معیار $6/38$ TECU و جذر میانگین مربعات (RMS) $10/52$ TECU می‌باشد.



شکل ۱۱- نقشه‌های VTEC (بالا) و RMS (پایین) مدل جهانی (GIM) برای ساعت ۱۴ روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ (مقادیر به واحد TECU هستند)

پس از محاسبه مقادیر VTEC از روی مشاهدات ارتفاعسنجی و با داشتن موقعیت مکانی مسیر حرکت ماهواره و تلفیق آنها با مشاهدات GPS، می‌توان مدل ترکیبی یونسفر را ایجاد نمود. در این قسمت باید ماتریس وزن مشاهدات ترکیبی به درستی تشکیل شود. بدین منظور از روش برآورد مولفه‌های واریانس کمترین مربعات (LS-VCE) استفاده می‌کنیم. قبل از شروع این مرحله ماتریس وزن ابتدایی مشاهدات GPS بر اساس ارتفاع ماهواره‌ها تنظیم می‌شود. به عبارت دیگر وزن نسبی بین مشاهدات را رعایت کرده و بگونه‌ای عمل می‌کنیم که مشاهده مربوط به ماهواره با ارتفاع بیشتر دارای وزن بیشتری نسبت به مشاهده مربوط به ماهواره با ارتفاع کمتر باشد. همچنین ماتریس وزن نسبی مشاهدات ارتفاعسنجی را برابر با ماتریس همانی در نظر گرفته و برآورد مجهولات را انجام می‌دهیم. در شکل شماره ۱۶ توزیع مشاهدات GPS را با رنگ آبی و توزیع مشاهدات ارتفاعسنجی را با رنگ قرمز از ساعت ۲۰/۵ تا ۲۱/۵ به وقت محلی مشاهده می‌کنید.

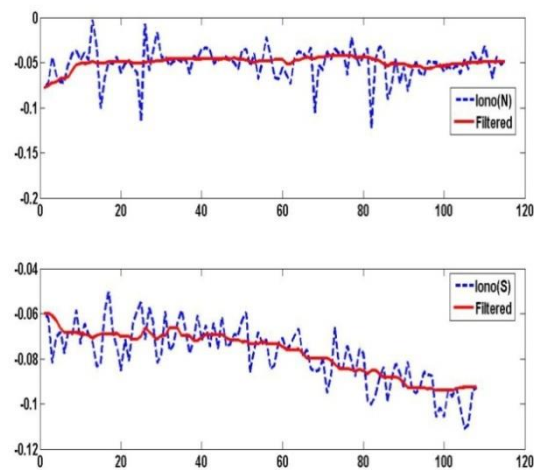


شکل ۱۶- توزیع مشاهدات GPS مربوط به ۲۱ ایستگاه (رنگ آبی) و مشاهدات ارتفاعسنجی (رنگ قرمز) در بازه زمانی ۲۰/۵ تا ۲۱/۵ به وقت محلی

همچنین مقادیر مولفه‌های واریانس برآورد شده که به روش تکرار و با استفاده از تکنیک LS-VCE حاصل شده‌اند، برای مشاهدات GPS با رنگ قرمز و برای مشاهدات ارتفاعسنجی با رنگ آبی در شکل ۱۷ قابل مشاهده است.

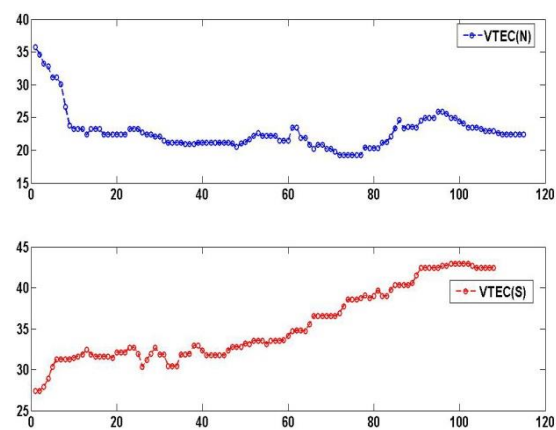
همانطور که در تصویر ۱۷ مشهود است پس از تکرار دوم مقادیر مولفه‌های واریانس، همگرا شده و مقدار آن ثابت می‌شود.

