



Efficiency of Fourier transformation in studying of ionosphere time series

Ramin Ali-Ramaili¹, **Mohammadreza Seif²**, **Seyyed Reza Ghaffari-Razin^{*3}**

1- MSc, Department of surveying engineering, Islamic Azad University of North Tehran, Tehran, Iran. Email: seif.eng@gmail.com

2- Assistant professor, Imam Hussein Comprehensive University, Tehran, Iran. Email: ali_ramaei@gmail.com

3- (*Corresponding author) Associate professor, Department of geoscience engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.
 Email: ghafari@gmail.com

Article Info

Date of receive:

2024/01/01

Date of last review:

2025/01/05

Date of accept:

2025/01/06

Date of online publication:

2025/01/08

Keywords:

Ionosphere,
 Fourier Transformation,
 Prediction,
 GPS,
 GIM

Extended Abstract

Introduction

The ionosphere is a layer of the earth's atmosphere that extends from an altitude of 80 km to more than 1000 km above the earth. Due to its electrical properties, this layer of the atmosphere has very important and fundamental effects on the waves passing through it. The ionosphere exhibits temporary and intermittent variations such as daily, 27-day, seasonal, six-monthly, annual and 11-year changes. Ionosphere disturbances can cause distance error, cycle slips and phase fluctuations of satellite systems signals, which leads to degradation of the performance, accuracy and reliability of these systems. A parameter that can be used to study the ionosphere is the total electron content (TEC). This parameter is the sum of free electrons in a cylinder with a cross section of one square meter between the satellite and the receiver in the ground and its unit is ele/m². If the TEC is along the vertical (zenith direction), it is called VTEC. Usually, TEC is expressed in terms of TECU, which is equal to 10¹⁶ ele/m². Various methods have been developed to model the TEC. The simplest and at the same time the most practical method is to use observations of two-frequency receivers. If there is a proper station distribution, it is possible to obtain accurate TEC and model the ionosphere.

Materials & Methods

The main purpose of this paper is to use the Fourier transform method to model and predict the value of TEC and to examine the variations in the time series of the ionosphere in 2018. ... ► Page 102

How to Cite:

Ali-Ramaili, R. Seif, M.R. Ghaffari-Razin, S.R. (2025). Efficiency of Fourier transformation in studying of ionosphere time series. Scientific - Research Quarterly Geographical Data (SEPEHR). 34(134), 101-118.

Fourier transform in mathematics is the study of the representation or estimation of general functions by sum of trigonometric functions. In engineering science, decomposition of a function into simpler parts is usually called Fourier analysis and the process of reconstructing the function from these simpler parts is called Fourier combination. Every transformation used for analysis also has an inverse transformation that is used as a composition. Using the Fourier transform, the main frequencies in the behavior of the ionosphere for the period 2007 to 2017 have been identified, and then using these frequencies, the value of the time series of TEC is predicted for 2018. All observations are related to the GPS station of Tehran, which is one of the stations of the international GNSS service (IGS) network. In order to evaluate the accuracy and correctness of the model presented in this paper, the statistical indicators of relative error and correlation coefficient are used. All the results obtained from the Fourier model are compared and evaluated with the results obtained from the outputs of the IGS network (TECGIM) and the ordinary Kriging (TECOK) model.

Results & Discussion

In the analysis of the results related to 2018, the correlation coefficient of FT, GIM and OK models with TEC obtained from GPS was obtained as 0.81, 0.71 and 0.77, respectively. Also, the averaged relative error of three models in 2018 was 13.18%, 27.75% and 15.18%, respectively. The comparison of the results of the correlation coefficient and the relative error indicated the higher accuracy and precision of the FT model than the GIM and OK models in predicting the TEC for quiet conditions of solar activities. Also, the RMSE parameter was investigated, which was lower for the FT model than the GIM and OK models.

Conclusion

In this paper, the total electron content (TEC) of the ionosphere is evaluated using the Fourier transform (FT). For this purpose, the observations of Tehran GPS station (35.690 N, 51.330 E), which is one of the stations of the IGS network, are used between 2007

and 2018. Using observations from 2007 to 2017, the coefficients of the Fourier series are calculated and the dominant frequencies in it are extracted. Then, using the obtained Fourier series coefficients, the amount of TEC is predicted daily, monthly and annually for 2018. The results of this paper showed that the Fourier transform model has the ability to know the behavioral frequencies of the ionosphere and also predict the TEC variations in the period of quiet solar activity. As a suggestion for the continuation of this research, the Fourier transform model for the state of severe solar activities can be investigated and evaluated and compared with other models. Also, with the availability of data from more stations, temporal and spatial variations of the ionosphere can be modeled with Fourier transform and then predicted.



ارزیابی کارائی تبدیل فوریه در مدل سازی و پیش بینی سری زمانی تغییرات یونسفر



سید رضا غفاری رزین*



محمدرضا سیف^۲،



رامین علی رمائی^۱

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران seif.eng@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران ali_ramaei@gmail.com

۳- (*نویسنده مسئول) دانشیار، گروه مهندسی نقشه برداری، دانشکده مهندسی علوم زمین، دانشگاه صنعتی اراک، ایران ghafari@gmail.com

چکیده

در این پژوهش مقدار محتوای الکترون کلی (TEC) یونسفر با استفاده از تبدیل فوریه (FT) مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور مشاهدات ایستگاه GPS تهران (۳۵/۶۹ N، ۵۱/۳۳ E) که یکی از ایستگاه های شبکه جهانی IGS است، از سال ۲۰۰۷ تا سال ۲۰۱۸ مورد استفاده قرار می گیرد. با استفاده از مشاهدات سال های ۲۰۱۷-۲۰۰۷ ضرایب سری فوریه محاسبه شده و فرکانس های غالب موجود در آن استخراج می شود. سپس با استفاده از ضرایب سری فوریه به دست آمده، مقدار TEC به صورت روزانه، ماهانه و سالیانه برای سال ۲۰۱۸ پیش بینی می شود. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی در این تحقیق، نتایج حاصل با مقادیر TEC حاصل از GPS (GPS_{TEC})، مدل کریجینگ معمولی (OK_{TEC}) و همچنین TEC حاصل از شبکه جهانی IGS (GIMTEC) مقایسه شده اند. پارامترهای آماری خطای نسبی، جذر خطای مربعی میانگین (RMSE)، ضریب همبستگی و هیستوگرام باقیمانده ها برای ارزیابی نتایج مورد استفاده قرار می گیرند. براساس نتایج، پیش بینی مقدار TEC حاصل از سری فوریه در سال ۲۰۱۸ دارای بیشینه خطای نسبی ۱۶/۶۲٪ و ۱/۹۷ RMSE TECU است. برای مدل GIM بیشینه مقادیر خطای نسبی و RMSE به ترتیب ۴۵/۴۰٪ و ۳/۵۰ TECU به دست آمده است. همچنین برای مدل کریجینگ معمولی مقادیر خطا به ترتیب برابر با ۲۱/۳۵٪ و ۲/۱۲ TECU شده است. تحلیل هیستوگرام باقیمانده ها نیز حاکی از دقت بالاتر مدل FT نسبت به مدل های GIM و کریجینگ معمولی است. نتایج حاصل نشان می دهند که روش تبدیل فوریه قابلیت بالایی برای تخمین سری زمانی TEC در دوره فعالیت های آرام خورشیدی را دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۰/۱۱

تاریخ آخرین بازنگری:

۱۴۰۳/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۱۰/۱۷

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۱۰/۱۹

واژه های کلیدی:

یونسفر؛

تبدیل فوریه؛

پیش بینی؛

سیستم تعیین موقعیت

جهانی؛

GIM

استناد به این مقاله:

علی رمائی، ر: سیف، م: ر: غفاری رزین، س: ر (۱۴۰۴) ارزیابی کارائی تبدیل فوریه در مدل سازی و پیش بینی سری زمانی تغییرات یونسفر؛ فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۳۴ (۱۳۴)، ۱۱۸-۱۰۱

۱- مقدمه

یونسفر^۱ لایه‌ای از جو زمین است که از ارتفاع ۸۰ کیلومتری تا ارتفاع بیش از ۱۰۰۰ کیلومتری زمین گسترش پیدا کرده است. این لایه از جو به دلیل خاصیت الکتریکی، اثرات بسیار مهم و اساسی بر روی امواج عبوری از آن دارد. یونسفر برخی تغییرات موقتی و متناوب مانند تغییرات روزانه، تغییرات ۲۷ روزه، تغییرات فصلی، تغییرات شش ماهه، تغییرات سالیانه و تغییرات ۱۱ ساله را از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، تغییرات نامنظم غیرمنتظره در یونسفر به واسطه شرایط آب و هوایی در فضا مانند فوران‌های خورشیدی و طوفان‌های الکترومغناطیسی، مخاطرات طبیعی با منشاء زمین همانند زمین‌لرزه، سونامی، انفجارهای آتشفشانی و حوادث انسانی مانند راه‌اندازی راکت، انفجار اتمی و موارد مشابه ایجاد می‌شوند. این تغییرات به عنوان اختلالات و یا آنومالی‌های یونسفری شناخته می‌شوند (*اسچانک و نافی، ۲۰۰۰: ۱۲*). اختلالات یونسفر می‌توانند باعث خطای فاصله، جهش فاز و نوسانات فاز سیگنال‌های سامانه‌های ماهواره‌ای شوند که این امر منجر به تنزل عملکرد، دقت و قابلیت اطمینان این سامانه‌ها می‌شود (*جاکووسکی و همکاران، ۲۰۰۵: ۸*؛ *استنانکوف و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۰*). پارامتری که با استفاده از آن می‌توان یونسفر را مورد مطالعه و بررسی قرار داد، کمیت محتوای کلی الکترون^۲ (TEC) است. این پارامتر مجموع الکترون‌های آزاد در یک استوانه به مقطع یک مترمربع مابین ماهواره و گیرنده زمینی بوده و واحد آن الکترون بر مترمربع است. اگر TEC در امتداد قائم (راستای زنیت) باشد، VTEC^۳ نامیده می‌شود. معمولاً TEC برحسب TECU که برابر 10^{16} ele/m^2 است، بیان می‌شود (*سیر، ۲۰۰۳*).

