

## بررسی تغییرات روزانه و فصلی محتوای کلی الکترون یونسپهر و ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری در منطقه تهران و مقایسه آن با مدل یونسپهری IRI-2007

سرمد قادر<sup>۱\*</sup>، خلیل کرمی<sup>۲</sup> و احمد رایین<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران  
<sup>۳</sup>استادیار بازنشسته، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۳/۲۵)

### چکیده

ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهر (یونسفر) اطلاعات مفیدی در ارتباط با بادهای نصف‌النهاری که در یونسپهر و گرمسپهر (ترموسفر) می‌وزند به دست می‌دهد. همچنین این عامل در اجرای مدل‌های گردش کلی گرمسپهر (thermospheric general circulation models) از پارامترهای اساسی است. به علاوه برهم‌کنش بین یک سیگنال رادیویی و ذرات باردار در محیط یونسپهر می‌تواند منجر به تغییر قابل توجهی در دامنه، فاز، قطبش و چرخش فاراده در سیگنال حامل شود که مقادیر این تغییرات تابعی از محتوای الکترون کلی یونسپهر است. در این پژوهش ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری در منطقه تهران از تابستان ۱۳۸۵ تا تابستان ۱۳۸۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین محتوای کلی الکترون یونسپهر در چهار روز از فصل‌های متفاوت سال محاسبه می‌شود. به علاوه مقادیر خروجی حاصل از پیش‌بینی ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری و محتوای کلی الکترون یونسپهر در بازه زمانی مشابه توسط مدل IRI-2007، با مقادیر حاصل از محاسبات در ایستگاه یونسپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در اجرای مدل IRI-2007 فقط از زیرروال CCIR در پیش‌بینی ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهر مورد استفاده قرار گرفته است. محاسبه‌ها نشان می‌دهند که مقادیر ارتفاع بیشینه لایه F2 محاسبه شده از رابطه شیمازاکی مقادیر بیشتری نسبت به رابطه بیلیتزا در هنگام روزنتیجه می‌دهد، درحالی‌که مقادیر ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری محاسبه شده از این دو رابطه، در ساعت‌های شب مقادیر یکسانی دارند. همچنین نتایج روشن می‌سازد که حدود دوسوم از محتوای کلی الکترون یونسپهر در بخش بالایی یونسپهر و حدود یک‌سوم باقی‌مانده از محتوای کلی الکترون یونسپهر در بخش پایینی یونسپهر واقع شده است و تغییرات محتوای کلی الکترون یونسپهر در ساعت‌های روز نوسان شدیدی را نشان می‌دهد، درحالی‌که در ساعت‌های شب تغییرات کمی را شاهد هستیم.

واژه‌های کلیدی: یونسپهر، محتوای کلی الکترون یونسپهر، ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهر، مدل‌سازی یونسپهر

### Diurnal and seasonal variation of the total electron content and peak height of the F2-ionospheric layer (hmF2) over the Tehran area and comparisons with IRI-2007 model predictions

Sarmad Ghader<sup>1\*</sup>, Khalil Karami<sup>1</sup>, and Ahmad Raean<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 06 October 2010, accepted: 15 March 2011, available online: 15 June 2011)

\*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir

\*نگارنده رابط:

## Summary

To understand the physics of the F2 ionospheric layer and for ionospheric radio-wave propagation studies, accurate values of the peak height of the F2 ionospheric layer (hmF2) are needed. The peak height of the F2 ionospheric layer is the most important parameter after peak density in high frequency (HF) propagation prediction. Diurnal variation of hmF2 is controlled by solar radiation and thermospheric winds. Thermospheric winds cause pressures that change the ionosphere at different altitudes. Therefore, hmF2 is a key parameter in studying ionospheric dynamics. In addition, the interaction between radio waves and charged particles of ionospheric plasma can cause significant changes in the phase, amplitude and polarization of navigation signals. All of these changes depend on the value of the total electron content (TEC) in the ionosphere.

Data measured by IPS-71 at the ionospheric station at the Institute of Geophysics of the University of Tehran from July 2006 to June 2007 were used to perform the calculations. As the real height is difficult to acquire directly from ionograms, the Shimazaki and Bilitza formulations are used to calculate the peak height of the F2 ionospheric layer for the period from July 2006 to June 2007.

The most commonly employed mathematical function that depicts the electron density profile in the ionosphere is the Chapman function. In this work, we have used the method presented by Ezquer et.al (1992), in which two Chapman profile expressions are utilized for topside ionosphere and bottomside ionosphere, to obtain TEC from ionograms.