مربوط به دریای عمان با رنگ آبی و مقادیر فیلتر شده به رنگ قرمز آورده شده‌اند. به منظور اجرای فیلتر ۲۰ median نقطه‌ای که توصیه دستورات عملیاتی ارتفاعسنجی ماهواره‌ای می‌باشد، داده نقطه اول و پایانی ۲۰ بار تکرار می‌شوند.



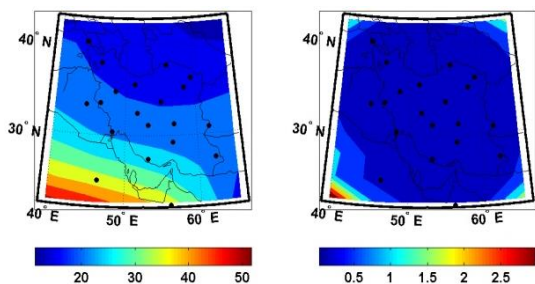
شکل ۱۴- مقادیر خام و هموار شده اثر یونسفر روی مشاهدات ارتفاعسنجی ماهواره‌ای Jason-2 (N مربوط به دریای خزر و S مربوط به دریای عمان است و مقادیر به واحد متر هستند)

برای تبدیل مقادیر اثر یونسفر از واحد میلیمتر به واحد TECU از رابطه ۱۴ استفاده می‌کنیم.



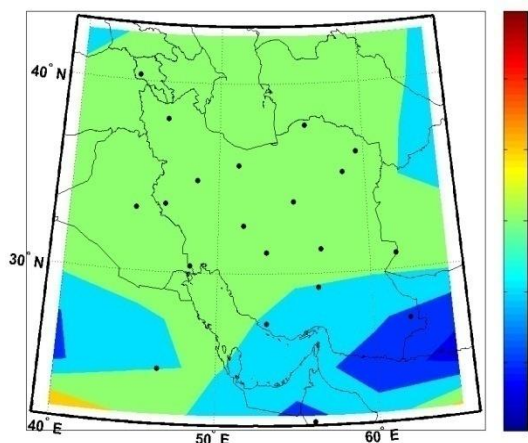
شکل ۱۵- مقادیر VTEC حاصل از مشاهدات ارتفاعسنجی راداری ماهواره Jason-2 در محدوده ایران (N مربوط به دریای خزر و S مربوط به دریای عمان است مقادیر به واحد TECU هستند)

شکل ۱۵ مربوط به مقادیر VTEC در راستای مسیر حرکت ماهواره Jason-2 در سیکل ۲۱۳ و عبور ۹۲ از محدوده ایران و در واحد TECU است. N مربوط به دریای خزر و S مربوط به دریای عمان است. از آنجا که این ماهواره‌ها سیگنالهای خود را به صورت عمود بر سطح زمین ارسال می‌کنند، لذا مقادیر بدست آمده VTEC هستند و در اینجا نیازی به تابع تصویر نداریم.



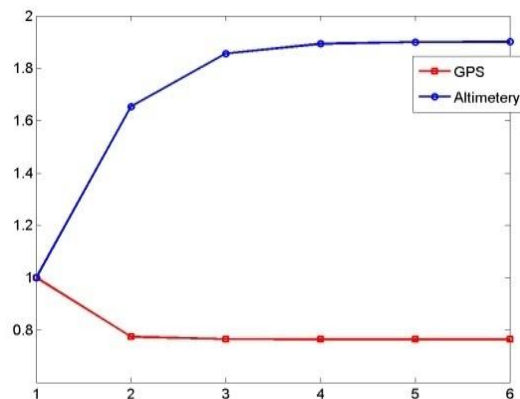
شکل ۱۹- نقشه‌های VTEC و RMS مدل یونسفر ایران با استفاده از تلفیق مشاهدات GPS و ارتفاعسنجی ماهواره‌ای (مقادیر به واحد TECU هستند)

