

# 3-D Modeling of Ionospheric Tomography Using GPS Observations Geodynamics Network of Iran in Three Different Seasons

**M. R. Ghaffari<sup>1\*</sup> and M. M. Hossainali<sup>2</sup>**

1, 2. Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering., K. N. Toosi University. of Technology

\*Intersection of Valiasr- Mirdamad St., Tehran, IRAN

**mirreza\_ghaffari@yahoo.com-09144261851**

*The function based approach to three-dimensional tomographic modeling of Ionosphere is analyzed. Harmonic and empirical orthogonal functions are used as the base functions required in the modeling of the horizontal and vertical variations of the electron density. The instability of solution has been numerically analyzed and the Tikhonov regularization technique has been used to regularize the solution. To come up with an optimum value for the regularization parameter, the direct measurements of the electron density obtained from the Tehran Ionosonde station, located at  $\lambda = 51.64^{\circ}$  and  $\varphi = 35.87^{\circ}$ , are used. The electron density model reconstructed in this paper has a maximum relative error of 36.44% and its minimum value is 0.8503. The maximum difference between the vertical total electron content (VTEC) obtained from the reconstructed model to that obtained from the corresponding IGS network Ionosphere product is 52.320 TECU and its minimum value is 1.268.*

**Keywords:** Ionospheric tomography, GPS TEC, Ionosonde Data

# مدل سازی سه بعدی تغییرات چگالی الکترونی یونوسفر با استفاده از مشاهدات GPS شبکه ژئودینامیک ایران در سه فصل مختلف

میررضا غفاری رزین<sup>۱\*</sup> و مسعود مشهدی حسینعلی<sup>۲</sup>

۱ و ۲- گروه ژئودزی، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

\*تهران، تقاطع خ ولی عصر و میرداماد

mirreza\_ghaffari@yahoo.com

توموگرافی بر اساس توابع پایه یکی از تکنیک‌های موجود برای مدل سازی سه بعدی چگالی الکترونی در لایه یونوسفر است که در این مقاله بررسی می‌شود. در این روش، تغییرات افقی چگالی الکترونی را توابع هارمونیک و تغییرات عمودی آن با توابع متعامد تجربی مدل سازی می‌شوند. ناپایداری مسئله به صورت عددی بررسی و از روش TIKHONOV برای پایدار کردن مسئله استفاده شده است. مقدار بهینه پارامتر پایدارسازی از طریق مقایسه چگالی الکترونی به دست آمده از روش توموگرافی با چگالی الکترونی به دست آمده از ایستگاه یونوسوند تهران واقع در موقعیت  $\varphi = 35.87^\circ$  و  $\lambda = 51.64^\circ$  تعیین شده است. ماکزیمم خطای نسبی در بازسازی چگالی الکترونی به روش توموگرافی در منطقه مورد نظر  $36/44\%$  درصد و مینیمم خطای آن  $0/18503\%$  به دست آمده است. همچنین مقادیر VTEC به دست آمده از این روش با مقادیر VTEC حاصل از داده‌های شبکه IGS مقایسه شده است که بیشترین مقدار اختلاف در این شبکه، مقدار  $52/330\%$  TECU و کمترین مقدار آن  $1/268\%$  TECU است.

کلیدواژه: توموگرافی یونوسفر، پارامتر پایدارسازی، ایستگاه یونوسوند، روش TIKHONOV

## مقدمه

کندتر حرکت می‌کنند و در نتیجه زمان انتقال آنها طولانی تر می‌شود. این تأثیر به تأخیر در انتقال امواج شناخته می‌شود [۴-۱]. در ده سال اخیر، سیستم GPS به ابزاری مهم برای مطالعه فیزیک جو تبدیل شده است. در لایه یونوسفر، این ابزار امکان مطالعه و مدل سازی چگالی الکترون‌های آزاد و در نتیجه TEC (انتگرال خطی چگالی الکترونی مابین گیرنده و ماهواره GPS) را فراهم ساخته است، به نحوی که تولید مدل‌های تک لایه برای TEC یکی از محصولات معمول شبکه بین‌المللی IGS محسوب می‌شود. به این ترتیب، با توسعه شبکه‌های GPS محلی، منطقه‌ای و جهانی؛ مطالعه ویژگی‌های یونوسفر با دقت کافی و با تراکم بسیار مناسب در

یونوسفر، لایه‌ای از جو زمین است که از ارتفاع ۸۰ کیلومتری تا ارتفاع بیش از هزار کیلومتری از سطح زمین گسترش دارد. این لایه از جو، اثراتی مهم و اساسی بر انتشار امواج رادیویی در آن می‌گذارد. یونوسفر محیطی پاشنده<sup>۳</sup> است. میزان پاشندگی امواج در این محیط به فرکانس آنها بستگی دارد. امواج رادیویی هنگام عبور از این لایه

۱. کارشناس ارشد

۲. استادیار

3. Dispersive

در سال ۱۹۸۶، اوستون<sup>۷</sup> نخستین بار پیشنهاد مطالعه یونوسفر به کمک تکنیک توموگرافی با امواج رادیویی ماهواره‌ها، به عبارت دیگر بازسازی چگالی الکترونی در یونوسفر به کمک امواج رادیویی عبوری از این لایه از اتمسفر را پیشنهاد کرد [۳]. اولین نتایج استفاده از این تکنیک برای مدل‌سازی چگالی الکترونی در یونوسفر توسط آندرو<sup>۸</sup> و در سال ۱۹۹۰ ارائه شد [۳]. به دنبال این بررسی‌ها تلاش‌های دیگری نیز برای مطالعه چگونگی توزیع الکترون‌های آزاد به این روش صورت گرفت، به عنوان مثال: [۷-۱۱]. این نتایج نشان می‌دهند که بررسی سه بعدی توزیع الکترون‌های آزاد به این روش به نتایج با ارزشی منجر می‌شود.

عموماً مدل‌های توموگرافی به دو دسته طبقه‌بندی می‌شوند: مدل‌های مبتنی بر توابع پایه<sup>۹</sup> [۲-۴] و مدل‌های مبتنی بر المان‌های حجمی<sup>۱۰</sup> [۱۲-۱۸]. در گروه نخست معمولاً از مجموعه توابع برای نمایش چگالی الکترونی یونوسفر استفاده می‌کنند. در روش المان‌های حجمی، یونوسفر به المان‌های حجمی کوچکی تقسیم شده و فرض می‌شود که چگالی الکترونی یونوسفر در داخل هر یک از این المان‌ها یکنواخت است. محاسبه محتوای الکترونی یونوسفر در یک امتداد خاص از جمع مقادیر الکترون در هر سلول به دست می‌آید. در این مقاله توموگرافی به روش توابع پایه مورد بررسی واقع می‌شود.

بازسازی سه بعدی چگالی الکترونی لایه یونوسفر در ایران نخستین بار توسط غفاری و حسینی [۲۰ و ۱۹] و به کمک مشاهدات فاز و کد شبکه GPS موردی «ایران سراسری» انجام شد. به دلیل دسترسی نداشتن به اندازه‌گیری‌های مستقیم چگالی الکترونی در بازه زمانی این مشاهدات، در این تحقیق از چگالی الکترونی حاصل از مشاهدات کد برای مدل‌سازی چگالی الکترونی یونوسفر در محدوده فلات ایران استفاده شد. از آنجا که مدل به دست آمده در تحقیق مذکور نتوانست به خوبی تغییرات چگالی الکترونی یونوسفر را در محدوده فلات ایران مقید کند، در این مقاله، ضمن استفاده بخشی از مشاهدات ایستگاه‌های دائمی GPS کشور، از اندازه‌گیری‌های مستقیم چگالی الکترونی استفاده شده است. علاوه بر این، روش پایدارسازی به کاررفته در این تحقیق از معایب روش مورد استفاده در مقاله مذکور برخوردار نیست.

این مقاله شامل بخش‌های زیر است: در بخش دوم، مشاهدات مورد نیاز برای بازسازی چگالی الکترونی و نحوه محاسبه آن آورده شده است. بخش سوم، معادلات مشاهدات مورد نیاز در این روش را توضیح خواهد داد. بخش چهارم، در مورد نحوه تعیین توابع متعامد تجربی صحبت می‌کند. بخش پنجم، در مورد تعیین پارامترها و سرانجام بخش ششم، نتایج به دست آمده از این روش را شرح خواهد داد.

مقایسه با تکنیک‌های مستقیم تعیین چگالی الکترونی انجام پذیر است. تعیین چگالی الکترونی یا حداقل تعیین TEC در این لایه از جو، اطلاعات با ارزشی را در خصوص یونوسفر و فعالیت‌های آن در اختیار می‌گذارد. اهمیت این اطلاعات در مطالعات فضایی به حدی است که تعیین چگالی الکترونی در مراکز فضایی یکی از فعالیت‌های معمول این مراکز است [۱]. علاوه بر این، محاسبه تصحیح تأخیر گروه و تقدم فاز سیگنال، نه تنها در تعیین موقعیت دقیق با گیرنده‌های تک فرکانس، بلکه در مراحل مختلفی از پردازش داده‌های GPS اجتناب‌ناپذیر است. بازسازی سه بعدی چگالی الکترونی در این لایه از جو به روش توموگرافی، محاسبه TEC و در نتیجه تأخیر و تقدم زمانی مذکور را امکان‌پذیر می‌کند.