Furthermore, in the present work, the international reference ionosphere (IRI-2007) model with CCIR coefficients was used to predict the peak height of the F2 ionospheric layer and the TEC for the period from July 2006 to June 2007. The IRI-2007 model is an empirical models that is widely used to show ionospheric changes. The IRI model is a standard model of the ionosphere supported by the Committee on Space Research (COSPAR) and International Union of Radio Science (URSI). The IRI model has many practical applications in High Frequency (HF) predictions. The IRI model is based on a mathematical description of the ionosphere as a function of location, time, altitude, solar activity and geomagnetic activity. It has two options for the prediction of the F2, F1 and E layer critical frequencies (CCIR and URSI coefficients).

The integration of two Chapman profiles shows that almost 2/3 of the TEC of the ionosphere is in the topside ionosphere and almost 1/3 is in the bottomside of ionosphere. Additionally, the daytime values of the TEC show intense fluctuation, while they becomes smoother in the nighttime. Furthermore, during the daytime values of hmF2 computed by the Bilitza method are lower than those calculated by the Shimazaki method. However, during the nighttime the values of hmF2 computed by Bilitza method are the as same as those computed with Shimazaki method. In addition, our study shows that around midnight, the values of hmF2 are greater than those of the daytime. Conversely, there is a downward shift in the F2 peak near sunrise. From morning to afternoon, the hmF2 increases again. In the evening an upward drift of the F2-peak is clear.

**Key words:** Ionosphere, total electron content, peak of the F2 ionospheric layer, ionospheric modeling, ionospheric prediction

ضروری است. یونسفر به بادهای گرم سپهری  
عکس العمل نشان می دهد. بادهای گرم سپهری می توانند  
لایه های یونسفری را به ارتفاع های متفاوتی منتقل کنند.

۱ مقدمه

برای درک عمیق تر رخدادهای فیزیکی موثر بر رفتار  
یونسفر آگاهی از ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسفر

حاصل از همین محاسبات برای خروجی مدل IRI-2007 در بازه زمانی مشابه اختصاص دارد.

## ۲ داده‌های یون‌سپهری

در این تحقیق از داده‌های ایستگاه یون‌سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (35.4N, 51.2E, 52.7dip) استفاده شده است. این داده‌ها با استفاده از سونداژ قائم یون‌سپهری در ایستگاه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران اندازه‌گیری می‌شوند. سونداژ قائم در هر ساعت دوبار صورت می‌گیرد و همچنین محدوده بسامد موج حامل بین ۱ تا ۲۰ مگاهرتز قرار دارد. بازه زمانی داده‌ها حدود ۱ سال و از تابستان ۱۳۸۵ تا تابستان ۱۳۸۶ را دربر می‌گیرد. این بازه زمانی در کمینه لکه‌های خورشیدی واقع شده که تعداد آنها بین ۷/۷ و ۱۵/۳ قرار دارد. اطلاعات مربوط تعداد لکه‌های خورشیدی از پایگاه اینترنتی (<http://www.ips.gov.au/Solar/1/6>) قابل دسترسی است.

## ۳ ارتفاع بیشینه لایه F2 یون‌سپهری

به منظور محاسبه hmF2 آگاهی از دو پارامتر زمان برگشت موج و سرعت گروه موج برگشتی ضروری است. زمان بازگشت سیگنال را می‌توان به صورت مستقیم اندازه گرفت ولی سرعت گروه در محیط یونیزه را نمی‌توان از آینوگرام‌ها به دست آورد و باید از روش دیگری برای محاسبه hmF2 استفاده کرد (دودنی، ۱۹۸۳). شیمازاکی (۱۹۵۵) در نخستین اقدام برای محاسبه hmF2 با استفاده از آینوگرام‌ها رابطه زیر را پیشنهاد کرده است:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2} - 176 \text{ km} \quad (1)$$

که در آن فاکتور پخش یعنی M(3000)F2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

همچنین آگاهی از ارتفاع واقعی لایه F2 یون‌سپهر (hmF2) از پارامترهای بسیار مهم در بررسی انتشار امواج رادیویی با یون‌سپهر است (ستهی و همکاران، ۲۰۰۴). برای محاسبه زاویه دقیق ارسال موج به سمت فضا و برگشت آن از یون‌سپهر، نیاز به دانستن ارتفاع دقیق این لایه داریم (ستهی و همکاران، ۲۰۰۸).

یک سیگنال رادیویی که از زمین به ماهواره یا بالعکس فرستاده می‌شود، تحت تاثیر محیط یونیزه یون‌سپهر قرار می‌گیرد. میزان این تاثیر بر یک سیگنال رادیویی به بسامد موج حامل آن و همچنین به وضعیت یون‌سپهر و چگالی الکترونی لایه‌های گوناگون یون‌سپهر بستگی دارد (سیباندان و مک کینل، ۲۰۰۹).

هدف اصلی COSPAR از مدل‌سازی یون‌سپهر توانایی پیش‌بینی آن دسته از پارامترهای یون‌سپهری است که روی ماهواره‌ها و فضاپیماها تاثیر گذارند. اما هدف اصلی URSI پیش‌بینی منحنی چگالی الکترونی در یون‌سپهر به منظور تسهیل ارتباطات رادیویی از راه دور است (رینیش و بیلیتزا، ۲۰۰۴).

