

اعتبارسنجی مدل یونسپهری IRI-2007 در یک بازه زمانی کمینه فعالیت‌های خورشیدی در منطقه تهران با استفاده از داده‌های ایستگاه یونسپهر (یونسفر) مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

سرمد قادر^{۱*}، خلیل کرمی^۲ و احمد رایین^۳

^۱استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
^۳استادیار بازنشسته، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۷/۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۱۲/۲۴، دسترسی برخط: ۱۳۹۰/۳/۲۵)

چکیده

آگاهی از نحوه توزیع و تغییرات الکترون در لایه F2 یونسپهر در مطالعه توفان‌های خورشیدی و همچنین برآورد و تصحیح تأخیر انتشار یونسپهری موثر بر ارتباطات راه دور، دارای اهمیت فراوان است. برای برقراری ارتباطات مطمئن و بدون نوبه با ماهواره‌ها و همچنین ارتباطات رادیویی زمینی، ضروری است که بسامد بحرانی و همچنین چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهر مشخص شود. در این پژوهش بسامد بحرانی و چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهری در منطقه تهران از تابستان ۱۳۸۵ تا تابستان ۱۳۸۶ مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج آن با خروجی مدل IRI-2007 مقایسه می‌شود. در این بازه زمانی شدت فعالیت‌های خورشیدی کمینه است. مقایسه نشان می‌دهد که مدل یونسپهری IRI-2007 به‌خوبی تغییرات زمانی بسامد بحرانی و چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 را نشان داده است. همچنین این مدل به‌خوبی بی‌هنجاری نیمه‌سالانه را پیش‌بینی کرده است که در آن چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهری در اکتوبر بیشتر از فصل تابستان است. مقایسه‌ها نشان می‌دهد که هنگام استفاده از مدل، زیرروال CCIR نسبت به زیرروال URSI پیش‌بینی بهتری در منطقه تهران به نمایش می‌گذارد. مقایسه روشن می‌سازد که تفاوت بسامد بحرانی لایه F2 حاصل از پیش‌بینی مدل و مشاهدات، کمتر از ۱۲ درصد برای تمام فصول سال است. همچنین خطای مربوط به چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 کمتر از ۲۱ درصد برای تمام فصول سال به‌دست آمده است. به‌این‌ترتیب با توجه به نتایج حاصل، می‌توان از این مدل در بازه‌های زمانی که دسترسی به داده‌های اندازه‌گیری شده امکان‌پذیر نیست، استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: یونسپهر، بسامد بحرانی لایه F2 یونسپهر، چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهر، مدلسازی و پیش‌بینی یونسپهر

Validation of IRI-2007 ionospheric model predictions over the Tehran area during a low solar activity period using data of ionospheric station of the Institute of Geophysics, University of Tehran

Sarmad Ghader^{1*}, Khalil Karami¹, and Ahmad Raean¹

¹Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 29 September 2010, accepted: 15 March 2011, available online: 15 June 2011)

*Corresponding author:

sghader@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

Summary

The outer part of the upper atmosphere, the ionosphere, is where free electrons formed by solar X-rays and extreme ultraviolet (EUV) radiation play an important role in radio and satellite communication. Knowledge of the critical frequency and maximum electron density of the F2 ionospheric layer distribution is crucial for ionospheric storm studies and the estimation and correction of propagation delays in telecommunications. It has proven that the F2 ionospheric layer can significantly affect the propagation of radio waves. The ionosphere can be used to reflect radio signals over long distances. Indeed, the ionosphere is an efficient reflector with frequencies below approximately 30 MHz. Also, it can be useful to study the variability of the F2 ionospheric layer to show that this layer is affected primarily by space weather phenomena, mostly of solar origin such as the solar zenith angle, solar ionizing radiation, and the solar cycle. These extraterrestrial phenomena control the ionosphere from above. Some other waves enter the ionosphere from below and can cause some significant changes in the F2 ionospheric layer.

The International Reference Ionosphere (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 offers a description of the average ionosphere. It is a mathematical description of the ionosphere as a function of location, time, altitude, solar activity and geomagnetic activity. Periodic updates to this model are essential to maintaining its prediction ability. A large number of independent studies have evaluated the IRI model in comparisons with direct and indirect ionospheric measurements, those not used in the model development. A favorable comparison with IRI model is often one of the major goals of ionospheric teams all over the world.

In this work, to evaluate the latest available ionospheric model, IRI-2007, we have obtained hourly monthly values of foF2 and NmF2 over the Tehran area (35.4N, 51.2E, 52.7dip) during low solar activity period, in which the Rz12 (12-month running average sunspot number) varies between 7.7 and 15.3 from July 2006 to June 2007. Data measured using the IPS-71 at the ionospheric station at the Institute of Geophysics at the University of Tehran (35.4N, 51.2E, 52.7dip) were used to perform the calculations. Subsequently, the observed critical frequency and maximum electron density of the F2 ionospheric layer is compared with IRI-2007 model predictions. To run the IRI2007 model, the URSI and CCIR coefficients were used.

Our study shows that values of the foF2 and NmF2 parameters have the highest values during the daytime hours and the lowest values occur at pre-sunrise hours. Our study shows that the IRI-2007's ability to predict semi-annual anomalies with a maximum electron density of the F2 ionospheric layer are most accurate in the summer and less so during the autumn and spring.