تاکنون، مدل‌های دو بعدی یونوسفری<sup>۴</sup> مختلفی به وجود آمده و برای کاربردهای مختلف، بسته به دقت مورد نیاز، استفاده شده‌اند. این مدل‌ها به دو دسته کلی زیر طبقه‌بندی می‌شوند: مدل‌های شبکه‌ای<sup>۵</sup> و مدل‌های غیرشبکه‌ای<sup>۶</sup> [۲-۴]. در مدل‌های شبکه‌ای، از الگوریتم‌های مختلفی برای به دست آوردن تغییرات چگالی الکترونی یونوسفر استفاده می‌شود [۲-۶]. مدل‌های غیرشبکه‌ای مبتنی بر برازش کم‌ترین مربعات یک مدل به اندازه‌گیری‌هاست. در این روش، مدل مورد نظر بر حسب توابع پایه مختلفی مانند توابع چندجمله‌ای و هارمونیک‌های کروی تعریف می‌شود [۲-۶].

در تمامی روش‌های دوبعدی مدل‌سازی یونوسفر، این لایه از جو؛ با پوسته‌ای نازک که در ارتفاع ۲۵۰ تا ۴۵۰ کیلومتری سطح زمین قرار دارد تقریب زده می‌شود. در این مدل‌ها معمولاً از ارتفاع ۳۵۰ کیلومتری به عنوان ارتفاعی که در آن چگالی الکترونی به ماکزیمم مقدار آن می‌رسد، استفاده می‌شود. این فرض با شرایط فیزیکی واقعی یونوسفر در توافق نبوده و بنابراین باعث ایجاد خطایی در مدل‌سازی یونوسفر می‌شود. به ویژه در طول فعالیت‌های بالای خورشیدی، تغییرات ارتفاع پوسته یونوسفری افزایش یافته و در نتیجه این خطا افزایش می‌یابد. مطالعات انجام گرفته در سال ۱۹۹۷ توسط کومجاتی، نشان داده است [۳] که فرض یک ارتفاع ثابت برای پوسته یونوسفری، تأثیر زیادی بر دقت مدل‌سازی یونوسفر دارد و تغییرات زمانی و مکانی ارتفاع پوسته یونوسفری به تغییرات زیادی در مقدار TEC منجر می‌شود. علاوه بر این به لحاظ ماهیت دوبعدی مدل‌های تک لایه، بررسی تغییرات ارتفاعی چگالی الکترونی در یونوسفر به کمک این مدل‌ها امکان‌پذیر نیست. این ویژگی یکی دیگر از نقاط ضعف مدل‌های دو بعدی محسوب می‌شود.

7. Austin  
8. Andreeva  
9. Function based  
10. Voxel based

4. Two dimensional (2D) ionospheric model  
5. Grid based  
6. Non\_grid\_based

$$TEC_R = \frac{f_1^2[(P_1 - P_2) - B_i - B^p]}{40.3(1 - \gamma)} \quad (7)$$

$\gamma$  مربع نسبت دو فرکانس به صورت زیر است:

$$\gamma = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2 = \left(\frac{77}{60}\right)^2 \quad (8)$$

به علت وجود دو ابهام فاز  $N_1$  و  $N_2$  در معادله (۶)، TEC که از مشاهدات فاز محاسبه می شود کمیته نسبی<sup>۱۳</sup> است. در مقابل، به این علت که در مشاهدات شبه فاصله کد، ابهام در فاز وجود ندارد، مقدار TEC به دست آمده کمیته مطلق<sup>۱۴</sup> است. با وجود این، کمیته TEC به دست آمده از مشاهدات فاز موج حامل به علت بالاتر بودن دقت مشاهدات فاز موج حامل از مشاهدات کد، دقت بیشتری نسبت به TEC به دست آمده از مشاهدات کد دارد [۴ و ۳ و ۲]. از طرف دیگر در صورتی که امواج سیستم به صورت پیوسته و بدون قطعی موقت (جهش فاز) دریافت شوند، دو ابهام فاز مذکور ثابت باقی می ماندند. از این روی می توان با تشکیل ترکیب مناسبی از معادلات (۶) و (۷) به برآوردی مطلق از مقدار TEC رسید که دقتی بهتر از مقدار TEC حاصل از مشاهدات کد دارد. این مقدار TEC اصطلاحاً به TEC نرم شده<sup>۱۵</sup> معروف است [۴ و ۳ و ۲]. برای این کار در نخستین گام اختلاف بین دو مقدار TEC حاصل از مشاهدات کد و فاز در هر اپک محاسبه می شوند:

$$\Delta TEC_n = TEC_{R,n} - TEC_{\Phi,n} \quad (9)$$

مقادیر بایاس داخل فرکانسی برای گیرنده و ماهواره در طول یک پریود چند روزه، نسبتاً ثابت است [۴-۲]. بعد از محاسبه  $\Delta TEC_n$  از معادله (۹)، افسست میان TEC نسبی و مطلق می تواند با مقدار  $TEC_{\Phi}$  به دست آمده از معادله (۶) جمع شود. بنابراین مقدار  $TEC_{SM,N}$  برآوردی مطلق از مقدار TEC بوده و از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\Delta TEC_N = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \Delta TEC_n \quad (10)$$

$$TEC_{SM,N} = TEC_{\Phi,N} + \Delta TEC_N \quad (11)$$

### گسترش مدل توموگرافی

با توجه به اینکه TEC انتگرال خطی چگالی الکترونی در طول مسیر حرکت سیگنال از ماهواره به گیرنده است، برای کمیته  $TEC_{SM,N}$  می توان نوشت [۴ و ۳ و ۲]:

### مشاهدات

گیرنده های دو فرکانس GPS، مشاهدات کد و فاز موج حامل  $(P_i, \Phi_i (i=1,2))$  را در باند L و با فرکانس های  $L1(1575.42MHz)$  و  $L2(1227.60MHz)$  در اختیار می گذارند. مدل ریاضی این مشاهدات که ویژگی های هندسی و فیزیکی فضای اندازه گیری را در بر می گیرد عبارت است از [۲۸]:

فرکانس L1:

$$P_1 = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + I \quad (1)$$

$$+ b_{p1} - B_{p1} + d_{mult/p1} + \varepsilon(P_1)$$

$$\Phi_1 = \rho + c(dt - dT) + \lambda_1 N_1 + d_{orb} + d_{trop} \quad (2)$$

$$- I + b_{\Phi 1} - B_{\Phi 1} + d_{mult/\Phi 1} + \varepsilon(\Phi_1)$$

فرکانس L2:

$$P_2 = \rho + c(dt - dT) + d_{orb} + d_{trop} + \gamma I \quad (3)$$

$$+ b_{p2} - B_{p2} + d_{mult/p2} + \varepsilon(P_2)$$

$$\Phi_2 = \rho + c(dt - dT) + \lambda_2 N_2 + d_{orb} + d_{trop} \quad (4)$$

$$- \gamma I + b_{\Phi 2} - B_{\Phi 2} + d_{mult/\Phi 2} + \varepsilon(\Phi_2)$$

که در آن:

$$I = 40.3 \frac{TEC}{f_i^2} \quad (5)$$

$\rho$  فاصله هندسی میان گیرنده و ماهواره،  $c$  سرعت نور در خلأ بر حسب متر بر ثانیه،  $dt$  خطای ساعت ماهواره نسبت به زمان GPS،  $dT$  خطای ساعت گیرنده نسبت به زمان GPS،  $d_{orb}$  خطای مدار ماهواره بر حسب متر،  $\lambda$  طول موج سیگنال  $L_i$  بر حسب متر،  $N_i$  ابهام فاز،  $d_{trop}$  تأخیر تروپوسفری به متر،  $I$  پارامتر تأخیر یونوسفری،  $d_{mult}$  اثر خطای چند مسیری به متر،  $b_{\Phi i}$  و  $b_{p i}$  تأخیر ابزاری ماهواره<sup>۱۱</sup> روی فرکانس های  $L1$  و  $L2$  و  $B_{\Phi i}$  و  $B_{p i}$  تأخیر ابزاری گیرنده<sup>۱۲</sup> روی فرکانس های  $L1$  و  $L2$  به متر،  $f_1 = 1575.42MHz$ ،  $f_2 = 1227.60MHz$  و بالاخره  $\varepsilon$  نویز اندازه گیری ها بر حسب متر هستند.

با استفاده از مشاهدات فاز موج حامل در هر دو فرکانس  $L1$  و  $L2$  می توان کمیته TEC را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$TEC_{\Phi} = \frac{f_1^2[(\lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - b_i - b^p]}{40.3(\gamma - 1)} \quad (6)$$

همچنین کمیته TEC را می توان مستقیماً از مشاهدات شبه فاصله به دست آورد:

13. Relative TEC

14. Absolute TEC

15. Smoothed Total Electron Content

11. Satellite instrumental delay

12. Receiver instrumental delay

(داده‌های مشاهداتی) یا داده به‌دست آمده از مدلی جهانی محاسبه و تعیین می‌شوند و  $a_{nk}^m, b_{nk}^m$  ضرایب مدل سه بعدی مورد نظرند که از حل دستگاه معادلات (۱۲) تعیین می‌شوند. ترکیب معادلات (۱۲) و (۱۷) معادله مشاهده پایه در مدل‌سازی توموگرافیک سه بعدی یونوسفر به روش توابع پایه را به‌دست می‌دهد:

$$TEC_{SM,N} = \sum_{k=1}^K \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^M a_{nk}^m \int_{rx}^{sv} \cos(m\lambda) \bar{P}_n^m(\cos\phi) Z_k(z) ds + \sum_{k=1}^K \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^M b_{nk}^m \int_{rx}^{sv} \sin(m\lambda) \bar{P}_n^m(\cos\phi) Z_k(z) ds + \frac{f_1^2 B_i}{40.3(1-\gamma)} + \frac{f_1^2 B^p}{40.3(1-\gamma)} \quad (18)$$

### تعیین توابع متعامد تجربی

در محاسبه توابع متعامد تجربی می‌توان از چگالی الکترونی حاصل از مدل‌های تجربی یونوسفر مانند مدل مرجع بین‌المللی<sup>۱۸</sup> یا از مشاهدات مستقیم چگالی الکترونی استفاده کرد [۲۵]. مدل‌های رفرانس بین‌المللی یونوسفر مقادیر متوسط چگالی الکترونی را به‌صورت تابعی از ارتفاع برای یک موقعیت و در اپک زمانی مشخصی به‌دست می‌دهند.