اعتبارسنجی مدل IRI-2007 با استفاده از آن دسته از پارامترهای یون‌سپهری که به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری هستند در نقاط گوناگون دنیا (برای مثال، آبدو و همکاران، ۱۹۹۶؛ آدواله و همکاران، ۲۰۰۹) و همچنین در ایران توسط قادر و همکاران (۱۳۸۹) صورت گرفته است. نکته حائز اهمیت این است که هر دو پارامتر محتوای کلی الکترون (TEC) یون‌سپهر و همچنین hmF2 که مورد بحث در تحقیق حاضر هستند، به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیستند و می‌باید به صورت غیرمستقیم محاسبه شوند. تحقیق حاضر به نحوه محاسبه و بررسی تغییرات روزانه و فصلی این دو پارامتر با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه یون‌سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و همچنین مقایسه آنها با نتایج

#### ۴ محتوای کلی الکترون یونسپهر

محتوای کلی الکترون یونسپهر تعداد الکترونها می‌باشد که در ستون قائم یونسپهر از ارتفاع ۶۰ کیلومتری تا ارتفاع ۱۰۰۰ کیلومتری سطح زمین در ستونی به مساحت ۱ متر مربع وجود دارد. آگاهی از نحوه توزیع الکترون در یونسپهر از چندین نظر دارای اهمیت است برای مثال برآورد و تصحیح تاخیر انتشار در Global Navigation Satellite System (GNSS)، بررسی توفان‌های مغناطیسی، ترکیبات یونی در جو و تاثیر space weather روی ارتباطات از راه دور (استانکوف و همکاران، ۲۰۰۳). در یک تقسیم‌بندی کلی یونسپهر به دو ناحیه یونسپهر بالا و یونسپهر پایین تقسیم می‌شود. یونسپهر پایین از ارتفاع حدود ۶۰ کیلومتری شروع می‌شود و تا ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهر (hmF2) امتداد می‌یابد. یونسپهر بالا نیز از ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری آغاز می‌شود و تا ارتفاع UTH (Upper Transition Height) امتداد می‌یابد. UTH ارتفاعی است که در آن ارتفاع غلظت یون هیدروژن و یون اکسیژن با هم برابر هستند و بعد از این ارتفاع پروتونسپهر (پروتونسفر) آغاز می‌شود (سیباند و مک کینل، ۲۰۰۹). فرایندهای گوناگونی، منحنی چگالی الکترونی در یونسپهر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در یونسپهر پایین فرایندهای غالب عمدتاً واکنش‌های شیمیایی‌اند. نوریونش (فتوایونیزاسیون) و بازترکیب، دو فرایند غالب در یونسپهر پایین را تشکیل می‌دهند و برعکس، عمده فرایندها در یونسپهر بالا دینامیکی‌اند. ترابرد پلاسما در تغییرات یونسپهر بالا با زمان، نقش اصلی را ایفا می‌کند (سیباند و مک کینل، ۲۰۰۹). همچنین، نکته جالب توجه این است که با وجود اینکه یونسپهر پایین به سطح زمین نزدیک‌تر است، ولی یونسپهر بالا بیشترین تاثیر را از تغییرات میدان مغناطیسی زمین می‌گیرد (بلاخی و تساکوری، ۲۰۰۲).

$$M(3000)F2 = \frac{MUF}{foF2} \quad (2)$$

در واقع MUF بالاترین بسامدی است که موج رادیویی فقط با شکست یونسپهر بین دو نقطه در سطح زمین به فاصله ۳۰۰۰ کیلومتر می‌تواند منتشر شود و  $foF2$  نیز بسامد بحرانی لایه F2 یونسپهری است (ستهی و همکاران، ۲۰۰۴). ضریب پخش روزانه با آینوسوندها و به‌طور خودکار اندازه‌گیری می‌شوند. برای به‌دست آوردن رابطه (۱) شیمازاکی (۱۹۵۵) فرض کرده است که میدان مغناطیسی زمین هیچ تاثیری بر ارتفاع واقعی لایه F2 یونسپهری ندارد و همچنین لایه‌های پایین‌تر از لایه F2 یونسپهری نیز در نظر گرفته نشده‌اند. در تلاش‌های بعدی به‌منظور بهبود رابطه ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری (بیلیترا و همکاران، ۱۹۷۹) رابطه‌ای را معرفی کرده‌اند که لایه‌های پایین‌تر از لایه F2 یونسپهری نیز در نظر گرفته شده است:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000)F2 + \Delta M} - 176 \text{ km} \quad (3)$$

