

بررسی تغییرات زمانی در لایه F₂ یون‌سپهر (یونسفر)فرزاد شیرزادی تبار^{۱*}، ناصر حسین‌زاده گویا^۲ و احمد رائین^۳^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد ژئوفیزیک، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران^۲ دانشیار گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران^۳ استادیار گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(دریافت: ۸۵/۳/۱۶، پذیرش نهایی: ۸۵/۱۱/۱۸)

چکیده

تغییرات در شدت و زاویه تابش خورشید- که عامل اصلی ایجاد یون‌سپهر است- به سطح زمین در روز و شب و در طول سال، باعث ایجاد تغییراتی در میزان چگالی الکترون‌های یون‌سپهر می‌شود. در این بررسی تأثیر تابش خورشید در طول شبانه روز بر لایه یون‌سپهری F₂ مورد بررسی قرار گرفته است و ارتباط مستقیم ایجاد یونش با تابش خورشیدی نشان داده شده است. همچنین تغییرات یون‌سپهر در طول یک سال که ناشی از چرخش گرم‌سپهر و نیز تغییر ترکیبات جوی است، تحقیق شده است. اثبات وجود تطابق بین دوره تغییرات ۱۱ ساله فعالیت لکه‌های خورشیدی و تغییرات بلندمدت در یون‌سپهر هم مورد بررسی قرار گرفته است.

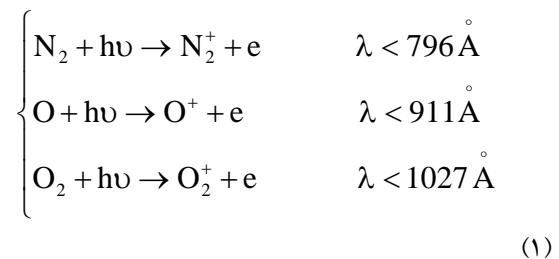
واژه‌های کلیدی: ناهنجاری نیمه‌سالانه، ناهنجاری فصلی، چرخش گرم‌سپهری کلی، ترکیب جوی

۱ مقدمه

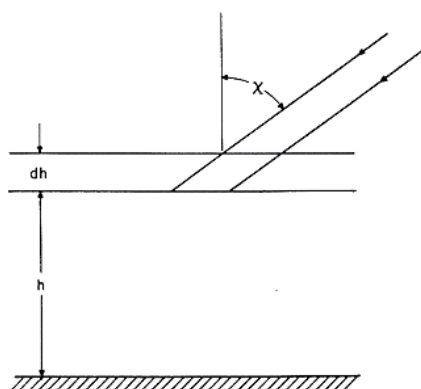
خیلی زیاد است یون‌سپهر می‌نامند. الکترون‌های آزاد شده از مولکول‌ها می‌توانند آزادانه مانند یک جریان الکتریکی حرکت کنند، بنابراین یون‌سپهر یک لایه رسانای جریان الکتریسیته است. یون‌سپهر در پخش امواج رادیویی و سایر امواج با طول موج کوتاه اهمیت زیادی دارد. در واقع تحقیق در مورد ساختار یون‌سپهر به کمک امواج رادیویی صورت می‌گیرد.

یون‌سپهر از چهار طبقه مختلف تشکیل شده است که فاصله و مرز بین آنها و حتی موجودیت آنها برحسب ساعت‌های شب و روز و فصل‌های متفاوت سال تغییر می‌کند. لایه‌های یون‌سپهر عبارت‌اند از لایه D، که در محدوده ارتفاعی ۶۰-۹۰ km قرار دارد و عموماً امواج رادیویی را جذب می‌کند، لایه E که در محدوده ۹۰-۱۴۰ km قرار دارد، لایه F که بالاتر از ۱۴۰ km تا حدود ۳۰۰ km ادامه دارد و در روز به دو زیرلایه F₁ و F₂ تقسیم می‌شود. چون لایه F₂ در سراسر طول شبانه روز

یون‌سپهر نامی است که به طبقات بالای جو (ارتفاع بیش از تقریباً ۸۰ km) داده‌اند چون اتم‌ها و مولکول‌های واقع در این ناحیه یونیده شده‌اند. مولکول‌ها و اتم‌های نیتروژن و اکسیژن جو بالا پرتوهای گاما با انرژی زیاد و پرتوهای ایکس و فرابنفش خورشید را جذب می‌کنند و در حین این عمل هر مولکول یا اتم یک الکترون از دست می‌دهد و به یک مولکول یا اتم با بار مثبت به نام یون تبدیل می‌شود. برای مثال چند فعل و انفعال مهم زیر رخ می‌دهند:



نواحی بالاتر از ۸۰ km تا حدود ۴۰۰ km از سطح زمین را که تجمع یون‌های مثبت و الکترون‌های منفی



شکل ۱. زاویه تابش نور خورشید بر لایه‌های یونسپهر.

$$N \propto \cos^{1/2} \chi \quad (2)$$

۲- اتلاف یونش: در اینجا الکترون‌های آزاد هم به‌طور اساسی با دو فرایند مصرف می‌شوند. یکی از اینها بازترکیب (recombination)، یعنی یکی شدن با یک یون مثبت، است؛ و دیگری اتصال (attachment) با یک مولکول خنثی است که در آن یک یون منفی شکل می‌گیرد که به دلیل وزن زیادش، اهمیت زیادی در اندازه‌گیری‌ها ندارد.

بازترکیب دقیقاً فرایند عکس یونش نوری است. هم در نظریه و هم به صورت تجربی روشن شده است که احتمال وقوع چنین فرایندی خیلی کم است. بازترکیب تنها به احتمال برخورد بین الکترون‌ها و یون‌های مثبت وابسته است که این فقط تابعی از چگالی یونی است نه چگالی گاز. بنابراین بازترکیب دارای احتمال کمتری برای لایه‌های بالاتر نسبت به لایه‌های پایین‌تر نیست - یعنی هرچند که چگالی گاز در لایه‌های پایین‌تر بیشتر است اما دلیل بر این نیست که الکترون‌ها سریع‌تر از بین بروند، چون اگر الکترون‌ها به جای برخورد با یون‌های مثبت با ذرات خنثی برخورد کنند، آن‌گاه یک یون منفی تشکیل خواهد شد (فرایند اتصال). حال چون در لایه‌های پایین‌تر میزان نیتروژن بیشتر است و یون‌های نیتروژن منفی پایدار

حضور دارد و نیز چگالی الکترون‌ها در آن بیشتر از لایه‌های دیگر است، بهتر از لایه‌های دیگر قابل بررسی است.

از مدت‌ها پیش مشخص شده که لایه F_2 یونسپهر زمین دارای ناهنجاری‌هایی است که در آنها رفتار یونسپهر از آنچه که انتظار می‌رفته انحرافاتی داشته است. کروم و همکاران در ۱۹۶۰ و وان‌زانت و نشت در ۱۹۶۴ روشن ساختند که مقادیر ظاهر NmF_2 (چگالی الکترون‌های لایه F_2) زمستانی فراتر از مقادیر تابستانی هستند. یونزاوا هم در ۱۹۵۹ نشان داد که در خیلی از مکان‌ها، بیشینه‌هایی در اطراف اعتدالین و کمینه‌هایی در انقلابین وجود دارد. میلوارد و همکارانش نیز در ۱۹۹۶ با استفاده از مدل خود با نام CTIP (coupled-thermosphere-ionosphere-plasmasphere model)، به نتایج مشابهی در مورد وجود این ناهنجاری‌ها رسیده‌اند.

۲ فرایندهای تولید و اتلاف الکترون

۱- ایجاد یونش: اساساً دو فرایند در ایجاد یونش در جو بالا نقش دارند، یکی تابش نور که در صورتی می‌تواند منجر به یونش شود که به اندازه کافی طول موجش کوتاه باشد، یعنی انرژی کوانتومی نور باید به اندازه کافی برای کندن الکترون از مولکول، زیاد باشد. علاوه بر یونش نوری، تابش ذره‌ای هم می‌تواند یونش ایجاد کند. این ذرات ممکن است اتم‌ها، مولکول‌ها، یون‌ها یا حتی ذرات غبار باشند. در این حالت هم انرژی ذره باید به اندازه کافی زیاد باشد. لایه‌ای که از راه یونش با پرتوهای ذره‌ای ایجاد می‌شود عموماً خیلی نازک‌تر از لایه‌ای است که با یونش نوری پدید می‌آید. شکل ۱ زاویه تابش نور خورشید به لایه‌های یونسپهر و رابطه (۲) ارتباط چگالی الکترون‌ها را با این زاویه نشان می‌دهد (راور، ۱۹۵۶).

