

## پایش تغییرات لایه ازن در جو ایران با استفاده از داده های ماهواره ای

محمد رضا مباحثی

استادیار گروه سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت: ۸۵/۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۸۶/۸/۲۵

### چکیده

داده های جمع آوری شده از لایه ازن در سالهای ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۳ توسط سنجنده TOMS بر روی ماهواره NIMBUS-7 به دفعات جو زمین را پوشش داده و داده های ازن کلی جمع آوری شده از طریق پردازش تصاویر ماهواره ای و اندازه گیری های میدانی، امکان بررسی روند تغییرات ازن در جو تمامی نقاط دنیا از جمله ایران را میسر ساخته است. داده های این پژوهش در محدوده طول های جغرافیایی ۴۷/۵ و ۵۶/۵ درجه شرقی و عرض های جغرافیایی ۲۶/۵ و ۳۸/۵ درجه شمالی قرار دارد. این محدوده از ماکو در شمال غرب تا شرق بندرعباس در جنوب شرق را شامل می شود. میانگین سالانه ازن دارای افت و خیزهایی می باشد که توجه آن را در گردش جو و فعالیت های صنعتی می توان یافت. این افت و خیزها به سمت یکنواختی میل می کند. در این پژوهش نشان داده می شود که این یکنواختی در فصول تابستان و پاییز به سرعت در حال وقوع بوده و برای عرض های میانه (همچون اصفهان) به مقادیر بسیار پایین در حال همگرایی است. البته این مسئله کم و بیش در تمامی منطقه های صنعتی ایران قابل مشاهده است. میزان ازن در فصول تابستان و پاییز کاهش می یابد. در ناحیه هایی همچون رشته کوه های البرز، استان اردبیل و دامنه جنوبی رشته کوه های البرز، آنومالی هایی در توزیع ازن در مقایسه با سایر نقاط دیده می شود ولی تا کنون به زیر حد مجاز نرسیده است. تغییرات میزان ازن در جو اصفهان بصورت مطالعه موردی با استفاده از پردازش تصاویر MODIS در باند ۳۰ استخراج گردید که یافته فوق را تأیید نمود.

واژه های کلیدی: ازن - سنجش از دور - تصاویر ماهواره ای - جو ایران

### سر آغاز

در حدود ۹۰٪ از ازن جو در لایه استراتوسفر (پوش سپهر) قرار دارد (Davies, 1993; Chandra, et al., 2004). این ناحیه که ۱۰ تا ۵۰ کیلومتر ضخامت داشته و در بالای سطح زمین قرار گرفته است. ۱۰٪ باقیمانده ازن در لایه زیر آن یعنی تروپوسفر (وردسپهر) که پایین ترین لایه در جو است قرار دارد. این لایه جایی است که تمامی تغییرات جوی در آن اتفاق می افتد. اندازه گیری هایی که در روی زمین و یا توسط بالون و یا از طریق فضا صورت گرفته، نشان می دهد که بیشترین غلظت ازن در ارتفاعی بین ۱۵ تا ۳۰ کیلومتر قرار دارد.

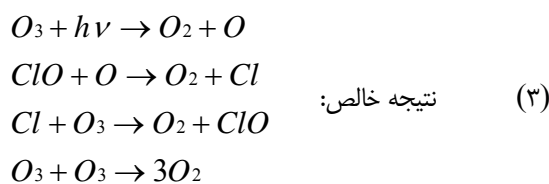
غلظت ازن بسیار کم است. معمولاً مقدار آن چند مولکول به ازای یک میلیون مولکول هواست، ولی همین مقدار اندک برای زندگی اهمیتی حیاتی دارد زیرا با جذب اشعه UV که (برای محیط زیست مضر است و از خورشید می تابد) مانع رسیدن آن به سطح زمین

می گردد. از آنجایی که قسمت اعظم ازن جو در استراتوسفر قرار دارد، این ناحیه از ازن، ناحیه ازن استراتوسفری نامیده می شود (UNEP, 1991; WMO, 1994; Considine, 2004; de Laat, et al., 2003; Fishman, et al., 2003; Edwards, 2003). در مقابل این لایه ازن مفید، ازن تروپوسفری یک آلودگی به حساب می آید و اغلب آنرا به عنوان یک گاز سمی می شناسیم. ازن تروپوسفری در طول روز در نواحی آلوده مثل مناطق شهری تولید می شود (Edwards, 2003; Fishman, et al., 2003).