که در آن، پارامتر تصحیح ( $\Delta M$ ) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Delta M = \frac{f_1 \times f_2}{foF2 - f_3} + f_4$$

$$f_1 = 0.00232 \times Rz12 + 0.222 \quad (4)$$

$$f_2 = 1 - \frac{Rz12}{150} \times \exp\left(-\left(\frac{\psi}{40}\right)^2\right)$$

$$f_3 = 1.2 - 0.0116 \times \exp\left(\frac{Rz12}{41.84}\right)$$

$$f_4 = 0.096 \times \left(\frac{Rz12 - 25}{150}\right)$$

که در آن،  $Rz12$  میانگین تعداد لکه‌های خورشیدی ۱۲ ماهه،  $\psi$  magnetic dip latitude و برای منطقه تهران ۵۲/۷ درجه است و  $foE$  و  $foF2$  بسامدهای بحرانی لایه‌های F2 و E یونسپهری هستند.

فرایند غالب به صورت  $x + e \rightarrow x^-$  که در آن آهنگ نابودی الکترون‌ها با رابطه  $L = \beta N$  نشان داده می‌شود. در این رابطه  $\beta$  ضریب اتصال نامیده می‌شود (استانکوف و همکاران، ۲۰۰۳؛ رینیش و همکاران، ۲۰۰۴). همچنین از کوور و همکاران (۱۹۹۲) از مقیاس ارتفاع ۱۰۰ کیلومتری استفاده کرده‌اند که در تحقیق حاضر نیز مقدار مقیاس ارتفاع ۱۰۰ کیلومتر فرض شده است.

برای نمایش مقادیر کمی الکترون کلی در یون‌سپهر از واحد (Total Electron Content Unit) TECU استفاده

می‌شود که برابر با  $10^{16} \frac{\text{electron}}{\text{m}^2}$  است.

## ۵ نتایج

در ادامه، به تشریح نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود. ابتدا نتایج مربوط به محاسبه ارتفاع بیشینه لایه F2 یون‌سپهر و در ادامه نتایج مربوط به TEC یون‌سپهر حاصل از محاسبات و اجرای مدل عرضه می‌شود.

### ۱-۵ ارتفاع بیشینه لایه F2

در ادامه، شکل‌های مربوط به محاسبه ارتفاع بیشینه لایه F2 یون‌سپهر با استفاده از رابطه بیلیترا و شیمازاکی و همچنین مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل یون‌سپهری IRI-2007 را خواهیم دید. نکته قابل توجه این است که هرچند IRI-2007 برای پیش‌بینی بسامدهای بحرانی لایه‌های F2, F1, E و زیر روال CCIR و URSI را دارد، اما در کار حاضر تنها از زیر روال CCIR در پیش‌بینی‌ها استفاده شده است، زیرا IRI-2007 برای پیش‌بینی hmF2 از مقادیر فاکتور پخش M(3000)F2 استفاده می‌کند که مربوط به زیر روال CCIR هستند (راتووسکی و همکاران، ۲۰۰۹).

شکل‌های ۱-الف و ۱-ب به ترتیب پربندهای ارتفاع بیشینه لایه F2 یون‌سپهری را برای داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه یون‌سپهر مؤسسه ژئوفیزیک

برای به دست آوردن TEC از آینوگرام که به آن Ionogram total electron content می‌گویند، TEC از روش زیر به دست می‌آید:

$$ITEC = \int_0^{\infty} N(h)dh = \int_0^{hmF2} N_B(h)dh + \int_{hmF2}^{\infty} N_T dh \quad (5)$$

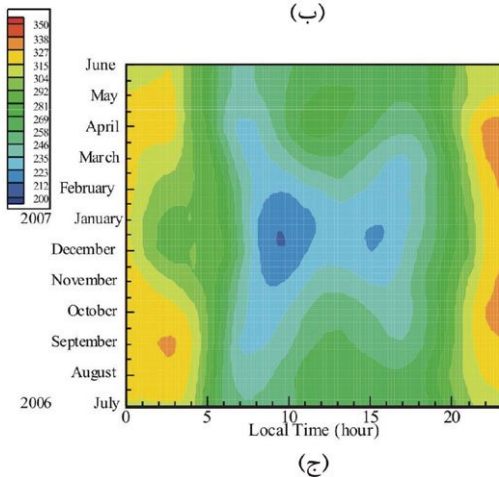
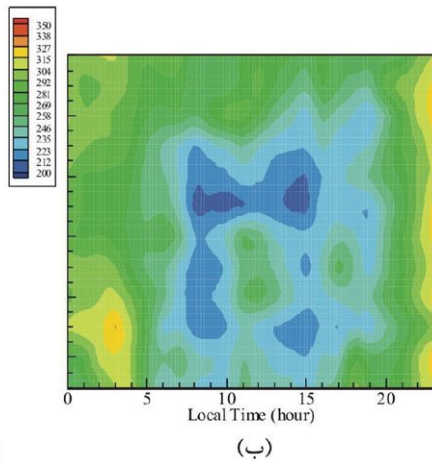
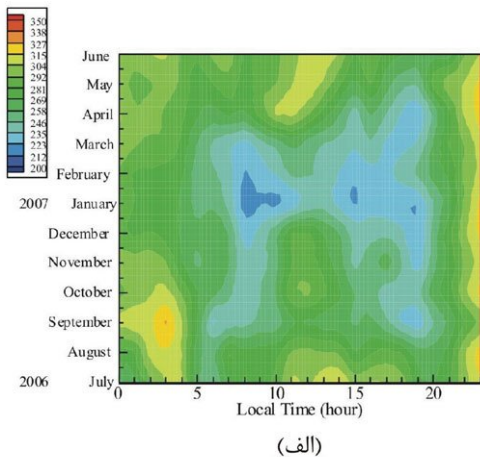
که در آن منحنی چگالی الکترونی و  $N_B$  منحنی چگالی الکترونی در یون‌سپهر پایین و  $N_T$  منحنی چگالی الکترونی در یون‌سپهر بالا است (بلاخی و تساکوری، ۲۰۰۲).