### نحوه محاسبه توابع EOF

با در اختیار داشتن پروفیل قائم چگالی الکترونی یونوسفر (مثلاً از طریق مدل‌های مرجع بین‌المللی) در اپوک‌های زمانی و در نقاط مختلف، ماتریس پروفیل چگالی الکترونی را می‌توان به صورت زیر تشکیل داد:

$$N(t, h) = \begin{bmatrix} N(t_1, h_1) & N(t_1, h_2) & \dots & N(t_1, h_N) \\ N(t_2, h_1) & N(t_2, h_2) & \dots & N(t_2, h_N) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N(t_M, h_1) & N(t_M, h_2) & \dots & N(t_M, h_N) \end{bmatrix} \quad (19)$$

که در آن  $N(h_j, t_i)$  چگالی الکترونی در ارتفاع یکسان و هر ستون نشان‌دهنده مقادیر چگالی الکترونی در ارتفاعات یکسان است. به این ترتیب متوسط هر ستون در این ماتریس معرف میانگین زمانی چگالی الکترونی در هر ارتفاع است که با  $\bar{N}(h_j)$  ( $j=1,2,\dots,N$ ) نمایش داده می‌شود:

$$TEC_{SM,N} = \int_{rx}^{sv} N_e(\lambda, \phi, z) ds = \int_{rx}^{sv} [N_e^0(\lambda, \phi, z) + \delta N_e(\lambda, \phi, z)] ds \quad (12)$$

در این رابطه  $TEC_{SM,N}$  محتوای الکترون یونوسفر در طول مسیر حرکت سیگنال GPS از ماهواره (sv) تا گیرنده زمینی (rx)،  $N_e(\lambda, \phi, z)$  چگالی الکترونی یونوسفر در موقعیت  $(\lambda, \phi, z)$  و  $ds$  المان طولی در مسیر حرکت سیگنال است.  $N_e^0(\lambda, \phi, z)$  مقدار اولیه‌ای از  $N_e(\lambda, \phi, z)$  است که به کمک مدل‌های تجربی تعیین می‌شود. انتگرال‌گیری از مقدار تقریبی  $N_e(\lambda, \phi, z)$ ، کمیت  $TEC_0$  را به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$TEC_0 = \int_{rx}^{sv} N_0(\lambda, \phi, z) ds \quad (13)$$

با جایگزینی معادله (۱۳) در معادله (۱۲) خواهیم داشت:

$$TEC_{SM,N} = TEC_0 + \int_{rx}^{sv} \delta N_e(\lambda, \phi, z) ds \quad (14)$$

با تعریف اختلاف  $TEC_{SM,N}$  و مقدار تقریبی  $TEC_0$  با  $\delta TEC$  به‌صورت زیر خواهیم داشت:

$$\delta TEC = TEC_{SM,N} - TEC_0 \quad (15)$$

با توجه به تعریف  $\delta TEC$  و رابطه (۱۳) داریم:

$$\delta TEC = \int_{rx}^{sv} \delta N_e(\lambda, \phi, z) ds \quad (16)$$

به این ترتیب در بازسازی چگالی الکترونی به روش توموگرافی هدف تعیین  $\delta N_e(\lambda, \phi, z)$  به‌عنوان ترم تصحیحی برای این مقدار اولیه  $N_e^0(\lambda, \phi, z)$  است. توموگرافی به کمک توابع پایه یکی از روش‌های توموگرافی است که در آن، تغییرات افقی این کمیت (ترم تصحیحی  $\delta N_e(\lambda, \phi, z)$ ) با توابع هارمونیک کروی<sup>۱۶</sup> و تغییرات عمودی آن با توابع متعامد تجربی<sup>۱۷</sup> توصیف می‌شوند. درجه بهینه و مرتبه ممکن توابع هارمونیک مورد استفاده متناسب با دقت مورد نیاز و حجم داده‌ای موجود تعیین می‌شود [۲۲، ۲۳ و ۲۴]:

$$\delta N(\lambda, \phi, z) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=-M}^M \sum_{n=|m|}^M [a_{nk}^m \cos(m\lambda) + b_{nk}^m \sin(m\lambda)] \bar{P}_n^m(\cos\phi) Z_k(z) \quad (17)$$

در این رابطه  $\bar{P}_n^m(\cos\phi)$  چند جمله‌ای لژاندر از مرتبه  $m$  و درجه  $n$ ،  $Z_k(z)$  توابع متعامد تجربی که از داده موجود

16. Spherical Harmonic Function (SHF)

17. Empirical Orthogonal Function (EOF)

18. International Reference Ionosphere Model

می‌توان به تعداد بهینه توابع متعامد تجربی مورد نیاز برای مدل سازی تغییرات قائم چگالی الکترونی در منطقه مورد نظر و در بازه زمانی مورد نظر رسید.

### تعیین مدل

دستگاه معادلات مشاهداتی را که بر پایه معادله مشاهده (۱۸) نوشته می‌شود، می‌توان به فرم کلی زیر نوشت [۲۷-۳۰]:

$$\mathbf{d} = \mathbf{G}\mathbf{m} + \mathbf{v} \quad (22)$$

که در آن  $\mathbf{d}$  بردار مشاهدات (در اینجا  $TEC = TEC_{SM,N} - TEC_0$ )،  $\mathbf{v}$  بردار نویز مشاهدات،  $\mathbf{m}$  بردار مدل (شامل پارامترهای مجهول  $a_{nk}^m$  و  $b_{nk}^m$ ) و  $\mathbf{G}$  ماتریس ضرایب که ارتباط میان مشاهدات و پارامترهای مجهول را توصیف می‌کند. دستگاه معادلات حاصل از معادله (۱۸) به دو دلیل زیر دستگاه معادلاتی ناپایدار است [۲۷-۳۰]:

۱. معادله انتگرالی حاصل از رابطه (۱۸) جزء معادلات انتگرالی فرد هلم نوع اول است. ثابت می‌شود که مسائل معکوس مبتنی بر انتگرال‌های فوق، مسائلی ناپایدارند [۲۷-۳۰].
  ۲. وجود عناصر نامتجانس در ماتریس ضرایب حاصل از سیستم معادلات (۱۸) باعث به وجود آمدن ناپایداری و در نتیجه بزرگ شدن عدد شرط ماتریس فوق است [۲۷-۳۰].
- بنابراین استفاده از فنون پایدارسازی برای رسیدن به جوابی پایدار برای آن ضروری است. برای این منظور و در این مقاله از روش TIKHONOV استفاده شده است [۳۰].

### پایدارسازی سیستم معادلات با روش TIKHONOV

یکی از روش‌های موجود برای حل مسائل ناپایدار، استفاده از تکنیک GSVD<sup>۲۲</sup> است [۳۰]. در واقع این روش تعمیمی از روش SVD<sup>۲۳</sup> است که اولین بار تیخونوف استفاده از آن را برای حل مسائل کم‌ترین مربعاتی که از جوابی ناپایدار برخوردارند پیشنهاد کرده است. معادله اصلی برای برآورد پارامترها در این روش به صورت زیر است:

$$\min \|\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}\|_2^2 + \alpha^2 \|\mathbf{L}\mathbf{m}\|_2^2 \quad (23)$$

$$\bar{N}(h_j) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M N(t_m, h_j) \quad (20)$$

به این ترتیب تغییرات چگالی الکترونی در منطقه مورد مطالعه و در بازه زمانی مورد بررسی به کمک ماتریس زیر بررسی می‌شود:

$$\mathbf{S} = \tilde{\mathbf{N}}^T(t, h) \tilde{\mathbf{N}}(t, h) \quad (21)$$

در این رابطه  $\tilde{\mathbf{N}}(t, h)$  ماتریسی است که هر ستون آن از کم کردن عناصر ستون نظیر در ماتریس  $\mathbf{N}$  از میانگین مربوطه محاسبه می‌شود. ماتریس وریانس- کووریانس که از این طریق تشکیل می‌شود اطلاعاتی را در خصوص چگونگی تغییرات چگالی الکترونی در اختیار می‌گذارد [۲۶ و ۲۷]. برای بررسی این تغییرات، در آمار ریاضی از روشی موسوم به تجزیه به مؤلفه‌های اصلی<sup>۱۹</sup> استفاده می‌شود [۲۶ و ۲۷]. در این روش داده‌های مورد نظر (در اینجا ماتریس  $\mathbf{S}$ ) به مؤلفه‌های اصلی آن تجزیه و سهم هریک از این مؤلفه‌ها در تغییرات ماتریس وریانس- کووریانس متغیر تصادفی مربوطه بررسی می‌شود. اگر  $\mathbf{x} = [x_1, \dots, x_p]^T$  برداری تصادفی و  $\sum$  ماتریس وریانس- کووریانس مربوط به آن باشند، ثابت می‌شود که مؤلفه‌های اصلی این ماتریس شامل ترکیب‌های خطی به فرم  $y_h = \mathbf{e}_h^T \mathbf{x}$  است که در آن بردار ویژه نظیر مقدار ویژه  $h$  این ماتریس است. علاوه بر این نشان داده می‌شود که وریانس هر مؤلفه اصلی برابر  $\lambda_h$  یا مقدار ویژه نظیر آن است و هیچ کووریانسی بین مؤلفه‌های اصلی مختلف وجود ندارد [۲۶ و ۲۷]. مؤلفه‌های اصلی یک ماتریس به توابع متعامد تجربی<sup>۲۰</sup> آن نیز معروفند.

