

کاربرد پایدارسازی بروش هیبرید در بازسازی توموگرافی چگالی الکترونی یونوسفر در ایران

میر رضا غفاری رزین*^۱، بهزاد وثوقی^۲

دانشجوی دکتری ژئودزی - دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
rghaffari@mail.kntu.ac.ir

دانشیار گروه مهندسی ژئودزی - دانشکده مهندسی ژئودزی و ژئوماتیک - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
(عضو قطب علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی)
vosoghi@kntu.ac.ir

(تاریخ دریافت دی ۱۳۹۴، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۵)

چکیده

توموگرافی یونوسفر یک روش بسیار موثر جهت بررسی ویژگیهای فیزیکی این لایه از جو می‌باشد. بازسازی توموگرافیک چگالی الکترونی یونوسفر بدلیل کمبود مشاهدات ورودی و نیز عدم توزیع یکنواخت آنها یک مساله معکوس بدووضع محسوب می‌شود. در این مقاله از یک روش جدید پایدارسازی بنام هیبرید جهت حل این مساله استفاده شده است. این روش ترکیبی از روشهای پایدارسازی تیخونوف و تغییرات کلی (TV) می‌باشد. مزیت این روش در کمتر شدن میزان بایاس ایجاد شده در نتایج و نیز ایجاد تعامل بهینه مابین مقدار بایاس و دقت نتایج حاصل است. بدلیل وجود اندازه گیریهای مستقیم یونوسفر (یونوسوند $\lambda=51.3851^0$, $\phi=35.7382^0$) در سال ۲۰۰۷، کارایی روش پیشنهادی این مقاله توسط داده‌های شبکه ژئودینامیک کشور ایران در سه روز مختلف بتاریخهای ۲۰۰۷/۰۱/۰۳ (فصل زمستان)، ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ (فصل بهار) و ۲۰۰۷/۰۷/۱۳ (فصل تابستان) مورد تست و ارزیابی قرار گرفته است. همچنین نتایج الگوریتم پیشنهادی در این مقاله با نتایج حاصل از روش تیخونوف مرتبه صفرم، چگالی الکترونی بدست آمده از مدل مرجع جهانی یونوسفر ۲۰۱۲ (IRI-2012) و چگالی الکترونی حاصل از مدل NeQuick موسسه عبدالسلام ایتالیا مورد مقایسه قرار گرفته است. منطقه بازسازی شده دارای عرض ۲۲ تا ۴۰ درجه و طول ۴۴ تا ۶۴ درجه می‌باشد. آنالیز انجام گرفته نشاندهنده کمینه خطای نسبی ۱/۵۵ درصد و بیشینه ۱۹/۵۲ درصد می‌باشد. همچنین مقادیر کمینه و بیشینه خطای مطلق بترتیب برابر با $1/32 \times 10^{11}$ (ele/m³) و $6/67 \times 10^{11}$ (ele/m³) بدست آمده است.

واژگان کلیدی: پایدارسازی، هیبرید، توموگرافی یونوسفر، GPS، IRI-2010، NeQuick

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

یونوسفر یک بخش بسیار مهمی از جو می‌باشد. تکنولوژی و علم بررسی و مدلسازی ویژگیهای فیزیکی این لایه از جو دارای کاربردهای فراوانی است. سیستم تعیین موقعیت جهانی^۱ که معمولاً جهت کاربردهای ژئودتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، در سالیان اخیر جهت اندازه‌گیری تاخیر یونوسفری و محاسبه چگالی الکترونی یونوسفر مورد توجه قرار گرفته است [۱]. آستین در سالهای ۱۹۸۶ و ۱۹۸۸ برای اولین بار ایده استفاده از روش توموگرافی^۲ را جهت بازسازی چگالی الکترونی یونوسفر ارائه داد. وی همچنین از این روش جهت بدست آوردن پروفیل‌های ارتفاعی یونوسفر استفاده کرد [۲]. بعد از وی افراد دیگری در سرتاسر جهان از این روش جهت بازسازی چگالی الکترونی در یونوسفر استفاده کردند [۳،۴،۵،۶،۷،۸،۹،۱۰].

الگوریتمهای بسیار زیادی جهت حل مساله معکوس توموگرافی ارائه شده است. این الگوریتمها را می‌توان به دو دسته تکراری^۳ و غیرتکراری^۴ تقسیم نمود [۱۱]. از جمله الگوریتمهای تکراری می‌توان به تکنیک بازسازی جبری (ART)^۵، بازسازی جبری ضربی (MART)^۶ و بازسازی جبری همزمان (SIRT)^۷ اشاره کرد [۱۱]. از جمله روشهای غیرتکراری نیز می‌توان روشهای پایداری همانند تیخونوف^۸ و روش تجزیه به مقادیر منفرد (SVD)^۹ را نام برد [۱۱]. بدلیل کمبود اطلاعات و مشاهدات و نیز وجود نویز در مشاهدات ورودی، مساله توموگرافی یک مساله معکوس بدو وضع می‌باشد [۱۲].

وجود توابع پایداری^{۱۰} مختلف و ترکیب آن با سایر توابع می‌تواند در کاهش بایاس ایجاد شده در جواب، به دلیل استفاده از روشهای پایداری کمک فراوانی کند. این امر می‌تواند یک مزیت بسیار مهم برای روشهای غیرتکراری باشد. نایقرن در سال ۱۹۹۷ از تابع پایداری

به همراه اطلاعات واریانس جهت بازسازی توموگرافی یونوسفر استفاده کرد [۱۳]. باهایان و بویان در سال ۲۰۰۷ از روش تجزیه به مقادیر منفرد تعمیم یافته^{۱۱} (GSVD) جهت تعیین چگالی الکترونی در یونوسفر بروش توموگرافی بهره بردند [۱۴]. نتایج حاصل از کار آنها نشاندهنده این موضوع بود که روش تجزیه به مقادیر منفرد تعمیم یافته دارای قابلیت بسیار بالایی در حل مساله معکوس توموگرافی یونوسفر می‌باشد. ون دی کمپ در سال ۲۰۱۲ روش پایداری سازی MART را بر اساس حساسیت به نویز در داده‌های اولیه پیشنهاد داد [۱۵]. غفاری رزین و مشهدی حسینعلی در سال ۲۰۱۱ از روش تجزیه به مقادیر منفرد برش یافته (TSVD)^{۱۲} جهت حل مساله توموگرافی و بازسازی چگالی الکترونی یونوسفر در منطقه ایران استفاده کردند [۱۶]. تمامی تلاشهای صورت گرفته در این زمینه در راستای بهبود دقت نتایج و قابلیت اطمینان آنها انجام گرفته شده است. مشکل اصلی در این روشها عدم ثبات در نتایج بدلیل تغییر و ناپیوستگی در مشاهدات ورودی می‌باشد.

در مقابل این روشها، اخیراً ایده استفاده از روش پایداری سازی تغییرات کلی (TV)^{۱۳} بدلیل ماهیت پایدار آن نسبت به وجود نویز در مشاهدات مورد توجه قرار گرفته است. وگل در سال ۲۰۰۲ از قابلیت این روش جهت بازسازی چگالی الکترونی بروش توموگرافی استفاده کرد [۱۷]. کمال آبادی و شریف در سال ۲۰۰۵ یک الگوریتم تکراری را براساس روش پایداری سازی تغییرات کلی ارائه دادند [۱۸]. لی و کمال آبادی در سال ۲۰۰۹ از ترکیب روشهای پایداری سازی تغییرات کلی و تیخونوف مرتبه صفرم جهت پایداری سازی توموگرافی یونوسفر استفاده کردند [۱۹].