برای آشکارسازی تغییرات لایه ازن با استفاده از تصاویر ماهواره ای نیاز است که با چگونگی تولید و نابودی یک مولکول ازن آشنا شویم. یک مولکول ازن زمانی تولید می شود که مولکول اکسیژن توسط اشعه ماورا بنفش با طول موج ۲۴۰ نانومتر و کمتر شکسته شده و تبدیل به دو اتم اکسیژن شود. این اتم ها بلافاصله با مولکول های اکسیژن محیط

ولی مولکول‌های دیگر موجود در جو نیز می‌توانند در این واکنش شرکت کنند. این واکنش‌ها معمولاً به صورت یک فرآیند کاتالیست اتفاق می‌افتد.

هرگاه این مولکول کاتالیزور منوکسید کلر (ClO) باشد، در هر فرآیند دو مولکول ازن نابود شده و منوکسید بدون تغییر به برهمکنش بعدی وارد می‌شود. این فرآیند به شکل زیر خلاصه می‌شود:



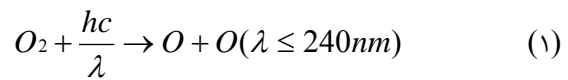
اثر خالص این واکنش تولید سه مولکول اکسیژن از دو مولکول ازن است، درحالی‌که مولکول ClO بدون تغییر باقی می‌ماند. در ارتفاع ۴۰ کیلومتری، این زنجیره کاتالیزوری Cl-CIO می‌تواند تقریباً هزار مولکول ازن را قبل از اینکه Cl یا ClO به یک کلر (یا HCL اسید کلریدریک و یا ClONO<sub>2</sub> کلرین نیترات) تبدیل بشود، نابود کند (Madronich and Granier, 1994).

اسید کلریدریک و یا کلرین نیتراتی که بدین طریق تولید می‌شوند معمولاً برای چند روزی می‌توانند دوام می‌آورند و پس از آن توسط اشعه UV تجزیه می‌شوند. پس از این واکنش تجزیه شدن، مجدداً کلر آزاد می‌شود تا بتواند ازن بیشتری را نابود کند و در نهایت اتم کلر از استراتوسفر خارج می‌شود.

در طول مدت این چرخه زندگی در استراتوسفر، تنها یک اتم کلر می‌تواند ۱۰۰ هزار مولکول ازن را نابود کند (Madronich and Granier, 1994).

میزان ازن در استراتوسفر نتیجه توازی بین تولید آن توسط انرژی خورشیدی با طول موج کمتر از ۲۴۰ نانومتر و از دست دادن آن از طریق این عملیات کاتالیستی است. اگر ما بتوانیم انرژی UV خورشید را در طول موج کمتر از ۲۴۰ نانومتر افزایش بدهیم سطح ازن موجود هم افزایش پیدا می‌کند. از دست دادن ازن یک فرآیند طبیعی است که از سطح بهنجارگازهای موجود مانند متان، اکسید نیتروس، متیل بروماید و متیل کلراید نتیجه می‌شود.

برهمکنش کرده و دو مولکول ازن را تشکیل می‌دهند. رابطه‌ای که می‌تواند این فرآیند را توصیف کند به صورت زیر نشان داده می‌شود:

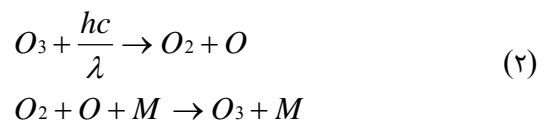


که در آن  $hc/\lambda$  انرژی فوتون UV،  $h$  ثابت پلانک،  $c$  سرعت نور در خلأ و  $\lambda$  طول موج وابسته به فوتون مربوطه را نشان می‌دهد. به دلیل اینکه در طیف خورشیدی تعداد فوتون‌هایی که در نواحی با طول موج کمتر از ۲۴۰ نانومتر قرار دارند بسیار اندکند (Chandra et al., 2004 و مباشری، ۱۳۸۵)، آهنگ تولید ازن بسیار آهسته است.

به عنوان مثال اگر ما تمامی ازمی که تا ارتفاع ۲۰ کیلومتر از سطح زمین وجود دارد را نابود کنیم، فرآیند تولید فوق حداقل در مدت یکسال می‌تواند آنرا جبران نماید (UNEP, 1991).

مولکول‌های ازن تقریباً تمامی زندگی خود را در جذب اشعه UV می‌گذرانند. این فرآیند جذب زمانی اتفاق می‌افتد که اشعه UV مولکول ازن را می‌شکند و تبدیل به یک اتم و یک مولکول اکسیژن می‌کند.