در شکل ۲۰ نیز اختلاف دو مدل قبل آورده شده است. همانطور که از این تصویر برمی‌آید اضافه کردن مشاهدات ارتفاعسنجی راداری به مشاهدات GPS حداکثر، تغییری در حدود ۱ تا ۱/۵ TECU را در منطقه جنوب شرقی ایران (دریای عمان) باعث شده است. عدم تغییر قابل ملاحظه در دریای خزر را می‌توان مربوط به تراکم‌تر بودن داده‌های GPS در دریای خزر نسبت به دریای عمان عنوان کرد. به عبارت دیگر تراکم مشاهدات GPS استفاده شده در این تحقیق به قدری در دریای خزر مناسب بوده است که اضافه کردن مشاهدات ارتفاعسنجی راداری بهبود کمتری در آن منطقه ایجاد کرده است. در جدول ۴ نیز مقادیر ریشه‌کترین مربعات باقیمانده‌ها را به تفکیک برای شمال ایران (N) و جنوب ایران (S) مشاهده می‌نمایید.



شکل ۲۰- نقشه اختلاف مقادیر VTEC، حاصل شده از مشاهدات GPS تنها و تلفیق مشاهدات GPS و ارتفاعسنجی ماهواره‌ای (مقادیر به واحد TECU هستند)

همانطور که در این جدول دیده می‌شود در حالت مدل‌سازی ترکیبی در هر دو نیمه بهبود حاصل شده است. البته میزان این بهبود در جنوب ایران بیشتر است، که به علت تراکم کمتر داده‌های GPS در جنوب ایران است.



شکل ۱۷- مقادیر مولفه‌های واریانس برای هر دو دسته مشاهدات حاصل از تکنیک LS-VCE به واحد $TECU^2$

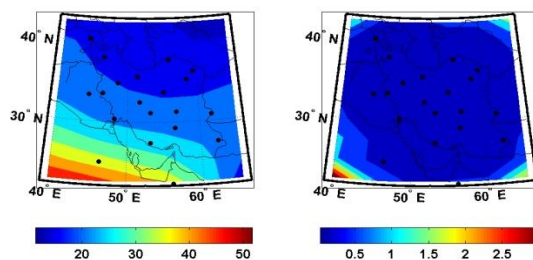
مقادیر نهایی مولفه‌های واریانس برای هر دو دسته مشاهدات که به واحد $TECU^2$ هستند را می‌توانید در جدول ۳ مشاهده نمایید.

جدول ۳- مقادیر نهایی مولفه‌های واریانس به واحد $TECU^2$

Data Type	LS-VCE
GPS	۰/۷۶۴۷
Altimetry	۱/۹۰۱۷

در نهایت پس از تشکیل ماتریس وزن، مقادیر مجهولات، شامل ضرایب مدل یونسفر به همراه مقادیر DCB به ازای هر ایستگاه و یک بایاس بین مشاهدات GPS و مشاهدات ارتفاعسنجی برآورد می‌گردد.

در تصاویر ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نقشه‌های VTEC و RMS مربوط به استفاده از مشاهدات GPS تنها و مشاهدات ترکیبی را می‌توانید مشاهده کنید. همانطور که در این تصاویر (در دریای عمان) دیده می‌شود، اضافه کردن مشاهدات ارتفاعسنجی به مشاهدات GPS، باعث بهبود دقت مدل در این ناحیه شده است. همچنین مقدار بایاس بین مشاهدات GPS و ارتفاعسنجی ماهواره‌ای در بازه زمانی مدل‌سازی برابر با ۵/۳۱ TECU با انحراف معیار $0/19$ TECU برآورد گردید.