در این مقاله یک روش جدید پایداری سازی بنام هیبرید-تیخونوف^{۱۴} جهت حل مساله معکوس بدو وضع توموگرافی یونوسفر پیشنهاد می‌شود. این روش دارای قابلیت بسیار بالا در بدست آوردن نتایج با مقدار بایاس کم است. کارائی و قابلیت این روش توسط داده‌های ایستگاههای شبکه ژئودینامیک کشور ایران در سه روز

^۱ Global Positioning System (GPS)

^۲ Tomography

^۳ Iterative

^۴ Non-Iterative

^۵ Algebraic Reconstruction Technique (ART)

^۶ Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique

^۷ Simultaneous Iteration Reconstruction Technique

^۸ Tikhonov Regularization

^۹ singular value decomposition (SVD)

^{۱۰} regularization functions

^{۱۱} Generalized Singular Value Decomposition (GSVD)

^{۱۲} Truncated singular value decomposition (TSVD)

^{۱۳} Total variation (TV)

^{۱۴} Hybrid-Tikhonov

محاسباتی مربوط به STEC به دو بخش کلی تقسیم می‌شود. از ارتفاع ۱۰۰ تا ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری مربوط به لایه یونوسفر و از ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتر به بعد مربوط به بخش پلاسما-کره در نظر گرفته می‌شود. بنابراین براساس ناحیه محاسباتی فوق، معادله انتگرالی (۱) را می‌توان بصورت معادله گسسته زیر بازنویسی نمود:

$$Y_i^j(t) \approx \sum_{n=1}^N a_n N_e(\vec{r}, t) + B_i + B^j + P_i^j \quad (2)$$

در رابطه (۲) n نشاندهنده نقطه نمونه و a بیانگر وزن آن نقطه در انتگرال گیری می‌باشد. همچنین N نشاندهنده تعداد کل نقاط مورد استفاده در مسیر اشعه از ماهواره تا گیرنده و P_i^j ترم مربوط به اثر بخش پلاسما-کره است. در این مقاله تنها اثرات مربوط به بخش یونوسفر مورد بررسی قرار گرفته و از بخش پلاسما صرف نظر خواهد شد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$Y_i^j(t) \approx \sum_{n=1}^N a_n N_e(\vec{r}, t) + \varepsilon_i^j \quad (3)$$

در رابطه فوق ε_i^j خطاهای مربوط به مدل و مشاهدات می‌باشند. در این تحقیق وزنه‌های مورد استفاده در هر نقطه نمونه براساس طول مسیر سیگنال گذرنده از المانهای حجمی محاسبه می‌شوند. این المانهای حجمی در راستای طول، عرض و ارتفاع تقسیم بندی شده‌اند. رابطه (۳) را در حالت ماتریسی می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\mathbf{y} = \mathbf{Ax} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4)$$

در رابطه (۴) $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^{M \times 1}$ مشاهدات مربوط به STEC بدست آمده از اندازه‌گیریهای GPS، M تعداد کل مشاهدات STEC، $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ نشاندهنده ماتریس طرح، $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ مقدار چگالی الکترونی در هر المان حجمی و $\boldsymbol{\varepsilon}$ بیانگر نویز می‌باشد.

۳- پایدارسازی بروش هیبرید

معادله (۴) در روش توموگرافی یونوسفر نشاندهنده یک مساله معکوس بد وضع است زیرا ماتریس طرح $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{M \times N}$ یک ماتریس با عناصر نامتجانس بوده و همچنین دارای کمبود مرتبه می‌باشد. جهت بدست آوردن

مختلف از سال ۲۰۰۷ مورد ارزیابی و تست واقع می‌شود. همچنین نتایج حاصل از روش پیشنهادی برای پایدارسازی با نتایج حاصل از روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرمورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

این مقاله شامل بخشهای زیر است: در بخش دوم روش توموگرافی یونوسفر مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش سوم اختصاص بروش هیبرید-تیخونوف و چگونگی مدلسازی آن دارد. در بخش چهارم نتایج عملی کار ارائه شده و سرانجام در بخش پنجم در مورد معایب و مزایا و نیز پیشنهادات برای کارهای آینده صحبت خواهد شد.

۲- مدل توموگرافی یونوسفر

گیرنده‌های دوفرکانسه GPS مشاهدات مورد نیاز جهت مدلسازی توموگرافی یونوسفر را فراهم می‌آورند. با استفاده از اندازه‌گیریهای فاز موج حامل در هر دو فرکانس امکان محاسبه مقدار دقیق ولی نسبی محتوای الکترون کلی یونوسفر (TEC)^۱ فراهم می‌شود. مقدار مطلق TEC را می‌توان از اندازه‌گیریهای کد بدست آورد. دقت TEC بدست آمده از مشاهدات کد به مراتب پایین‌تر از مشاهدات فاز موج حامل است. با استفاده از الگوریتمهای مختلف موجود می‌توان مقدار TEC بدست آمده از مشاهدات کد را با کمک TEC بدست آمده از مشاهدات فاز نرم کرد. با وجود این مقادیر بایاس داخل فرکانسی هنوز به عنوان یک منبع خطا در TEC بدست آمده می‌باشد. براساس آستین ۱۹۸۸ مقدار محتوای الکترون کلی در راستای مایل (STEC) در مسیر حرکت سیگنال از ماهواره به گیرنده بصورت معادله زیر می‌تواند تعریف گردد [۲]:

$$Y_i^j(t) = \int_{\vec{r}_i}^{\vec{r}_j} N_e(\vec{r}, t) ds + B_i + B^j \quad (1)$$

$$(i = 1, \dots, I; j = 1, \dots, J)$$

در رابطه (۱) $Y_i^j(t)$ مقدار محتوای الکترون کلی در راستای مایل، مقدار چگالی الکترونی در زمان مشاهده، I و J تعداد ماهواره و گیرنده‌های مورد استفاده، \vec{r}_i^j بردار موقعیت گیرنده و ماهواره، B_i بایاس گیرنده و B_j بایاس مربوط به ماهواره می‌باشد. در رابطه (۱) ناحیه

^۱ Total Electron Content (TEC)

بروش تیخونوف از برتری نسبی برخوردار می‌باشد [۱۹]. بدلیل وجود معایب در روش پایدارسازی تیخونوف، در این مقاله از ترکیب دو روش TV و تیخونوف جهت پایدارسازی مساله ناپایدار توموگرافی یونسفر استفاده شده است. در نتیجه تابع پایدارسازی کلی، حاصل از این ترکیب بصورت زیر نوشته خواهد شد:

$$\min_x J^{\alpha,\beta}(x) = \frac{1}{2} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\mathbf{Lx}\|^2 + \beta TV(x) \quad (۸)$$

که در رابطه (۸) α و β مقادیر پارامترهای پایدارسازی می‌باشند. جهت بدست آوردن مقدار تغییرات کلی (TV) در شروع مرحله پایدارسازی با کمک تابع پایدارسازی (۸) از معادله زیر می‌توان استفاده نمود [۱۹]:

$$TV(x) = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{N_s-1} \sum_{t=1}^{N_t-1} \sum_{z=1}^{N_z-1} \left((D_s x)^2 + (D_t x)^2 + (D_z x)^2 + \tau \right)^{\frac{1}{2}} \quad (۹)$$

در رابطه (۹) N_s ، N_t و N_z تعداد المانهای حجمی در راستای طول، عرض و ارتفاع بوده و خواهیم داشت $N = N_s N_t N_z$ ، یک مقدار ثابت است که براساس هندسه مساله تعیین می‌شود و D_s ، D_t و D_z اپراتورهای شبکه می‌باشند. در راستای بعد مسطحاتی خواهیم داشت:

$$D_s x = x_{s+1,t,z} - x_{s,t,z} \quad (۱۰)$$

$$D_t x = x_{s,t+1,z} - x_{s,t,z}$$

همچنین برای بعد ارتفاعی نیز می‌توان نوشت:

$$D_z x = x_{s,t,z+1} - x_{s,t,z} \quad (۱۱)$$

با استفاده از رابطه (۹) می‌توان گرادیان مسطحاتی و ارتفاعی را با استفاده از روش تغییرات کلی (TV) بصورت زیر تعیین نمود [۱۹]:

$$\nabla TV(x) = \begin{bmatrix} D_1^T & D_2^T & D_3^T \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} W(x) & 0 & 0 \\ 0 & W(x) & 0 \\ 0 & 0 & W(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

$$x = D^T W(x) D x \quad (۱۳)$$

نتایج با قابلیت اطمینان بالا، معمولاً از روش تیخونوف با تابع پایدارسازی زیر استفاده می‌شود:

$$\min_x J^\alpha(x) = \frac{1}{2} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{y}\|^2 + \frac{\alpha}{2} \Omega(x) \quad (۵)$$