سپس اتم اکسیژن بلافاصله با مولکول اکسیژن بعدی ترکیب شده و یک مولکول ازن دیگر را مجدداً تشکیل می‌دهد و انرژی آزاد شده به صورت انرژی حرارتی (جنبشی) در فضا منتشر می‌شود. این واکنش‌ها را می‌توانیم به صورت معادلات زیر نشان دهیم:



M مولکولی است که می‌تواند انرژی اضافی این فعل و انفعالات را بگیرد. معمولاً این مولکول می‌تواند N<sub>2</sub> یا O<sub>2</sub> باشد که فراوان‌ترین مولکول‌های جو هستند.

اندازه‌گیری شده توسط این سنجنده‌ها با استفاده از یک الگوریتم مخصوص تبدیل به داده های مربوط به ازن می‌شوند.

به این معنا که داده‌های این سنجنده‌ها برهمکنش ازن با اشعه عبوری را نشان داده و مستقیماً خود مشخصه ازن را اندازه‌گیری نمی‌کنند. این الگوریتم‌ها اندازه‌گیری‌های تابشی را تبدیل به مشخصه‌های جوی می‌کنند (Liu, X., 2005; 2006)

### داده های میدانی جمع آوری شده

گرچه اندازه‌گیری محتوای جو از ۱۹۷۰ شروع شده است، ولی اندازه‌گیری ازن رسماً از ۱۹۷۸ با پرتاب ماهواره NIMBUS-7 آغاز شد. این ماهواره دو سنجنده TOMS و SBUV را با خود حمل کرد. هم‌اکنون سنجنده‌هایی همچون SBUV، SAGE، TOMS، و MODIS مستقر بر روی ماهواره Terra در فضا به جمع‌آوری اطلاعات و اندازه‌گیری ازن و سایر گازها مشغولند و سنجنده‌هایی همچون UARS، OS-Chem، NPOESS و ENVISAT-1 بتدریج تا سال ۲۰۱۰ بکار گرفته خواهند شد.

همچنین تعدادی از پروژه‌هایی که طی آن مشخصه‌های جوی منجمله میزان ازن اندازه‌گیری می‌شود و داده های این پژوهش نیز از آنها تهیه شده است به شرح ذیل اند (MODIS home page, 2006):

- اندازه‌گیری نیمرخ ازن و سایر گازهای مهم مانند هیدروژن کلراید HCL و هیدروژن فلوراید HF: Halogen Occultation Experiment (HALOE)
- اندازه‌گیری ClO، O<sub>3</sub>، HNO<sub>3</sub> استراتوسفری و H<sub>2</sub>O در تروپوسفر فوقانی (Microwave Limb Sounder (MLS)
- پایش طیف ماورای بنفش خورشیدی Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor (SUSIM)
- آزمایش مقایسه‌ای طیف ماورای بنفش خورشیدی Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE)
- پایش فعال رادیومتری تابش فرودی خورشیدی Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor (ACRIM)

### نیمرخ چگالی تعداد

این نیمرخ به صورت میانگین فصلی در فواصل یک کیلومتری در داخل استراتوسفر و در فواصل ۰/۵ کیلومتری در داخل تروپوسفر توسط سنجنده SBUV مستقر بر ماهواره NIMBUS-7 اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این نیمرخ‌های ثابت، آلودگی‌های موجود در لایه

اگرچه دلایلی میزان این گازهای طبیعی را در استراتوسفر افزایش دهیم یا ترکیبات جدیدی مثل CFCها را به جو وارد کنیم که در این فرایند بتوانند شرکت کنند، میزان از دست دادن ازن افزایش پیدا می‌یابد. این عمل تا زمانی که این تولید و نابودی به تعادل جدیدی برسند، ادامه می‌یابد (Madronich and Granier, 1994).

در سنجش از دور مقدار ازن به طور غیرمستقیم و از طریق تغییرات در میزان انرژی تابشی جو که ناشی از حضور ازن است، به دست می‌آید. بدین معنی که تجهیزات سنجش از دور، تغییرات میزان انرژی تابشی موجود در جو در ناحیه حرارتی، ناحیه مرئی، UV و ماکروویو که ناشی از حضور مولکول‌های ازن است، را تشخیص می‌دهد.

این تجهیزات بدون توجه به سکویی که بر روی آن قرار گرفته اند، خود آن مشخصه را به طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌کنند.

برای مثال یک سنجنده سنجش از دور میزان مولکول‌های ازن را اندازه‌گیری نمی‌کند، به جای آن چگونگی تغییرات میزان انرژی تابشی خورشیدی عبوری در باندهای مختلف از جو را اندازه‌گیری و با مقدار واقعی آن در جو استاندارد مقایسه می‌کند (TOMS home page, 2007).