### تعیین سهم هر مؤلفه اصلی در ماتریس کوواریانس

اثر<sup>۲۱</sup> ماتریس وریانس- کووریانس یک متغیر تصادفی برابر حاصل جمع مقادیر ویژه آن است [۲۶ و ۲۷]. بنابراین می‌توان گفت که نسبت هر مقدار ویژه به حاصل جمع مقادیر ویژه یک ماتریس وریانس- کووریانس، معرف سهم هر مؤلفه اصلی آن ماتریس در بیان تغییرات کل متغیر تصادفی مربوطه است. به این ترتیب، برای محاسبه و بررسی سهم هر مؤلفه اصلی در تغییرات چگالی الکترونی کافی است مقادیر ویژه  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) از ماتریس  $\mathbf{S}$  را محاسبه و به مجموع این مقادیر تقسیم کرد. مقادیر به دست آمده از این طریق  $(\lambda_i \times 100 / \sum \lambda_i)$  نشان دهنده سهم هر مؤلفه اصلی ماتریس  $\mathbf{S}$  در تغییرات آن است. از مقایسه این مقادیر

19. Principal Components

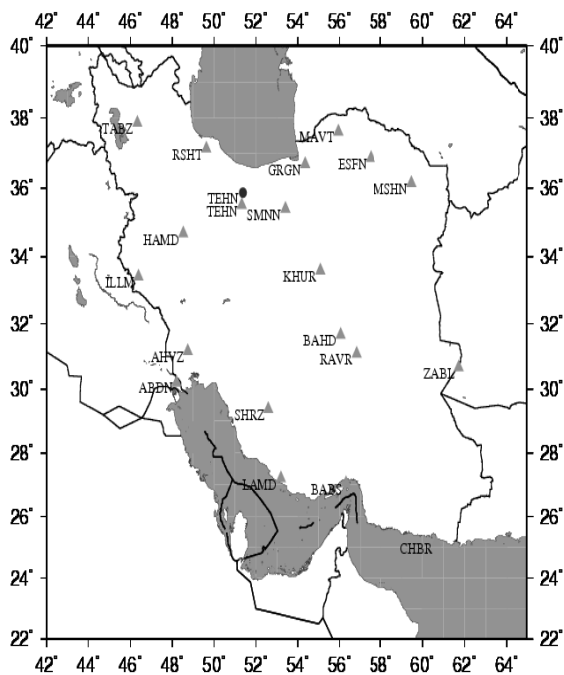
20. Empirical Orthogonal Function

21. Trace

22. Generalized Singular Value Decomposition

23. damped least squares

شبکه اصلی انتخاب شده است. در این تحقیق، از داده‌های ۲۲ ایستگاه شبکه اصلی برای مدل‌سازی توموگرافی یونوسفر در اتمسفر بالای ایران استفاده شده است. چگونگی توزیع تعدادی از ایستگاه‌های این شبکه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- چگونگی توزیع ایستگاه‌های دائمی GPS در شبکه مورد بررسی در این تحقیق، مثلث‌های سبز نشان‌دهنده ایستگاه‌های دائمی و دایره قرمز مربوط به ایستگاه یونوسفر در این شبکه هستند.

که در معادله بالا  $\alpha$  پارامتر پایداری است و مقداری بزرگ‌تر از صفر است.  $L$  یک ماتریس معین مثبت است که نوع آن بستگی به مرتبه پایداری دارد. برای روش پایداری مرتبه صفرم تیخونف، ماتریس  $L$  یک ماتریس همانی است. برآورد پارامترها با روش پایداری تیخونف مرتبه صفرم، با رابطه زیر انجام می‌شود:

$$m_{\alpha} = (G^T G + \alpha^2 L)^{-1} G^T d \quad (24)$$

مقدار پارامتر پایداری در این روش غالباً به کمک روش  $L$ -curve تعیین می‌شود. روش  $L$ -curve یکی از روش‌های موجود در تعیین بهینه مقدار منفردی است که با آن، دستگاه معادلات حاصل پایداری کافی خواهد داشت [۳۰]. این روش یکی از ساده‌ترین روش‌های موجود برای انتخاب بهینه پارامتر پایداری (در اینجا  $\alpha$ ) در پایداری یک مسئله گسسته معکوس ناپایدار است که در آن تغییرات نرم جواب پایداری شده نسبت به تغییرات نرم بردار باقیمانده‌ها بررسی می‌شود [۳۰]. در مسائل گسسته معکوس ناپایدار، نمایش لگاریتمی منحنی این تغییرات غالباً به شکل  $L$  است و نقطه شکستگی این منحنی جواب پایداری شده با خطای پایداری مناسبی را پیشنهاد می‌کند.

میزان بایاس موجود در جواب مسئله پایداری شده غالباً از طریق ماتریس رزولوشن بررسی و کنترل می‌شود. این ماتریس به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۰]:

$$R = (G^T G + \alpha^2 L)^{-1} G^T G \quad (25)$$

در غیاب بایاس در نتایج، مقادیر روی قطر اصلی ماتریس رزولوشن عدد یک خواهند بود. بنابراین هر چقدر درایه‌های روی قطر اصلی ماتریس رزولوشن به عدد یک نزدیک‌تر باشند، صحت جواب پایداری شده بیشتر است.

## پردازش داده‌ها

مطالعات ژئودینامیک در ایران از سال ۱۳۷۷ به منظور پایش تغییرات پوسته زمین و حرکات تکتونیکی مربوط به آن آغاز شده است. شبکه دائمی ژئودینامیک سراسری در سال ۱۳۸۳ به منظور بررسی ساز و کارهای حرکات گسل‌های ایران طراحی شده و از همان زمان شروع به کار کرده است. در حال حاضر این شبکه، ۱۰۶ ایستگاه دائمی GPS دارد. از این تعداد ایستگاه، ۴۰ ایستگاه با توزیع تقریباً یکنواخت در سراسر منطقه ایران و به فاصله تقریبی ۳۰۰ کیلومتر از هم به عنوان

## نتایج حاصل از پردازش داده‌ها

در این قسمت از داده‌های روزهای سوم ژانویه، سوم آوریل و سیزدهم جولای سال ۲۰۰۷، برای به دست آوردن نتایج مدل توموگرافی استفاده شده است. در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) به ترتیب چگالی الکترونی به دست آمده از الگوریتم بازسازی مورد استفاده با چگالی به دست آمده از اندازه‌گیری‌های مستقیم در ارتفاعات و زمان‌های متفاوت در موقعیت ایستگاه یونوسفر مقایسه شده است و خطاهای نسبی برای هر ارتفاع و زمان محاسبه شده است. نتایج به دست آمده با توجه به جدول‌های فوق نشان‌گر این است که روش توموگرافی به کمک توابع پایه قابلیت بالایی در بازسازی چگالی الکترونی به کمک داده‌های شبکه‌های GPS دارد.

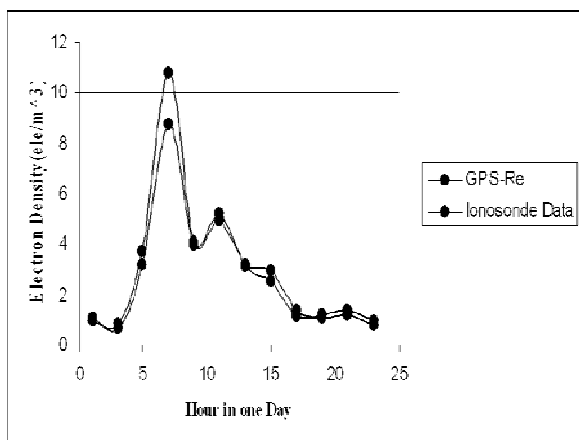
**جدول ۳-** خطای نسبی برای چگالی الکترونی به دست آمده از الگوریتم بازسازی در ارتفاعات متفاوت- روز ۲۰۰۷/۰۷/۱۳

ساعت مشاهده (LT)	ارتفاع مشاهده (Km)	چگالی الکترونی مشاهده شده ( $ele/m^3$ )	چگالی الکترونی حاصل از اندازه گیری های مستقیم ( $ele/m^3$ )	خطای نسبی (%)
۱	۲۴۵	-۰/۹۷۴۰	۱/۲۴۶۱	+۲۱/۸۳۶۱
۳	۲۱۷	۲/۶۵۸۹	۲/۷۹۷۹	+۴/۹۶۸۰
۵	۲۹۲	۴/۲۱۹۳	۴/۱۷۱۶	-۱/۱۴۳۴
۷	۲۶۹	۴/۸۴۶۵	۴/۵۰۹۰	-۷/۴۸۵۰
۹	۳۱۹	۳/۴۱۵۰	۳/۷۱۰۴	+۷/۹۶۱۴
۱۱	۳۳۵	۴/۰۲۵۴	۳/۸۸۸۹	-۳/۵۰۹۹
۱۳	۲۵۱	۳/۹۸۶۵	۴/۲۸۷۵	+۷/۰۲۰۴
۱۵	۲۷۷	۲/۹۶۵۴	۲/۷۳۹۳	-۸/۲۵۳۹
۱۷	۲۴۵	۳/۹۸۷۹	۳/۵۸۹۳	-۱۱/۱۰۵
۱۹	۲۳۶	۳/۹۲۳۵	۳/۲۲۵۴	-۲۱/۶۴۳۱
۲۱	۲۱۹	۱/۲۴۸۵	۱/۹۶۴۳	+۳۶/۴۴۰
۲۳	۲۷۱	۱/۸۷۶۳	۱/۵۱۹۱	-۲۰/۵۱۳۹