روش‌های مختلف و متفاوتی برای مدل‌سازی مقدار TEC به وجود آمده که ساده‌ترین و در عین حال کاربردی‌ترین روش، استفاده از مشاهدات گیرنده‌های

دوفرکانسه است (*کلویچار، ۱۹۹۶: ۱۸*). در صورت وجود تراکم و توزیع ایستگاهی مناسب، امکان به‌دست آوردن TEC دقیق و مدل‌سازی یونسفر فراهم می‌شود. سرویس بین‌المللی سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی^۴ (IGS) از سال ۱۹۹۸ در قالب گروه کاری یونسفر شروع به انتشار روزانه نقشه‌های جهانی یونسفری از کمیت TEC محاسبه شده از اطلاعات GPS به‌عنوان یکی از محصولات IGS نموده است (*شایر، ۱۹۹۹: ۲۶*). این نقشه‌ها در ابتدا به‌صورت هفتگی ارائه می‌شدند که با افزایش سرعت محاسباتی سیستم‌های کامپیوتری، در حال حاضر هر ۲ ساعت یک‌بار و با قدرت تفکیک مکانی ۵ درجه در طول و ۲/۵ درجه در عرض جغرافیایی در فرمت استاندارد IONEX منتشر می‌شوند. در حال حاضر مرکز تعیین مدار اروپا دارای پنج مرکز تحلیل یونسفر (ESA, JPL, NRCAN, UPC, CODE) است. از سایر مدل‌های جهانی مربوط به یونسفر می‌توان به مدل مرجع بین‌المللی یونسفر^۵ (IRI) و همچنین مدل NeQuick اشاره نمود که به مدل‌های تجربی معروف هستند (*بلتزیا و راینیش، ۲۰۰۸: ۱۲*؛ *ناوا و همکاران، ۲۰۰۸: ۷*). هر دو مدل اطلاعات بسیار باارزشی را در مورد یونسفر و تغییرات آن در اختیار استفاده‌کنندگان قرار می‌دهند. منبع اصلی داده‌های مشاهداتی برای هر دو مدل (IRI و NeQuick) شامل شبکه سراسری از ایستگاه‌های یونوسوند (۴۲۳ ایستگاه در کل دنیا) و دستگاه ISR (۹ ایستگاه در کل دنیا) در جهان هستند. تحقیقات بسیار گسترده و وسیعی در کل دنیا و مخصوصاً کشور ایران برای ارائه یک مدل محلی دقیق و صحیح برای بررسی پارامتر TEC و همچنین مدل‌سازی سری زمانی آن ارائه شده است. لیو و گائو (۲۰۰۳: ۶) با استفاده از مدل‌سازی به روش هارمونیک‌های کروی^۶ (SH) سری زمانی TEC را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج کار ایشان به درجه و مرتبه هارمونیک‌های کروی وابسته است. دقت حاصل در مقایسه با مدل GIM در حدود ۳ الی ۶ TECU گزارش شده است.

4- International GNSS Service

5- International Reference Ionosphere

6- Spherical Harmonic

1- Ionosphere

2- Total Electron Content

3- Vertical TEC

انصاری و همکاران (۲۰۱۸: ۱۱) با استفاده از مشاهدات شبکه ایستگاه های GNSS کشور ترکیه به بررسی و مقایسه دو مدل کریجینگ و NeQuick پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر دقت بالاتر مدل کریجینگ در مقایسه با مدل NeQuick است.

سبزه ای و همکاران (۲۰۱۸: ۱۴) از قابلیت های شبکه های عصبی مصنوعی چندلایه به منظور مدل سازی TEC برای گیرنده های تک فرکانسه در منطقه ایران بهره بردند. دقت مدل ارائه شده توسط ایشان در شرایط مختلف در حدود ۳ TECU است.

رم و همکاران (۲۰۱۸: ۸) با استفاده از یک شبکه عصبی دوبعدی به مدل سازی مقدار چگالی الکترونی مابین سال های ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داده است که شبکه های عصبی دقت بالایی در مدل سازی چگالی الکترونی یونسفر دارند.

آبه و همکاران (۲۰۱۸: ۱۱) با استفاده از روش کریجینگ معمولی^۴ مقدار TEC یونسفر در منطقه آفریقا را درونیابی کردند. نتایج حاصل با مدل GIM مقایسه شده و دقتی در حدود ۲ الی ۵ TECU گزارش شده است.

مدل اتورگرسیون تطبیقی توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۸: ۷) برای پیش بینی نقشه های جهانی یونسفر VTEC توسعه داده شد. در این تحقیق ضرایب هارمونیک کروی پیش بینی شده و ترتیب مدل با آزمون F مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل حاصل خطای کمتر از ۳ TECU داشته است. تبابال و همکاران (۲۰۱۹) از یک شبکه عصبی پیشرو برای مدل سازی مقدار TEC در منطقه آفریقای جنوبی استفاده کردند. همچنین نتایج مدل جدید با مدل IRI مقایسه و ارزیابی شده و دقت حاصل در حدود ۱ الی ۵ TECU گزارش شده است.

فیضی و همکاران (۲۰۲۰: ۶) از مدل شبکه فازی^۵ به منظور پیش بینی مقدار TEC در منطقه ایران استفاده کردند. نتایج حاصل با مدل های شبکه عصبی شعاعی و استاندارد

یلماز و همکاران (۲۰۰۹: ۱۲) از شبکه های عصبی^۱ با توابع پایه شعاعی برای مدل سازی و تخمین مقدار TEC در کشور ترکیه استفاده نمودند. نتایج به دست آمده در مقایسه با مدل IRI بهبودی ۵۵ درصدی را نشان داده است.

عامریان و همکاران (۲۰۱۳: ۱۳) با استفاده از توابع اسپیلاین مقدار TEC را برای منطقه ایران مدل سازی کردند. در این پژوهش روش پایدارسازی LSQR^۲ به منظور حل مدل و برآورد ضرایب یونسفری مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیق ایشان دقتی در حدود ۱ الی ۲ TECU برای مدل جدید در منطقه ایران را نشان داده است.

آخوندزاده (۲۰۱۴: ۸) قابلیت شبکه های عصبی مصنوعی را برای تشخیص آنومالی های موجود در یونسفر قبل از زمین لرزه های بزرگ مورد مطالعه و بررسی قرار داد. نتایج تحقیق بیانگر این موضوع است که شبکه های عصبی در زمین لرزه های بزرگ مقیاس، قابلیت ارائه آنومالی های یونسفری را دارند.

شریفی و فرزانه (۲۰۱۵: ۱۰) و اعتمادفرد و حسینعلی (۲۰۱۶: ۱۱) با استفاده از تئوری اسلپین به مدل سازی TEC در منطقه آمریکا و قطب شمال پرداختند. نتایج هر دو تحقیق بیانگر دقتی در حدود ۱ الی ۳ TECU برای مدل سازی یونسفر است. غفاری رزین و وثوقی (۱۳۹۵: ۷، ۲۰۱۷: ۱۲) از ایده شبکه های عصبی سه لایه با استفاده از الگوریتم آموزش پس انتشار خطا^۳، برای مدل سازی و تخمین مقادیر VTEC در نقاط مختلف شبکه ژئودینامیک کشور ایران استفاده نمودند. مدل TEC حاصل از این تحقیقات در منطقه مورد مطالعه دارای دقتی کمتر از ۳ TECU شده است.

عبدی و همکاران (۲۰۱۸: ۹) با استفاده از تلفیق مشاهدات GPS و ارتفاع سنجی ماهواره ای به بررسی رفتار یونسفر در منطقه ایران و مناطق دریایی پرداختند. نتایج تحقیق ایشان حاکی از بهبود دقت مدل یونسفری ارائه شده نسبت به مدل GIM در منطقه ایران است.

1- Artificial neural network

2- Least Square QR

3- Back-propagation

4- Ordinary Kriging

5- Fuzzy network

ماشین انجام دادند. نتایج تحقیق نشان داده است که پارامترهای F10.7 و Kp بیشترین تأثیر را در مدل سازی یونسفر دارند.

هان و همکاران (۲۰۲۲: ۸) قابلیت چهار مدل شبکه عصبی مصنوعی، شبکه عصبی حافظه کوتاه مدت طولانی، سامانه استنتاج عصبی-فازی سازگار و گرادیان درخت تصمیم را در پیش بینی سری زمانی TEC یونسفر در سه ایستگاه IGS مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از این تحقیق بیانگر دقت بالاتر مدل گرادیان درخت تصمیم در مقایسه با سایر مدل ها است.

غفاری رزین و همکاران (۱۴۰۲) ایده استفاده از شبکه عصبی حافظه کوتاه مدت طولانی^۵ (LSTM) را برای مدل سازی و پیش بینی سری زمانی یونسفر ارائه داده و نتایج را با مدل های شبکه عصبی رگرسیون عمومی^۶ (GRNN)، مدل تجربی NeQuick و مدل GIM مقایسه نمودند. نتایج این تحقیق حاکی از دقت ۲/۸۷ TECU برای مدل LSTM در مقایسه با سایر مدل ها است.