در رابطه (۵) α پارامتر پایدارسازی و $\Omega(x)$ تابعی است که مساله بد وضع اولیه را به یک مساله خوش وضع تبدیل می‌کند. معمولاً در روش تیخونوف این تابع بصورت $\|\mathbf{Lx}\|^2$ انتخاب می‌گردد که در آن \mathbf{L} ماتریس پایدارسازی نامیده می‌شود. در این مقاله ماتریس \mathbf{L} به دو زیر ماتریس تقسیم خواهد شد: ماتریس \mathbf{H} که براساس طول و عرض جغرافیایی محاسبه شده و ماتریس \mathbf{V} که به عنوان یک قید ارتفاعی^۱ با استفاده از مدل‌های تجربی^۲ ساخته می‌شود. هدف در این مقاله تخمین ویژگیهای فیزیکی و نحوه تغییر چگالی الکترونی در موقعیتهای مختلف می‌باشد. جهت حل مساله از یک تقریب گسسته در مشتق گیری تابع پایدارسازی استفاده می‌شود. برای بعد مسطحاتی، در المانهای حجمی مجاور هم، تقریب زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\mathbf{H}[x_{n1}] = -x_{n1-1} + 2x_{n1} - x_{n1+1} \quad (۶)$$

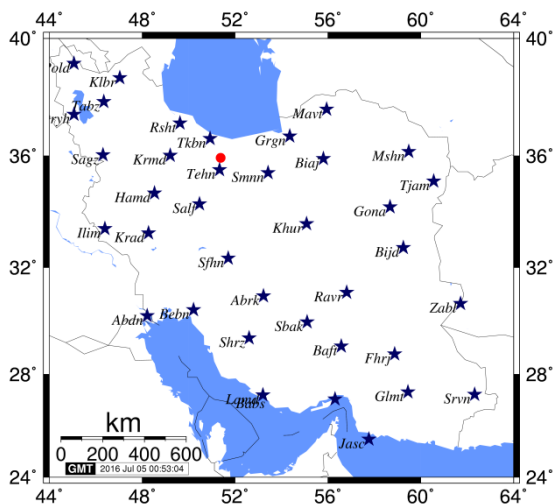
که در رابطه (۶) $n1$ نشاندهنده اندکس المان حجمی است. برای بعد ارتفاعی نیز از تقریب زیر استفاده می‌شود:

$$\mathbf{V}[x_{n2}] = x_{n2} - \frac{x_{n2}^0}{x_{n2+1}^0} x_{n2+1} \quad (۷)$$

در رابطه بالا $n2$ نشاندهنده اندکس المان حجمی و x_{n2}^0 و x_{n2+1}^0 مقادیر اولیه بدست آمده از مدل‌های تجربی یونسفر می‌باشند. این روش بسیار مناسب جهت بدست آوردن توزیع چگالی الکترونی است که بصورت پیوسته در حال تغییر خواهد بود. با وجود این یکی از معایب روش پایدارسازی تیخونوف، در از بین بردن اثر نویزهایی با فرکانس بالا در نتایج است. این امر باعث دور شدن نتایج بدست آمده از واقعیت فیزیکی مساله خواهد شد. در مقابل روش پایدارسازی TV به دلیل نوع برخورد آن با رفتار نویزها و تاثیر آنها در نتایج خروجی نسبت

^۱ Vertical Constraint
^۲ Empirical Model

الی ۴۰ درجه و طول جغرافیایی ۴۴ الی ۶۴ درجه و ارتفاع ۱۰۰ الی ۱۰۰۰ کیلومتر استفاده شده است. دلیل انتخاب این روزها جهت تست نتایج کار، همزمان بودن مشاهدات انجام گرفته با اندازه‌گیرهای ایستگاه یونوسوند موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران با موقعیت ۳۵/۷۳ عرض جغرافیایی و ۵۱/۳۸ طول جغرافیایی و همچنین تست مدل پیشنهادی این مقاله در ۳ روز مختلف و متفاوت از سال ۲۰۰۷ می‌باشد. المانهای حجمی انتخاب شده در این مقاله جهت بازسازی توموگرافی یونوسوند ۲۰ × ۲۰ × ۲۰ Km در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه تعداد کل المانهای حجمی در فضای بالای شبکه ۳۶۰۰ المان می‌باشد. جهت آنالیز رفتار چگالی الکترونی و حل مساله توموگرافی از اندازه‌گیرهای GPS در بازه‌های مشاهداتی یک ساعته استفاده شده است. شکل (۱) چگونگی توزیع مکانی ایستگاههای مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. در این شکل ستاره‌ها نشان‌دهنده ایستگاههای GPS و دایره قرمز رنگ بیانگر ایستگاه یونوسوند می‌باشد.



شکل ۱- چگونگی توزیع مکانی ایستگاههای GPS (ستاره‌ها) و یونوسوند (دایره قرمز رنگ) مورد استفاده جهت بازسازی توموگرافی در این مقاله

با توجه به معادله (۲) جهت بدست آوردن مقادیر STEC می‌بایستی مقادیر بایاس داخل فرکانسی برای ماهواره و گیرنده‌های مورد استفاده تعیین گردد. مقادیر بایاس داخل فرکانسی ماهواره‌ها توسط مرکز تعیین مدار اروپا (CODE) بدست آمده و مقادیر بایاس داخل فرکانسی برای گیرنده‌ها از پردازشهای اولیه مشاهدات توسط نرم افزار Bernese تعیین گردیده است. شکل (۲)

که در رابطه (۱۲) و (۱۳) $W(x)$ یک ماتریس قطری از مرتبه $(N_s - 1)(N_r - 1)(N_z - 1) \times (N_s - 1)(N_r - 1)(N_z - 1)$ با عناصر قطر اصلی $\left((D_s x)^2 + (D_r x)^2 + (D_z x)^2 + \tau \right)^{\frac{1}{2}}$ و D_1, D_2 و D_3 ماتریسهایی با مرتبه $(N_s - 1)(N_r - 1)(N_z - 1) \times N_s N_r N_z$ بوده که از روی اپراتورهای شبکه محاسبه می‌شوند. از معادله (۸) می‌توان گرادیان را بصورت زیر بدست آورد [۲۰]:

$$\nabla J^{\alpha, \beta}(x) = \mathbf{A}^T \mathbf{p}(\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{y}) + \alpha \mathbf{L}^T \mathbf{L}\mathbf{x} + \beta \mathbf{D}^T \mathbf{W}(x) \mathbf{D}\mathbf{x} \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) \mathbf{p} ماتریس وزن مربوط به مشاهدات STEC می‌باشد. با استفاده از رابطه (۸) می‌توان نوشت:

$$H_{J,x} = \mathbf{A}^T \mathbf{p}\mathbf{A} + \alpha \mathbf{L}^T \mathbf{L} + \beta \mathbf{D}^T \mathbf{W}(x) \mathbf{D} \quad (15)$$