تجهیزات ماهواره‌ای و یا تجهیزات مستقر بر روی زمین به فاصله بسیار دور از ازن استراتوسفری قرار دارند، در حالیکه بالن‌هایی که در ارتفاع بالا پرواز می‌کنند و همچنین هواپیماها معمولاً در داخل خود استراتوسفر قرار می‌گیرند.

در تمامی روش‌های سنجش از دور چهار تکنیک غیرفعال شامل پراش ماورای بنفش<sup>۱</sup> (BUV)، روش "عبور از لایه های جو"<sup>۲</sup>، روش "نشر جانبی نیمرخ"<sup>۳</sup> و روش "پراش جانبی نیمرخ"<sup>۴</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرند.

طرزکار این چهار تکنیک بطور مشروح توسط مولف (مباشری، ۱۳۸۴) و همچنین در (Kerr and McElroy, 1993) ارائه شده است.

این چهار تکنیک که بعضی اوقات در سکوه‌های ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند، بهترین داده را تولید کرده‌اند. هر یک از این تکنیک‌ها هندسه دید مربوط به خود را دارد. هندسه دید بر اندازه‌گیری تابش جوی تأثیر می‌گذارد.

در هر سکوی ماهواره‌ای از یک یا چند مورد از این تکنیک‌ها استفاده می‌شود. نکته‌ای که قابل توجه است این است که داده‌های

تغییرات ازن در جو تمامی نقاط دنیا از جمله ایران را میسر ساخته است (Considine, 2004; Levelt, 2006a; Levelt, 2006b).

این داده‌ها در محدوده طول‌های جغرافیایی ۴۷/۵ و ۵۶/۵ درجه و عرض‌های جغرافیایی ۲۶/۵ و ۳۸/۵ درجه قرار دارد. این محدوده از ماکو در شمال غرب کشور تا شرق بندرعباس را شامل می‌شود.

داده‌ها برحسب واحد دابسون ارائه شده است. از آنجا که ازن در فصل بهار بیشینه وضعیت خود را داراست، داده‌های این فصل مورد توجه قرار گرفته است. برای درک بهتر و امکان مقایسه داده‌ها، سعی شده است نتایج بصورت گراف و منحنی ارائه شود. این منحنی‌ها شامل موارد ذیل می‌شود:

- ✓ تغییرات ازن کلی بر حسب عرض‌های جغرافیایی برای طول‌های جغرافیایی مختلف (شکل شماره ۲)
- ✓ تغییرات ازن کلی بر حسب طول‌های جغرافیایی برای عرض‌های جغرافیایی مختلف (شکل شماره ۳)
- نمایش سه بعدی تغییرات ازن کلی در جو ایران، برای طول‌ها و عرض‌های مختلف (شکل شماره ۴)

ازن کلی از حدود ۳۰۰ دابسون در عرض جغرافیایی ۲۶/۵ درجه تا حدود ۳۷۰ دابسون در شمالی‌ترین نقطه ایران تغییر می‌کند. تغییرات برای طول‌های مختلف جغرافیایی در حدود ۱۰ دابسون است.

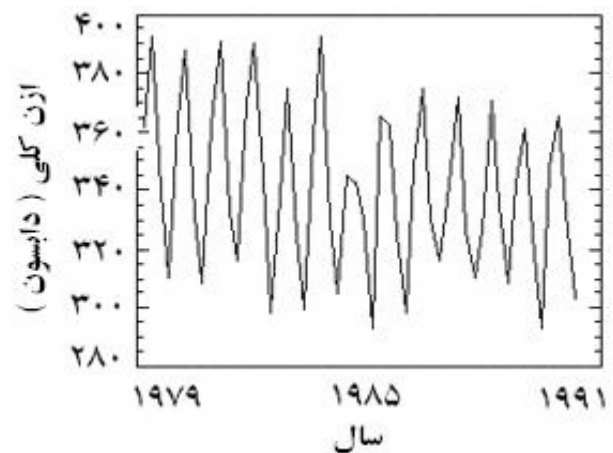
با مقایسه شکل‌های شماره (۳ و ۴) که در آن تغییرات ازن برحسب طول جغرافیایی برای عرض‌های مختلف رسم شده است، بنظر می‌رسد که توزیع ازن نسبت به عرض جغرافیایی حساس‌تر است ولی در هر صورت نسبت به طول جغرافیایی و زمان نیز از خود حساسیت نشان می‌دهد. شکل شماره (۳) نشان می‌دهد که در شمال شرق اصفهان (عرض ۳۳/۵ و طول ۵۳/۵) و اردبیل (عرض ۳۸/۵ و طول ۴۸/۵) آنومالی مختصری در مقایسه با نقاط هم عرض‌شان دیده می‌شود. همچنین در عرض جغرافیایی ۳۶/۵ و بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ تا ۵۲/۵ (ارتفاعات البرز) بر خلاف انتظار افزایش میزان ازن را مشاهده می‌کنیم. علت این امر را می‌توان در انتقال آلودگی‌های سطحی ازن در دامنه جنوبی کوه‌های البرز به همراه ناپایداری‌های محلی به ارتفاعات دانست. اگر این استدلال صحیح باشد باید این آنومالی را در سال‌های بعد نیز مشاهده کنیم. پستی بلندی‌های سطح در شکل شماره (۴) نیز مؤید توزیع غیر یکنواخت در عرض جغرافیایی است به گونه‌ای که در شمال غرب میزان ازن بیشتر است.