**جدول ۱-** خطای نسبی برای چگالی الکترونی به دست آمده از الگوریتم بازسازی در ارتفاعات متفاوت- در روز ۲۰۰۷/۰۱/۰۳

ساعت مشاهده (LT)	ارتفاع مشاهده (Km)	چگالی الکترونی مشاهده شده ( $ele/m^3$ )	چگالی الکترونی حاصل از اندازه گیری های مستقیم ( $ele/m^3$ )	خطای نسبی (%)
۱	۲۷۸	۱/۱۰۱۷	-۰/۹۸۴۲	-۱۱/۹۱۷۳
۳	۲۳۳	-۰/۶۵۳۵	-۰/۸۳۸۲	+۵/۸۶۶۷
۵	۲۲۳	۳/۱۵۲۱	۳/۷۱۰۴	+۱۵/۰۴۶۸
۷	۲۲۷	۸/۷۴	۱۰/۷۷۱۶	+۱۸/۸۶۰۷
۹	۲۱۹	۳/۹۳۸۸	۴/۱۰۰	+۳/۹۳۰۵
۱۱	۲۲۶	۴/۹۳۰۸	۵/۱۹۱۰	+۵/۰۱۳۶
۱۳	۲۱۱	۳/۱۶۴۲	۳/۱۳۷۵	-۰/۸۵۳۰
۱۵	۱۹۸	۲/۹۲۴۵	۲/۵۱۱۱	-۱۶/۴۶۳۹
۱۷	۲۴۴	۱/۳۸۹۵	۱/۱۳۱۰	-۲۲/۸۵۵۸
۱۹	۲۴۷	۱/۰۷۵۶	۱/۱۹۱۷	+۹/۷۴۲۷
۲۱	۳۱۹	۱/۱۸۶۵	۱/۳۷۵۱	+۱۳/۷۱۵۳
۲۳	۲۸۱	-۰/۷۷۲۴	-۰/۹۳۷۸	+۱۷/۶۳۷۰

در شکل های (۲)، (۳) و (۴) نمودار تغییرات چگالی الکترونی بازسازی شده به روش توموگرافی با چگالی الکترونی به دست آمده از ایستگاه یونوسوند، در طول سه روز مختلف نشان داده شده است.

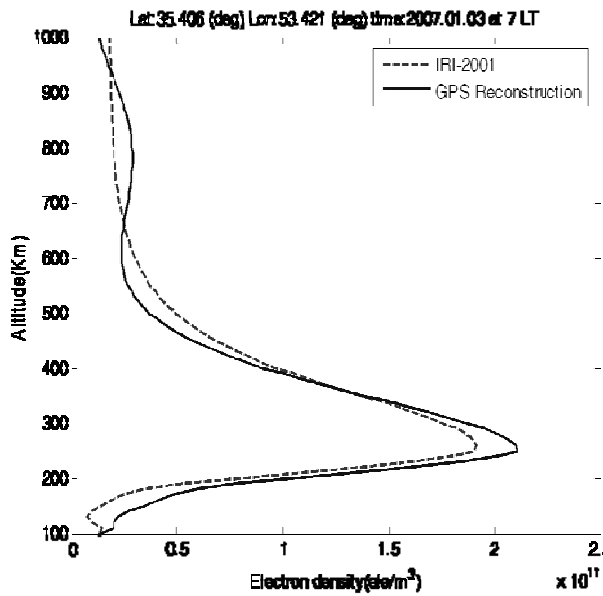


**شکل ۲-** نمودار تغییرات چگالی الکترونی بازسازی شده ( $ele/m^3$ ) و مشاهده شده در طول روز ۲۰۰۷/۰۱/۰۳

**جدول ۲-** خطای نسبی برای چگالی الکترونی به دست آمده از الگوریتم بازسازی در ارتفاعات متفاوت- روز ۲۰۰۷/۰۴/۰۳

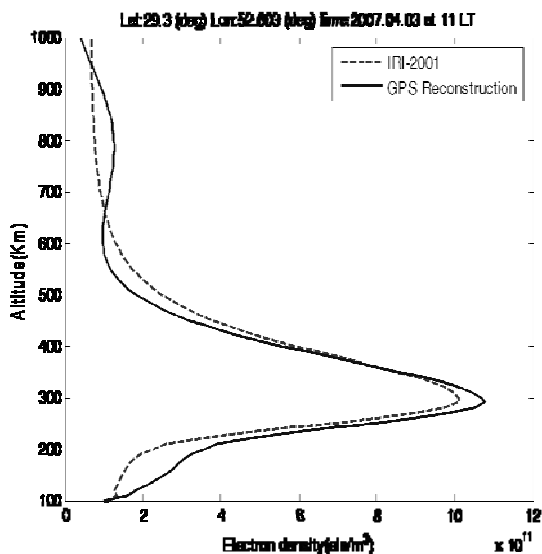
ساعت مشاهده (LT)	ارتفاع مشاهده (Km)	چگالی الکترونی مشاهده شده ( $ele/m^3$ )	چگالی الکترونی حاصل از اندازه گیری های مستقیم ( $ele/m^3$ )	خطای نسبی (%)
۱	۲۵۱	-۰/۵۹۳۴	-۰/۷۲۶۲	+۱۸/۲۸
۳	۲۲۲	۲/۱۶۵۸	۲/۹۰۴۹	+۲۵/۴۴۳۲
۵	۲۵۳	۳/۹۶۹۹	۴/۶۵۹۸	+۱۴/۸۰۵۳
۷	۳۰۲	۷/۲۱۳۴	۷/۸۳۷۶	+۷/۹۶۴۱
۹	۲۵۷	۹/۱۵۱۹	۹/۶۴۶۸	+۵/۱۳۰۱
۱۱	۲۳۲	۵/۵۸۰۴	۵/۷۸۴۸	+۳/۵۳۳۸
۱۳	۲۳۶	۵/۲۵۷۵	۴/۳۹۰۱	-۱۷/۷۵۶۵
۱۵	۲۱۷	۴/۰۸۳۹	۳/۵۲۳۹	-۱۵/۹۲۴۳
۱۷	۲۷۵	۱/۵۲۱۸	۱/۶۷۰۲	+۸/۸۸۵۱
۱۹	۲۹۲	۱/۲۴۸۹	۱/۳۲۶۰	+۵/۸۱۴۴
۲۱	۲۶۸	۱/۶۹۲۰	۱/۶۰۷۱	-۵/۲۸۲۸
۲۳	۲۴۴	۱/۳۱۵۴	۱/۲۹۳۷	-۱/۶۷۷۳



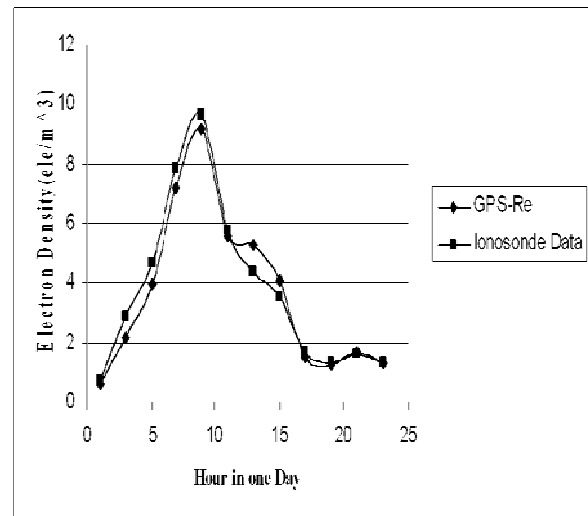


شکل ۵- پروفیل تغییرات چگالی الکترونی برای یک موقعیت خاص، نمودار آبی مربوط به الگوریتم بازسازی، نمودار قرمز مربوط به IRI 2001

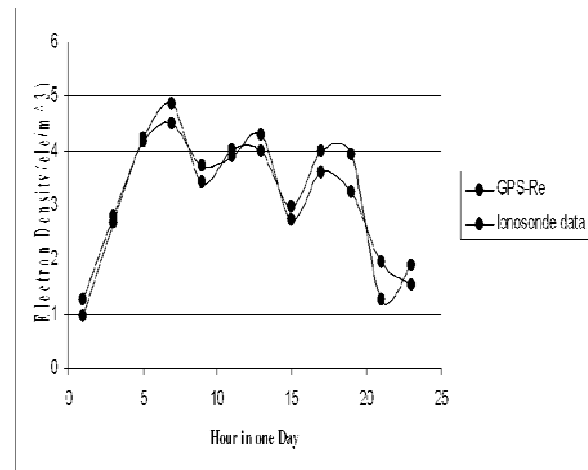
در شکل (۸) که مربوط به داده‌های استفاده شده از روز سوم ژانویه است تغییرات چگالی الکترونی در محدوده عرض جغرافیایی شبکه مورد مطالعه و در ارتفاعات و زمان‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به این تصاویر می‌توان دریافت که در ساعت ۴-۶ به وقت محلی، پیک چگالی الکترونی تقریباً در ارتفاع ۳۰۰ کیلومتری از سطح زمین و در محدوده عرض جغرافیایی ۲۲ تا ۲۴ درجه رخ داده است.