از کوور و همکاران (۱۹۹۲) از تابع چپمن (Chapman) برای توصیف منحنی چگالی الکترونی استفاده کرده‌اند. آنها دو تابع چپمن متفاوت را برای یون‌سپهر بالا و پایین به کار برده‌اند که به صورت زیر است:

$$N(h) = NmF2(\exp(c[1 - Z - \exp(-Z)])) \quad (6)$$

$$Z = \frac{h - hmF2}{H}$$

در رابطه اخیر NmF2 چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری و Z ارتفاع بهنجار شده نام دارد. h بیانگر ارتفاع یون‌سپهر و H مقیاس ارتفاع است. آنها برای توصیف یون‌سپهر بالا از تابع  $\alpha$ -چپمن که در آن  $c = 0.5$  است و برای یون‌سپهر پایین از تابع  $\beta$ -چپمن با  $c = 1$  استفاده کرده‌اند. دلیل استفاده از این دو تابع توجیه فیزیکی نیز دارد که مربوط می‌شود به اینکه چه فرضی در مورد بازترکیب الکترون‌ها در یون‌سپهر داشته باشیم. در تابع  $\alpha$ -چپمن فرض بر این است که الکترون‌ها به طور مستقیم با یون‌های مثبت ترکیب می‌شوند و هیچ یون منفی در این تئوری به وجود نمی‌آید. یعنی عمده واکنش‌ها به صورت  $e \rightarrow e^+ + x^-$  می‌باشد. آهنگ نابودی الکترون‌ها با رابطه  $L = \alpha N^2$  توصیف می‌شود که در آن  $\alpha$  ضریب بازترکیب نام دارد. در تابع  $\beta$ -چپمن نیز فرض بر این است که نابودی الکترون‌ها به واسطه اتصال و برخورد به مولکول‌های خنثی صورت می‌گیرد. یعنی



شکل ۱. پربندهای ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسفری (hmF2) بر حسب کیلومتر حاصل از (الف) رابطه شیمازاکی در ایستگاه یونسفر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و (ب) رابطه بیلترزا در ایستگاه یونسفر موسسه ژئوفیزیک و (ج) پیش بینی مدل IRI-2007 با استفاده از زیر روال CCIR.

دانشگاه تهران در بازه زمانی تابستان ۱۳۸۵ تا تابستان ۱۳۸۶ که با استفاده از روابط شیمازاکی و بیلترزا محاسبه شده‌اند، نشان می‌دهد. همچنین شکل ۱-ج مقادیر مربوط به پربندهای ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسفری حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 را با استفاده از زیرروال CCIR به‌نمایش می‌گذارد. مقایسه شکل‌ها نشان می‌دهد که مدل از لحاظ کیفی با نتایج مشاهدات در توافق است که البته با استفاده از یک مقایسه کمی می‌توان میزان انحراف‌های را نیز به‌دست آورد. مقایسه‌های کمی در ادامه خواهند آمد.