کانبرا، استرالیا، ۳۵/۳S و ۱۴۹E

۴ تغییرات روزانه

همان‌طور که گفتیم لایه F₂ تنها لایه نرمالی است که در شب هم یونیده است. در ارتفاع‌های بالا، چگالی هوا آنقدر کم است که یونش خیلی آهسته ناپدید می‌شود، یعنی هیچ تعادلی بین تولید و نابودی الکترون نمی‌توان در نظر گرفت. بنابراین چگالی الکترون‌های این لایه، NmF₂، به آرامی در طول شب به یک دهم یا یک بیستم مقدار اولیه می‌رسد.

چون تعادلی بین تولید و نابودی الکترون برقرار نمی‌شود، چگالی الکترون در روز به آرامی به مقدار بیشینه‌اش خواهد رسید و این چند ساعت بعد از این که خورشید در بالاترین ارتفاع است رخ خواهد داد، یعنی کمی بعد از ظهر، و سپس یک کاهش آرام داریم که بعد از غروب آفتاب سریع‌تر می‌شود و در سراسر شب به شکل نمایی ادامه می‌یابد. این روند در همه ماه‌های زمستانی برای بسامد بحرانی وجود دارد. مشاهدات طول تابستان به‌طور کامل متفاوت‌اند. در این روزها دو بیشینه دیده می‌شود، یکی کمی قبل از ظهر و دیگری در نزدیکی غروب خورشید. در ضمن، کاهش شبانه در تابستان بسیار آهسته است (شکل ۲).

این رفتارها نشان می‌دهند که فرایندها در لایه F₂ بسیار پیچیده‌اند و عوامل متفاوتی در این لایه نقش بازی می‌کنند.

بسامد بحرانی شبانه همان‌گونه که در تابستان کاهش می‌یابد در زمستان هم در طول شب کاهش می‌یابد و به مقدار کمینه کمی قبل از طلوع خورشید می‌رسد. این حالت متناظر با نظریه مستقیم (direct theory) است، یعنی لایه در روز با یونش نوری ایجاد می‌شود و نیز هیچ یونشی در شب رخ نمی‌دهد اما این یونش یاد شده، در طول شب به آرامی ناپدید می‌شود.

نیستند، ممکن است فرایند جدایی الکترون از نیتروژن صورت گیرد.

در فرایند اتصال، الکترون به یک مولکول خنثی یا به یک اتم می‌چسبد تا یک یون منفی تشکیل شود. به نظر نمی‌رسد که یون‌های نیتروژن منفی پایدار باشند اما روشن شده که یون‌های اکسیژن منفی وجود دارند. بنابراین فرایند اتصال وابسته به چگالی اتم‌های اکسیژن است؛ هرچه این چگالی بیشتر باشد، یونش سریع‌تر از بین می‌رود (راور، ۱۹۵۶).

۳ نوع داده‌ها و مرجع آنها

در این بررسی از داده‌های بسامد بحرانی، f_c، لایه F₂ استفاده شده که از مرکز جهانی داده‌ها (World Data Center) واقع در انگلستان برداشت شده است (<http://www.ukssdc.ac.uk>). بسامد بحرانی یک لایه یونسفری بالاترین بسامدی است که موجی الکترومغناطیسی می‌تواند داشته باشد تا از آن لایه یونسفری بازتاب شود.

در اینجا علاوه بر استفاده مستقیم از داده‌های بسامد بحرانی لایه F₂، (foF₂)، از چگالی الکترون‌ها صحبت می‌شود. رابطه چگالی الکترون‌ها با بسامد بحرانی به صورت زیر است:

$$N_m = 1.24 \times 10^{-2} f_c^2 \quad (3)$$

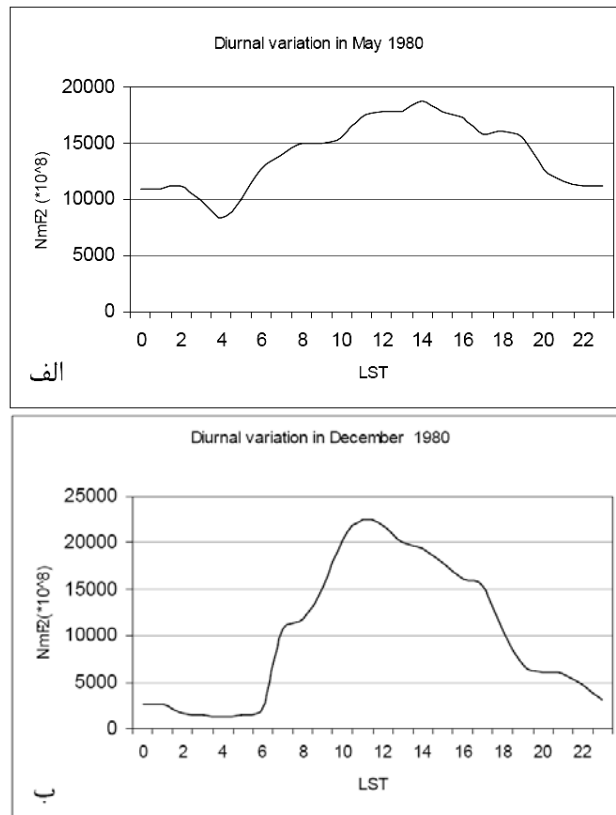
که در آن f_c برحسب هرتز و N_m برحسب m⁻³ هستند. از آنجا که f_c بالاترین بسامد است، چگالی الکترون‌ها هم باید چگالی بیشینه، N_m، باشد. ایستگاه‌های مورد استفاده در این بررسی همراه با موقعیت جغرافیایی در زیر آورده شده‌اند:

رزولوت بی، کانادا، ۷/۵N و ۹۴/۹W

توکیو، ژاپن، ۳۵/۷N و ۱۳۹/۵E

مائیوی، ایالات متحد آمریکا، ۲۰/۸N و ۱۵۶/۵W

تاهیتی، اقیانوس آرام جنوبی، ۱۷/۷S و ۱۴۹/۳W



شکل ۲. تغییرات روزانه NmF_2 برحسب زمان محلی در روز پنجم ماه مه (الف) و روز اول ماه دسامبر (ب) سال ۱۹۸۰ در ایستگاه توکیو. در اینجا NmF_2 برحسب m^{-3} است.

لایه در طول روزهای تابستان گرم می‌شود و آن چنان گسترده می‌شود که کاهش چگالی الکترون ناشی از انبساط لایه، بزرگ‌تر از افزایش نرمال یونش خواهد بود. همچنان‌که دما در عصر کاهش می‌یابد، لایه کوچک‌تر می‌شود و چگالی الکترون دوباره افزایش می‌یابد. این امر به بیشینه‌ای در هنگام عصر منجر خواهد شد، همچنان‌که در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

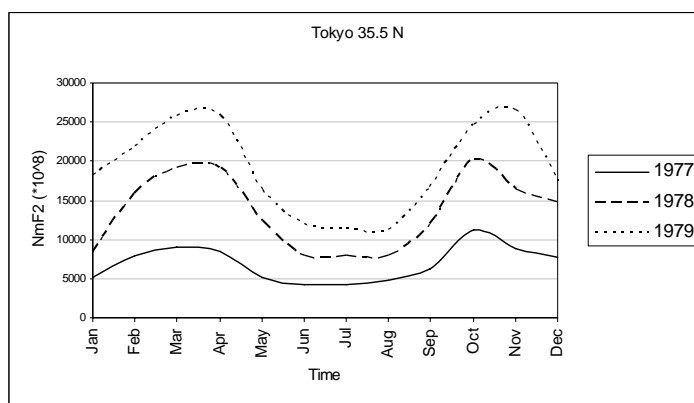
۵ بررسی تغییرات فصلی و نیمه سالیانه

مشاهدات صورت گرفته در طول سال (شکل‌های ۳ و ۴) ناهنجاری‌هایی را نشان می‌دهند که در اینجا به توضیح