سطحی و تروپوسفر با تعریف یک نسبت آمیختگی برای ازن در هر ارتفاع تعیین می‌شود که با استفاده از آنها می‌توان نسبت به اصلاح نیمرخ اقدام کرد (Liu, 2005; Liu, 2006).

### ازن کلی ستونی

با بهنجار کردن نیمرخ<sup>۵</sup> چگالی تعداد به اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط سنجنده TOMS، می‌توان نیمرخ‌های فصلی را به دست آورد (Levelt, 2006a; Levelt, 2006b). اندازه‌گیری‌های دور ششم سنجنده TOMS با چند استثنا، اندازه‌گیری‌هایی پیوسته از ضخامت ازن کلی ستونی در یک شبکه ۱ درجه در ۱/۲۵ درجه از دسامبر ۱۹۷۸ تا ژانویه ۱۹۹۲ می‌باشد.

شکل شماره (۱) مثالی از تغییرات میانگین ازن کلی ستونی در سیزده سال را نشان می‌دهد. ضخامت این ستون از ازن، مقادیر بیشینه‌ای را در نیمه اول سال خصوصاً فصل بهار را نشان می‌دهد. این ضخامت در طول پائیز کاهش یافته و در زمستان دوباره شروع به رشد می‌کند توضیح بیشتر در این رابطه در بخش‌های بعدی ارائه خواهد شد.



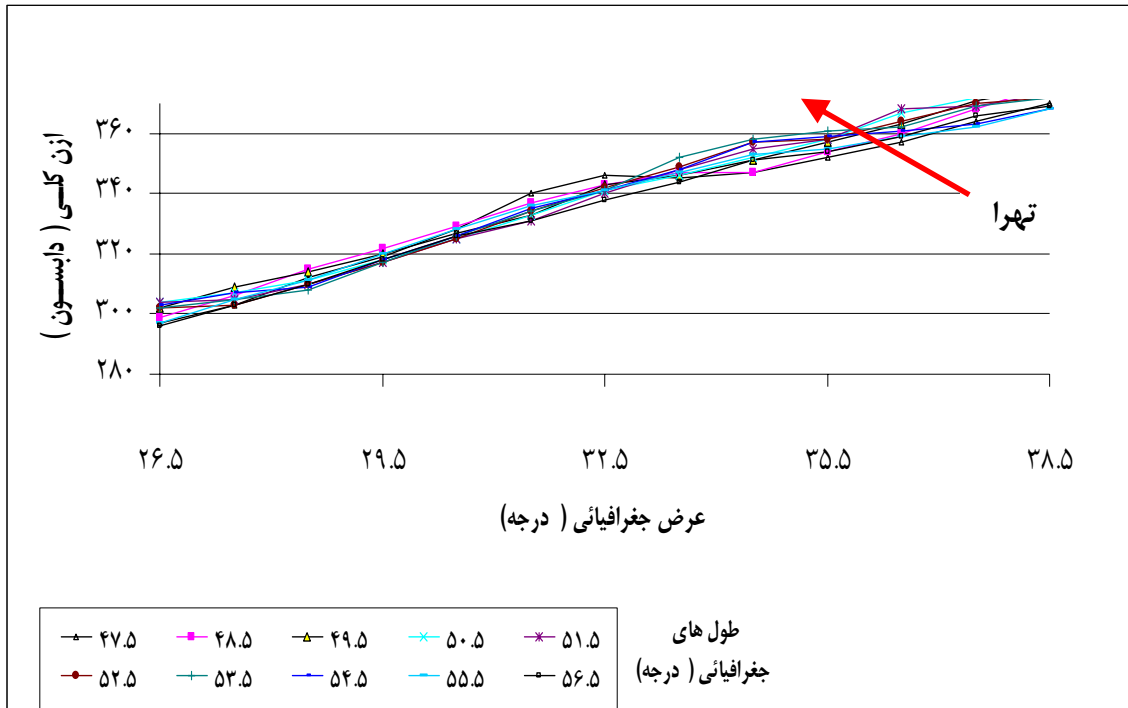
شکل شماره (۱): تغییرات شش ماهه ازن کلی ستونی