In general, the predictions obtained with CCIR and URSI are similar. Our results show that IRI-2007 can successfully predict the critical frequency and maximum electron density of the F2 ionospheric layer. Additionally, our study shows that differences between the foF2(OBS) and the foF2(IRI-2007) remains below 12% during all seasons. The best agreement occurs during the summer and winter, and the largest differences are observed in the spring and autumn. The average percentage deviation of a full year registers at approximately 6.5% for CCIR and nearly 8% for URSI coefficients. Moreover, our results show that the percentage deviation between the NmF2(OBS) and the NmF2(IRI-2007) remains lower than 21% during all seasons. The total average percentage deviation of a full year is approximately 13% for the CCIR coefficient and nearly 16.5% for the URSI.

This result shows that the IRI-2007 has been able to predict ionospheric parameters correctly. Therefore, the IRI-2007 predictions can be used for cases in which the observed data are missing.

Key words: Ionosphere, critical frequency of F2 ionospheric layer, maximum electron density of F2 ionospheric layer, ionospheric modeling, ionospheric prediction

۱ مقدمه

یونوسفر زمین یک لایه ساده و بی تغییر اطراف زمین نیست بلکه به طور پیوسته تحت تاثیر خورشید و توفان‌های خورشیدی (واداشت از بالا)، میدان مغناطیسی زمین، توفان‌های سطح زمین (واداشت از پایین) و گردش گرم‌سپهری (ترموسفری) قرار دارد (آتاچ و همکاران، ۲۰۰۹). پیش‌بینی رفتار لایه یونوسفر در بررسی دینامیک جو بالا و همچنین ارتباطات رادیویی زمینی و زمین‌فضا دارای اهمیت فراوان است (اویناتس و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به اهمیت نوارهای بسامدی در ارتباطات رادیویی زمینی، و همچنین، زمین‌فضا و نیز وابستگی پدیده‌های انتشار امواج به بسامد و محدودیت منابع بسامد رادیویی، نیاز به پیش‌بینی رفتار جو در مقابل انتشار امواج الکترومغناطیسی ضروری است. در واقع یونوسفر تاثیر بسزایی در ارتباطات با ماهواره‌ها دارد. این تاثیرات می‌تواند به صورت ارتباط زمین‌فضا (ایستگاه زمینی-ماهواره) یا ارتباطات فضافضا (ماهواره-ماهواره) مطرح باشد. این نیازها سبب مدل‌سازی یونوسفر و پیش‌بینی رفتار یونوسفر شده است (ازکوور و همکاران، ۲۰۰۸). یکی از مدل‌های پیش‌بینی کننده رفتار لایه یونوسفر مدل IRI-2007 (International Reference Ionosphere) است که کاربردهای وسیعی در زمینه ارتباطات با ماهواره‌ها دارد. این مدل یک طرح مشترک میان COSPAR (Committee on Space Research) و URSI (International Union of Radio Science) است که از ۱۹۷۸ اقدام به پیش‌بینی رفتار یونوسفر کرده است (بیلیترا و رینیش، ۲۰۰۸). مدل یونوسفری IRI-2007 در

سراسر جهان به طور گسترده برای پیش‌بینی رفتار یونوسفر مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجاکه این مدل با به کارگیری روابط تجربی و نیمه تجربی مربوط به داده‌های یونوسفری اندازه‌گیری شده در مناطق اروپایی و آمریکایی تهیه شده، برای استفاده از این مدل در خارج از مناطق پیش‌گفته، ارزیابی پیش‌بینی‌های حاصل از این مدل در این مناطق ضروری است. اعتبارسنجی این مدل را محققان گوناگونی برای نقاط متفاوت به انجام رسانده‌اند. البته تا آنجا که اطلاع در دست است، تاکنون پژوهشی در این زمینه در کشور ما صورت نگرفته است اما ارزیابی و اعتبارسنجی مدل IRI برای نواحی خارج از منطقه اروپا و آمریکا در مناطق گوناگونی به انجام رسیده است که از آن جمله می‌توان برای نمونه به کارهای صورت گرفته ستهی و همکاران (۲۰۰۴)، ژانگ و همکاران (۲۰۰۷)، راتوسکی و همکاران (۲۰۰۹)، ویچاپانیچ و همکاران (۲۰۱۰)، اولادپو و همکاران (۲۰۱۱)، ایهنلافا و همکاران (۲۰۱۰) و چو و لی (۲۰۰۸) اشاره کرد. در ارزیابی‌های این محققان، اغلب از پارامترهای بسامد بحرانی لایه F2، چگالی الکترونی لایه F2، پارامتر انتشار، بیشینه ارتفاع لایه F2 و محتوای کلی الکترون یونوسفر، برای اعتبارسنجی مدل‌های IRI استفاده شده است. نکته قابل ذکر دیگر این است که بیشتر اعتبارسنجی‌های صورت گرفته، به محدوده عرض‌های جغرافیایی پایین (نزدیک استوا) اختصاص داشته است.

همچنین، لازم به توضیح است که برای اجرای مدل IRI-2007 دو زیرروال موجود است که عبارت‌اند از Committee Consultatif International des

امکان به وجود آمدن بارهای منفی زیاد به علت جذب الکترون‌ها با یون‌های مثبت و شکل گرفتن مولکول‌های خنثی وجود ندارد. تعداد الکترون‌های آزاد موجود در واحد حجم، موسوم به چگالی پلاسما است. با ورود امواج رادیویی به محیط یونیده، میدان‌های الکتریکی متناوب، نوسان‌هایی را در بارهای موجود در محیط یونیده به وجود می‌آورند دامنه نوسانی این ذرات از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$x_0 = \frac{e}{m\omega^2} E_0 \quad (1)$$

در این رابطه m جرم ذره، e بار الکتریکی ذره و x_0 دامنه جابه‌جایی ذره و E_0 دامنه میدان الکتریکی و ω بسامد میدان الکتریکی است. نکته حائز اهمیت این است که برای یون‌های سنگین، دامنه نوسانی بسیار کوچک است. برای مثال مقدار این نسبت برای اکسیژن 29400 مرتبه کوچک‌تر از این نسبت برای الکترون‌های آزاد است. بنابراین، برای محاسبات روی پدیده بازتاب می‌توان بدون توجه و اهمیت دادن به یون‌های سنگین و حالت آنها فقط به اثر الکترون‌های آزاد توجه کرد (راور، ۱۹۶۵).