شکل ۱۸- نقشه‌های VTEC و RMS مدل یونسفر ایران با استفاده از مشاهدات GPS تنها (مقادیر به واحد TECU هستند)

جدول ۴- مقادیر ریشه میانگین مربعات باقیمانده‌ها به تفکیک برای شمال ایران (N) و جنوب ایران (S) (مقادیر به واحد TECU هستند)

Data Type	RMSE (N)	RMSE (S)
GPS	۱/۴۰	۱/۷۶
GPS+Altimetry	۱/۳۸	۱/۷۰

۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

یونسفر به عنوان لایه‌ای از اتمسفر زمین که از ارتفاع ۸۰ تا ۱۲۰۰ کیلومتری سطح زمین گسترده شده‌است، حاوی ذرات باردار و الکترونی‌های آزاد بوده و روی انتشار امواج الکترومغناطیسی که در حال عبور از آن هستند اثر گذار خواهد بود. لذا دانستن رفتار و مقدار این اثر در علوم و کاربردهای مختلف از قبیل ارتباطات و مخابرات، هواشناسی اتمسفر، ارتفاع سنجی راداری تک فرکانس و تعیین موقعیت و ناوبری ماهواره‌ای مهم است. امروزه به دلیل گستردگی و حجم انبوه اطلاعات در دسترس و بدست آمده از گیرنده‌های دوفرکانس GPS می‌توان پارامترهای مختلف یونسفر را به خوبی مدل‌سازی کرده و در کاربردهای دیگر مورد استفاده قرار داد. به عبارت دیگر چون یونسفر یک محیط تجزیه‌پذیر است و اثر آن روی امواج الکترومغناطیسی بستگی به فرکانس دارد، لذا با انجام مشاهده همزمان در دو فرکانس می‌توان کل اثر را برآورد کرده و با استفاده از توابع پایه مناسب در مقیاس جهانی، منطقه‌ای و محلی آن را مدل کنیم. امروزه IGS با استفاده از مشاهدات ایستگاههای دائمی سراسر کره زمین به صورت روزانه مدل‌های یونسفری را تحت بستر اینترنت به کاربران ارائه می‌کند که این مدل‌ها در بازه‌های زمانی دو ساعته و با قدرت تفکیک مکانی ۲/۵ درجه در عرض جغرافیایی و ۵ درجه در طول جغرافیایی و قدرت تفکیک زمانی ۲ ساعت، مقادیر VTEC به همراه RMS آنها را در قالب IONEX ارائه می‌دهند. در این راستا مرکز تعیین مدار اروپا (CODE) به عنوان یکی از چهار مرکز IGS که وظیفه تولید مدل‌های یونسفری را بر عهده دارند از توابع هارمونیک کروی تا درجه و مرتبه ۱۵ برای تولید مدل‌های خود استفاده می‌کند و به عبارت دیگر استفاده از توابع هارمونیک کروی در مدل‌سازی دو بعدی یونسفر در مجامع علمی مرسوم است. اما به خوبی می‌دانیم در صورتی می‌توان از توابع هارمونیک کروی در فرآیند مدل‌سازی استفاده کرد که اولاً داده‌های ما کل کره را پوشش دهند و ثانیاً توزیع داده‌ها روی کره همگون باشد که در مورد مشاهدات ایستگاههای دائمی GPS در سراسر کره

زمین اینچنین نیست. چرا که اولاً این ایستگاهها دارای توزیع یکنواخت نیستند و ثانیاً در سطح دریاها به دلیل عدم وجود ایستگاههای دائمی داده‌ای وجود ندارد و در نتیجه مدل‌های جهانی در این مناطق ضعف دارند.