تبدیل فوریه در ریاضیات مطالعه چگونگی نمایش یا تخمین تابع های عمومی به وسیله مجموعی از توابع مثلثاتی است (هریس، ۱۹۷۸: ۱۸). این تحلیل از مطالعات مربوط به سری فوریه آغاز شد و به بزرگداشت ژوزف فوریه که نشان داد نمایش یک تابع به کمک توابع مثلثاتی به ساده شدن مسئله انتقال گرما کمک می کند، فوریه نام گرفت. امروزه تحلیل فوریه طیف گسترده ای از ریاضیات را دربر می گیرد. در علوم و مهندسی، تجزیه یک تابع به قسمت های ساده تر معمولاً تحلیل فوریه و روند بازسازی تابع از این قسمت های ساده را ترکیب فوریه می نامند. البته در ریاضیات عبارت تحلیل فوریه برای هر دو عمل کاربرد دارد. روند تجزیه به تنهایی تبدیل فوریه نامیده می شود. این تبدیل ها نیز با توجه به دامنه و ویژگی های مختلف تابعی که تبدیل می شود، نام های جزئی تری به خود می گیرند. علاوه بر این، مفهوم کلی تحلیل فوریه در طول زمان گسترده تر شده و به موضوعات انتزاعی و عمومی دیگری نیز تعلق

مقایسه شده است. دقت مدل ANFIS ارائه شده در این تحقیق در حدود ۱/۵ TECU است.

غفاری رزین و وثوقی (۲۰۲۰: ۹) با استفاده از ترکیب شبکه انفیس^۱ و تجزیه به مؤلفه های اصلی، سری زمانی TEC را در منطقه ایران مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق ایشان نشان داده است که با اولین مؤلفه اصلی و ترکیب آن با شبکه انفیس، دقتی در حدود ۱/۶۵ TECU را می توان برای مدل سازی TEC به دست آورد.

ملیکا و همکاران (۲۰۲۰: ۷) مدل کلوبوچار را با استفاده از روش میانگین متحرک رگرسیون خودکار^۲ (ARMA) برای پیش بینی تخمین های دقیق تأخیر یونسفری برای کاربران GNSS توسعه دادند.

غفاری رزین و مرادی (۲۰۲۱: ۹) از مدل شبکه های عصبی موجک^۳ (WNN) به منظور مدل سازی و پیش بینی سری زمانی TEC در ایستگاه تهران استفاده کردند. نتایج این تحقیق نشان دهنده دقتی در حدود ۲ الی ۵ TECU در پیش بینی سری زمانی یونسفر است.

نعمتی پور و همکاران (۲۰۲۱: ۹) از روش درون یابی المان محدود C1^۴ برای مدل سازی و پیش بینی VTEC در اروپا استفاده کردند. آن ها دریافتند که روش جدید در مقایسه با مدل های GIM و NeQuick از دقت بالاتری برخوردار است. دقت به دست آمده برای مدل جدید در حدود ۱ الی ۴ TECU است.

غفاری رزین و همکاران (۲۰۲۱: ۸) از ماشین بردار پشتیبان برای مدل سازی زمانی-مکانی TEC در دوره فعالیت های شدید خورشیدی بهره بردند. نتایج تحقیق ایشان بیانگر دقت ۳ الی ۴ TECU برای مدل سازی یونسفر در بازه فعالیت های شدید خورشیدی است.

نظام زاده و همکاران (۲۰۲۲: ۱۱) ارزیابی تأثیر پارامترهای خورشیدی و ژئومغناطیسی را در مدل سازی زمانی-مکانی محتوای کلی الکترون یونسفر با استفاده از مدل های یادگیری

1- ANFIS network

2- Auto Regressive Moving Average

3- Wavelet Neural Network

4- C1 finite element interpolation method

5- Long Short-Term Memory neural network

6- Generalized Regression Neural Network

باقیمانده ها، خطای نسبی و جذر خطای مربعی میانگین^۳ (RMSE) انجام می گیرد. شاخص های خطای نسبی، ضریب همبستگی و RMSE به صورت رابطه (۱) تعریف می شوند.

$$R e .(\%) = \frac{|TEC_{model} - TEC_{GPS}|}{TEC_{GPS}} \times 100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{q=1}^Q (TEC_{model}^q - TEC_{GPS}^q)^2} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (VTEC_{model}^i - \overline{VTEC_i}) (VTEC_{GPS}^i - \overline{VTEC_{GPS}^i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (VTEC_{model}^i - \overline{VTEC_i})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (VTEC_{GPS}^i - \overline{VTEC_{GPS}^i})^2}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در روابط (۱) و (۲) و (۳)، Q تعداد نمونه های انتخاب شده برای تست و به دست آوردن خطاها، TEC_{GPS} بیانگر مقدار حاصل از مشاهدات GPS و TEC_{model} نشان دهنده مقدار حاصل از مدل های فوریه، مدل کریجینگ و GIM هستند.

۲-۱- استخراج مشاهدات STEC

گیرنده های دوفرکانسه 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. با استفاده از مقادیر مشاهدات کد و فاز در هر دو فرکانس خواهیم داشت (کیرالو و همکاران، ۲۰۰۷: ۱۰):

$$P_{1,u}^m = P_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$P_{2,u}^m = P_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) \quad \text{رابطه (۵)}$$

در روابط (۴) و (۵)، $P_{(1,2),u}^m$ فاصله دقیق بین ماهواره و گیرنده برای دو فرکانس L_1 و L_2 ، U اشاره به نام ایستگاه زمینی، m اشاره به شماره ماهواره، C سرعت نور در خلاء،

می گیرد؛ این مسائل به طور کلی تحلیل هارمونیک^۱ نامیده می شوند (بوروس، ۱۹۹۵: ۱۲).

۲- مشاهدات مورد استفاده

هدف اصلی در پژوهش حاضر استفاده از روش تبدیل فوریه^۲ به منظور مدل سازی و پیش بینی مقدار TEC و بررسی تغییرات سری زمانی یونسفر در سال ۲۰۱۸ است. با استفاده از تبدیل فوریه، فرکانس های اصلی در رفتار یونسفر برای بازه زمانی ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۷ شناسایی شده و سپس با استفاده از این فرکانس ها، مقدار سری زمانی تغییرات TEC برای سال ۲۰۱۸ پیش بینی می شود. کلیه مشاهدات مورد استفاده مربوط به ایستگاه GNSS تهران (۳۵/۶۹ N، ۵۱/۳۳ E) است که یکی از ایستگاه های شبکه جهانی IGS محسوب می شود. کلیه فایل های راینکس مربوط به این ایستگاه از طریق وبسایت شبکه جهانی IGS (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/>) دریافت شده اند. دلیل اصلی انتخاب این ایستگاه، در دسترس بودن مشاهدات مربوط به آن از طریق وبسایت شبکه جهانی IGS است. همچنین برای مقایسه نتایج حاصل از روش پیشنهادی این تحقیق، مقادیر پیش بینی شده TEC برای سال ۲۰۱۸ با مقادیر TEC حاصل از GPS (GPSTEC)، مدل کریجینگ (OKTEC) همچنین TEC حاصل از شبکه جهانی IGS (GIMTEC) مقایسه می شوند. کلیه فایل های یونکس مربوط به شبکه جهانی IGS از وبسایت (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/>) قابل دریافت هستند.

زمان مورد استفاده در فایل های یونکس زمان جهانی UT بوده که می توان با افزودن ۳/۵ ساعت، به زمان محلی تبدیل نمود. همچنین رزولوشن مکانی مشاهدات یونکس ۵° در طول جغرافیایی و ۲/۵° در راستای عرض جغرافیایی با رزولوشن زمانی دو ساعته است. ارزیابی خطای مدل فوریه در پیش بینی مقدار TEC برای سال ۲۰۱۸ با استفاده از شاخص های آماری ضریب همبستگی، هیستوگرام

1- Harmonic analysis

2- Fourier transform

$d_{ion,u}^m$ در معادلات $P_{4,u}^m$ و $L_{4,u}^m$ نتیجه به صورت روابط (۱۱) و (۱۲) خواهد شد.

$$P_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB_u^m + DCB_u) \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

$$L_{4,u}^m = A \left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \right) STEC_u^m - c(DCB_u^m + DCB_u) + \Delta N^m \quad \text{رابطه (۱۲)}$$

با استفاده از روابط (۱۱) و (۱۲) مقادیر STEC به صورت روابط (۱۳) و (۱۴) حاصل خواهند شد.

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_{4,u}^m(n) + c(DCB_u^m + DCB_u)] \quad \text{رابطه (۱۳)}$$

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [B + L_{4,u}^m(n) + c(DCB_u^m + DCB_u)] \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

در رابطه (۱۴) B مقداری است که با استفاده از اندازه گیری های فاز موج حامل در کمان های پیوسته محاسبه می شود. پس از محاسبه مقدار STEC با استفاده از تابع تصویر می توان مقدار VTEC را به صورت رابطه (۱۵) محاسبه نمود.

$$VTEC_u^m(n) = \frac{STEC_u^m(n)}{M(\varepsilon_m(n))} \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

در رابطه (۱۵) M تابع تصویر است که با رابطه (۱۶) می توان آنرا به دست آورد:

$$M(\varepsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \varepsilon_m(n)}{R + h} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

در روابط (۱۵) و (۱۶) M تابع تصویر، ε زاویه ارتفاعی ماهواره، R شعاع کره زمین و h ارتفاع مدل تک لایه یونسفری (۴۵۰ کیلومتر) است. بایاس داخل فرکانسی مربوط به ماهواره معمولاً از فایل IONEX محاسبه می شود که از محصولات IGS است. بایاس داخل فرکانسی گیرنده در مرحله پیش پردازش مشاهدات ایستگاه برآورد شده است. زاویه ارتفاعی نیز با استفاده از فاصله هندسی ماهواره