برای به دست آوردن رابطه مربوط به تاثیر موج الکترومغناطیسی بر الکترون‌ها در محیط یون سپهر، معادلات ماکسول می‌تواند مفید واقع شود.

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} &= -\nabla \times E, B = \mu_0 H \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t}, D = \epsilon_0 E \end{aligned} \quad (2)$$

که در این معادلات E شدت میدان الکتریکی، D چگالی میدان الکتریکی، H شدت میدان مغناطیسی و J چگالی جریان است. اگر چگالی جریان را به صورت $J = NeV$ تعریف کنیم که در آن N تعداد بارها در متر مکعب و V سرعت بارها است و از آنجا که در یون سپهر در حجم‌های ماکروسکوپی یک مناسب تعداد بارهای مثبت و منفی با هم برابر است، داریم $\nabla \cdot E = 0$ زیرا یکی از وضعیت‌های

URSI و Radiocommunications (CCIR) (International Union of Radio Science) (برای نمونه، برتونی و همکاران، ۲۰۰۶) که در کار حاضر هر دوی این زیرروال‌ها اجرا شده است و نتایج مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

۲ داده‌های یون سپهری

در این تحقیق از داده‌های ایستگاه یون سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (35.4N, 51.2E, 52.7dip) استفاده شده است. بازه زمانی داده‌ها حدود ۱ سال و از تابستان ۱۳۸۵ شمسی تا تابستان ۱۳۸۶ شمسی را دربر می‌گیرد. این بازه زمانی در کمینه لکه‌های خورشیدی واقع شده و تعداد لکه‌های خورشیدی بین ۷/۷ و ۱۵/۳ قرار دارد. اطلاعات مربوط به تعداد لکه‌های خورشیدی از پایگاه اینترنتی (<http://www.ips.gov.au/Solar/1/6>) قابل دسترسی است.

ایستگاه یون سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران از دستگاه IPS71 استفاده می‌کند. این دستگاه سونداژ قائم یون سپهری را به‌طور متناوب و برای فواصل زمانی قابل تنظیم (برای مثال هر ساعت دو بار) صورت می‌دهد و بسامد بحرانی هر لایه و همچنین ارتفاع مجازی آنها را روی آینوگرام‌ها ثبت می‌کند. بسامد بحرانی یک لایه یون سپهری بالاترین بسامدی است که یک موج الکترومغناطیسی می‌تواند داشته باشد تا از آن لایه یون سپهری بازتابیده شود.

۳ محاسبه چگالی الکترونی

در این بخش نحوه محاسبه چگالی الکترونی به صورت مختصر تشریح می‌شود. عمل یونش در یون سپهر، الکترون‌ها را از مولکول‌ها جدا می‌کند و به این ترتیب بارهای آزاد را در یون سپهر به وجود می‌آورد. یون‌های مثبتی که به وجود می‌آیند سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند و

مشخصه پلاسما، حالت خنثای آنها در حجم‌های ماکروسکوپی است که در اثر توازن بار فضایی یون‌های مثبت و الکترون‌ها پدید می‌آید.

بدین ترتیب معادله موج مربوط به حرکت بارهای آزاد در محیط یون‌سپهر به صورت زیر است:

$$\nabla^2 E = \mu_0 N e^2 \frac{E}{m} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (3)$$

با فرض اینکه جواب معادله اخیر یک موج ریاضی که معادله آن به صورت $E = E_0 \exp(i(\omega t - k \cdot r + \phi_0))$ است که در آن عدد موج به صورت $k = \frac{\omega}{c}$ تعریف می‌شود و با فرض اینکه این موج تحت فقط در راستای محور zها منتشر می‌شود و با در نظر گرفتن n به منزله اندیس بازتاب به صورت $n = \frac{c}{v}$ که در آن v سرعت موج است، آن‌گاه رابطه پاشندگی برای گازهای یونیده به صورت زیر به دست می‌آید:

$$n^2 = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon_0} N \frac{e^2}{m} \right) \frac{1}{\omega^2} \quad (4)$$

که در آن، ϵ_0 ضریب گذردهی خلا، ω بسامد پلاسما، N چگالی ذرات و n نیز ضریب شکست محیط است. با توجه به نسبت $\frac{e^2}{m}$ ، این الکترون‌ها هستند که اثر قطعی روی رابطه پاشندگی دارند.

اگر بسامد موج ارسالی با بسامد پلاسما مساوی باشد، بازتاب طبق رابطه زیر صورت می‌گیرد:

$$N_e = \epsilon_0 \frac{m}{e^2} f^2 = 12400 \times f^2 \quad (5)$$

در این رابطه N_e چگالی الکترونی ذرات و f بسامد بحرانی موج ارسالی است همچنین در این رابطه بسامد بحرانی بر حسب مگاهرتز و چگالی الکترونی بر حسب تعداد الکترون و به صورت تعداد الکترون بر سانتی‌متر مکعب است. (راور، ۱۹۶۵).