## ۵-۲ محتوای کلی الکترون یونسفر

به‌منظور پی‌بردن به روند تغییرات TEC در فصل‌های متفاوت و ساعت‌های متفاوت شبانه‌روز، چهار روز از چهار فصل متفاوت انتخاب شده است تا TEC در آن روزها مورد محاسبه قرار گیرد. هیچ ارجحیتی در انتخاب این روزها وجود نداشته است مگر اینکه در آن روزها توفان مغناطیسی روی نداده باشد و داده‌ها هم در آن روزها پیوستگی خوبی داشته باشند. این چهار روز عبارت‌اند از ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۶، ۱ اکتبر ۲۰۰۶، ۵ ژانویه ۲۰۰۷ و ۲۲ مارس ۲۰۰۷. در ادامه شکل‌های مربوط به پارامتر TEC را در این روزها خواهیم دید. در شکل ۲-ج مقادیر TEC حاصل از محاسبات در ایستگاه یونسفر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران با مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 در روز ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۶ نشان داده شده است. در شکل ۲-الف مقادیر TEC حاصل از محاسبات در ایستگاه یونسفر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران با مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 در روز ۱ اکتبر سال ۲۰۰۶ نشان داده شده است. در شکل‌های ۲-ب و ۲-د نیز به ترتیب مقادیر TEC حاصل از محاسبات در ایستگاه یونسفر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران با مقادیر حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 در روز ۵ ژانویه ۲۰۰۷ و ۲۲ مارس ۲۰۰۷ نشان داده شده است.

یون سپهری با میدان مغناطیسی زمین است، رابطه دقیق تری است. همچنین مقایسه نشان می‌دهد که در بیشتر فصل‌ها اختلاف مدل با محاسبات در ساعت‌های شب بیشتر از ساعت‌های روز است. در طول شب مقادیر ارتفاع بیشینه لایه F2 یون سپهری بیشتر از مقادیر آن در طول روز است. بادهای گرم سپهری می‌توانند یک فشار رو به بالا را به لایه F2 وارد کنند که همین بادهای موجب ارتفاع بیشتر لایه F2 یون سپهری در طول شب هستند (کوهل و کینگ، ۱۹۶۷). نزدیک طلوع خورشید تابش EUV (Extreme Ultra Violet) موجب یونش شدید در یون سپهر می‌شود و ارتفاع بیشینه لایه F2 یون سپهری کاهش می‌یابد (ریشبس و گریوت، ۱۹۶۹). از صبح تا ظهر مجدداً مقادیر ارتفاع بیشینه لایه F2 افزایش می‌یابد که دلیل آن افزایش دمای یون سپهر در این ساعت‌ها است. در طول ساعت‌های بعد از ظهر به دلیل کاهش یونش در یون سپهر جهت بادهای گرم سپهری عوض شده و سبب می‌شود که ارتفاع بیشینه لایه F2 به ارتفاع‌های بالاتر منتقل شود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود وضعیت استقرار ارتفاع بیشینه لایه F2 یون سپهری به بادهای گرم سپهری و همچنین تابش خورشیدی وابسته است (ستهی و همکاران، ۲۰۰۴).

همان‌طور که در شکل‌های مربوط به الکترون کلی یون سپهر مشخص است، پارامتر TEC در طول روز دارای نوسانات زیادی است و در طول شب دارای نوسانات کمتری است. انتگرال گیری از تابع Chapman در معادله (۵) در دو ناحیه یون سپهر بالا و یون سپهر پایین نشان می‌دهد که حدود دو سوم از الکترون کلی یون سپهر در یون سپهر بالا و حدود یک سوم از آن در یون سپهر پایین است. همچنین لازم به ذکر است که در پلاسماسفر چگالی ذرات خنثی به اندازه ای پایین است که تاثیری بر حرکت ذرات باردار در این ناحیه ندارند. حرکت ذرات باردار در یون سپهر بالا تحت تاثیر میدان الکتریکی و

همان‌طور که مشاهده می‌شود در همه موارد انتخاب شده مدل توانسته است که روند تغییرات را به خوبی نشان دهد، اگرچه میزان TEC محاسبه شده با مدل نسبت به مشاهدات بیشتر است.

### ۳-۵ مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل با مقادیر مشاهدات

در ادامه مقایسه نتایج حاصل از مدل با مشاهدات عرضه می‌شود. برای مقایسه کمی نتایج حاصل از اجرای مدل و مشاهدات از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

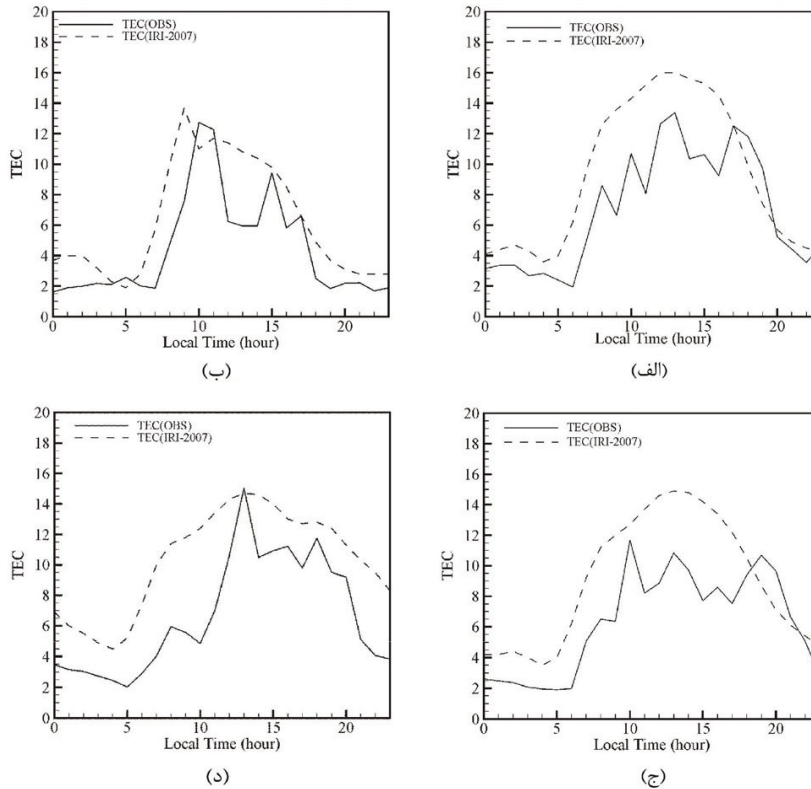
$$pd = \frac{x_{iO} - x_{iM}}{x_{iO}} \times 100 \quad (5)$$