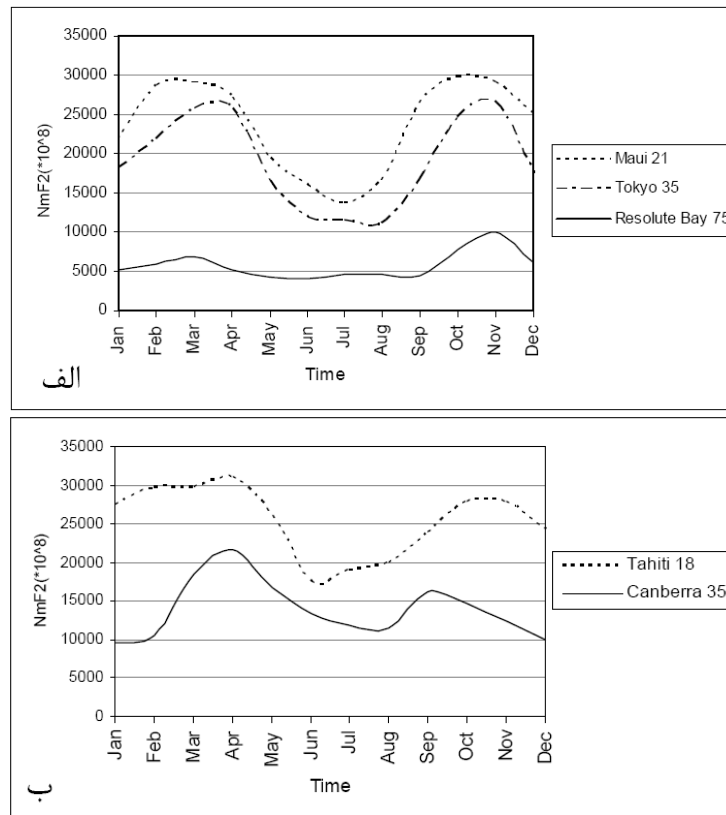
توضیح اندازه‌گیری‌ها در طی روز برای این فصول بسیار مشکل است. به طور تجربی دریافت شده است که بیشینه چگالی الکترون در طول روزهای تابستان کمتر از روزهای زمستان است، اما این به آن معنی نیست که تعداد کل الکترون‌ها در لایه کمتر است، چرا که لایه در تابستان به گستره ارتفاعی بسیار بزرگ‌تری نسبت به زمستان گسترش می‌یابد. بیشتر پیچیدگی‌های ظاهری در رفتار لایه F_2 ، وقتی که مقدار کلی چگالی الکترون جمع‌آوری شده در آن ارتفاع استفاده شود، ظاهر نمی‌شوند. از طرفی در شکل ۲ مشاهده می‌شود که در طول شب، چگالی الکترون‌ها در تابستان بیشتر از زمستان است.

پدیده روزانه است و در شب وجود ندارد (شکل ۵). این ناهنجاری در نیم کره شمالی و جنوبی، ۶ ماه خارج از فاز است (به این دلیل که زمستان و تابستان در نیمکره‌های شمالی و جنوبی ۶ ماه با هم فاصله دارند). بنابراین به طور کلی آن را ناهنجاری فصلی می‌گویند. ناهنجاری زمستانی در کمینه لک‌های خورشیدی وجود ندارد اما با افزایش فعالیت خورشیدی ظاهر می‌شود. ناهنجاری نیمه سالیانه، برخلاف ناهنجاری زمستانی، در کمینه لک‌های خورشیدی هم باقی می‌ماند. میلوارد و همکارانش در ۱۹۹۶ با استفاده از مدل CTIP در دو موقعیت ۵۰°S، ۹۰°W و نیز ۵۰°N، ۹۰°E به نتایج مشابهی رسیدند. در نتیجه مدل آنها، دو بیشینه در اطراف اعتدالین مشاهده می‌شود که همان ناهنجاری نیمه سالیانه است. همچنین مدل آنها وجود ناهنجاری زمستانی (فصلی) را تأیید می‌کند.

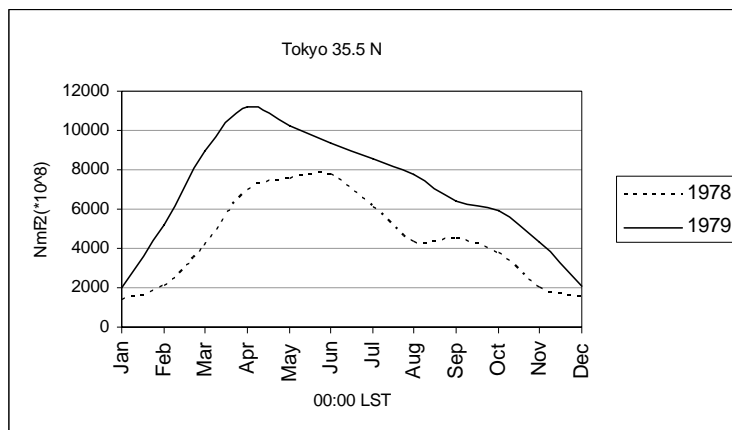
آنها می‌پردازیم. اولین ناهنجاری که از این مشاهدات دیده می‌شود وجود دو بیشینه است که در نزدیکی اعتدالین رخ می‌دهد. این ناهنجاری را ناهنجاری نیمه سالیانه (semiannual) می‌نامند. منشا ناهنجاری نیمه سالیانه پیچیده است. چرخش گرم‌سپهری کلی، بر چگالی نیتروژن و اکسیژن مولکولی در انقلابین می‌افزاید. بنابراین چگالی اکسیژن اتمی را در مقایسه با اعتدالین کاهش می‌دهد. چون گازهای مولکولی و اتمی آهنگ اتلاف و تولید پلاسما را کنترل می‌کنند، یک نسبت کم اتمی به مولکولی منجر به چگالی‌های الکترونی کم در یون سپهر می‌شود. بیشینه‌های تغییر نیمه سالیانه، در ماه‌های آوریل و اکتبر رخ می‌دهند. ناهنجاری دیگر آن است که چگالی الکترون در نیمه روز در زمستان بیشتر از تابستان است. این ناهنجاری به ناهنجاری زمستانی معروف است. ناهنجاری زمستانی