### در مدت سیزده سال بر روی شهر اصفهان

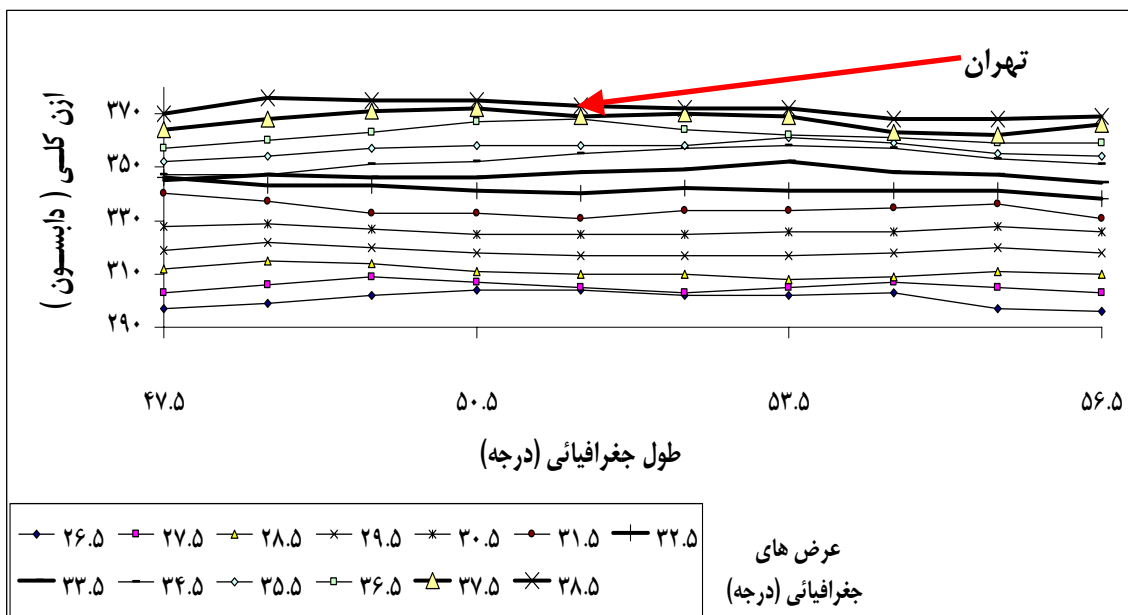
(TOMS home page, 2007)

### بررسی ۱۵ ساله لایه ازن در قسمتی از جو ایران

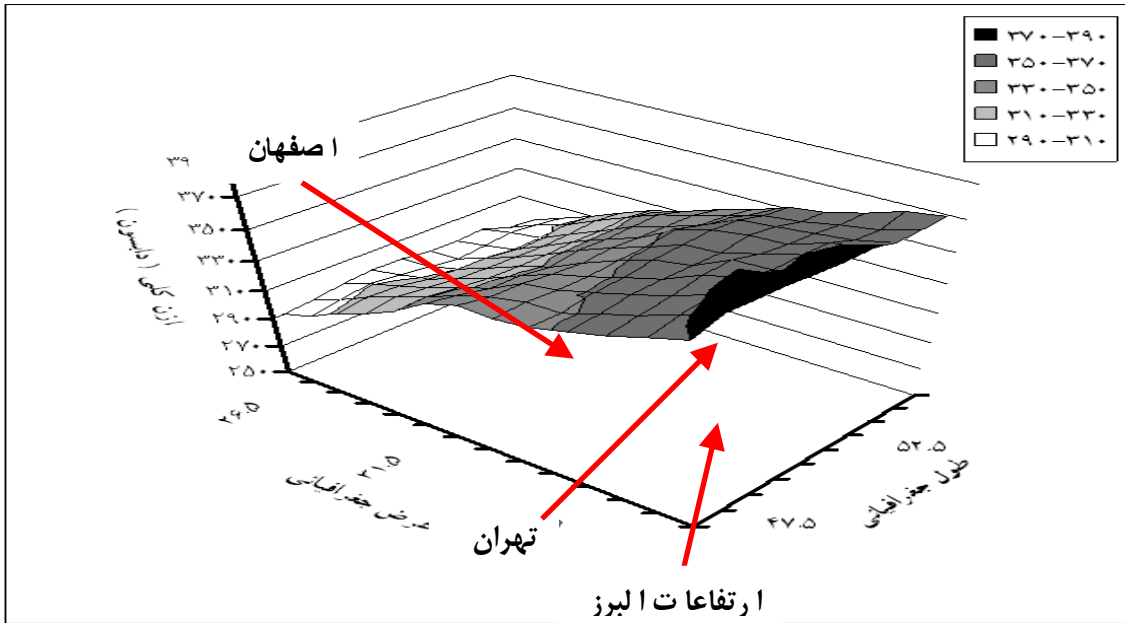
داده‌های جمع‌آوری شده در سال‌های ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۳ توسط سنجنده TOMS بر روی ماهواره NIMBUS-7 به دفعات جو زمین را پوشش داده و داده‌های ازن کلی جمع‌آوری شده، امکان بررسی روند