در این مقاله از روش گوس-نیوتن^۱ جهت حل مساله پایدارسازی بروش هیبرید استفاده می‌شود. خواهیم داشت:

$$x^{k+1} = x^k - \lambda H_{J,x^k}^{-1} \nabla J(x^k) \quad (16)$$

در رابطه (۱۶) k گام حرکت در روش تکرار و λ فاکتور تضعیف^۲ می‌باشند. انتخاب فاکتور تضعیف بصورت کاملاً اختیاری و تجربی خواهد بود. در این مقاله جهت بدست آوردن پارامترهای پایدارسازی α و β از روابط زیر استفاده شده است [۱۱]:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{p}\mathbf{A})}}{\sqrt{2\text{tr}(\mathbf{L}^T \mathbf{L})}} \quad (17)$$

$$\beta = \frac{\sqrt{\text{tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{p}\mathbf{A})}}{\sqrt{2\text{tr}(\mathbf{D}^T \mathbf{W}(x) \mathbf{D})}} \quad (18)$$

۴- نتایج عددی روش پایدارسازی هیبرید

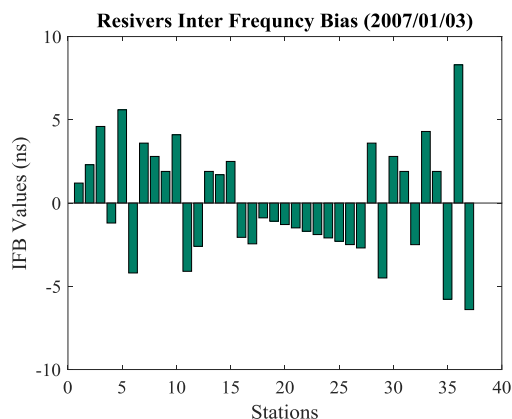
جهت تست و ارزیابی صحت نتایج بدست آمده از روش پایدارسازی هیبرید در بازسازی چگالی الکترونی یونوسفر، از داده‌های ۳۷ ایستگاه شبکه ژئودینامیک کشور ایران بتاریخهای ۲۰۰۷/۰۱/۰۳ (زمستان)، ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ (بهار) و ۲۰۰۷/۰۷/۱۳ (تابستان) در محدوده عرض جغرافیایی ۲۴

^۳ Center for orbit determination in Europe

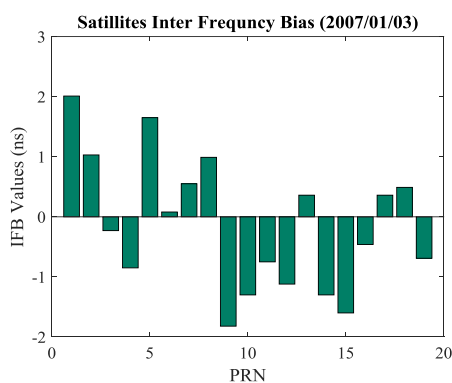
^۱ Gauss-Newton
^۲ Attenuation Factor

عدد شرط ماتریس نرمال $10^{12} \times 7/654$ بدست می آید. در حالتی که از پایدارسازی بروش تیخونوف استفاده شود، ماتریس نرمال بصورت $A^T P A + \alpha L^T L$ بوده که در این حالت عدد شرط ماتریس مذکور $10^5 \times 4/027$ تعیین شده است و نیز در حالتی که از روش پایدارسازی هیبرید استفاده شود ماتریس نرمال بصورت $A^T P A + \alpha L^T L + \beta D^T W$ بوده و در این حالت عدد شرط $10^2 \times 1/592$ بدست آمده است. بایستی توجه داشت که مقادیر عدد شرط بصورت قابل توجهی کاهش یافته است. در نتیجه می توان به این نکته اشاره کرد که ماتریس نرمال مشاهدات بعد از پایدارسازی از ثبات بهتری برخوردار شده است.

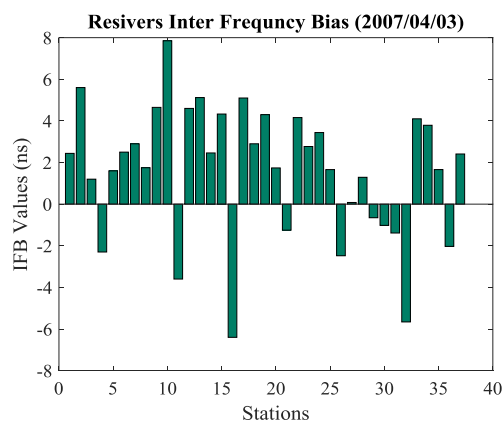
نشاندنده بایاس داخل فرکانسی گیرنده ها برای روزهای ۲۰۰۷/۰۱/۰۳، ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ و ۲۰۰۷/۰۷/۱۳ می باشند.



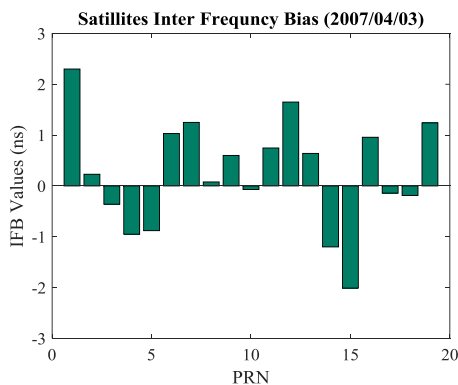
۲۰۰۷/۰۱/۰۳



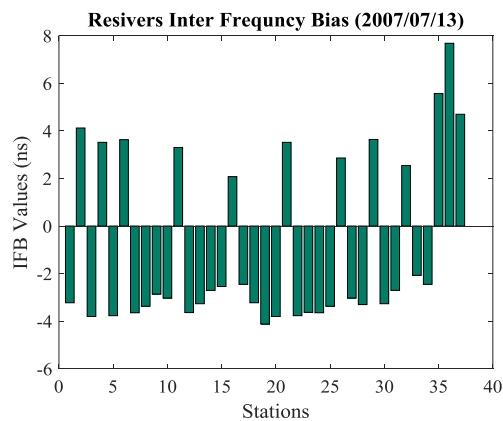
۲۰۰۷/۰۱/۰۳



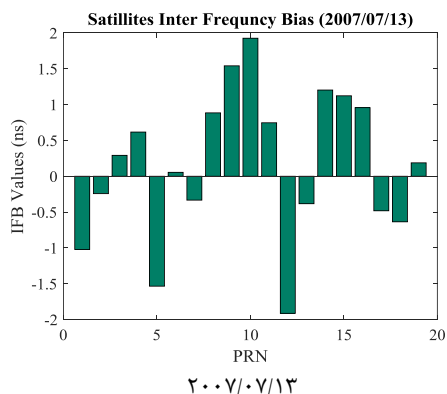
۲۰۰۷/۰۴/۰۳



۲۰۰۷/۰۴/۰۳



۲۰۰۷/۰۷/۱۳



۲۰۰۷/۰۷/۱۳

شکل ۲- مقادیر بایاس داخل فرکانسی محاسبه شده برای ۳۷ گیرنده مورد استفاده در این تحقیق بدست آمده از پردازشهای اولیه مشاهدات توسط نرم افزار Berness

جهت آنالیز و بررسی نتایج الگوریتم بکار گرفته شده در این مقاله، از تغییرات عدد شرط ماتریس نرمال در معادلات استخراج شده می توان استفاده نمود. در حالتی که هیچ گونه قیدی به مساله توموگرافی اضافه نشده است ماتریس نرمال مشاهدات بصورت $A^T P A$ می باشد که در این حالت

شکل ۳- مقادیر بایاس داخل فرکانسی محاسبه شده برای ۱۹ ماهواره روبرت شده توسط گیرنده ها بدست آمده از مرکز تعیین مدار اروپا

جدول ۳- مقادیر چگالی الکترونی مشاهده شده، بازسازی شده توسط روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم، بازسازی شده توسط روش پایدارسازی هیبرید (10^{11}ele/m^3) و خطاهای نسبی بدست آمده از هر دو روش (%) در تاریخ ۲۰۰۷/۰۷/۱۳

زمان محل (UT)	ارتفاع مشاهده (Km)	خطای نسبی (%)	
		Ionosonde- (Tikhonov)	Ionosonde- (Hybrid)
۱	۲۴۵	۲۱/۸۳۶۱	۱۸/۳۱
۵	۲۹۲	۱/۱۴۳۴	۱/۵۵
۹	۳۱۹	۷/۹۶۱۴	۲/۹۱
۱۳	۲۵۱	۷/۰۲۰۴	۴/۲۸
۱۷	۲۴۵	۱۱/۱۰۵	۳/۳۸
۲۱	۲۱۹	۳۶/۴۴۰	۱۵/۵۸

بایستی به این نکته مهم اشاره نمود که بدلیل اینکه اندازه‌گیریهای ایستگاه یونسوند بصورت گسسته انجام گرفته‌اند، بهمین جهت مقایسه پروفیل‌های چگالی الکترونی بازسازی شده با چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده میسر نیست. به همین دلیل در هر سه جدول مقایسه بصورت ارتفاع و زمان خاص انجام گرفته است.