شکل ۳. تغییرات لایه F₂ یون سپهر در توکیو در سال‌های ۱۹۷۷-۱۹۷۹. ناهنجاری‌های نیمه سالیانه و فصلی در هر سه سال در ماه‌های مشابه رخ می‌دهند. NmF₂ بر حسب m⁻³ است. این منحنی از میانگین داده‌های هر ماه برای ساعت ۱۲ ظهر حاصل شده است.



شکل ۴. تغییرات لایه F₂ یونسپهری در پنج ایستگاه یونسپهری در نیمکره‌های شمالی (الف) و جنوبی (ب) در ۱۹۷۹. عرض جغرافیایی هر ایستگاه در کنار نام آن قید شده است و بدیهی است که زمستان و تابستان در نیمکره‌های متفاوت ۶ ماه خارج از فازاند. ناهنجاری‌های نیمه سالیانه و فصلی در همه ایستگاه‌ها، در ماه‌های مشابه رخ می‌دهند. NmF₂ برحسب m⁻³ است.



شکل ۵. منحنی تغییرات لایه F₂ یونسپهری در نیمه شب در طول سال‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹. NmF₂ برحسب m⁻³ است.

یونیده کننده به طور نسبی با N₂ (نیترژن مولکولی) جذب می‌شود و باعث یونش N₂ می‌شود. الکترون‌های مرتبط با این یونش، خیلی سریع به سبب باز ترکیب تفکیکی ناپدید می‌شوند، بنابراین در چگالی‌های الکترون مشاهده شده در لایه F₂ بسیار کم شرکت می‌کنند.

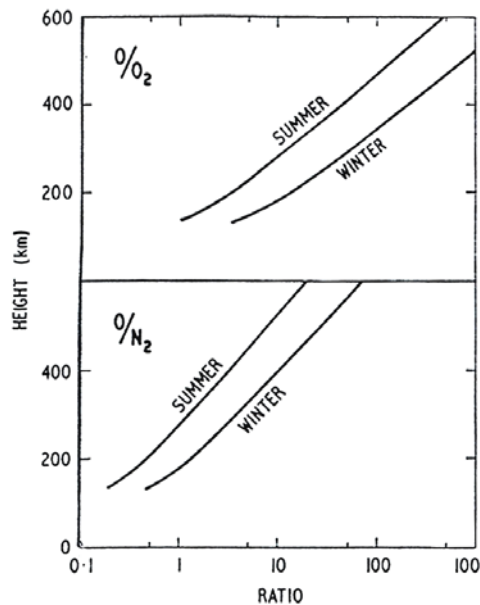
۲- سرعت اتلاف الکترون‌ها در تابستان ممکن است در نتیجه افزایشی در نسبت‌های $\frac{N_2}{O}$ و $\frac{O_2}{O}$ ، افزایش یابد (شکل ۳). در نهایت سرعت اتلاف الکترون‌ها به فرایندهای ثانویه‌ای مثل $O^+ + N_2 \rightarrow NO^+ + N$ و $O^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + O$ ، که بعد از آن، باز ترکیب تفکیکی الکترون‌ها با یون‌های مولکولی صورت می‌گیرد، بستگی پیدا می‌کند.

هر دوی ناهنجاری‌های یون سپهری نیمه‌سالانه و فصلی به‌طور نزدیک مرتبط با تغییرات ترکیب گازی جو هستند که بر اثر چرخش گرم‌سپهری کلی ایجاد می‌شود. مشخص شده است که NmF₂ بالای زمستانی توسط نسبت افزایش یافته $\frac{[O]}{[N_2]}$ ایجاد شده است؛ نسبت یون اتمی به مولکولی در زمستان بیشتر از تابستان است (شکل ۶). در لایه F₂ تولید الکترون‌ها مرتبط با غلظت گاز اتمی [O] و اتلاف یون‌ها مرتبط با مولکول‌های گازی [N₂, O₂] است. در این صورت افزایش نسبت $\frac{[O]}{[N_2]}$ بر کاهش $\cos \chi$ غالب می‌شود و منجر به مقدار زیاد یون‌ها در زمستان می‌شود.