شکل ۶- پروفیل تغییرات چگالی الکترونی برای یک موقعیت خاص، نمودار آبی مربوط به الگوریتم بازسازی، نمودار قرمز مربوط به IRI 2001



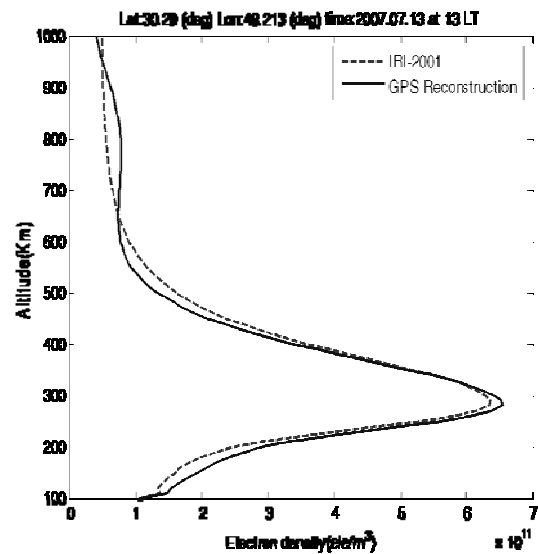
شکل ۳- نمودار تغییرات چگالی الکترونی بازسازی شده ( $ele/m^3$ ) و مشاهده شده در طول روز ۲۰۰۷/۰۴/۰۳



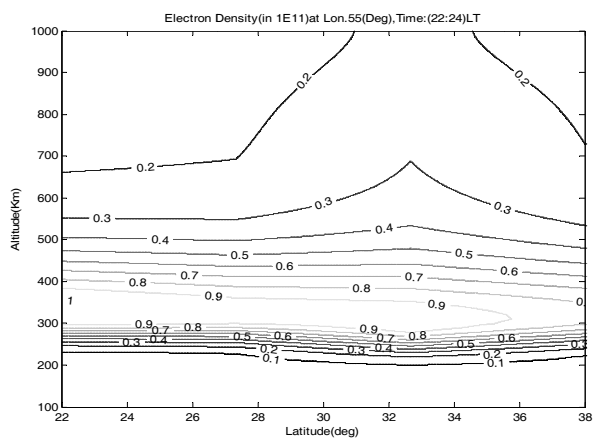
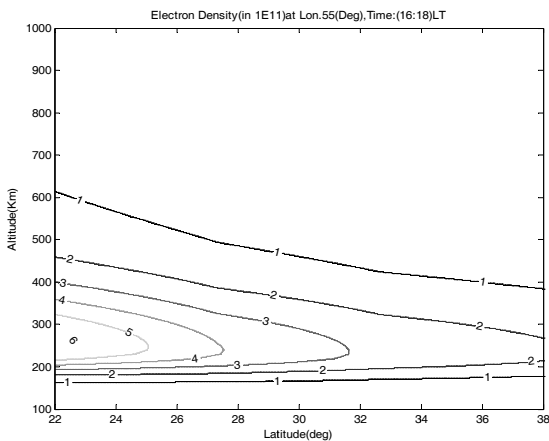
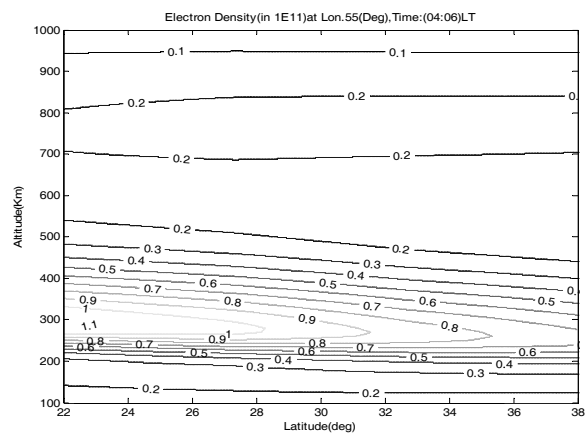
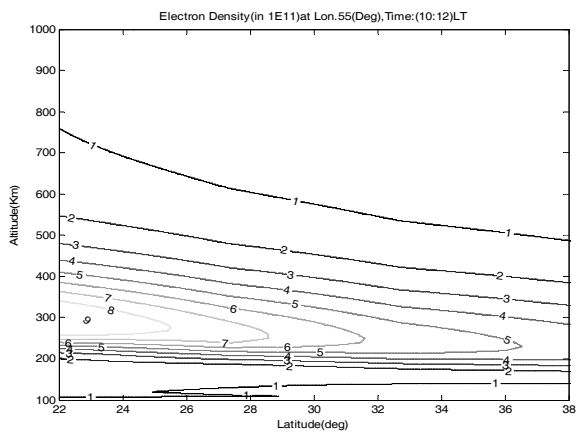
شکل ۴- نمودار تغییرات چگالی الکترونی بازسازی شده ( $ele/m^3$ ) و مشاهده شده در طول روز ۲۰۰۷/۰۷/۱۳

به دلیل نبود داده‌های پیوسته از مقادیر چگالی الکترونی در ایستگاه یونسوند واقع در تهران، این مقایسه به صورت نقطه به نقطه انجام شده است. همچنین در اشکال (۵)، (۶) و (۷) پروفیل بازسازی شده چگالی الکترونی با استفاده از داده‌های به دست آمده از سه روز موردنظر با پروفیل چگالی الکترونی به دست آمده از مدل IRI 2001 در یک موقعیت و زمان خاص، مقایسه شده است. مقایسه پروفیل‌های به دست آمده از دو روش بیانگر کیفیت بالای روش توموگرافی در بازسازی چگالی الکترونی است.

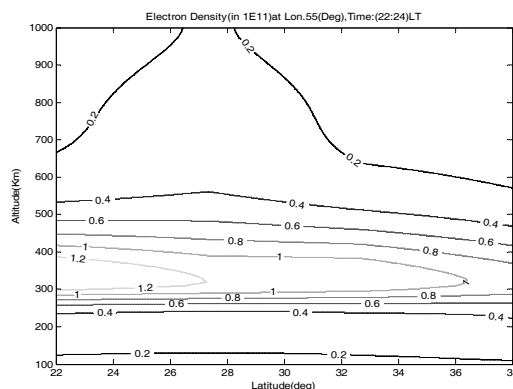
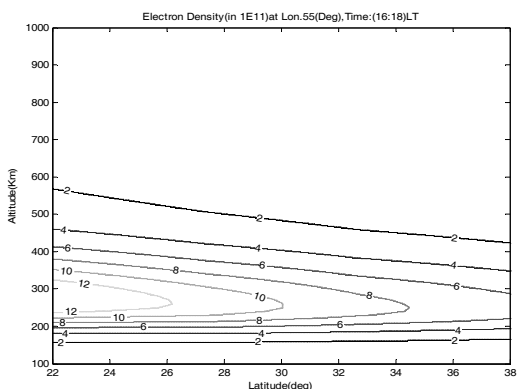
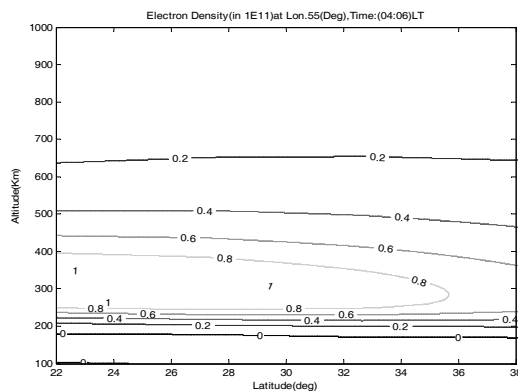
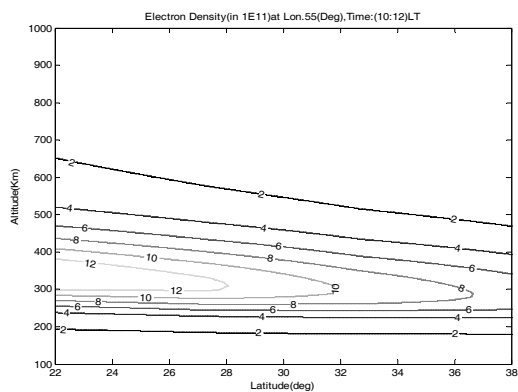
از تصویر به دست آمده در ساعت ۲۲ تا ۲۴ می توان دریافت که پیک چگالی الکترونی در ارتفاع ۳۵۰ تا ۴۰۰ کیلومتری از سطح زمین و در محدوده عرض جغرافیایی ۲۲ تا ۲۶ درجه رخ داده است. این واقعیت که توزیع دانسیته الکترونی یونوسفر با زمان متغیر است این نتایج را تأیید می کند. همچنین بررسی این نتایج نشان می دهد که ارتفاع پیک چگالی الکترونی یونوسفر، محاسبه شده از الگوریتم بازسازی یونوسفر با استفاده از داده های GPS، در طول شب و روز متفاوت است. نمایان شدن این تغییر در ارتفاع پیک چگالی الکترونی، بیانگر برتری روش توموگرافی در توصیف ویژگی تغییرات ارتفاعی یونوسفر در مقایسه با نتایج مدل های دو بعدی رایج است. اندازه گیری های مستقیم چگالی الکترونی در طول شبانه روز در مناطق مختلف و ایستگاه های دیگر یونوسوند این ویژگی نتایج حاصل را تأیید می کند. با توجه به شکل های (۹) و (۱۰) نیز می توان ویژگی های تغییرات ارتفاع پیک چگالی الکترونی و همچنین تغییرات مکانی چگالی الکترونی های یونوسفر را به وضوح مشاهده کرد.