با توجه به مقایسه صورت گرفته مابین مقادیر چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده و نیز مقادیر چگالی الکترونی بازسازی شده در جداول (۱)، (۲) و (۳) می‌توان به این نتیجه رسید که استفاده از روش پایدارسازی هیبرید از صحت بالاتری نسبت به روش پایدارسازی تیخونوف در بازسازی چگالی الکترونی در این منطقه برخوردار است. میانگین خطای نسبی بدست آمده از روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم ۱۲/۴۰ درصد و میانگین خطای نسبی بدست آمده از روش هیبرید ۱۰/۵۰ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده بوضوح می‌توان به این نکته دست یافت که مقدار چگالی الکترونی بازسازی شده با استفاده از الگوریتم هیبرید دارای دقت بالاتری نسبت به پایدارسازی بروش تیخونوف می‌باشد. پس از بررسی صحت هر دو روش در بازسازی چگالی الکترونی می‌توان تغییرات مسطحاتی چگالی الکترونی را برآورد نمود. در اشکال (۴)، (۵) و (۶) مقدار چگالی الکترونی بازسازی شده با استفاده از روش پایدارسازی هیبرید و پایدارسازی تیخونوف در محدوده طول و عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در زمان ۵ بوقت جهانی و ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری از سطح زمین نشان داده شده است. همچنین در این اشکال مقادیر خطا برای روشهای پایدارسازی هیبرید و پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم نشان داده شده است. این اشکال برای سه روز ۲۰۰۷/۰۱/۰۳، ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ و ۲۰۰۷/۰۷/۱۳ محاسبه شده است. در تمامی اشکال زیر واحد چگالی الکترونی (10^{11}ele/m^3) در نظر گرفته شده است.

جهت ارزیابی صحت نتایج حاصل از دو روش پایدارسازی هیبرید و تیخونوف مرتبه صفرم، چگالی الکترونی بازسازی شده از هر دو روش با مقادیر چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده از دستگاه یونسوند ($\varphi=35.7382^0$, $\lambda=51.3851^0$) مورد مقایسه قرار گرفته است. این مقایسه برای سه روز ۲۰۰۷/۰۱/۰۳، ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ و ۲۰۰۷/۰۷/۱۳ انجام گرفته است. نتایج این مقایسه در جداول (۱)، (۲) و (۳) نشان داده شده است. شاخص خطای نسبی^۱ جهت ارزیابی روشها در جداول آورده شده است. این شاخص بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Re. = \frac{|N_{ion.} - N_{Re}|}{N_{ion}} \times 100 \quad (19)$$

در رابطه بالا N_{ion} نشاندهنده چگالی الکترونی اندازه‌گیری شده و N_{Re} بیانگر چگالی الکترونی بازسازی شده می‌باشند.

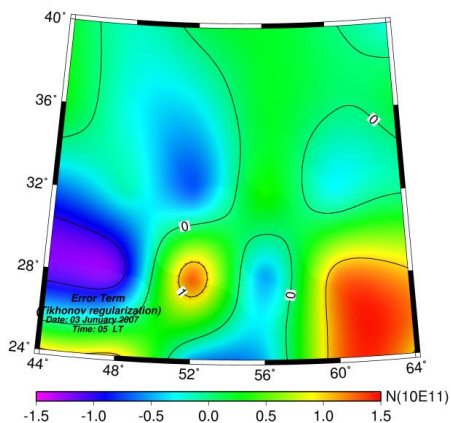
جدول ۱- مقادیر چگالی الکترونی مشاهده شده، بازسازی شده توسط روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم، بازسازی شده توسط روش پایدارسازی هیبرید (10^{11}ele/m^3) و خطاهای نسبی بدست آمده از هر دو روش (%) در تاریخ ۲۰۰۷/۰۱/۰۳

زمان محل (UT)	ارتفاع مشاهده (Km)	خطای نسبی (%)	
		Ionosonde- (Tikhonov)	Ionosonde- (Hybrid)
۱	۲۷۸	۱۱/۹۱۷۳	۱۲/۱۲۶۵
۵	۲۲۳	۱۵/۰۴۶۸	۱۳/۲۵۶۴
۹	۲۱۹	۳/۹۳۰۵	۱۰/۶۹۸۴
۱۳	۲۱۱	۰/۸۵۳۰	۶/۶۳۲۱۴
۱۷	۲۴۴	۲۲/۸۵۵۸	۱۴/۸۹۶۳
۲۱	۳۱۹	۱۳/۷۱۵۳	۱۱/۴۷۹۲

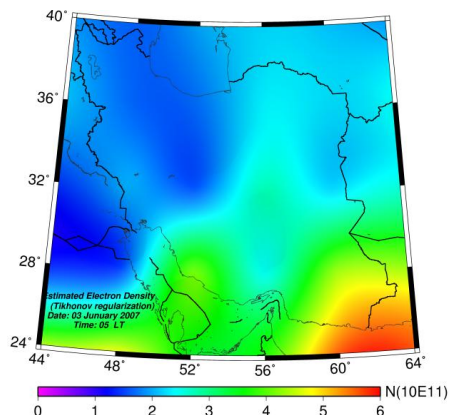
جدول ۲- مقادیر چگالی الکترونی مشاهده شده، بازسازی شده توسط روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم، بازسازی شده توسط روش پایدارسازی هیبرید (10^{11}ele/m^3) و خطاهای نسبی بدست آمده از هر دو روش (%) در تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۳

زمان محل (UT)	ارتفاع مشاهده (Km)	خطای نسبی (%)	
		Ionosonde- (Tikhonov)	Ionosonde- (Hybrid)
۱	۲۵۱	۱۸/۲۸۰	۱۹/۵۲۸
۵	۲۵۳	۱۴/۸۰۵	۱۶/۱۶۴۳
۹	۲۵۷	۵/۱۳۰۱	۵/۴۴۶۸
۱۳	۲۳۶	۱۷/۷۵۶	۱۶/۱۴۵
۱۷	۲۷۵	۸/۸۸۵۱	۱۰/۲۷۹۱
۲۱	۲۶۸	۵/۲۸۲۸	۶/۳۷۱۹

^۱ Relative Error



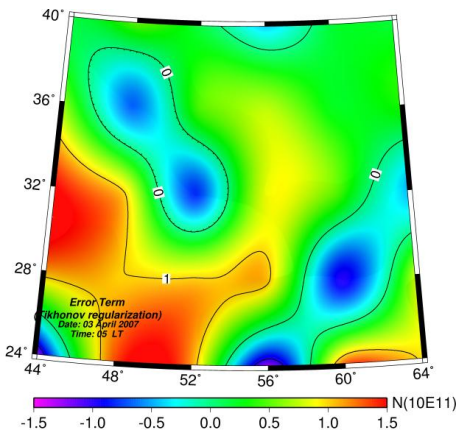
(ب) خطاهای بدست آمده از پایداری سازی بروش تیخونوف مرتبه صفرم برای چگالی الکترونی در زمان ۵ بوقت جهانی