ناهنجاری فصلی را می‌توان به دو صورت زیر توضیح

داد:

۱- نسبت نیترژن مولکولی به اکسیژن اتمی در تابستان افزایش می‌یابد (شکل ۶) که در پی آن بیشتر تابش

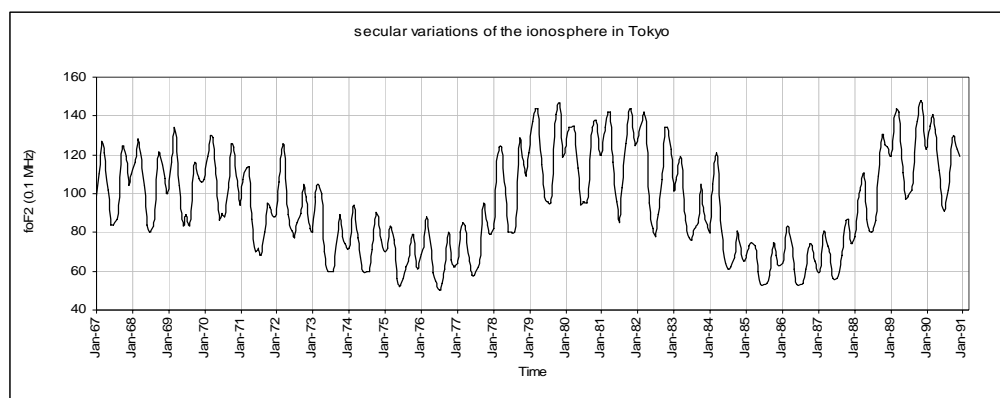


شکل ۶. نسبت‌های اکسیژن اتمی به مولکولی و اکسیژن اتمی به نیترژن مولکولی در زمستان بیشتر از تابستان است (روستر و کینگ، ۱۹۷۳).

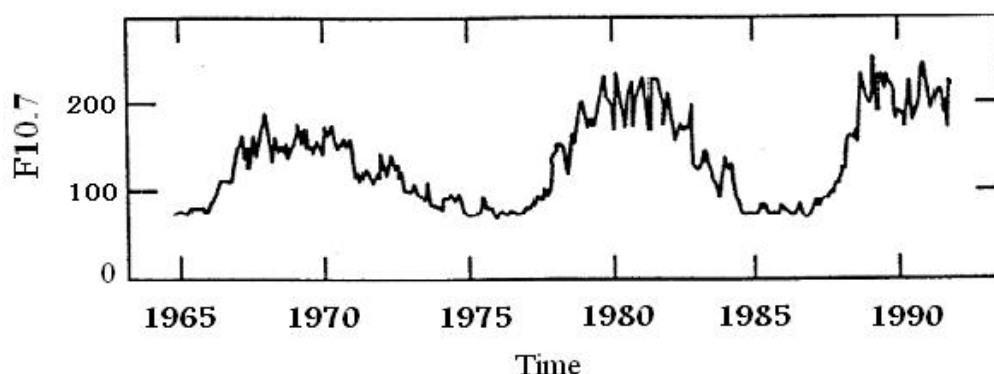
۶ تغییرات طولانی در یونسپهر

علاوه بر تغییرات روزانه، نیمه سالیانه، سالیانه و فصلی که قبلاً به آنها اشاره شد، نوعی تغییر طولانی مدت در چگالی الکترون‌های یونسپهر (شکل ۷) متناسب با تغییر در فعالیت‌های خورشیدی (شکل ۸) وجود دارد. دلیل این تغییر در چگالی الکترون‌ها، تغییر در تعداد لک‌های خورشیدی است که در نتیجه آن در بیشینه لک‌های خورشیدی میدان مغناطیسی خورشید قوی‌تر و نیز تعداد ذرات باردار و سرعت حرکت آنها به سمت بیرون، بیشتر از زمانی است که تعداد لک‌های خورشیدی در کمینه است.

از شکل ۸ مشاهده می‌شود که از سال ۱۹۷۶ تا سال ۱۹۸۱ روند افزایش فعالیت خورشیدی را داشته‌ایم. تأثیر این روند در این شکل واضح است اما در شکل (۳) منحنی‌های سال‌های ۱۹۷۷ تا ۱۹۷۹ به‌طور جداگانه رسم شده‌اند که میزان جدایی آنها از هم بسیار آشکار است. میلوارد و همکارانش نیز در ۱۹۹۶، علاوه بر لایه F_2 ، وجود تغییرات بلندمدت در لایه‌های F_1 و E را برای دو ایستگاه پورت استنلی (Port Stanley) در $60^\circ W$ ، $52^\circ S$ و اسلاو (Slough) در $0^\circ E$ ، $52^\circ N$ بررسی کردند و به نتایج مشابهی رسیدند.