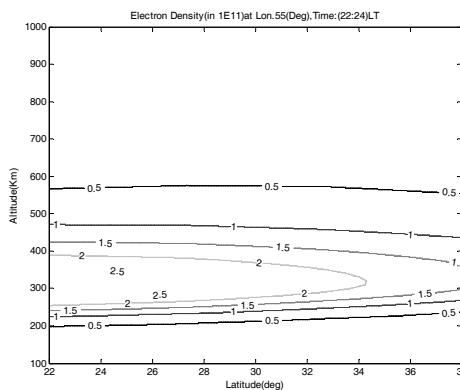
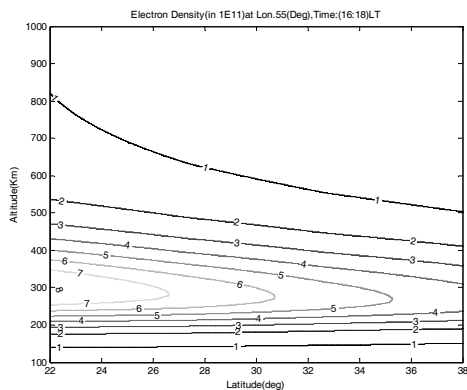
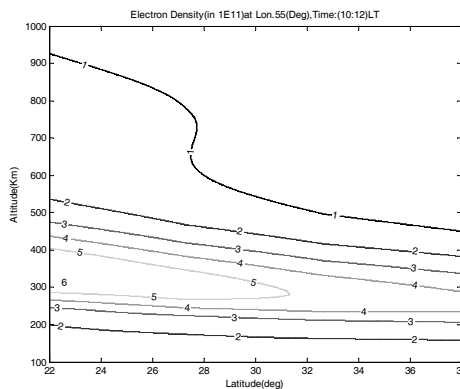
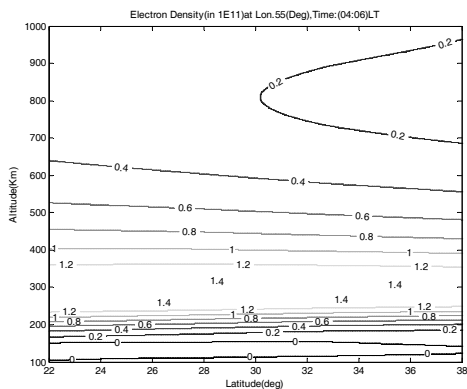
شکل ۷- پروفیل تغییرات چگالی الکترونی برای یک موقعیت خاص، نمودار آبی مربوط به الگوریتم بازسازی، نمودار قرمز مربوط به IRI 2001



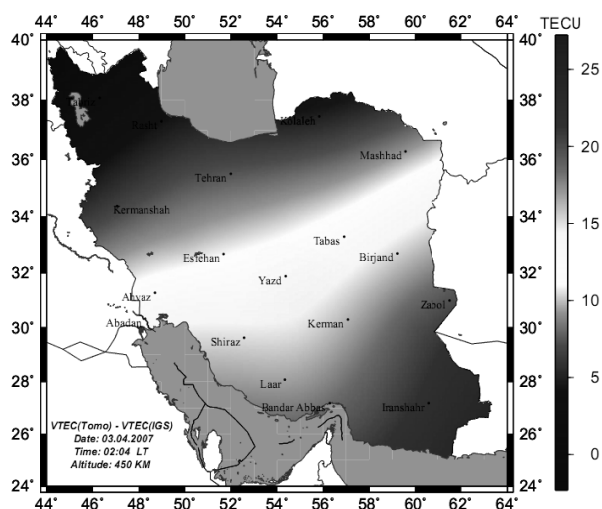
شکل ۸- تغییرات چگالی الکترونی برای عرض های جغرافیایی مختلف در محدوده شبکه مورد مطالعه در طول روز سوم ژانویه ۲۰۰۷



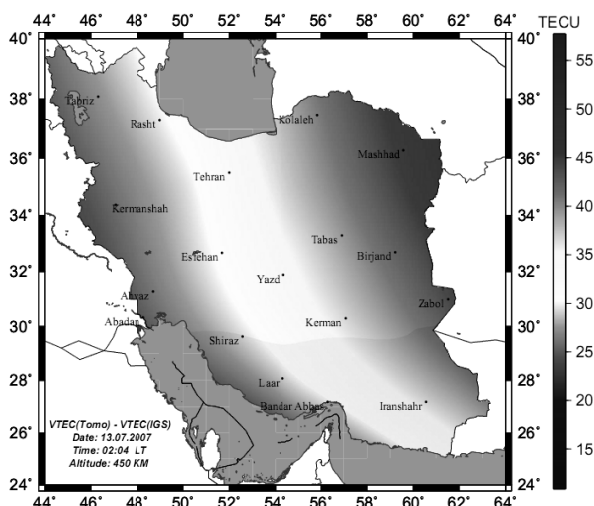
شکل ۹- تغییرات چگالی الکترونی برای عرض‌های جغرافیایی مختلف در محدوده شبکه مورد مطالعه در طول روز سوم آوریل ۲۰۰۷



شکل ۱۰- تغییرات چگالی الکترونی برای عرض‌های جغرافیایی مختلف در محدوده شبکه مورد مطالعه در طول روز سیزدهم جولای ۲۰۰۷



شکل ۱۲ - مقادیر اختلاف میان TEC ( $ele/m^2$ ) به دست آمده از توموگرافی و TEC به دست آمده از داده های شبکه IGS برای محدوده طول و عرض جغرافیایی شبکه مورد مطالعه - سوم آوریل ۲۰۰۷



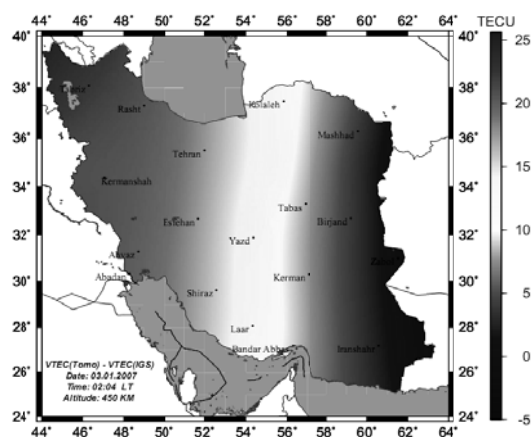
شکل ۱۳ - مقادیر اختلاف میان TEC ( $ele/m^2$ ) به دست آمده از توموگرافی و TEC به دست آمده از داده های شبکه IGS برای محدوده طول و عرض جغرافیایی شبکه مورد مطالعه - روز سیزدهم جولای ۲۰۰۷

جدول ۴ - مقایسه اختلاف میان TEC به دست آمده از توموگرافی با TEC به دست آمده از داده های شبکه IGS - روز ۰۳/۰۱/۲۰۰۷

مقادیر به دست آمده از مقایسه نتایج حاصل برای TEC از روش توموگرافی و شبکه IGS	
ماکزیمم اختلاف (TECU)	مینیمم اختلاف (TECU)
+۲۳/۰۶۳	+۲/۶۱۰

با توجه به نتایج به دست آمده از الگوریتم بازسازی توموگرافی و استفاده از سه روز داده در فصل های مختلف سال ۲۰۰۷ میلادی در منطقه ایران، ارزیابی تغییرات روزانه چگالی الکترونی لایه یونوسفر و توصیف ویژگی های تغییرات مکانی و زمانی این لایه امکان پذیر شده است. اما باید توجه داشت که لایه یونوسفر تغییرات دیگری همانند تغییرات فصلی و سالیانه دارد. همچنین وجود آناملوی هایی در این لایه مانند آناملوی زمستانی و استوایی و همچنین اثر طوفان های خورشیدی بر روی چگالی الکترون های آزاد در این لایه، بررسی ویژگی های لایه یونوسفر را مسئله ای مهم و پیچیده می کند. بررسی چنین ویژگی هایی از لایه یونوسفر مستلزم وجود داده های لازم و کافی در این زمینه است، مثلاً در مورد ارزیابی تغییرات فصلی لایه یونوسفر و همچنین بررسی آناملوی های موجود خصوصاً آناملوی زمستانی و تأثیر آن بر الکترون های آزاد لایه یونوسفر وجود حداقل ۱۵ روز داده از هر ماه یک فصل لازم و ضروری است. به دلیل نبود داده های کافی، بررسی این ویژگی ها و تفسیر نتایج حاصله و نیز نشان دادن کارایی یا عدم کارایی روش توموگرافی در این زمینه، این مسئله در تحقیق حاضر غیرممکن شده است.

برای ارزیابی میزان معنی دار بودن نتایج حاصل در زمینه تغییرات روزانه، تغییرات چگالی الکترونی در این منطقه با نمودار حاصل از مدل جهانی IGS مقایسه شده است (شکل های (۱۱)، (۱۲) و (۱۳)). با مراجعه به این شکل ها به سادگی می توان دید که نتایج حاصل از روش مورد استفاده (روش توموگرافی) در بررسی تغییرات مسطحاتی به نتایج با مقدار خطای نسبتاً زیاد در محاسبه مقدار TEC منتهی می شود. ارزیابی دقیق تر این موضوع مستلزم بررسی نقش تعداد توابع پایه مسطحاتی مورد استفاده در مدل بازسازی شده است. همچنین در جدول های (۴)، (۵) و (۶) ماکزیمم و مینیمم این اختلاف در سطح شبکه مورد مطالعه و در ارتفاع ۴۵۰ کیلومتری ارائه شده است.