$d_{trop,u}^m$ تأخیر تروپوسفری، $d_{ion,u}^m$ تأخیر یونسفری بر روی دو فرکانس، δt_u خطای ساعت گیرنده، δt^m خطای ساعت ماهواره، $\varepsilon_{1,u}^m, \varepsilon_{2,u}^m$ بایاس داخل فرکانسی گیرنده و $\varepsilon_1^m, \varepsilon_2^m$ بایاس داخل فرکانسی برای ماهواره ها هستند. با تفاضل مقادیر P_1 و P_2 خطاهایی باقی می ماند که وابسته به فرکانس هستند. در نتیجه، تنها خطای یونسفر به همراه بایاس های گیرنده و فرستنده باقی می ماند. بنابراین خواهیم داشت:

$$P_{4,u}^m = P_{2,u}^m - P_{1,u}^m = d_{ion2,u}^m - d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_{2,u}^m - \varepsilon_{1,u}^m) + c(\varepsilon_{2,u}^m - \varepsilon_{1,u}^m) \quad \text{رابطه (۶)}$$

همانطور که در رابطه (۶) ملاحظه می شود، پارامتر $P_{4,u}^m$ عاری از خطاهای تروپوسفری و آنتن است. می توان برای مشاهدات فاز موج حامل نیز روابط (۷) و (۸) را نوشت.

$$L_{1,u}^m = \lambda_1 \phi_{1,u}^m = P_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \lambda_1 \phi_{ion1,u}^m + \lambda_1 \phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}^m) + \lambda_1 N_1^m \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$L_{2,u}^m = \lambda_2 \phi_{2,u}^m = P_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \lambda_2 \phi_{ion2,u}^m + \lambda_2 \phi_{trop,u}^m - c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}^m) + \lambda_2 N_2^m \quad \text{رابطه (۸)}$$

در روابط (۷) و (۸)، λ_1, λ_2 طول موج فرکانس های f_1 و f_2 ، $\phi_{1,u}^m, \phi_{2,u}^m$ تأخیر فاز برای فرکانس های f_1 و f_2 ، و $\phi_{ion1,u}^m, \phi_{ion2,u}^m$ تأخیرات فاز یونسفریک فرکانس های f_1 و f_2 ، N_1^m, N_2^m مربوط به ابهامات فاز اولیه فرکانس های f_1 و f_2 تغییرات فاز مربوط به تروپوسفر هستند. با تفاضل دو معادله (۷) و (۸) خواهیم داشت:

$$L_{4,u}^m = \lambda_2 \phi_{2,u}^m - \lambda_1 \phi_{1,u}^m = \lambda_2 \phi_{ion2,u}^m - \lambda_1 \phi_{ion1,u}^m + c(DCB_u^m) + c(DCB_u) + \Delta N^m \quad \text{رابطه (۹)}$$

با استفاده از تقریب داده شده توسط لیائو (۲۰۰۰: ۵) و لیک (۲۰۰۴: ۲۶) خواهیم داشت:

$$d_{ion,u}^m = -\phi_{ion,u}^m \frac{c}{f} \approx A \frac{STEC_u^m}{f^2} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

در رابطه (۱۰) مقدار A برابر با $\frac{40}{3}$ است. با جای گذاری

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سمر)

ارزیابی کارایی تبدیل فوریه در مدل سازی و پیش بینی سری زمانی ... / ۱۰۹

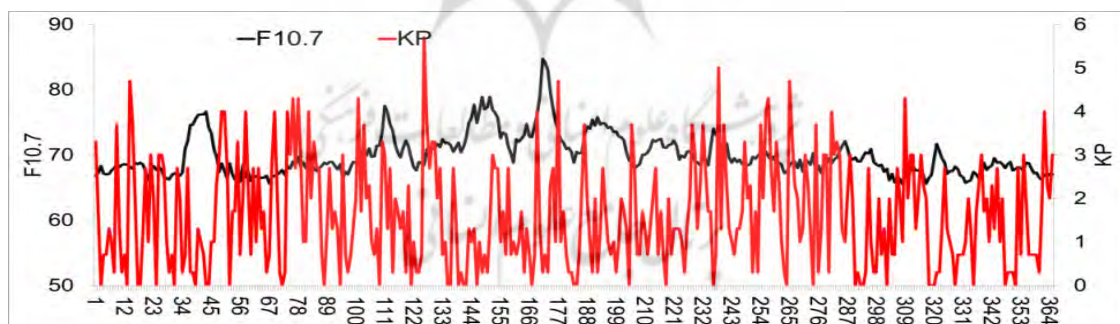
صفر تا نه نشان می دهد که از مشاهدات مگنتومتر با فاصله زمانی سه ساعته حاصل می شود. اگر مقدار شاخص KP مابین صفر تا چهار باشد، آن روز با فعالیت پایین و اگر بیشتر از چهار باشد، روز با فعالیت زیاد نامیده می شود. شاخص F10.7 شار رادیویی خورشید را در طول موج ۱۰/۷ سانتی متر و در واحد فرکانس اندازه گیری می کند. شاخص F10.7 ارتباط خوبی با تعداد لکه های خورشیدی و اشعه ماورای بنفش دارد. شار رادیویی می تواند کمتر از SFU50 تا بیشتر از SFU300 در طول دوره ای از یک چرخه خورشیدی متفاوت باشد. مقدار کمتر از ۱۰۰ برای شاخص F10.7 بیانگر روز با فعالیت آرام خورشیدی است. براساس نگاره (۱) و توضیحات ارائه شده می توان نتیجه گرفت که اکثر روزهای سال ۲۰۱۸ روز با فعالیت کم خورشیدی و ژئومغناطیسی است.

با توجه به اینکه از مشاهدات سال های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۷ برای مدل سازی و کشف فرکانس های رفتاری یونسفر استفاده می شود، در نگاره (۲) چگونگی تغییرات TEC در ایستگاه تهران و در این ۱۱ سال به تصویر کشیده شده

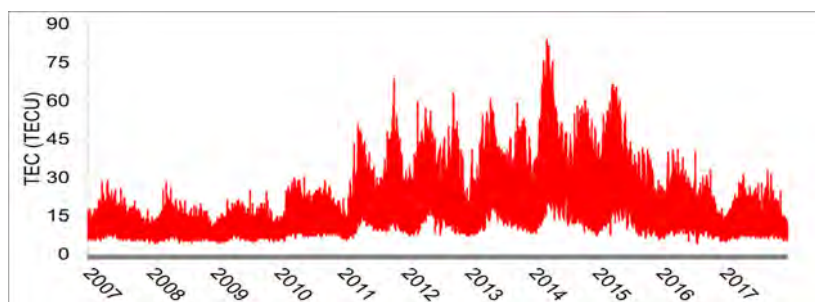
و گیرنده و با داده های افریز ماهواره محاسبه می شود.

۲-۲- تحلیل مشاهدات مورد استفاده برای مدل سازی

براساس تحقیقات صورت گرفته (اینیورت و سکر تکین، ۲۰۱۹: ۵) یونسفر دارای فرکانس های زمانی روزانه، ماهیانه، فصلی و سالیانه است. مقدار TEC یونسفر تغییرات بسیار زیادی در زمان داشته و عوامل مختلفی می تواند بر رفتار آن مؤثر باشد. از جمله این عوامل می توان به تغییرات وابسته به مکان (طول و عرض جغرافیایی)، تغییرات مربوط به عوامل ژئومغناطیسی (KP) و تغییرات وابسته به شار خورشیدی (F10.7) اشاره نمود. با توجه به اینکه سال ۲۰۱۸ به عنوان سال مورد مقایسه انتخاب شده، چگونگی تغییرات دو شاخص KP و F10.7 در نگاره (۱) نمایش داده شده است. دانشمندان برای اندازه گیری قدرت یک طوفان ژئومغناطیسی، پارامتری به نام شاخص KP را اندازه می گیرند که نشانگر آهنگ تغییرات میدان های مغناطیسی نزدیک زمین است. شاخص KP اختلال در مؤلفه افقی میدان مغناطیسی زمین را با یک عدد صحیح در محدوده



نگاره ۱: چگونگی تغییرات شاخص های KP و F10.7 در کلیه روزهای سال ۲۰۱۸



نگاره ۲: سری زمانی تغییرات TEC حاصل از GPS در ایستگاه تهران مابین سال های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۷

است. تبدیل فوریه، یک سیگنال را به توابع نمایی مختلطی با فرکانس‌های متفاوت تجزیه نموده و این مهم از طریق رابطه (۱۷) به دست می‌آید (اوسگود، ۲۰۰۴: ۷):

$$FT(x(t)) = X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

در رابطه (۱۷) t و f به ترتیب متغیرهای متناظر با زمان و فرکانس، $x(t)$ بیانگر سیگنال در فضای زمان یا همان سیگنال خام و $X(f)$ نشانه سیگنال در فضای فرکانس هستند. با توجه به اینکه سری زمانی یونسفر یک سری گسسته است در نتیجه از تبدیل فوریه گسسته برای بررسی آن و محاسبه ضرایب مربوطه استفاده می‌شود. فرض کنیم $f(x)$ تابعی متناوب با دوره تناوب $p=2L$ باشد که در فاصله تناوب خود پیوسته و تکه تکه هموار باشد، آنگاه می‌توان تابع مذکور را به صورت مجموعی از جملات سینوسی و کسینوسی با آرگومان‌های مختلف که به سری فوریه تابع موسوم است، به صورت رابطه (۱۸) نوشت:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi}{L} x + b_n \sin \frac{n\pi}{L} x \right) \quad \text{رابطه (۱۸)}$$

در رابطه (۱۸) ضرایب سری فوریه به صورت روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه می‌شوند:

$$a_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} f(x) \cos \frac{n\pi}{L} x dx \quad \text{رابطه (۱۹)}$$

$$b_n = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} f(x) \sin \frac{n\pi}{L} x dx$$

$$a_0 = \frac{1}{L} \int_{-L}^{+L} f(x) dx \quad \text{رابطه (۲۰)}$$

تفاوت‌های این تبدیل با تبدیل فوریه پیوسته را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- در تبدیل گسسته، سیگنال مورد نظر که در تبدیل پیوسته، تابعی پیوسته نسبت به زمان بود، توسط دنباله عددی جایگزین شده است.
- زمان پیوسته t در این تبدیل توسط شاخص k جایگزین

است. براساس این نگاره می‌توان سری زمانی تغییرات TEC را براساس سال‌های مختلف مشاهده نمود.