لذا در مدل‌سازی‌های منطقه‌ای و محلی استفاده از توابع پایه با محمل فشرده، مانند توابع بی-اسپلاین پیشنهاد می‌شود که بازه اثر آنها در خارج از محدوده خاصی صفر است. در این پژوهش، به منظور مدل‌سازی یونسفر و تولید نقشه‌های VTEC پس از آزمایشات فراوان توابع بی-اسپلاین سطح ۱ برای طول جغرافیایی و سطح ۲ برای عرض جغرافیایی در بازه‌های زمانی دو ساعته انتخاب شدند. مشاهدات عاری از اثر یونسفر با استفاده از تفاضل مشاهدات کد هموارشده در دوفرکانس برای ۱۶ ایستگاه در ایران و ۵ ایستگاه در اطراف ایران در روز ۱۰۷ از سال ۲۰۱۴ مطابق با آخرین بیشینه فعالیت خورشیدی ایجاد شده و ماتریس وزن نسبی آنها با توجه به ارتفاع ماهواره‌ها تشکیل شد. سپس ۲۴ ضریب مدل به همراه مقادیر DCB گیرنده‌ها در هر دو ساعت برآورد شده و نقشه‌های VTEC به همراه مقادیر RMS آنها تولید شدند. مقدار بیشینه VTEC برابر با بیشتر از ۱۰۰ TECU در جنوب و در ساعت ۱۴ به وقت محلی رویت شد. سپس اختلافات مدل حاصل با مدل جهانی (GIM) محاسبه شده که مقادیر اختلاف در زمانها و مکانهای مختلف از ۲۵- تا ۱۰+ TECU متغیر بود.

در ادامه به منظور بررسی اثر اضافه شدن مشاهدات ارتفاع‌سنجی به مشاهدات GPS در فرآیند تولید مدل‌های یونسفری از مشاهدات ماهواره Jason-2 در روز مورد نظر و سیکل ۲۱۳ و عبور ۹۲ استفاده کردیم و به مشاهدات GPS ۲۱ ایستگاه مذکور اضافه کردیم. در نهایت با استفاده از توابع بی-اسپلاین در دو حالت استفاده از مشاهدات GPS تنها و استفاده از مشاهدات ترکیبی مدل‌سازی را انجام دادیم و در محاسبه ماتریس وزن نیز از تکنیک برآورد مولفه‌های واریانس کمترین مربعات استفاده شد. در نتیجه، بهبود در ریشه میانگین مربعات باقیمانده‌های برآورد شده در حالت استفاده از مشاهدات ترکیبی مشاهده گردید که میزان این بهبود در جنوب شرق ایران (دریای عمان) بیشترین بود.

در پژوهشهای بعدی استفاده از مشاهدات فاز در کنار مشاهدات کد و همچنین استفاده از مشاهدات سیستمهای ناوبری ماهواره‌ای دیگر نظیر GLONASS و BeiDou در کنار مشاهدات GPS پیشنهاد می‌گردد. همچنین پیشنهاد

ژئودینامیک سازمان نقشه‌برداری کشور که زحمت فراوانی را در نگهداری، پشتیبانی، ذخیره و پردازش اطلاعات شبکه ایستگاههای دائمی GNSS ایران (IPGN)، متحمل می‌شوند را اعلام می‌دارند. همچنین از جناب آقای مهندس حامد مرادیان که زحمت ویرایش چکیده لاتین را متقبل شدند نیز تشکر و قدردانی می‌نمائیم.

می‌شود که در مطالعات بعدی اثر مدلهای تولید شده روی بهبود تعیین موقعیت توسط مشاهدات گیرنده‌های تک فرکانس نیز بررسی شود.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی و سپاسگزاری خود را از کارشناسان مرکز محاسبات ژئودزی و