بدین ترتیب با در دست داشتن بسامد بحرانی موج ارسالی می‌توان چگالی الکترونی نواحی گوناگون یون‌سپهر را محاسبه کرد. همان‌گونه که پیش از این نیز ذکر شد، بسامد بحرانی نیز با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده از روی آینوگرام‌های ثبت شده استخراج می‌شود.

۴ نتایج

در ادامه به تشریح نتایج به دست آمده پرداخته می‌شود. ابتدا، نتایج مربوط به محاسبه بسامد بحرانی لایه F2، و همچنین، چگالی الکترونی حاصل از مشاهدات و اجرای مدل داده می‌شود. نتایج پیش‌گفته امکان مقایسه کیفی را فراهم می‌کنند. در ادامه، مقایسه نتایج به صورت کمی آورده شده است.

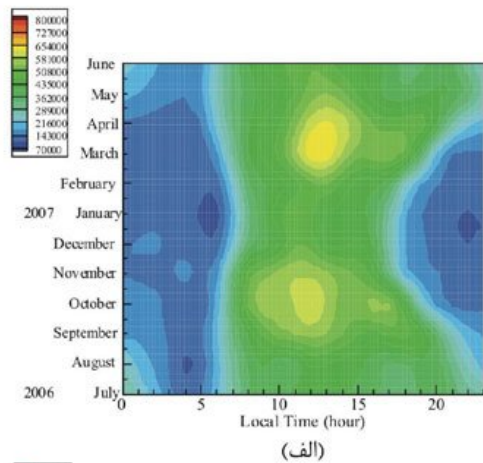
۴-۱ بسامد بحرانی لایه F2

شکل ۱-الف مقادیر بسامد بحرانی لایه F2 یون‌سپهری مشاهده شده در ایستگاه یون‌سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران را برای بازه زمانی تابستان ۱۳۸۵ تا تابستان ۱۳۸۶ نشان می‌دهد. شکل‌های ۱-ب و ۱-ج نیز به ترتیب مقادیر بسامد بحرانی لایه F2 یون‌سپهری حاصل از اجرای مدل IRI-2007 با زیرروال‌های CCIR و URSI است. شکل‌ها توافق خوب بین نتایج حاصل از مدل را با مشاهدات نشان می‌دهند.

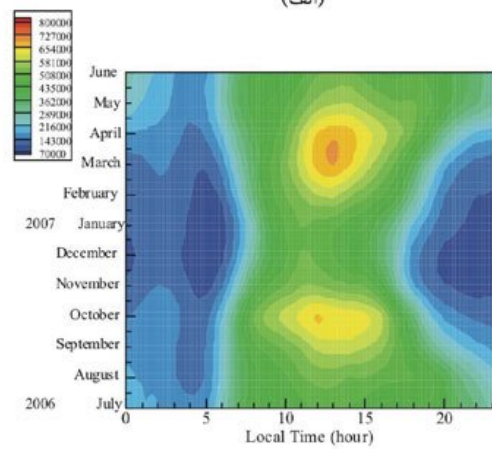
۴-۲ چگالی الکترونی

شکل ۲-الف مقادیر چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری محاسبه شده در ایستگاه یون‌سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران را نشان می‌دهد. شکل‌های ۲-ب و ۲-ج نیز به ترتیب مقادیر چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری حاصل از اجرای مدل IRI-2007 با زیرروال‌های CCIR و URSI را نشان می‌دهند. همان‌گونه

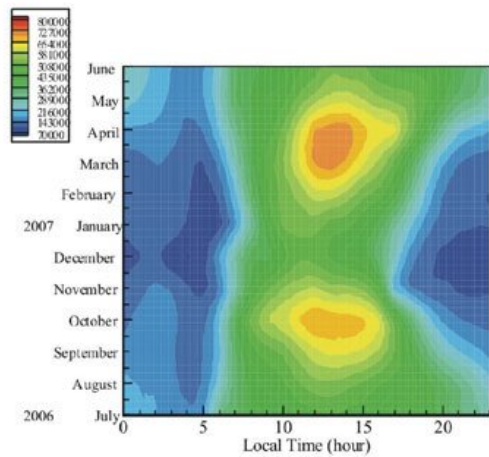
که مشاهده می‌شود توافقی مناسبی میان نتایج حاصل از مدل با مشاهدات وجود دارد.



(الف)

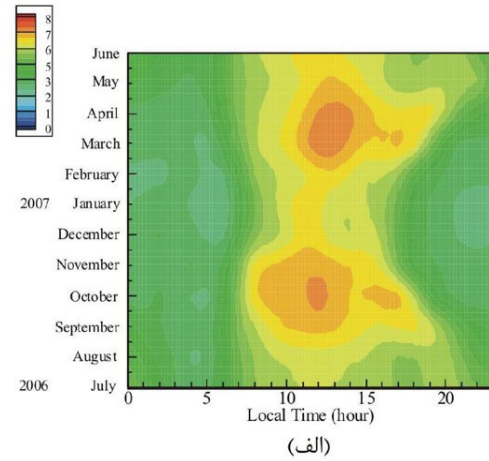


(ب)

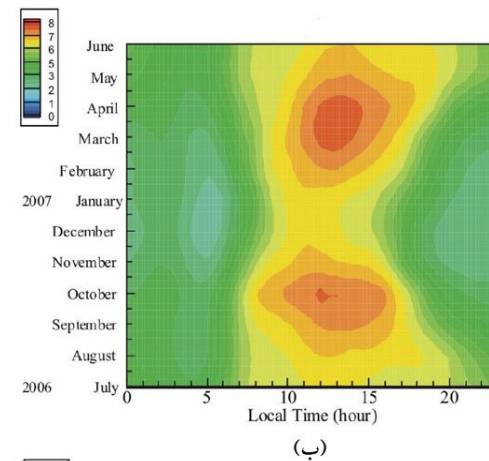


(ج)