چرخه فعالیت‌های خورشیدی ۱۱ ساله بوده و تقریباً هر ۱۱ سال یک بار ایجاد می‌شود. براساس این چرخه و شاخص F10.7، سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ جزء سال‌های با فعالیت بسیار بالا محسوب شده و تأثیر این فعالیت بر افزایش مقدار TEC در نگاره (۲) کاملاً مشخص است. در این سه سال مقدار TEC ۸۰ تا ۸۰ TECU نیز افزایش یافته در حالی که متوسط تغییرات آن در سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۲ برابر با ۲۸ TECU بوده است. این سری زمانی به عنوان سیگنال خام اصلی به سری فوریه معرفی شده و ضرایب a و b استخراج شده است.

۳- تبدیل فوریه

توابع مورد استفاده در مهندسی و توابع نمایانگر سیگنال‌ها معمولاً تابعی از زمان هستند. برای حل بسیاری از مسائل بهتر است که تابع در دامنه فرکانس تعریف شده باشد، زیرا این دامنه ویژگی‌هایی دارد که به راحتی محاسبات می‌انجامد. غالباً سیگنال‌های خام تابعی از زمان هستند؛ یعنی متغیر مستقل در تابع معرف سیگنال، پارامتر زمان بوده و در مقابل متغیر وابسته، معمولاً پارامتری مثل دامنه یا نظیر آن است. اما در بسیاری از کاربردهای پردازش سیگنال، نمایش تابع در فضای زمان یا مکان، بهترین نمایش آن نخواهد بود؛ بلکه در فضای فرکانس و با کمک طیف فرکانسی توابع، می‌توان به طور ملموس‌تری به مطالعه و کنکاش در آن پرداخت و به اطلاعات مفیدتری در این فضا رسید. یکی از روش‌های بسیار معروف برای شناخت فرکانس‌های موجود در یک سیگنال، استفاده از تبدیل فوریه است.

یونسفر دارای فرکانس‌های روازنه، ماهیانه، فصلی و سالیانه بوده و برای شناخت رفتار این لایه در زمان، می‌بایستی فرکانس‌های مختلف آن مورد بررسی قرار گیرد. یکی از بهترین ابزارهای ریاضی برای کشف فرکانس‌های مختلف موجود در یک سیگنال، استفاده از تبدیل فوریه

نمونه به صورت $Y=(y_1, \dots, y_n)$ باشند. در این صورت ماتریس مدل با ابعاد $n \times p$ به صورت رابطه (۲۳) می تواند

$$F = \begin{pmatrix} b_1(x^1) & \dots & b_p(x^1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_1(x^n) & \dots & b_p(x^n) \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۲۳) تعریف شود:}$$

برای نمونه ارائه شده ماتریس همبستگی را می توان به صورت رابطه (۲۴) در نظر گرفت:

$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi(x^1, x^1) & \dots & \psi(x^1, x^n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi(x^n, x^1) & \dots & \psi(x^n, x^n) \end{pmatrix} \quad \text{رابطه (۲۴)}$$

که در رابطه (۲۴) $\psi(x^n, x^n)$ تابع کوواریشن است. در نتیجه میانگین و واریانس پیش بینی شده توسط درونیابی کریجینگ برای هر نقطه به صورت روابط (۲۵) و (۲۶) محاسبه می شود:

$$\mu(x) = M\alpha + r(x) \times \Psi^{-1} \times (y - F\alpha) \quad \text{رابطه (۲۵)}$$

$$s^2(x) = \sigma^2 \left(1 - r(x) \Psi^{-1} r(x)^T + \frac{(1 - F^T \Psi^{-1} r(x)^T)}{F^T \Psi^{-1} F} \right) \quad \text{رابطه (۲۶)}$$

در روابط (۲۵) و (۲۶) $M = (b_1(x), b_2(x), \dots, b_p(x))$ ماتریس مدل در نقطه مجهول مورد نظر، بردار ضرایب مربوط به تابع رگرسیون و $r(x) = (\psi(x, x^1), \dots, \psi(x, x^n))$ بردار همبستگی مابین نقاط نمونه و نقطه مجهول هستند.

۵- بحث و یافته ها

جنبه متمایزکننده رویدادهای تناوبی، الگوی تکراری در زمان است. یونسفر نیز در بازه های زمانی مختلف تکرار می شود به طوری که با در نظر گرفتن فعالیت خورشیدی ۱۱ ساله، مقدار یونسفر ماه ژانویه با ماه های ژانویه سال های دیگر رفتاری مشابه دارند. بسیاری از رفتارهای یونسفر

می شود که k مقادیر صحیح از ۰ تا $N-1$ را اختیار می کند.

- در تبدیل گسسته، سری جایگزین انتگرال شده است.
- خروجی تبدیل گسسته به جای تابع پیوسته فرکانس، دنباله فرکانسی است و فرکانس پیوسته f نیز به وسیله شاخص فرکانس بیان می شود که مقادیر صحیح از ۰ تا $N-1$ را اختیار می کند.

۴- مدل کریجینگ

یکی از تکنیک های بسیار مناسب و پیشرفته برای تحلیل فضایی داده های مکانی، استفاده از روش کریجینگ است. کریجینگ یک برآوردگر ناریب با کمترین واریانس برآورد است. برای برآورد مقادیر بر اساس روش کریجینگ، روش های مختلفی وجود دارد که می توان به کریجینگ معمولی^۱، کریجینگ فراگیر^۲، کریجینگ قطعه ای^۳ و نیز کوکریجینگ^۴ اشاره نمود. درونیابی کریجینگ از دو مرحله تشکیل شده است: مرحله اول ساختن تابع رگرسیون^۵ با استفاده از داده های ورودی $f(x)$ و مرحله دوم پردازش های آماری^۶ برای تعیین بایاس ها $Z(x)$. این دو مرحله به صورت رابطه (۲۱) نمایش داده می شوند:

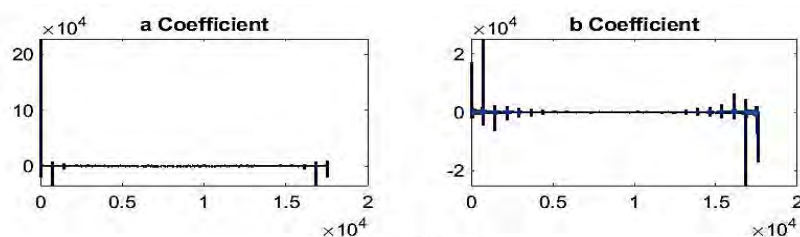
$$Y(x) = f(x) + Z(x) \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

در رابطه (۲۱) $f(x)$ تابع رگرسیون و $Z(x)$ پردازش های آماری با در نظر گرفتن میانگین صفر و واریانس σ^2 و نیز ماتریس همبستگی Ψ هستند. برای ادامه می توان نوشت:

$$f(x) = \sum_{i=1}^p \alpha_i b_i(x) \quad \text{رابطه (۲۲)}$$

در رابطه (۲۲) $b_i(x)$ توابع پایه و $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_p)$ نشان دهنده ضرایب هستند. در نظر بگیریم که نمونه ای به طول n به صورت $X = (x_1, \dots, x_n)$ و مقادیر خروجی مربوط به هر

- 1- Spatial Analysis
- 2- Ordinary Kriging
- 3- Universal Kriging
- 4- Blok Kriging
- 5- Cokriging
- 6- Regression Function
- 7- Statistical Process
- 8- Correlation Matrix



نگاره ۳: ضرایب a (شکل چپ) و b (شکل راست) حاصل از سری فوریه برای سری زمانی TEC مابین سالهای ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۷

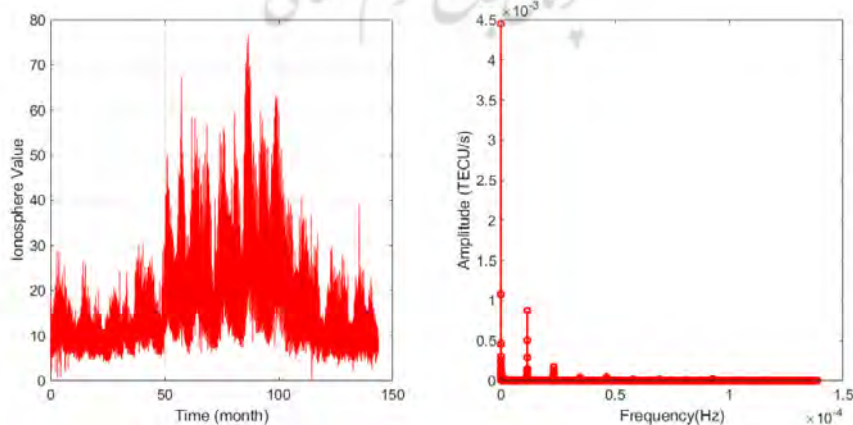
مستقیم با فعالیت خورشید، افزایش می‌یابد. این افزایش در ساعت‌های ۸ الی ۱۲ به وقت جهانی به حداکثر و در شب به حداقل مقدار خود خواهد رسید. یونسفر در اواخر روزهای زمستان و ابتدای بهار حداکثر مقدار خود را دارد، که بیشترین مقدار دامنه روزانه می‌تواند برای روزهای زمستان در سال ۲۰۱۳ که فعالیت خورشیدی به اوج خود رسیده و کمترین مقدار دامنه می‌تواند متعلق به روزهای پاییز در سال ۲۰۰۷ که فعالیت خورشیدی به حداقل خود می‌رسد، باشد.