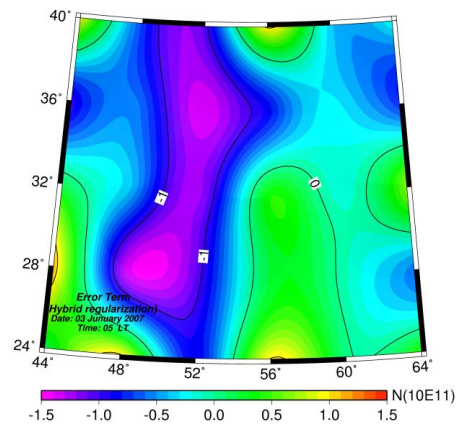
(ب) چگالی الکترونی برآورد شده با استفاده از پایداری سازی بروش تیخونوف مرتبه صفرم در زمان ۵ بوقت جهانی

شکل ۴- چگالی الکترونی برآورد شده توسط دو روش پایداری سازی مختلف در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری و زمان ۵ بوقت جهانی در تاریخ ۲۰۰۷/۰۱/۰۳

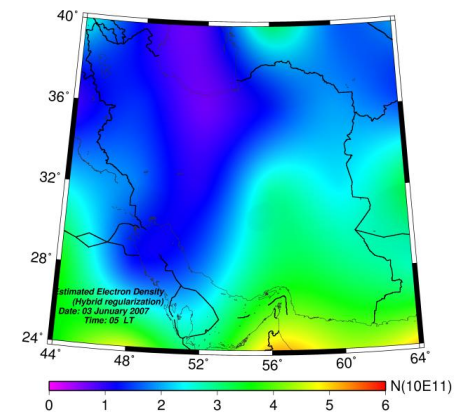
است. همچنین در شکل (۵) چگالی الکترونی بازسازی شده با استفاده از روشهای پایداری سازی هیبرید و پایداری سازی تیخونوف نشان داده شده است. این شکل برای تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ و زمان ۵ بوقت جهانی در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری از سطح زمین ترسیم شده است.



(ب) خطاهای بدست آمده از پایداری سازی بروش تیخونوف مرتبه صفرم برای چگالی الکترونی در زمان ۵ بوقت جهانی

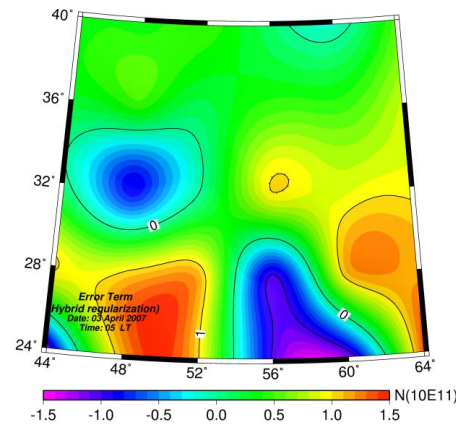


(الف) خطاهای بدست آمده از پایداری سازی بروش هیبرید برای چگالی الکترونی در زمان ۵ بوقت جهانی

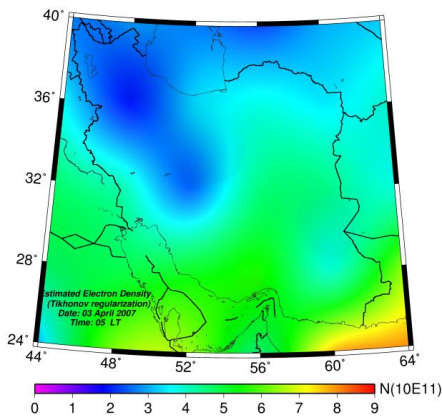


(الف) چگالی الکترونی برآورد شده با استفاده از روش هیبرید در زمان ۵ بوقت جهانی

شکل (۴) نشاندهنده چگالی الکترونی برآورد شده در تاریخ ۲۰۰۷/۰۱/۰۳ از دو روش پایداری سازی بروش هیبرید و پایداری سازی بروش تیخونوف مرتبه صفرم می باشد. با توجه به میزان خطای هر دو روش می توان به این نکته پی برد که روش پایداری سازی تیخونوف مرتبه صفرم از خطای بیشتری نسبت بروش پایداری سازی هیبرید برخوردار



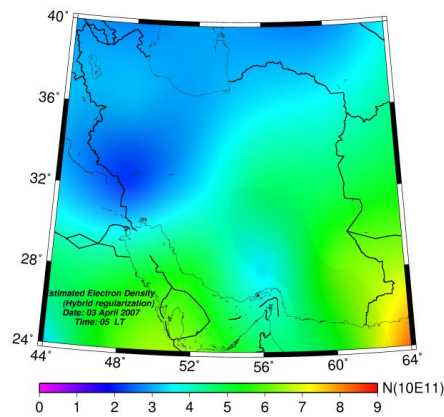
(الف) خطاهای بدست آمده از پایداری سازی بروش هیبرید برای چگالی الکترونی در زمان ۵ بوقت جهانی



ب) چگالی الکترونی برآورد شده با استفاده از پایدارسازی بروش

تیخونوف مرتبه صفرم در زمان ۵ بوقت جهانی

شکل ۵- چگالی الکترونی برآورد شده توسط دو روش پایدارسازی مختلف در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری و زمان ۵ بوقت جهانی در تاریخ ۲۰۰۷/۰۴/۰۳

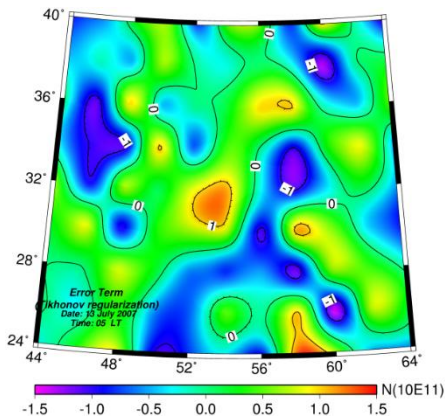


الف) چگالی الکترونی برآورد شده با استفاده از روش هیبرید در

زمان ۵ بوقت جهانی

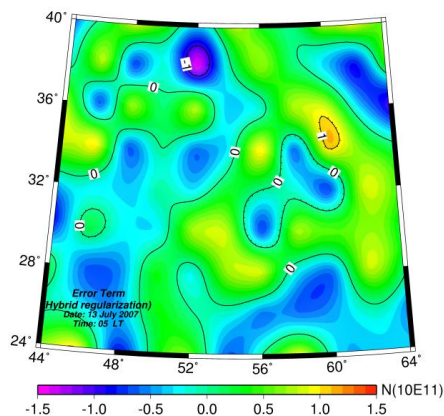
مقادیر خطای بدست آمده از دو روش با همدیگر متفاوت بوده و خطای بدست آمده از روش هیبرید از مقدار عددی کمتری برخوردار می‌باشند. نکته مهم حاصل از سه شکل (۴)، (۵) و (۶) در این است که چگالی الکترونی دارای تغییرات وسیع مسطحاتی می‌باشد و این تغییرات در فصول مختلف سال دارای مقادیر عددی متفاوتی است.