شکل ۱۱ - مقادیر اختلاف میان TEC ( $ele/m^2$ ) به دست آمده از توموگرافی و TEC به دست آمده از داده های شبکه IGS برای محدوده طول و عرض جغرافیایی شبکه مورد مطالعه - روز سوم ژانویه ۲۰۰۷

این روش برای حذف خطای یونوسفری در تعیین موقعیت و همچنین استفاده از آن در تعیین موقعیت آنی پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- [1] Feltens, J., Dow, J. M., Martin-Mur, T. J., Romero, I. and Martinez, C. G., "Routine Production of Ionosphere TEC Maps at ESOC," *In Proceedings of the 1998 IGS Analysis Centers Workshop*, Essoc Darmstadt, Germany, 1998, pp. 273-284.
- [2] Gao, Y. and Liu, Z. Z., "Precise Ionosphere Modeling Using Regional GPS Network Data," *Journal of Global Positioning System*, Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 18-24.
- [3] Liu Z. Z., "Ionosphere Tomographic Modeling and applications Using Global Positioning System (GPS) Measurements," *UCGE Reports*, Number 20198, University of CALGARY, June 2004.
- [4] Liu Z. Z. and Gao, Y., "Ionospheric Tomography Using GPS Measurements," *Proceeding of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, Banff, Alberta, Canada, June 5-8, 2001, 2001, pp. 111-120.
- [5] El-Arini, M. B., Hegarty C. J., Fernow, J. P. and Klobuchar, J. A., "Development of an Error Budget for a GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS)," *Proceeding of the Institute of Navigation NTM-94*, San Diego, CA, January, 1994.
- [6] El-Arini, M. B., O'Donnell, P. A., Kellam, P., Klobuchar, J. A., Wisser, T. C. and Doherty P. H., "The FAA Wide Area Differential GPS (WADGPS) Static Ionosphere Experiment," *Proceeding of the Institute of Navigation NTM-93*, San Francisco, CA, January, 1993.
- [7] El-Arini, M. B., Conker, R. S., Albertson, T. W., Reagan, J. K., Klobuchar, J. A. and Doherty, P. H., "Comparison of Real-Time Ionosphere Algorithms for a GPS Wide-Area Augmentation System (WAAS)," *Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 41, No.4, 1994-1995, pp. 393-413.
- [8] Gao, Y., Heroux, P. and Kouba, J., "Estimation of GPS Receiver and Satellite L1/L2 Signal Delay Biases Using Data from CACS," *Processing of KIS-94*. Banff, Canada, Aug. – Sep., 1994.
- [9] Skone, S., "Wide Area Ionosphere Grid Modeling in the Auroral Region," *UCGE Reports Number*

**جدول ۵-** مقایسه اختلاف میان TEC به دست آمده از توموگرافی با TEC به دست آمده از داده‌های شبکه IGS - روز ۲۰۰۷/۰۴/۰۳

مقادیر به دست آمده از مقایسه نتایج حاصل برای TEC از روش توموگرافی و شبکه IGS	
ماکزیمم اختلاف (TECU)	مینیمم اختلاف (TECU)
+۲۳/۳۹۴	+۱/۲۶۸

**جدول ۶-** مقایسه اختلاف میان TEC به دست آمده از توموگرافی با TEC به دست آمده از داده‌های شبکه IGS - روز ۲۰۰۷/۰۷/۱۳

مقادیر به دست آمده از مقایسه نتایج حاصل برای TEC از روش توموگرافی و شبکه IGS	
ماکزیمم اختلاف (TECU)	مینیمم اختلاف (TECU)
+۵۲/۳۲۰	+۷/۵۴۰

## نتیجه گیری

در این مقاله، تکنیک بازسازی چگالی الکترونی لایه یونوسفر با استفاده از روش توموگرافی مورد بررسی قرار گرفت. از داده‌های بخشی از شبکه ژئودینامیک سراسری کشور برای بررسی خصوصیات لایه یونوسفر و نیز داده چگالی الکترونی به دست آمده از ایستگاه یونوسوند واقع در تهران برای به دست آوردن پارامتر مناسب پایدارسازی استفاده شد. توابع پایه هارمونیک کروی و توابع متعامد تجربی برای به دست آوردن محتوای الکترون یونوسفر استفاده شده است. بررسی و آنالیز نتایج به دست آمده از این روش، تغییرات مکانی و زمانی مورد انتظار در چگالی الکترونی لایه یونوسفر را تأیید می‌کند. همچنین نتایج به دست آمده نشان دهنده تغییرات ارتفاع پیک چگالی الکترونی در طول شب و روز است، واقعیتی که مدل‌های دو بعدی یونوسفر (TEC به دست آمده از شبکه IGS) قادر به توصیف آن نبوده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده، این روش توانایی بازسازی ۶۴ تا ۹۹ درصد از تغییرات چگالی الکترونی لایه یونوسفر را دارد. در تعیین TEC با استفاده از این روش با توجه به نتایج به دست آمده، نقش تعداد توابع پایه مورد استفاده و نیز نوع توابع پایه مورد استفاده (مانند توابع پایه هار یا موجک‌ها) باید مورد توجه و بررسی واقع شود. با توجه به خصوصیات روش توموگرافی در بازسازی چگالی الکترونی لایه یونوسفر استفاده از

- [۲۰] غفاری، امیررضا و مشهدی حسینعلی، مسعود. «تعیین دانسیته الکترونی لایه یونوسفر در منطقه ایران با استفاده از تکنیک توموگرافی بر اساس مشاهدات GPS ایران سراسری»، نشریه فناوری اطلاعات مکانی، شماره اول، ۱۳۸۸، ص ۲۶-۱۲.
- [21] Seeber G., *Satellite Geodesy*, Walter de Gruyter, Berlin and New York, 1993.
- [22] Liao, X., *Carrier Phase Based Ionosphere Recovery Over a Regional Area GPS Network*, UCGE Reports, Number 20143, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- [23] Liao, X. and Gao, Y., "High-Precision Ionosphere TEC Recovery Using a Regional - Area GPS Network," *Navigation*, Vol. 48, No. 2, 2001, pp. 101-111.
- [24] Liu, Z. Z. and Gao, Y., "Optimization of Parameterization in Ionospheric Tomography," *Proceeding of Institute of Navigation GPS 2001*, Salt Lake City, Utha, USA, September 11-14, 2001, pp. 2277-2285
- [25] Bilitza, D., "International Reference Ionosphere 2000," *Radio science*, Vol. 36, No. 2, 2001, pp. 261-275.
- [26] Jackson, J. E., *A Users' Guide to Principal Components*, Wiley & Sons Inc, 2003.
- [27] Johnson, R. A. and Wichern, D. W., *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Prentice Hall, Edit 5, 2001.
- [28] Fremouw, E. J., Secan, J. A., Bussey, R. M., Howe, B. M., "A Status Report on Applying Discrete Inverse Theory to Ionospheric Tomography," *International Journal Imaging Systems and Technology*, Vol. 5, Issue 2, 1994, pp. 97-105.
- [29] Fremouw, E. J., Secan, J. A. and Howe, B. M., "Application of Stochastic Inverse Theory to Ionospheric Tomography," *Radio Science*, Vol. 27, No. 5, 1992, pp. 721-732.
- [30] Aster, R. C., Borchers, B. and Thurber, C., *Parameter Estimation and Inverse Problems*, Elsevier Academic Press, 2005
- [31] Watkins, D. S., *Fundamentals of Matrix Computations*, John Wiley & Sons, 2002.
- [32] Moler, C. B., *Numerical computing with Matlab*, SIAM, 2004.
- 20123, [Ph.D thesis], The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 1999.
- [10] Schaer. S., "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global positioning System," *Ph.D Dissertation, Astronomical Institute*, University of Berne, Switzerland, 1999
- [11] Komjathy, A., "Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System," [Ph.D Dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering], Technical Report No. 188, University of New Brunswick, Canada, 248, 1997.
- [12] Coster, A. J., Foster. J. and Erickson, P., "Monitoring the Ionosphere with GPS," *Space Weather*, GPS World, Vol.14, No.5, 2003, pp.42-49.
- [13] Walker, J. K., "Spherical Cap Harmonic Modeling of High Latitude Magnetic Activity and Equivalent Sources with Sparse Observations," *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, Vol. 51, No. 2, 1989, pp. 67-80.
- [14] Raymond, T. D., Pryse, S. E., Kersley, L., Heaton, J. A. T., "Tomographic Reconstruction of Ionospheric Electron Density with European Incoherent Scatter Radar Verification Methods," *Radio Science* 28, No. 5, 1993, pp. 811-818.
- [15] Foster, J., C. and et al., "Russian American Tomography experiment," *International Journal of Imaging System and Technology*, Vol. 5, Issue 2, 1994, pp.148-159.
- [16] Mitchell, C. N., Kersley, L., Heaton, J. A. T. and Pryse, S. E., "Determination of the Vertical Electron-Density Profile in Ionospheric Tomography: Experimental Results," *Annales Geophysicae*, Vol. 15, Issue 6, 1997, pp. 747-752.
- [17] Yin, P., Mitchell, C. N., Spencer, P. S. J. and Foster, J. C., "Ionospheric Electron Concentration Imaging Using GPS Over the USA During the Storm of July 2000," *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, Issue 12, L12806, 2004, pp. 1-4.
- [18] Yizengaw, E., Moldwina, M. B., Dysonb, P. L. and Essexb, E. A., "Using Tomography of GPS TEC to Routinely Determine Ionospheric Average Electron Density Profile," *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, Vol. 69, Issue 3, 2007, pp. 314-321.
- [۱۹] غفاری، میررضا و مشهدی حسینعلی، مسعود. توموگرافی یونوسفر به کمک داده‌های شبکه ژئودینامیک کشور ایران، [پایان نامه کارشناسی ارشد] دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ۱۳۸۸.

Maximum Electron Density and Equivalent Slab Thickness at a South-American Station,” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Vol. 67, Issue 17-18, 2005, pp. 1687-1690.

[33]Miler, K., “Least-Squares Method for Ill-Posed Problems with a Prescribed Bound,” *SIAM, Journal on Mathematical Analysis*, Vol. 1, Issue 1, 2011, pp. 52-74.

[34]Mansilla, G. A., Mosert, M. R. and Ezquer, G., “Seasonal Variation of the Total Electron Content,