تدریجی و آرام و برخی به صورت آنی به علت شرایط جوی می‌تواند رخ دهد (اینیورت و سکرکین، ۲۰۱۹: ۶). با محاسبه فرکانس رفتار یونسفر می‌توان به کوچک‌ترین رفتار یونسفر در بازه زمانی ساعتی، ماهیانه، فصلی، سالیانه و یازده ساله که بر اثر فعالیت‌های خورشیدی و عوامل جوی رخ می‌دهند، پی برد. نگاره (۳) نمایش‌دهنده ضرایب a و b حاصل از سری فوریه برای سری زمانی TEC در بازه سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۷ است.

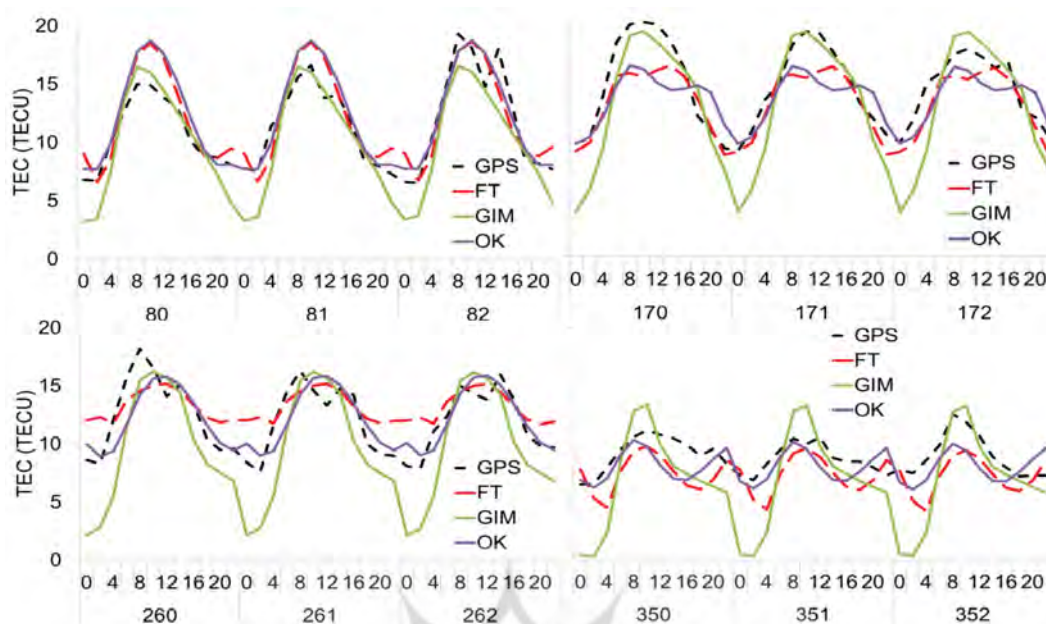
نگاره (۴) رفتار یونسفر را در بازه زمانی ۱۱ سال و همچنین چگونگی رفتار آن در حوزه فرکانس را نمایش می‌دهد.

۱-۵- مدل‌سازی سری زمانی یونسفر برای سال ۲۰۱۸
نگاره (۵) سری زمانی تغییرات روزانه TEC حاصل مدل‌های FT، OK و GIM را در مقایسه با TEC حاصل از GPS در روزهای ۸۰، ۸۱، ۸۲ (فصل زمستان)، ۱۷۰، ۱۷۱، ۱۷۲ (فصل بهار)، ۲۶۰، ۲۶۱، ۲۶۲ (فصل تابستان)، ۳۵۰،

براساس نگاره (۴) و تغییرات یونسفر در حوزه فرکانس، چندین فرکانس غالب با دامنه‌های بزرگ‌تر نسبت به سایر فرکانس‌ها قابل مشاهده است. این فرکانس‌ها می‌توانند نشان‌دهنده تغییرات روزانه، ماهانه، فصلی، سالیانه و ۱۱ سال باشند. مقدار یونسفر در طول روز به علت رابطه



نگاره ۴: رفتار یونسفر در بازه زمانی ۱۱ سال (شکل چپ) و رفتار یونسفر در حوزه فرکانس (شکل راست)



نگاره ۵: سری زمانی تغییرات روزانه TEC حاصل از مدل های OK، FT و GIM در مقایسه با TEC حاصل از GPS در سال ۲۰۱۸

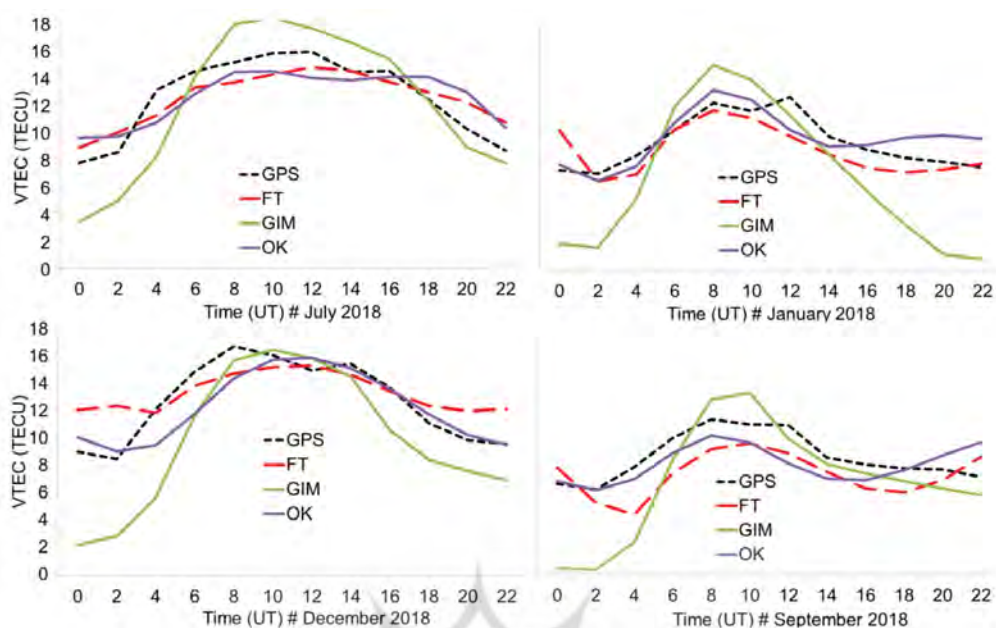
حاصل از مدل FT در پیش بینی سری زمانی یونسفر با مدل GIM و همچنین TEC حاصل از GPS مقایسه شده است. نکته بسیار مهم این است که نمودارهای ترسیمی به صورت میانگین ماهیانه و برای چهار ماه ژانویه، جولای، سپتامبر و دسامبر از سال ۲۰۱۸ محاسبه شده اند.

براساس نگاره (۶) مربوط به ماه ژانویه، TEC حاصل از مدل FT به TEC حاصل از GPS بسیار نزدیک است. البته در بازه زمانی ۱۰ تا ۱۸ UT خطایی در حد ۰ تا ۲ TECU مشاهده می شود. در همین ماه، سری زمانی ماهیانه مدل های GIM و OK نسبت به GPS دارای خطایی در حدود ۰ تا ۶ TECU است. برای ماه های جولای و سپتامبر مجدداً سری زمانی ماهیانه حاصل از مدل FT با سری زمانی حاصل از GPS مطابقت بالایی دارد. البته در برخی از زمان ها، عدم مطابقت در حدود ۰ تا ۲ TECU مشاهده می شود. در هر دو ماه جولای و سپتامبر، برای مدل های GIM و OK خطایی در حدود ۰ تا ۷ TECU دیده می شود. در ماه دسامبر، مقدار تطابق مابین TEC حاصل از مدل FT با TEC حاصل از GPS کاهش یافته و خطایی در حدود ۰ تا ۳ TECU مشاهده می شود. در این

۳۵۱ و ۳۵۲ (فصل پاییز) نمایش می دهد. بایستی اشاره شود که این روزها به صورت کاملاً تصادفی از هر فصل انتخاب شده اند.

براساس نگاره (۵) و در روزهای ۸۰، ۸۱ و ۸۲ (فصل زمستان) سری زمانی TEC حاصل از مدل های OK و FT دارای خطایی در حدود ۰ تا ۳ TECU در مقایسه با TEC حاصل از GPS دارد. در این سه روز برای مدل GIM نیز چنین خطایی می توان مشاهده نمود. در سه روز ۱۷۰، ۱۷۱ و ۱۷۲ (فصل بهار) مقدار خطا برای مدل های OK، FT و GIM در حدود ۰ تا ۶ TECU دیده می شود. در روزهای ۲۶۰، ۲۶۱ و ۲۶۲ (فصل تابستان) و همچنین ۳۵۰، ۳۵۱ و ۳۵۲ (فصل پاییز) مقدار خطا برای مدل GIM در حدود ۰ تا ۷ TECU است. افزایش خطا در مدل GIM می تواند به دلیل تغییرات در تابش های خورشیدی در ماه های آخر سال باشد. در این دو بازه زمانی مورد ارزیابی (۲۶۰، ۲۶۱ و ۲۶۲؛ ۳۵۰، ۳۵۱ و ۳۵۲) مقدار خطا برای مدل های OK و FT در حدود ۰ تا ۳ TECU است.