جهت بررسی و مقایسه بهتر دو روش پایدارسازی تیخونوف و پایدارسازی هیبرید از مشاهدات روز ۲۰۰۷/۰۷/۱۳ در ساعت ۵ بوقت جهانی استفاده شده است. نتیجه این مقایسه در شکل (۶) ترسیم شده است. همچنین خطاهای هر دو روش نیز مورد مقایسه قرار گرفته است. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که



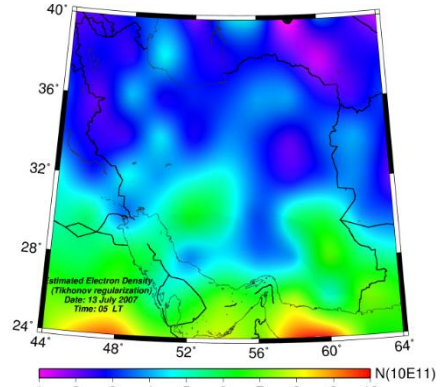
ب) خطاهای بدست آمده از پایدارسازی بروش تیخونوف مرتبه

صفرم برای چگالی الکترونی در زمان ۵ بوقت جهانی



الف) خطاهای بدست آمده از پایدارسازی بروش هیبرید برای

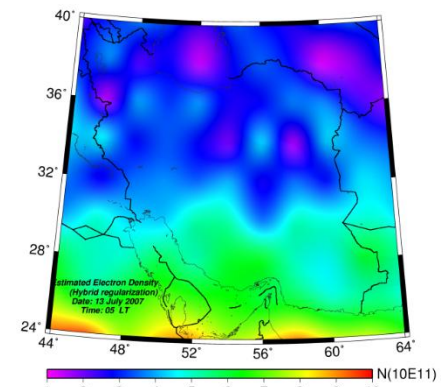
چگالی الکترونی در زمان ۵ بوقت جهانی



ب) چگالی الکترونی برآورد شده با استفاده از پایدارسازی بروش

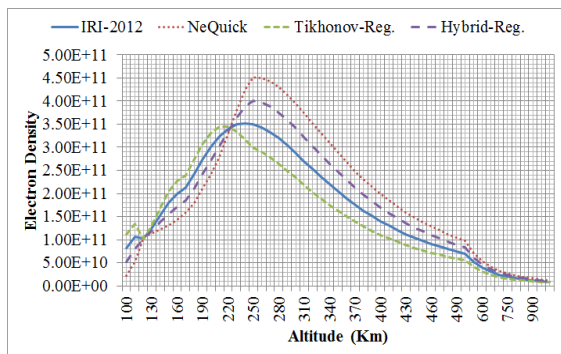
تیخونوف مرتبه صفرم در زمان ۵ بوقت جهانی

شکل ۶- چگالی الکترونی برآورد شده توسط دو روش پایدارسازی مختلف در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری و زمان ۵ بوقت جهانی در تاریخ ۲۰۰۷/۰۷/۱۳



الف) چگالی الکترونی برآورد شده با استفاده از روش هیبرید در

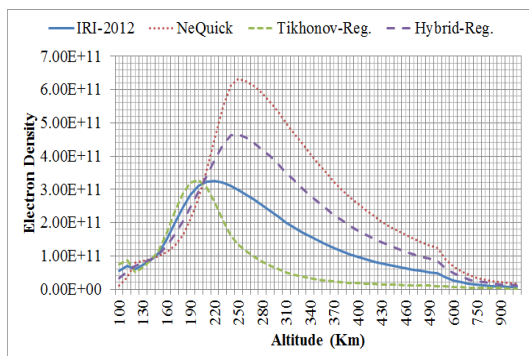
زمان ۵ بوقت جهانی



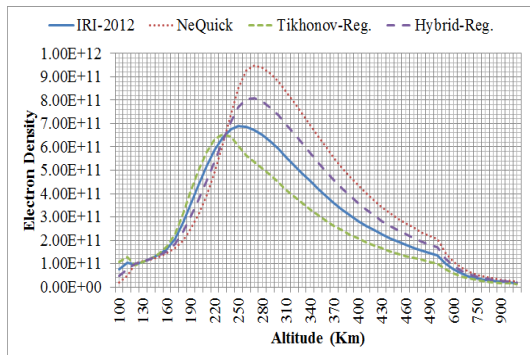
۲۰۰۷/۰۷/۱۳

شکل ۷- مقایسه پروفیل ارتفاعی چگالی الکترونی بدست آمده از روشهای پایداری سازی هیبرید، تیخونوف، مدل مرجع جهانی و مدل NeQuick در موقعیت جغرافیایی ۳۱ و ۵۱ درجه عرض و طول جغرافیایی در ساعت ۵ بوقت جهانی و برای سه روز مختلف از سال ۲۰۰۷

نتایج موجود در شکل (۷) که برای ساعت ۵ بوقت جهانی و برای یک موقعیت خاص ترسیم شده است بیانگر این واقعیت است که پیک چگالی الکترونی در محدوده ارتفاعی ۲۵۰ الی ۳۵۰ کیلومتر از سطح زمین رخ می‌دهد. البته با توجه به اینکه ماهیت مدل‌های مورد مقایسه در این شکل با همدیگر متفاوت است، ارتفاع پیک چگالی نیز متفاوت می‌باشد. این واقعیت فیزیکی لایه یونوسفر (ارتفاع پیک چگالی الکترونی) در شکل (۸) و برای ساعت ۱۲ بوقت جهانی نیز بوضوح قابل رویت می‌باشد.



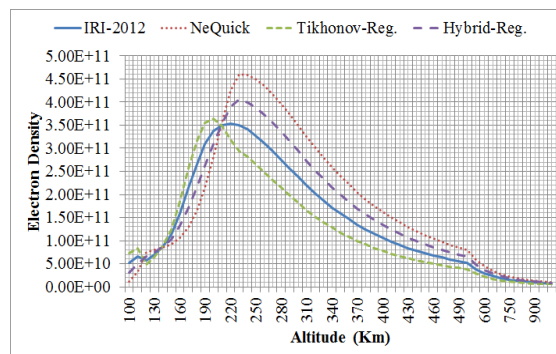
۲۰۰۷/۰۷/۱۱/۰۳



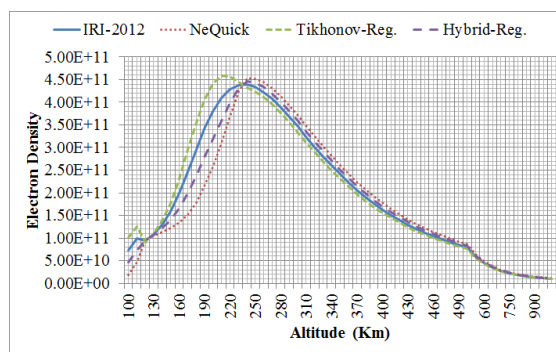
۲۰۰۷/۰۷/۰۴/۰۳

با استفاده از هر دو روش پایداری سازی اشاره شده در بالا (هیبرید و تیخونوف) می‌توان پروفیل تغییرات چگالی الکترونی را برای موقعیت و زمانهای مختلف محاسبه کرد. اشکال (۷) و (۸) نتایج حاصل از این مقایسه را نشان می‌دهند. تمامی پروفیل‌های ترسیم شده برای موقعیت ۳۱ و ۵۱ درجه عرض و طول جغرافیایی و زمانهای ۵ و ۱۲ بوقت جهانی در نظر گرفته شده‌اند. جهت مقایسه نتایج بدست آمده از پروفیل چگالی الکترونی بدست آمده از مدل مرجع جهانی یونوسفر ۲۰۱۲ و همچنین مدل NeQuick مربوط به موسسه عبدالسلام استفاده شده است.

نکته بسیار مهمی که می‌بایستی به آن اشاره نمود این است که تنها یک ایستگاه اندازه‌گیری مستقیم چگالی الکترونی در کشور ایران وجود دارد و متأسفانه بدلیل نقص فنی، مشاهدات این ایستگاه منقطع بوده و صرفاً برای سال ۲۰۰۷ می‌باشد. به همین جهت تولید و استخراج پروفیل ارتفاعی یونوسفر با استفاده از این ایستگاه ممکن نمی‌باشد. همین عامل باعث شده است که در اشکال (۷) و (۸) از خروجی‌های مدل‌های جهانی IRI-2012 و مدل NeQuick جهت بررسی درستی تغییرات کلی چگالی الکترونی بدست آمده از روشهای پایداری سازی هیبرید و تیخونوف استفاده شود. در حقیقت مقایسه صورت گرفته صرفاً جهت نشان دادن تغییرات چگالی الکترونی بدست آمده می‌باشد و هدف مقایسه دقت و صحت با استفاده از این مدل‌های جهانی نیست.