شکل ۷. تغییرات طولانی در لایه F_2 یونسپهر در ایستگاه توکیو.



شکل ۸. منحنی تغییرات فعالیت خورشیدی (برحسب $F_{10.7}$) نسبت به زمان که در آن دوره تغییرات ۱۱ ساله مشاهده می‌شود. در مقایسه با شکل ۷ مشاهده می‌شود که بیشینه چگالی الکترونی در بیشینه فعالیت خورشیدی رخ می‌دهد و بالعکس (میلوارد و همکاران، ۱۹۹۶).

۷ بحث و نتیجه گیری

فرض کنید یونسپهر فقط مطابق با رابطه (۲) رفتار کند. آنگاه نمودار یونسپهری به صورتی می شود که فقط در طول روز وجود دارد؛ یعنی در طلوع خورشید، چگالی الکترون ها از صفر شروع به زیاد شدن می کند، در ظهر که زاویه تابش خورشید در کوچک ترین مقدار است، به بیشترین اندازه خود می رسد و در بعد از ظهر رو به کاهش می گذارد. بنابراین ممکن است که در اوایل شب هم چگالی الکترون ها به صفر نرسیده باشد. همچنین در طول سال، یونسپهر به صورتی رفتار می کرد که در اوایل تابستان بیشترین مقدار چگالی الکترون ها و در اوایل زمستان کمترین مقدار آن اندازه گیری می شد. اما در شکل (۲) دیدیم که تغییرات روزانه یونسپهر به صورت دیگری است و حتی در شب هم چگالی الکترون ها مقدار کوچکی ندارد. شکل ۳ نشان می دهد که در طول سال هم تغییرات واقعی با نظریه هم خوانی ندارند و وجود ناهنجاری های نیمه سالیانه و فصلی انکار ناپذیر است. از این بحث می توان نتیجه گرفت که عوامل دیگری غیر از تابش خورشید بر ایجاد یونسپهر و نیز تغییرات زمانی آن تأثیر می گذارند که از بین آنها می توان به تغییر ترکیبات جو در زمستان و تابستان - که مهم ترین عامل در تغییرات لایه F₂ یونسپهر است - اشاره کرد.

از بحث تغییرات طولانی یونسپهر هم می توان نتیجه گرفت که خورشید عامل اصلی ایجاد یونسپهر است - هر چند که تنها عامل نیست - به صورتی که تغییرات طولانی در چگالی الکترون ها در آن متناسب با فعالیت لکه های خورشیدی است. از طرف دیگر می توان در شکل ۳ مشاهده کرد که هر قدر میزان لکه های خورشیدی در یک سال خاص بیشتر باشد، ناهنجاری فصلی، سالیانه و نیمه سالیانه در آن سال واضح تر است.

منابع

- Bates, D. R., Buckingham, R. A., Massey, H. S. W., and Unwin, J. J., 1939, Dissociation, recombination and attachment processes in the upper atmosphere. II. The rate of recombination: Proc. Roy. Soc., **A170**, 322-340.
- Croom, S. A., Robbins, A. R., and Thomas, J. O., 1960, Variation of electron density in the ionosphere with magnetic dip, Nature, **185**, 902.
- Massey, H. S. W., 1937, Dissociation, recombination and attachment processes in the upper atmosphere- I: Proc. Roy. Soc., **A163**, 542-553.
- Millward, G. H., Rishbeth, H., Fuller-Rowell, T. J., Aylward, A. D., Quegan, S., and Moffett, R. J., 1996, Ionospheric F2 layer seasonal and semiannual variations: J. Geophys. Res., 101, No. A3, 5149-5156.
- Rawer, K., 1956, The ionosphere: Fredrick ungar publishing co. New York.
- Ruster, R., and King, J. W., 1973, Atmospheric composition changes and the F2- layer seasonal anomaly: J. atmos. Terr. Phys., **35**, 1317-1322.
- Van zandt, T. E., and Knecht, R. W., 1964, The structure and physics of the upper atmosphere, John Wiley, New York.
- 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, II, J. Radio Res. Lab. Jpn., 6, 651.