مقایسه دیگر انجام گرفته مربوط به تغییرات ماهیانه TEC در ایستگاه تهران (نگاره ۶) است. در این نگاره نتایج



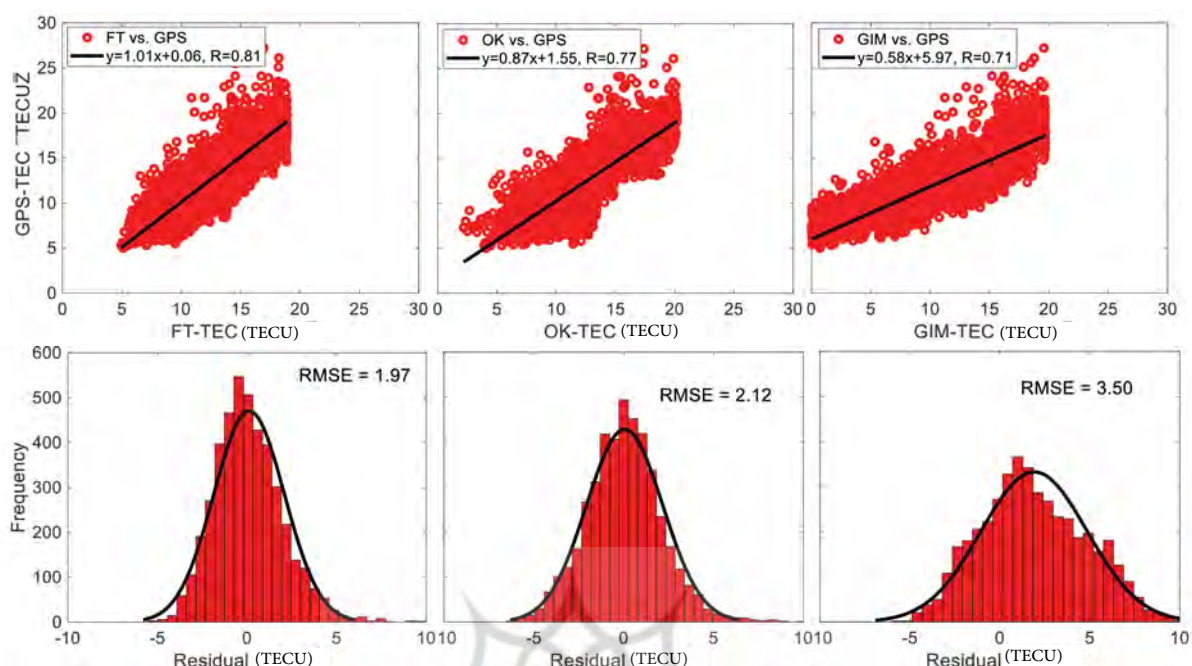
نگاره ۶: مقایسه تغییرات TEC حاصل از GPS، FT، GIM به صورت میانگین ماهیانه در سال ۲۰۱۸ برای ماه‌های ژانویه، جولای، دسامبر و سپتامبر

ماه، برای مدل‌های GIM و OK عدم مطابقت در حد 0 تا 6 TEC محاسبه شده است. مقایسه سری زمانی مدل FT با سری زمانی حاصل از GPS، GIM و OK بیانگر این موضوع است که مدل پیشنهادی به عنوان یک جایگزین بسیار خوب برای مدل‌های جهانی بوده و همچنین در شرایط آرام فعالیت‌های خورشیدی از دقت بالایی در پیش‌بینی سری زمانی یونسفر برخوردار است.

۲-۵- تحلیل خطای مدل فوریه

نگاره (۷) خط مربوط به بهترین برازش و نمودار هیستوگرام خطا را برای مدل‌های تبدیل فوریه (FT)، OK و GIM در مقایسه با TEC حاصل از GPS نمایش می‌دهد. هر چقدر ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک‌تر باشد، بیانگر شباهت زیاد تغییرات موجود در TEC حاصل از مدل با مقدار حاصل از GPS به عنوان مشاهده مرجع است. همچنین برای هیستوگرام خطا، هر چقدر تمرکز میله‌ها در اطراف صفر بیشتر بوده و فرکانس متناظر با آن نیز بزرگ باشد، بیانگر دقت بالاتر مدل مورد نظر است.

براساس نگاره (۷) مقادیر ضریب همبستگی برای مدل‌های FT، OK و GIM در مقایسه با GPS به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۷۷ و ۰/۷۱ حاصل شده است. همچنین نمودار مربوط به فرکانس و فراوانی خطاها نیز بیانگر این مطلب مهم است که اکثریت مشاهدات TEC حاصل از مدل FT در مرحله پیش‌بینی دارای خطایی در بازه $[-5, 5]$ TECU بوده و فراوانی اکثر مشاهدات نزدیک صفر TECU است. در حالی که برای مدل‌های OK و GIM مقدار در بازه $[-5, 10]$ TECU بوده و فراوانی آن اطراف صفر کمتر از مدل FT است. مقایسه این نتایج حاکی از دقت بالاتر مدل FT نسبت به مدل‌های OK و GIM است. همچنین براساس نگاره (۷) مقدار RMSE برای مدل‌های FT، OK و GIM در سال ۲۰۱۸ به ترتیب برابر با ۱/۹۷، ۲/۱۲ و ۳/۵۰ TECU است. نوع دیگر ارزیابی صورت گرفته با استفاده از پارامتر آماری خطای نسبی است. مقدار این پارامتر به صورت روزانه برای هر سه مدل OK، FT و GIM محاسبه شده و سپس میانگین ماهانه آن‌ها برای سال ۲۰۱۸ به دست آمده است. جدول (۱) نتایج این تحلیل را نمایش می‌دهد.



نگاره ۷: نمودار مربوط به بهترین برازش برای مدل FT (بالا-چپ)، مدل کریجینگ معمولی (بالا-وسط) و مدل GIM (بالا-راست) به همراه هیستوگرام خطا برای مدل FT (پایین-چپ)، مدل کریجینگ معمولی (پایین-وسط) و مدل GIM (پایین-راست) در مقایسه با TEC حاصل از GPS برای مشاهدات سال ۲۰۱۸

براساس نتایج حاصل از جدول (۱)، بیشینه مقدار خطای نسبی برای مدل های FT، OK و GIM به ترتیب برابر با ۱۶/۶۲٪، ۲۱/۳۵٪ و ۴۵/۴۰٪ و در ماه های اکتبر، آگوست و ژانویه به دست آمده است. با توجه به مقادیر میانگین خطای نسبی محاسبه شده برای کل سال ۲۰۱۸، کاملاً مشخص است که مدل FT نسبت به مدل های OK و GIM از دقت بالاتری برخوردار بوده است. شبکه جهانی IGS دارای دو ایستگاه فعال تهران و همدان در ایران است که ایستگاه همدان پنج سال پیش راه اندازی شده است. طبیعتاً مدل GIM برای محاسبه مقادیر TEC در جو بالای ایران، از مشاهدات ایستگاه های مجاور استفاده می کند. بنابراین به دلیل استفاده از درون یابی برای محاسبه مقدار TEC، این مدل در منطقه ایران از دقت کافی برخوردار نیست. همچنین رزولوشن زمانی این مدل به صورت دو ساعته است. در حالی که یونسفر می تواند تغییراتی در بازه زمانی کمتر از دو ساعت داشته باشد.

جدول ۱: مقایسه مقادیر خطای نسبی (%) برای مدل های FT، OK و GIM در مرحله پیش بینی سال ۲۰۱۸

ماه های سال ۲۰۱۸	خطای نسبی (%)		
	FT	OK	GIM
ژانویه	۱۴/۲۱	۱۴/۴۴	۴۵/۴۰
فوریه	۱۱/۵۵	۱۷/۰۶	۳۶/۶۳
مارچ	۱۰/۲۲	۱۴/۰۷	۲۴/۲۲
آوریل	۹/۱۸	۱۰/۳۵	۲۰/۴۸
می	۱۱/۱۰	۱۳/۰۶	۲۰/۰۵
ژوئن	۱۴/۸۱	۱۱/۳۹	۱۹/۷۶
جولای	۱۵/۰۰	۱۴/۰۶	۲۱/۰۰
آگوست	۱۴/۴۹	۲۱/۳۵	۲۳/۴۹
سپتامبر	۱۲/۷۵	۱۸/۱۲	۲۸/۵۳
اکتبر	۱۶/۶۲	۱۵/۹۸	۲۹/۰۷
نوامبر	۱۲/۰۵	۱۲/۱۲	۳۲/۴۳
دسامبر	۱۶/۱۱	۲۱/۱۵	۳۱/۹۷
میانگین کل سال	۱۳/۱۸	۱۵/۱۸	۲۷/۷۵

بود. به منظور دستیابی به این هدف، از مشاهدات ایستگاه GNSS تهران که یکی از ایستگاه‌های شبکه جهانی IGS است، استفاده شد. مشاهدات مربوط به ایستگاه تهران از سال ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۸ دریافت شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. از مشاهدات سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۷ برای مدل‌سازی و شناخت فرکانس‌های غالب موجود در سری زمانی یونسفر استفاده شده و سپس مقدار TEC برای سال ۲۰۱۸ که یک سال با فعالیت آرام خورشیدی است، پیش‌بینی شد. در تحلیل نتایج مربوط به سال ۲۰۱۸، مقدار ضریب همبستگی مدل‌های OK، GIM و FT با مقادیر TEC حاصل از GPS به ترتیب برابر با ۰/۸۱، ۰/۷۱ و ۰/۷۷ به دست آمد. همچنین میانگین شاخص خطای نسبی سه مدل در سال ۲۰۱۸ به ترتیب برابر با ۱۳/۱۸٪، ۲۷/۷۵٪ و ۱۵/۱۸٪ حاصل شد. مقایسه نتایج حاصل از دو شاخص ضریب همبستگی و خطای نسبی بیانگر دقت و صحت بالاتر مدل FT نسبت به مدل‌های GIM و OK در پیش‌بینی مقدار TEC برای شرایط آرام فعالیت‌های خورشیدی (سال ۲۰۱۸) بود. همچنین پارامتر آماری RMSE نیز مورد بررسی قرار گرفت که برای مدل FT کمتر از مدل‌های GIM و OK بود. نتایج نشان داد که مدل تبدیل فوریه قابلیت لازم برای شناخت فرکانس‌های رفتاری یونسفر و همچنین پیش‌بینی تغییرات TEC را در بازه فعالیت‌های آرام خورشیدی دارد.