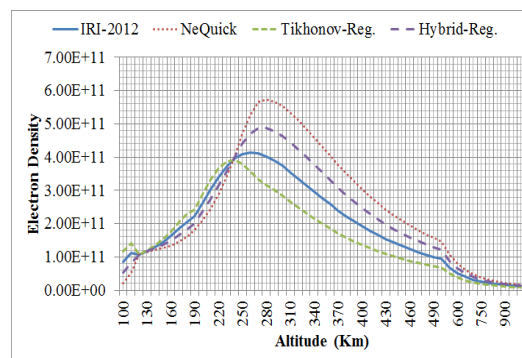


۲۰۰۷/۰۷/۱۱/۰۳



۲۰۰۷/۰۷/۰۴/۰۳

جوابهایی با صحت بالا کمک قابل توجهی کند. در این مقاله روش پایدارسازی هیبرید جهت حل مساله معکوس بدو وضع توموگرافی یونوسفر مورد تست و ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از روش پیشنهادی با نتایج حاصل از پایدارسازی بروش تیخونوف مرتبه صفرم و همچنین چگالی الکترونی اندازه گیری شده با دستگاه یونوسوند مورد مقایسه قرار گرفت. داده‌های ۳ روز سال ۲۰۰۷ (۲۰۰۷/۰۱/۰۳، ۲۰۰۷/۰۴/۰۳ و ۲۰۰۷/۰۷/۱۳) جهت مدلسازی و همچنین تست نتایج بکار گرفته شد. این سه روز بگونه‌ای انتخاب گردید تا بتوان صحت روش پیشنهادی در این مقاله را در فصول مختلف سال درستی آزمایی نمود. براساس آنالیز انجام گرفته میانگین خطای نسبی بدست آمده از روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم ۱۲/۴۰ درصد و میانگین خطای نسبی بدست آمده از روش هیبرید ۱۰/۵۰ درصد می‌باشد. براین اساس دقت چگالی الکترونی بازسازی شده با روش هیبرید بیشتر از روش پایدارسازی تیخونوف مرتبه صفرم می‌باشد. خصوصیات نظیر تغییر ارتفاع پیک چگالی الکترونی در طول شبانه روز و مقدار متوسط ارتفاع آن که از مشاهدات مستقیم چگالی الکترونی و در مناطقی با عرض جغرافیایی مشابه دیده می‌شود، تغییرات چگالی الکترونی در مدل پیشنهادی این مقاله را تایید می‌کند.



۲۰۰۷/۰۷/۱۳

شکل ۸- مقایسه پروفیل ارتفاعی چگالی الکترونی بدست آمده از روشهای پایدارسازی هیبرید، تیخونوف، مدل مرجع جهانی و مدل NeQuick در موقعیت جغرافیایی ۳۱ و ۵۱ درجه عرض و طول جغرافیایی در ساعت ۱۲ بوقت جهانی و برای سه روز مختلف از سال ۲۰۰۷

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مقاله از روش توموگرافی یونوسفر بصورت المانه‌ای حجمی جهت برآورد مقدار تغییرات ۳ بعدی (مسطحاتی-ارتفاعی) چگالی الکترونی در لایه یونوسفر استفاده شد. بدلیل ماهیت مساله توموگرافی یونوسفر، استفاده از روشهای پایدارسازی جهت برآورد پارامترهای مدل امری ضروری است.

پایدارسازی یک راه حل متعارف جهت حل مسائل معکوس بدو وضع می‌باشد. افزودن اطلاعات اولیه از مسئله مورد نظر به عنوان یک قید می‌تواند در بدست آوردن

مراجع

- [1] Amerian, Y., Hossainali, M. M., Voosoghi, B., Ghaffari Razin, M. R., (2010), "Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density in term of Wavelets", International Journal of Aerospace science and Technology.
- [2] Austen, J.R., Franke, S.J., Liu, C.H., (1988). "Ionospheric imaging using computerized tomography". Radio Sci. 23, 299-307.
- [3] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arikan, O., (2008). "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC". Radio Sci. 43, RS4004. <http://dx.doi.org/10.1029/2007RS003785>.
- [4] Hobiger, T., Kondo, T., Koyama, Y., (2008). "Constrained simultaneous algebraic reconstruction technique (C-SART) - a new and simple algorithm applied to ionospheric tomography". Earth Planets Space 60, 727-735.
- [5] Mitchell, C.N., Spencer, P.S.J., (2003). "A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS". Ann. Geophys. 46, 687-696.
- [6] Ghaffari Razin, M. R., (2015). "Development and analysis of 3D ionosphere modeling using base functions and GPS data over Iran". Acta Geod Geophys, DOI 10.1007/s40328-015-0113-9 Volume 51, Issue 1, pp 95-111.
- [7] Ghaffari Razin, M. R., Voosoghi, B., (2016). "Regional ionosphere modeling using spherical cap harmonics and empirical orthogonal functions over Iran". Acta Geod Geophys, DOI 10.1007/s40328-016-0162-8.
- [8] Wen, D.B., Yuan, Y.B., Ou, J., Huo, X., Zhang, K., (2007). "Three dimensional ionospheric tomography by an improved algebraic reconstruction technique". GPS Solut. 11, 251-258.

- [9] Wen, D.B., Yuan, Y.B., Ou, J., Zhang, K., Liu, K., (2008). "A hybrid reconstruction algorithm for 3-D ionospheric tomography". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46, 1733–1739.
- [10] Wen, D.B., Wang, Y., Norman, R., (2012). "A new two-step algorithm for ionospheric tomography solution". *GPS Solut.* 16, 89–94.
- [11] Zibetti, M., Bazan, F., Mayer, J., (2008). "Determining the regularization parameters for super-resolution problems". *Signal Process.* 88, 2890–2901.
- [12] Ghaffari Razin, M. R, Voosoghi, B, (2014). "3D spatial and temporal analysis of Ionosphere electron density Using Iranian Permanent GPS Network (IPGN)". *J. Geomatics Science*, 4, 1-10
- [13] Nygren, T., (1997). "Stochastic inversion in ionospheric radiotomography". *Radio Sci.* 32, 2359–2372.
- [14] Bhuyan, K., Bhuyan, P.K., (2007). "International reference ionosphere as a potential regularization profile for computerized ionospheric tomography". *Adv. Space Res.* 39, 851–858.
- [15] Van de Kamp, M.M.J.L., (2013). "Medium-scale 4-D ionospheric tomography using a dense GPS network". *Ann. Geophys.* 31, 75–89.
- [16] Ghaffari Razin, M. R., Hossainali, M. M., (2011). "Three-dimensional Modeling of the variations of the electron density in three seasons in Iran Using the Iranian Geodynamics Network". *Journal of space science and technology*, Volume 4, Issue 2 , pp 58-70.
- [17] Vogel, C.R., (2002). "Computational Methods for Inverse Problems". SIAM, Philadelphia, PA.
- [18] Kamalabadi, F., Sharif, B., (2005). "Robust regularized tomographic imaging with convex projections". In: *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'05)*, Genova, Italy, vol. 2, pp. 205–208.
- [19] Lee, J.K., Kamalabadi, F., (2009). "GPS-based radio tomography with edgepreserving regularization". *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47, 312–324.
- [20] Garcia, R., Crespon, F., (2008). "Radio tomography of the ionosphere: analysis of an underdetermined, ill-posed inverse problem, and regional application". *Radio Sci.* 43, RS2014. <http://dx.doi.org/10.1029/2007RS003714>.