که در آن  $pd$  درصد انحراف و  $x_{iM}$  و  $x_{iO}$  به ترتیب بیانگر مقادیر پیش بینی و مشاهده هستند.

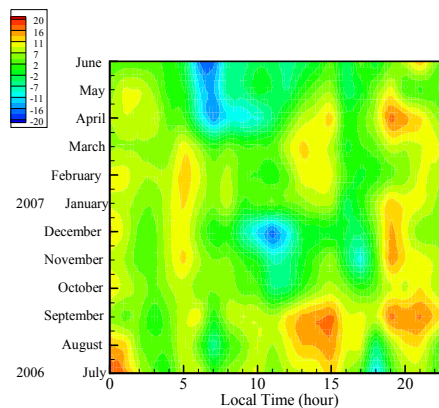
در شکل ۳ پربندهای درصد انحراف ارتفاع بیشینه لایه F2 یون سپهری حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 (CCIR) نسبت به مقادیر محاسبه شده از رابطه بیلیترا در ایستگاه یون سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران نشان داده شده است. شکل روشن می‌سازد که بیشینه میزان انحراف حدود ۲۰ درصد است. به علاوه همان‌طور که از شکل‌های ۱-الف و ۱-ب نیز مشخص است، با توجه به اینکه بیلیترا و همکاران (۱۹۷۹) لایه پایین‌تر از لایه F2 یعنی لایه E را نیز در نظر گرفته‌اند، ارتفاع محاسبه شده از رابطه بیلیترا و همکاران (۱۹۷۹) همواره کمتر یا مساوی با مقدار محاسبه شده از رابطه شیمازاکی (۱۹۵۵) است. حالت مساوی هنگامی برقرار است که بسامد بحرانی لایه E ( $f_oE$ ) صفر باشد که این حالت عموماً در شب‌ها ایجاد می‌شود. همچنین این رابطه به دلیل ارتباط دادن ارتفاع بیشینه لایه F2 یون سپهری به تغییر و تحولات خورشیدی که تعداد لکه‌های خورشیدی نماینده آن است و همچنین عرض مغناطیسی که بیانگر ارتباط ارتفاع بیشینه لایه F2

الکترونی در یونسپهر کاهش پیدا می کند، جهت حرکت غالب رو به پایین و از پلاسما اسپهر به سمت یونسپهر می شود (استانکوف و همکاران، ۲۰۰۳).

مغناطیسی در این ناحیه می باشد. یونش در طول روز در یونسپهر صورت می گیرد و به سمت بالا و پلاسما اسپهر حرکت دارد. درحالی که در طول شب که چگالی



شکل ۲: مقادیر TEC حاصل از محاسبات در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و پیش بینی حاصل از مدل یونسپهری IRI-2007(CCIR). (الف) در ۱ اکتبر ۲۰۰۶، (ب) در ۵ ژانویه ۲۰۰۷، (ج) در ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۶ میلادی و (د) در ۲۲ مارس ۲۰۰۷.



شکل ۳: پرندهای درصد انحراف ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری حاصل از پیش بینی مدل IRI-2007(CCIR) با مقادیر محاسبه شده از رابطه بیلیتزا در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.