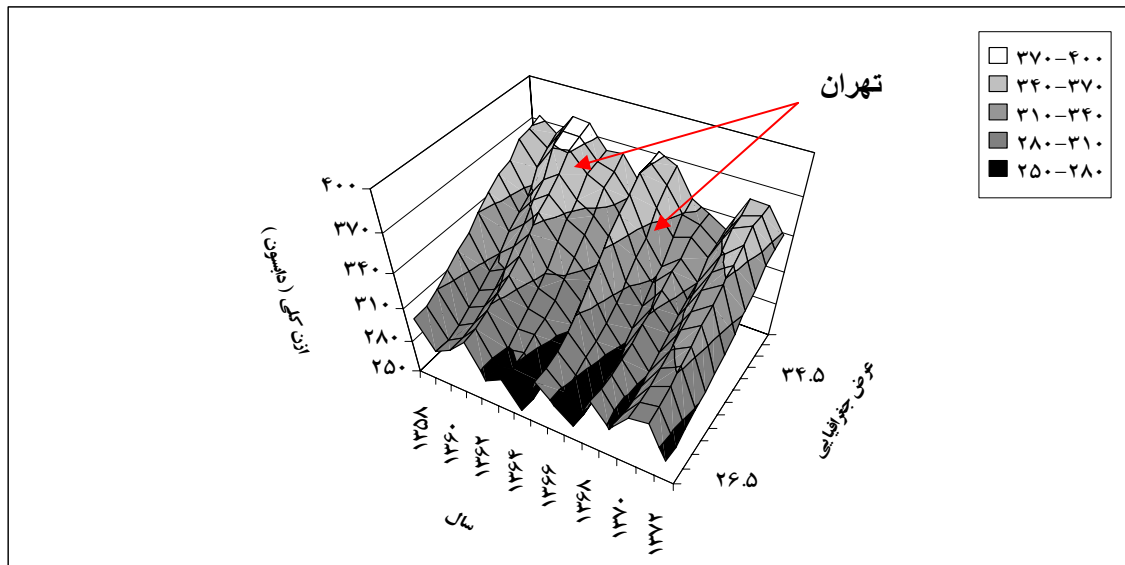
شکل شماره (۲): تغییرات ازن کلی بر حسب عرض جغرافیایی در فروردین ۱۳۵۸ (TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۳): تغییرات ازن کلی بر حسب طول جغرافیایی در فروردین ۱۳۵۸ (TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۴): نمایش سه بعدی تغییرات ازن کلی بر حسب طول و عرض جغرافیایی در فروردین ۱۳۵۸ (TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۵): تغییرات ۱۵ ساله ازن کلی در عرض‌های مختلف برای نصف النهار ۵۱/۵ درجه (TOMS home page, 2007)

تغییرات ازن کلی را برای طول جغرافیایی ۵۱/۵ درجه (تهران)، در مدت ۱۵ سال برحسب عرض‌های ۲۶/۵ تا ۳۸/۵ درجه رسم شده است. با اندکی توجه به این شکل افت و خیزهایی را در مقدار ازن برای سال‌های مختلف مشاهده می‌کنیم که در مجموع روندی کاهشی را شامل می‌شود (Kerr and McElroy, 1993). بدین معنی که جدای

**تجزیه و تحلیل داده های ازن در جو اصفهان**

همان‌گونه که در قسمت قبلی نیز اشاره شد، شکل‌های شماره (۶و۵) تا تغییرات ازن کلی در مدت ۱۵ سال برای عرض‌ها و طول‌های مشخص و معین نمایش می‌دهد. مثلاً در شکل شماره (۵)

ماهانه ازن کلی از تصاویر بدست آورد. علت این امر بستگی شدید توزیع ازن به شرایط جوی است.