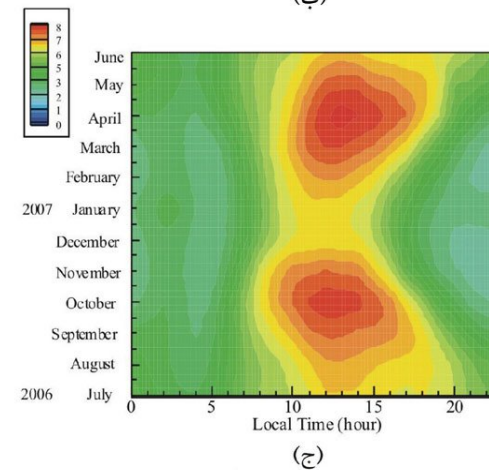
شکل ۲. پربندهای چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهری (NmF2) برحسب تعداد الکترون بر سانتی‌متر مکعب، (الف) حاصل از محاسبات در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، (ب) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 با استفاده از زیرروال CCIR و (ج) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 با استفاده از زیرروال URSI.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱. پربندهای بسامد بحرانی لایه F2 یونسپهری (foF2) برحسب مگاهرتز، (الف) در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، (ب) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 با استفاده از زیرروال CCIR و (ج) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 با استفاده از زیرروال URSI.

لایه F2 یون‌سپهری در طول روز به آرامی ایجاد می‌شود و بعد از طلوع خورشید الکترون‌ها با واکنش‌های متفاوت ناپدید می‌شوند. همین‌طور شکل‌های ۱-الف و ۲-الف نشان می‌دهند که بسامد بحرانی و همچنین چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری دارای بیشینه‌هایی در اعتدالین است. این بیشینه‌ها را که به آنها بی‌هنجاری نیمه‌سالانه گفته می‌شود با نظریه ساده‌ای که بیانگر این نکته باشد که بسامد بحرانی و همچنین چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 تنها تابعی از زوایه سمت‌الرأسی خورشید هستند، نمی‌توان توضیح داد. در واقع نمی‌توان تعادل واضحی را بین تولید و نابودی الکترون در لایه F2 یون‌سپهر در نظر گرفت، اما با توجه به شکل‌های ۱-الف و ۲-الف مشخص است که در طول فصل زمستان بسامد بحرانی و چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری در طول روز به آرامی به مقدار بیشینه‌اش می‌رسد و کمی بعد از ظهر کاهش چگالی الکترون را شاهد هستیم که بعد از غروب آفتاب روند آن سریع‌تر می‌شود.

اما مشاهدات فصل تابستان به‌طور کلی متفاوت از زمستان است زیرا در طول فصل تابستان دو بیشینه در چگالی الکترونی بیشینه وجود دارد که یکی کمی قبل از ظهر و دیگری در نزدیکی غروب خورشید رخ می‌دهد. در ضمن کاهش شبانه در تابستان بسیار آرام‌تر از فصل زمستان است. این رفتارها نشان می‌دهند که فرایندهای متعدد فیزیکی و شیمیایی در تغییر و تحول لایه‌های یون‌سپهر موثرند.

باز ترکیب و اتصال، دو فرایند مهمی هستند که سبب از بین رفتن الکترون‌ها در یون‌سپهر می‌شوند. در فرایند باز ترکیب، الکترون با یک یون مثبت ترکیب می‌شود و در فرایند اتصال الکترون با یک یون خنثی ترکیب می‌شود و یک یون منفی شکل می‌گیرد. هر چند که در تابستان تولید یون‌ها به علت تابش شدیدتر خورشید، بیشتر از اعتدالین است اما آهنگ از بین رفتن الکترون‌ها در تابستان

۳-۴ مقایسه نتایج حاصل از اجرای مدل IRI-2007

با مقادیر مشاهدات

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

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

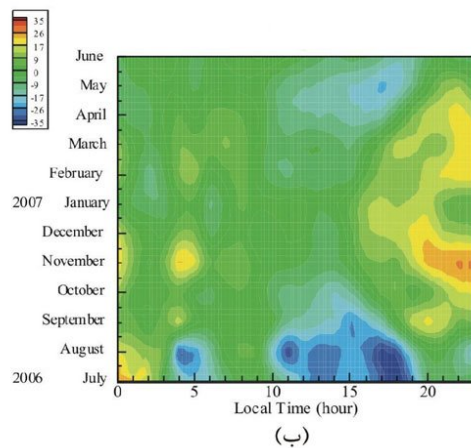
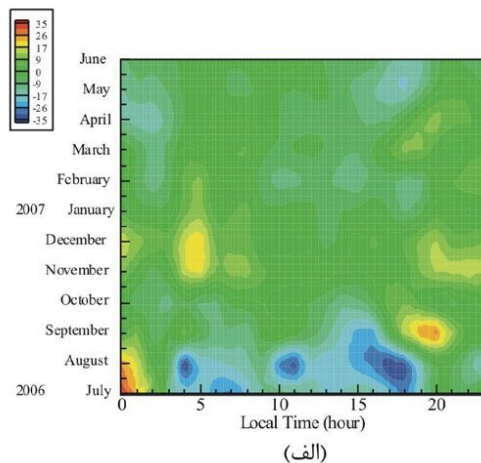
که در آن، pd درصد انحراف و x_{iO} و x_{iM} به ترتیب بیانگر مقادیر پیش‌بینی و مشاهده هستند.