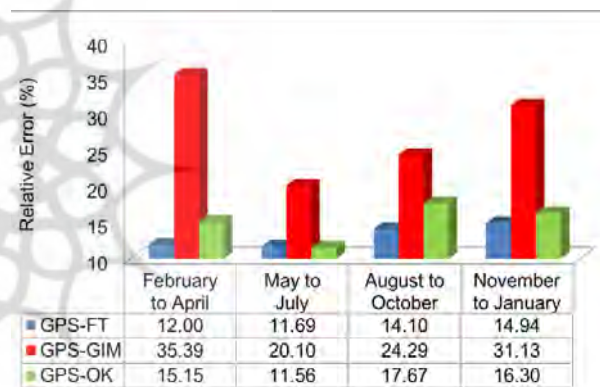
تعارض منافع

در این پژوهش، حامی مالی و تعارض منافع وجود ندارد.

References

- 1- Abdi, N., Azmoudeh Ardalan, A., & Karimi, R. H. (2017). Integration of GPS observations and satellite altimetry for local ionospheric modeling in Iran. *Science and Technology of Surveying and Mapping, 7*(3), 109–125.
- 2- Abe, O. E., Rabiou, A. B., Bolaji, O. S., & Oyeyemi, E. O. (2018). Modeling African equatorial ionosphere using ordinary Kriging interpolation technique for GNSS

نوع دیگری از ارزیابی مدل‌های OK، FT و GIM محاسبه پارامتر آماری خطای نسبی بصورت میانگین سه ماهه یا همان میانگین فصلی است. براساس تحقیقات موجود در زمینه فیزیک یونسفر، ۱۲ ماه سال را می‌توان به صورت چهار دسته (فوریه، مارچ و آوریل)، (می، ژوئن و جولای)، (آگوست، سپتامبر و اکتبر) و (نوامبر، دسامبر و ژانویه) در نظر گرفت. این دسته‌بندی براساس حرکت زمین در صفحه اکلیپتیک به دور خورشید و مطابق با نقاط ورنال پاییزی و بهاری و همچنین انقلاب تابستانی و زمستانی صورت می‌گیرد (اینیورت و سکرتهین، ۲۰۱۹: ۴). نگاره ۸ نشان‌دهنده مقادیر خطای نسبی به صورت فصلی و برای سه مدل FT، OK و GIM در مقایسه با GPS هستند.



نگاره ۸: مقادیر خطای نسبی محاسبه شده به صورت فصلی برای مدل‌های OK، FT و GIM در سال ۲۰۱۸

تحلیل خطای نسبی به صورت فصلی نشان می‌دهد که مقدار خطای بیشینه برای مدل FT در بازه سه ماهه نوامبر تا ژانویه و به مقدار ۱۴/۹۴ درصد محاسبه شده است. مقایسه مقدار خطای بیشینه برای مدل FT با مقادیر خطای نسبی مدل‌های OK و GIM حاکی از دقت بالاتر مدل FT است.

۶- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، استفاده از مدل تبدیل فوریه (FT) برای پیش‌بینی سری زمانی محتوای کلی الکترون یونسفر (TEC) در شرایط آرام فعالیت‌های خورشیدی

437.

12- Ghaffari Razin, M. R., & Vosoughi, B. (2017). Wavelet neural networks using particle swarm optimization training in modeling regional ionospheric total electron content. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 149*, 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.09.005>

13- Ghaffari Razin, M. R., & Vosoughi, B. (2020). Ionosphere time series modeling using adaptive neuro-fuzzy inference system and principal component analysis. **GPS Solutions*, 24*, 51.

14- Ghaffari Razin, M. R., Moradi, A. R., & Inyurt, S. (2021). Spatio-temporal analysis of TEC during solar activity periods using support vector machine. **GPS Solutions*, 25*, 121. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01158-3>

15- Han, Y., Wang, L., Fu, W., Zhou, H., Li, T., & Chen, R. (2022). Machine learning-based short-term GPS TEC forecasting during high solar activity and magnetic storm periods. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15*, 115–126. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3132049>

16- Harris, F. J. (1978). On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. **Proceedings of the IEEE*, 66*(1), 51–83.

17- Inyurt, S., & Sekertekin, A. (2019). Modeling and predicting seasonal ionospheric variations in Turkey using artificial neural network (ANN). **Astrophysics and Space Science*, 364*, 62.

18- Jakowski, N., Stankov, S., & Klaehn, D. (2005). Operational space weather service for GNSS precise positioning. **Annales Geophysicae*, 23*(9), 3071–3079.

19- Klobuchar, J. A. (1996). Ionospheric effects on GPS. In B. W. Parkinson & J. J. Spilker Jr. (Eds.), **Global Positioning System: Theory and applications** (Vol. 1, pp. 485–510). American Institute of Aeronautics and Astronautics.

20- Liu, Z., & Gao, Y. (2003). Ionospheric TEC predictions over a local area GPS reference network. **GPS Solutions*, 8*(1), 23–29.

21- Mallika, I. L., Ratnam, D. V., Raman, S., & Sivavaraprasad, G. (2020). A new ionospheric model

applications. **Astrophysics and Space Science*, 363*, 168.

3- Akhoondzadeh, M. (2014). Investigation of GPS-TEC measurements using ANN method indicating seismo-ionospheric anomalies around the time of the Chile ($M_w = 8.2$) earthquake of 01 April 2014. **Advances in Space Research*, 54*(9), 1768–1772.

4- Amerian, Y., Vosoughi, B., & Mashhadi Hossainali, M. (2013). Regional ionosphere modeling in support of IRI and wavelet using GPS observations. **Acta Geophysica*, 61*(5), 1246–1261. <https://doi.org/10.2478/s11600-013-0121-5>

5- Ansari, K., Kumar Panda, S., & Corumluoglu, O. (2018). Mathematical modelling of ionospheric TEC from Turkish permanent GNSS network (TPGN) observables during 2009–2017 and predictability of NeQuick and Kriging models. **Astrophysics and Space Science*, 363*, 42.

6- Bilitza, D., & Reinisch, B. W. (2008). International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. **Advances in Space Research*, 42*, 599–609.

7- Burrus, C. S. (1995). Multiband least squares FIR filter design. **IEEE Transactions on Signal Processing*, 43*(2), 412–421.

8- Ciralo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A., & Radicella, S. M. (2007). Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. **Journal of Geodesy*, 81*(2), 111–120. <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0093-1>

9- Etemadfar, H., & Hossainali, M. M. (2016). Application of Slepian theory for improving the accuracy of global ionosphere models in the Arctic region. **Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121*(3), 2583–2594.

10- Feizi, R., Vosoughi, B., & Ghaffari Razin, M. R. (2019). Regional modeling of the ionosphere using adaptive neuro-fuzzy inference system in Iran. **Advances in Space Research*, 65*, 2515–2528.

11- Ghaffari Razin, M. R., & Vosoughi, B. (2016). Modeling and interpolation of total electron content of the ionosphere using artificial neural networks and GPS observations. **Earth and Space Physics*, 42*(2), 419–

methods, and applications*. Walter de Gruyter.

30- Sharifi, M. A., & Farzaneh, S. (2015). Regional TEC dynamic modeling based on Slepian functions. *Advances in Space Research, 56*(5), 907–915.

31- Stankov, S., Jakowski, N., Tsybulya, K., & Wilken, V. (2006). Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning. *Radio Science, 41*, RS6S09. <https://doi.org/10.1029/2005RS003327>

32- Tebabal, A., Radicella, S. M., Dantie, B., Migoya-Orue, B., Nigussie, M., & Nava, B. (2019). Feed forward neural network-based ionospheric model for the East African region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 191*, 105052.

33- Wang, C., Xin, S., Liu, X., et al. (2018). Prediction of global ionospheric VTEC maps using an adaptive autoregressive model. *Earth Planets Space, 70*, 18. <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0762-8>

34- Yilmaz, A., Akdogan, K. E., & Gurun, M. (2018). GPS ionospheric modeling over the Turkish region using Kriging interpolation and artificial neural networks. *Astrophysics and Space Science, 363*, 137

for single frequency GNSS user applications using the Klobuchar model driven by auto regressive moving average (SAKARMA) method over the Indian region. *IEEE Access, 8*, 54535–54553. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981365>

22- Nava, B., Coisson, P., & Radicella, S. M. (2008). A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.01.015>

23- Nematipour, P., Raoofian-Naeeni, M., & Ghaffari Razin, M. R. (2021). Regional application of C1 finite element interpolation method in modeling of ionosphere total electron content over Europe. *Advances in Space Research.*

24- Osgood, B. (2004). *The Fourier transform and its applications*. Stanford University.

25- Ram, S., Gowtam, S., Mitra, V., & Reinisch, B. (2018). The improved two-dimensional artificial neural network-based ionospheric model (ANNIM). *Journal of Geophysical Research: Space Physics, 123*(7), 5807–5820.

26- Sabzehee, F., Farzaneh, S., Sharifi, M. A., & Akhoondzadeh, M. (2018). TEC regional modeling and prediction using ANN method and single frequency receiver over Iran. *Annals of Geophysics, 61*(1).

27- Schaer, S. (1999). Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System (Ph.D. thesis). Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland.

28- Schunk, R. W., & Nagy, A. F. (2000). *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge University Press.

29- Seeber, G. (2003). *Satellite geodesy: Foundations,

COPYRIGHTS

©2025 by the authors. Published by National Geographical Organization. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons [Attribution-NoDerivs 4.0 International \(CC BY-ND 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/)