مراجع

- [1] Abdi, N., Nankali, H. (2014). "Analysis on Temporal-Spatial Variations of Iranian TEC Using GPS Data." JGST. 2014; 4 (2) :113-121
- [2] Solarscience.msfc.nasa.gov/predict.shtml
- [3] Wild U. (1994). "Ionosphere and geodetic satellite systems: permanent GPS tracking data for modelling and monitoring". Ph.D. thesis, Geodätischgeophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Zurich, Switzerland, Vol. 48.
- [4] Wilson, B.D., Mannucci, A.J., Edwards, C.D. (1995). "Subdaily northern-hemisphere maps using an extensive network of GPS receivers". Radio Science 30 (3), 639±648.
- [5] Brunini C.A. (1998). "Global ionospheric model from GPS measurements". Ph.D. thesis, Facultad de Ciencias Astronomicas y Geofisicas, La Plata, Argentina.
- [6] Schaer S. (1999). "Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System". Ph.D. Thesis, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland
- [7] Gao Y., Liao X. and Liu Z.Z. (2002). "Ionosphere modeling using carrier smoothed ionosphere observations from a regional GPS network". Geomatica, Vol. 56, No. 2, pp. 97-106.
- [8] Mautz R., Ping J., Heki K., Schaffrin B., Schum C., and Potts L. (2005). "Efficient spatial and temporal representations of global ionosphere maps over Japan using B-spline wavelets". Journal of Geodesy, Vol. 78, pp. 660-667.
- [9] Schmidt M. (2007). "Wavelet modeling in support of IRI". Advances in Space Research, Vol. 39, pp. 932-940.
- [10] <https://igsb.jpl.nasa.gov/projects/iono/>
- [11] http://iono.jpl.nasa.gov/latest_rti_global.html
- [12] Todorova S, Schuh H, Hobiger T (2007). "Using the Global Navigation Satellite Systems and satellite altimetry for combined Global Ionosphere Maps". Advances in Space Research, Vol.42, pp. 727-736
- [13] <https://igsb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html>
- [14] Dettmering, D., Schmidt, M., Heinkelmann, R. (2011). "Combination of different space-geodetic observations for regional ionosphere modeling". Journal of Geodesy. Vol. 85, Issue 12, pp. 989-998
- [15] <http://ipgn.ncc.org.ir>
- [16] Chambodut A., Panet I., Mandeau M., Diament M., Holschneider M., and Jamet O. (2005). "Wavelet frames - an alternative to spherical harmonic representation of potential fields". Geophysical Journal International, Vol. 163, pp. 875-899.
- [17] Zeilhofer C. (2008). "Multi-dimensional B-spline modeling of spatio-temporal ionospheric signals". German Geodetic Commission, Series A, 123, Munich, Germany.
- [18] Nohutcu M., Karslioglu M. O., Gucluer B., Schmidt M., Zeilhofer C., Zhang Z., and Ergintav S. (2008). "Local modeling of VTEC using GPS observations". In: Proceedings of the TUJK Annual Scientific Meeting 2007, Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, 14-16 November 2007, Ankara, Turkey, pp. 33-37.
- [19] Zeilhofer C., Schmidt M., Bilitza D., and Shum C.K. (2009). "Regional 4-D modeling of the ionospheric electron density from satellite data and IRI". Advances in Space Research, Vol. 43, pp. 1669-1675.
- [20] 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

- [21] 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
- [22] 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
- [23] Farzaneh, S., Sharifi, M.A., (2015). "Spatio-temporal local variation of ionosphere". Ph.D thesis, University of Tehran, Tehran
- [24] 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
- [25] <http://www.nodc.noaa.gov/satellitedata/jason/>
- [26] Hansen P.C.: Regularization tools (1994): A Matlab package for analysis and solution of discrete ill-posed problems. *Numerical Algorithms*, Vol. 6, pp. 1–35.
- [27] Ardalan, A. A., Safari, A., Allahtavakoli, Y. (2008). "On the optimum method for estimation of regularization parameter of downward continuation in the problem of geoid computation without Stokes formula". *Journal of the earth and space physics*, Vol. 34, Issue 3, pp. 57-78
- [28] Zangenehnejad, F., Amiri-Simkooei, A. R., Asgari, J. (2014). "Least-Squares Variance Component Estimation Applied to GPS Geometry-Based Observation Model". *JGST*, Vol. 4, Issue 1, pp 27-40