شکل ۳-الف پربندهای درصد انحراف بسامد بحرانی

لایه F2 یون‌سپهری حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(CCIR) با مقادیر مشاهده شده در ایستگاه یون‌سپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران را نشان می‌دهد. همین‌طور شکل ۳-ب درصد انحراف بسامد بحرانی لایه F2 یون‌سپهری حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(URSI) با مقادیر مشاهده شده در ایستگاه یون‌سپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران را نشان می‌دهد. به‌طور مشابه شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نیز به ترتیب پربندهای درصد انحراف چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(CCIR) و IRI-2007(URSI) را از مقادیر مشاهده شده در ایستگاه یون‌سپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران نشان می‌دهند.

با توجه به شکل‌های ۳-الف تا ۴-ب می‌توان نتیجه گرفت که مدل IRI-2007 به‌خوبی روند تغییرات کلی روزانه و فصلی بسامد بحرانی و همچنین چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری را پیش‌بینی کرده است.

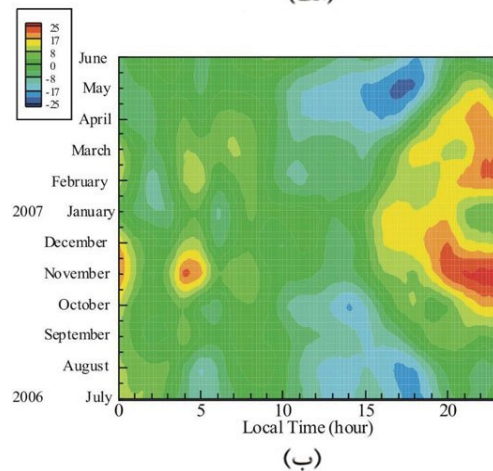
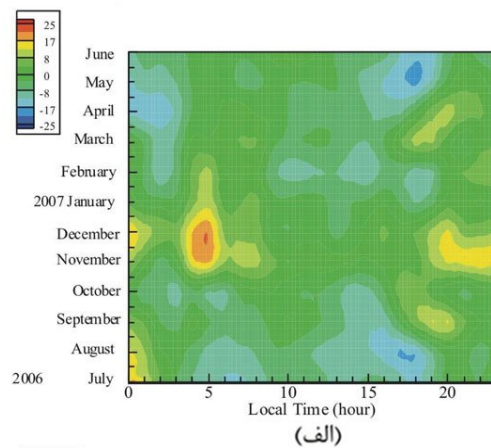
به‌علاوه همان‌طور که در شکل‌های ۱-الف و ۲-الف مشاهده می‌شود، بسامد بحرانی لایه F2 یون‌سپهری و همچنین چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 در طول شب؛ هم در فصل زمستان و هم در فصل تابستان، نسبت به روز، مقادیر کمتری دارند. کمینه مقادیر کمی قبل از طلوع خورشید است. این مشاهده منطقی به نظر می‌رسد یعنی



شکل ۴. پربندهای درصد انحراف چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهری، (الف) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(CCIR) با مقادیر محاسبه شده در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و (ب) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(URSI) با مقادیر محاسبه شده در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

همچنین مقادیر متوسط قدرمطلق درصد انحراف مدل IRI-2007 نسبت به مقادیر مشاهده شده در جدول ۱ آورده شده است. انحراف میان مشاهدات و نتایج مدل IRI-2007 نشان می‌دهد که بیشترین انحراف مدل با مشاهدات در دو فصل پاییز و بهار رخ داده است و این مورد برای هر دو پارامتر بسامد بحرانی و چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهر روی داده است. همچنین همان‌طور که در جدول شماره ۱ مشخص است، استفاده از زیرروال CCIR نسبت

نیز شدیدتر از اعتدالین است. برآیند این دو سبب می‌شود که مقدار چگالی الکترونی بیشینه در تابستان کمتر از اعتدالین باشد. علت کم بودن آهنگ نابودی الکترون‌ها در اعتدالین با چگالی نیتروژن و اکسیژن مولکولی ارتباط دارد که در اعتدالین کاهش پیدا می‌کنند. با توجه به اینکه یون‌های نیتروژن منفی پایدار نیستند اما یون‌های اکسیژن منفی پایداری خوبی دارند، فرایند اتصال وابسته به چگالی اتم‌های اکسیژن است. هرچه این چگالی بیشتر باشد، یونش سریع‌تر از بین می‌رود (ریشبس و همکاران، ۲۰۰۰؛ یونزواو، ۱۹۵۹).



شکل ۳. پربندهای درصد انحراف بسامد بحرانی لایه F2 یونسپهری، (الف) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(CCIR) با مقادیر مشاهده شده در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و (ب) حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007(URSI) با مقادیر مشاهده شده در ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

کاهش می‌یابد. همچنین در اینجا می‌باید به این نکته اشاره کرد که با توجه به کارهای محققان گوناگون، از جمله کار از کوور و همکاران (۲۰۰۸) برای پارامتر NmF2 مقادیر درصد انحراف کمتر از ۳۰ درصد در محدوده پیش‌بینی‌های مناسب و خوب قرار می‌گیرند و در واقع مقادیر پیش‌بینی‌شده با مدل، معنادار خواهند بود. جدول ۲، درصد مربوط به داده‌های مورد استفاده در کار حاضر را که دارای انحراف کمتر و بیشتر از ۳۰ درصد هستند، برای پارامتر NmF2 حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 با استفاده از هر دو زیرروال ممکن نشان می‌دهد. با توجه به جدول مشخص است که بخش قابل توجهی از داده‌های پیش‌بینی‌شده در بازه داده‌های معنادار قرار می‌گیرند و البته مدل با زیرروال CCIR عملکرد بهتری نشان می‌دهد. همچنین ذکر این نکته در اینجا ضروری است که در جدول ۱، مقادیر میانگین آورده شده است.