## ۶ نتیجه گیری

هدف اصلی در تحقیق حاضر محاسبه دو پارامتر hmF2 و TEC یونسپهر در منطقه تهران و مقایسه آن با مدل یونسپهری IRI-2007 بود. برای تحقق این منظور hmF2 با استفاده از دو رابطه شیمازاکی و بیلیتزا محاسبه شده است. محاسبات نشان می‌دهد که روند تغییرات ارتفاع بیشینه لایه F2 محاسبه شده از رابطه شیمازاکی، در هنگام روز مقادیر بیشتری نسبت به رابطه بیلیتزا دارد، در حالی که مقادیر ارتفاع بیشینه لایه F2 یونسپهری محاسبه شده از این دو رابطه، در ساعت‌های شب مقادیر یکسانی دارند. همچنین محاسبات روشن می‌سازد که مدل IRI-2007 در حالت کلی روند تغییرات hmF2 را به خوبی نشان داده است و در ساعت‌های شب و بعد از طلوع آفتاب، بیشترین انحراف را شاهد هستیم. همچنین محاسبات نشان می‌دهد که TEC در ساعت‌های روز مقادیر بیشتری نسبت به شب دارد. علاوه بر این TEC یونسپهر در ساعت‌های روز دارای نوسانات شدیدی است که بعد از غروب آفتاب و در ساعت‌های شب تغییرات اندکی را در TEC یونسپهر شاهد هستیم.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه تهران به دلیل حمایت از این کار پژوهشی، و همچنین، از بخش پژوهشی یونسپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های یونسپهری اندازه‌گیری شده تشکر می‌کنند. همچنین، نویسندگان لازم می‌دانند که از آقای دکتر ایرج ملک‌پور، به خاطر ارائه نقطه نظرات ارزشمند در طول اجرای این پژوهش تشکر کنند.

## منابع

- فعالیت‌های خورشیدی در منطقه تهران با استفاده از داده‌های ایستگاه یونسپهر (یونسفر): مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، مجله ژئوفیزیک ایران، (۲)۵، ۱۶-۲۷.
- Abdu, M. A., Batista, I. S., and de Souza, J. R., 1996, An overview of IRI-observational data comparison in American (Brazilian) sector low latitude ionosphere: *Journal of Advances in Space Research*, **6**, 13-22.
- Adewale, A. O., Oyeyemi, E. O., and McKinnell, L. A., 2009, Comparisons of observed ionospheric F2 peak parameters with IRI-2001 predictions over South Africa: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **71**(2), 273-284.
- Belehaki, A., and Tsagouri, I., 2002, Investigation of the relative bottomside/topside contribution to the total electron content estimates: *Annals of Geophysics*, **45**, 73-86.
- Bilitza, D., Sheikh, N. M., and Eyfrig, R., 1979, A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR: *Telecomm. J.*, **46**, 549-553.
- Dudney, J. R., 1983, The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F2-layer from scaled ionospheric characteristics: *J. Atmos. Terr. Phys.*, **45**, 629-640.
- Ezquer, R. G., Adler, N. O., Radicella, S. M., Gonzalez, M. M., and Manzano, J. R., 1992, Total electron content obtained from ionogram data alone: *Radio Science*, **27**, 429-434.
- Kohl, H. and King J. W., 1967, Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere: *J. Atmos. Terr. Phys.*, **29**, 1045-1062.
- Ratovsky, K. G., Oinats, A. V., and Medvedev, A. V., 2009, Diurnal and seasonal variations of F2 layer characteristics over Irkutsk during the decrease in solar activity in 2003-2006: Observations and IRI-2001 model predictions: *Advances in Space Research*, **43**, 1806-1811.
- Reinisch, B. W., and Bilitza, D., 2004, Karl Rawer's life and the history of IRI: *Journal of Advances in Space Research*, **34**, 1845-1850.
- Reinisch, B. W., Qin Huang, X., Belehaki, A., Kui Shi, J., Lian Zhang, M., and Ilma, R., 2004, Modeling the IRI topside profile using scale heights From ground-based ionosonde measurements: *Journal of Advances in Space Research*, **34**, 2026-2031.

قادر، س.، کرمی، خ.، و رایین، ا.، ۱۳۸۹، اعتبارسنجی مدل یونسپهری IRI-2007 در یک بازه زمانی کمینه

- Shimazaki, T., 1955, World daily variability in the height of the maximum electron density of the ionospheric F2- layer: J. Radio Res. Labs., (Japan), **2**, 85-97.
- Sibanda, P., and McKinnell, L. A., 2009, Evaluating the IRI topside model for the South African region: An overview of the modelling techniques: Journal of Advances in Space Research, **44**, 707-714.
- Stankov, S. M., Jakowski, N., and Stefan H, 2003, A new method for reconstruction of the vertical electron density distribution in the upper ionosphere and plasmasphere: J. Geophys. Res., **108**, 1164-1185.
- Rishbeth, H., and Garriot O. K., 1969, Introduction to ionospheric: Physics, Academic Press, New York.
- Sethi, N. K., Dabas, R. S., and Kavita S., 2008, Comparison between IRI predictions and digital ionosonde measurements of hmF2 at New Delhi during low and moderate solar activity: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, **70**, 756-763.
- Sethi, N. K., Dabas, R. S., and Vohra, V. K., 2004, Diurnal and seasonal variations of hmF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI2001: Annales Geophysicae, **22**, 453-458.