برای مقایسه با سایر تحقیقات صورت گرفته می‌توان نتایج به دست آمده را با کار از کوور و همکاران (۲۰۰۸) مقابله کرد. در کار از کوور و همکاران (۲۰۰۸) نتایج حاصل از پیش‌بینی برای پارامتر NmF2 با استفاده از مدل IRI-2001 و به کارگیری زیرروال CCIR، نشان می‌دهد که ۸۴ درصد از داده‌های به دست آمده دارای درصد انحراف کمتر از ۳۰ درصد بوده‌اند، در حالی که در کار حاضر، نتایج برای همین پارامتر و با استفاده از مدل IRI-2007 با زیرروال CCIR نشان می‌دهد که حدود ۹۸ درصد از داده‌ها دارای درصد انحراف کمتر از ۳۰ درصدند. همچنین روند مشابهی برای پیش‌بینی‌های حاصل از مدل IRI با زیرروال URSI نیز مشاهده می‌شود.

به زیرروال URSI موجب بروز خطای کمتری در پیش‌بینی پارامترها شده است.

همچنین مقایسه مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده نشان می‌دهد که زیرروال CCIR در بعدازظهرهای دو فصل بهار و تابستان و در ساعت‌های شب فصل بهار مقادیر پیش‌بینی بیشتری نسبت به مشاهدات داشته است. همچنین زیرروال CCIR در دو ماه دسامبر و نوامبر سال ۲۰۰۶ میلادی و در ساعت‌های نزدیک به طلوع خورشید، مقادیر کمتری را نسبت به مشاهده پیش‌بینی کرده است.

در مورد زیرروال URSI نیز وضعیت مشابهی دیده می‌شود؛ به استثنای اینکه در این زیرروال مقادیر پیش‌بینی شده به طور قابل توجهی کمتر از مقادیر مشاهده شده در شب‌هنگام و در دو فصل بهار و پاییز است.

در مورد پارامتر چگالی الکترونی بیشینه نیز وضعیت مشابهی نسبت به بسامد بحرانی مشاهده می‌شود. البته مقادیر درصد خطا در مورد چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهری نسبت به بسامد بحرانی بیشینه لایه F2 یونسپهری بیشتر است.

باید به این نکته توجه کرد که برای محاسبه محتوای کلی الکترون یونسپهر به مقادیر محاسبه شده چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 نیاز است. محتوای کلی الکترون یونسپهر پارامتری است که از دیدگاه‌های متفاوت از جمله بررسی توفان‌های مغناطیسی، بررسی ترکیبات یونی در جو و تحقیق در تاثیر شرایط فضا بر ارتباطات راه دور، دارای اهمیت فراوانی است (استانکوف و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین، هرچه میزان خطای موجود در محاسبات مربوط به چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 کمتر باشد، خطای محتوای کلی الکترون یونسپهر محاسبه شده نیز

جدول ۱. متوسط قدرمطلق درصد انحراف مدل IRI-2007 نسبت به مقادیر مشاهده‌شده برای بسامد بحرانی و مقادیر محاسبه شده چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یون‌سپهری در ایستگاه یون‌سپهر موسسه ژئوفیزیک.

Month	Critical frequency		Maximum electron density	
	IRI2007 (CCIR)	IRI2007 (URSI)	IRI2007 (CCIR)	IRI2007 (URSI)
July 2006	۷/۶۶	۸/۴۱	۱۴/۸۷	۱۶/۳۰
August 2006	۸/۵۰	۸/۲۹	۱۹/۵۹	۱۹/۱۵
September 2006	۵/۷۷	۵/۱۱	۱۰/۴۵	۱۰/۲۴
October 2006	۵/۷۴	۷/۶۸	۱۰/۸۴	۱۷
November 2006	۷/۳۵	۱۱/۳۶	۱۵/۳۵	۲۱/۴۱
December 2006	۷/۷۰	۸/۵۳	۱۵/۷۹	۱۷/۰۴
January 2007	۳/۵۵	۶/۰۴	۷/۰۹	۱۲/۸۷
February 2007	۷/۱۱	۹/۰۸	۱۴/۶۴	۱۷/۹۴
March 2007	۴/۷۴	۸/۲۴	۹/۹۹	۳۷/۱۶
April 2007	۶/۶۹	۹/۶۴	۱۳/۰۷	۱۸/۸۸
May 2007	۷/۰۸	۸/۹۵	۱۳/۳۸	۱۷/۷۵
June 2007	۶/۰۷	۵/۵۹	۱۱/۰۴	۱۰/۷۹
Average	۶/۴۹	۸/۰۷	۱۳	۱۶/۳۱

جدول ۲. درصد داده‌هایی که دارای قدرمطلق درصد انحراف بیشتر یا کمتر از ۳۰ درصد برای پارامترهای Nmf2 هستند.

درصد داده‌های با میزان درصد انحراف بیشتر از ۳۰ درصد	درصد داده‌های با میزان درصد انحراف کمتر از ۳۰ درصد	مدل
۱/۷	۹۸/۳	IRI2007 (CCIR)
۸/۸	۹۱/۲	IRI2007 (URSI)

۵ نتیجه گیری

همچنین نویسندگان لازم می دانند که از آقای دکتر ایرج ملک پور به خاطر عرضه دیدگاه‌های ارزشمند در طول این پژوهش تشکر کنند.

منابع

- Atac, T., Ozguc, A., and Pictac, R., 2009, The variability of foF2 in different phases of solar cycle 23: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **71**, 583-588.
- Bertoni, F., Sahai, Y., Lima, W. L. C., Fagundes, P. R., Pillat, V. G., Becker-Guedes, F., and Abalde, J. R., 2006, IRI-2001 model predictions compared with ionospheric data observed at Brazilian low latitude stations: *Annales Geophysicae*, **24**, 2191-2200.
- Bilitza, D., and Reinisch, B. W., 2008, International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters: *Advances in Space Research*, **42**, 599-609.
- Chuo, Y. J., and Lee, C. C., 2008, Ionospheric variability at Taiwan low latitude station: comparison between observations and IRI-2001 model: *Advances in Space Research*, **42**, 673-681.
- Ehinlafa, O. E., Falaiye, O. A., and Adeniyi, J. O., 2010, Comparison of observed hmF2 and IRI 2007 model with M(3000)F2 estimation of hmF2 at low solar activity for an equatorial station: *Advances in Space Research*, **46**, 89-93.
- Ezquer, M. R. G., Scidá, M. L., and López, J., 2008, Peak characteristics of F2 region over Tucuman: predictions and measurements: *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **70**, 1525-1532.
- Oinats, A. V., Kotovich, G. V., and Ratovsky, K. G., 2006, Comparison of the main ionospheric characteristics measured by the digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 model data: *Advances in Space Research*, **37**, 1018-1022.
- Oladipo, O. A., Adeniyi, J. O., Radicella, S. M., and Adimula, I. A., 2011, Variability of the ionospheric electron density at fixed heights and validation of IRI-2007 profile's prediction at Ilorin: *Advances in Space Research*, **47**, 496-505.
- 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.

هدف از کار حاضر اعتبارسنجی مدل یونسپهری IRI-2007 در منطقه تهران بوده است. برای رسیدن به این هدف نتایج حاصل از مدل IRI-2007 با مقادیر مشاهده شده بسامد بحرانی لایه F2 یونسپهری و همچنین چگالی الکترونی بیشینه محاسبه شده لایه F2 یونسپهری ایستگاه یونسپهر موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از مقایسه نشان می‌دهد که مدل IRI به خوبی روند تغییرات کلی روزانه و فصلی بسامد بحرانی و چگالی الکترونی بیشینه لایه F2 یونسپهری را پیش‌بینی کرده است. همچنین نتایج حاصل موید این نکته هستند که مدل به جز چند مورد اختلاف در فصل‌های متفاوت، توانایی مناسبی را از خود برای نشان دادن تغییرات لایه F2 یونسپهر در منطقه تهران به‌نمایش گذاشته است. همچنین مقایسه‌ها نشان می‌دهد که زیرروال CCIR پیش‌بینی بهتری نسبت به زیرروال URSI در منطقه تهران داشته است.

مقایسه کمی نتایج به‌دست آمده روشن می‌سازد که میانگین درصد انحراف بسامد بحرانی لایه F2 حاصل از پیش‌بینی مدل IRI-2007 با هر دو زیرروال ممکن برای همه فصل‌های سال، کمتر از ۱۲ درصد است. به‌علاوه نتایج پیش‌بینی مدل برای پارامتر چگالی الکترونی بیشینه لایه F2، میزان میانگین درصد انحراف کمتر از ۲۱ درصد را در همه فصل‌های سال برای این پارامتر نشان می‌دهد. درصد انحراف کمتر به‌دست آمده برای بسامد بحرانی روشن می‌سازد که مدل عملکرد بهتری را برای پیش‌بینی این پارامتر در منطقه تهران از خود نشان می‌دهد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از دانشگاه تهران به‌دلیل حمایت از این کار پژوهشی، و همچنین، از بخش پژوهشی یونسپهر مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به‌دلیل در اختیار گذاشتن داده‌های یونسپهری اندازه‌گیری شده تشکر می‌کنند.

- Wichaipanich, N., Supnithi, P., Ishii M., and Maruyama, T., 2010, Ionospheric variation at Thailand equatorial latitude station: comparison between observations and IRI-2001 model predictions: *Advances in Space Research*, **45**, 284-293.
- Yonezawa, T., 1959, On the seasonal and nonseasonal annual variations and the semiannual variation in the noon and midnight densities of the F2 layer in middle latitudes: *J. Radio Res. Lab. Jpn.*, **6**, 651.
- Zhang, M-L., Kui Shi, J., Wang, X., Shang, S., and Zhi Wu, S., 2007, Ionospheric behavior of the F2 peak parameters Fof2 and Hmf2 at Hainan and comparisons with IRI model predictions: *Advances in Space Research*, **39**, 661-667.
- The Australian Space Weather Agency, IPS Radio and Space Services, <http://www.ips.gov.au/Solar/1/6>
- Rawer, K., 1965, *The ionosphere*: Frederick Ungar Publishing.
- Rishbeth, H., Muller-wodarg, I. C. F., Zou, L., Fuller-Rowell, T. J., Millward, G. H., Moffett, R. J., Idenden, D. W., and Ayward, A. D., 2000, Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer. II. Physical discussion: *Annales Geophysicae*, **18**, 945-956.
- 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 IRI 2001: *Annales Geophysicae*, **22**, 453-458.
- 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.