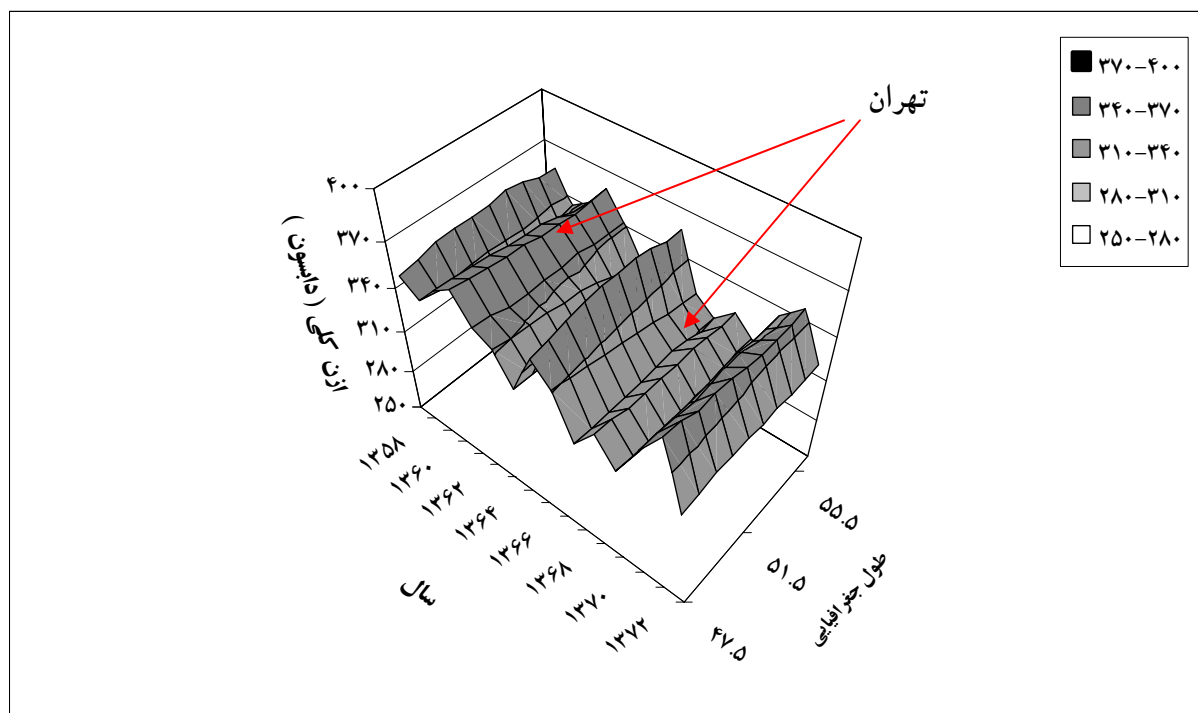
هرچه قدرت تفکیک زمانی پایش ازن افزایش یابد، شرایط جوی نیز دارای تغییراتی بیشتر بوده و یافتن روندی مشخص برای پایش بینی میزان ازن سخت تر و غیر ممکن تر خواهد شد. برعکس، با کاهش قدرت تفکیک زمانی به فصل و سال، روند تغییرات شکل مشخص تری را بخود می گیرد. شکل شماره (۸) تغییرات فصلی ازن کلی را برای اصفهان در مدت ۹ سال نشان می دهد. تغییرات در فصل بهار، بیشینه هایی در سال های ۰۷، ۸۰ و ۸۲ دارد ولی این بیشینه ها روندی کاهشی را نشان می دهد.

این موضوع برای فصل پاییز و زمستان نیز بخوبی مشاهده می شود. ولی در فصل تابستان از سال ۷۷ به بعد میزان ازن به سمت یکنواختی می رود. تصور می شود که علاوه بر اثرات جوی در توزیع ازن، سایر مشخصه ها از جمله فعالیت های صنعتی نیز می تواند بر میزان ازن ستونی (لایه ازن) تأثیر گذار باشد.

از افت و خیز طبیعی در میزان ازن که ناشی از تغییرات جوی و فصلی است، یک افت مقدار در میزان ازن کلی نیز مشاهده می شود. همین وضعیت در شکل شماره (۶) برای عرض جغرافیایی ۳۵/۵ درجه (تهران) نیز مشاهده می شود.

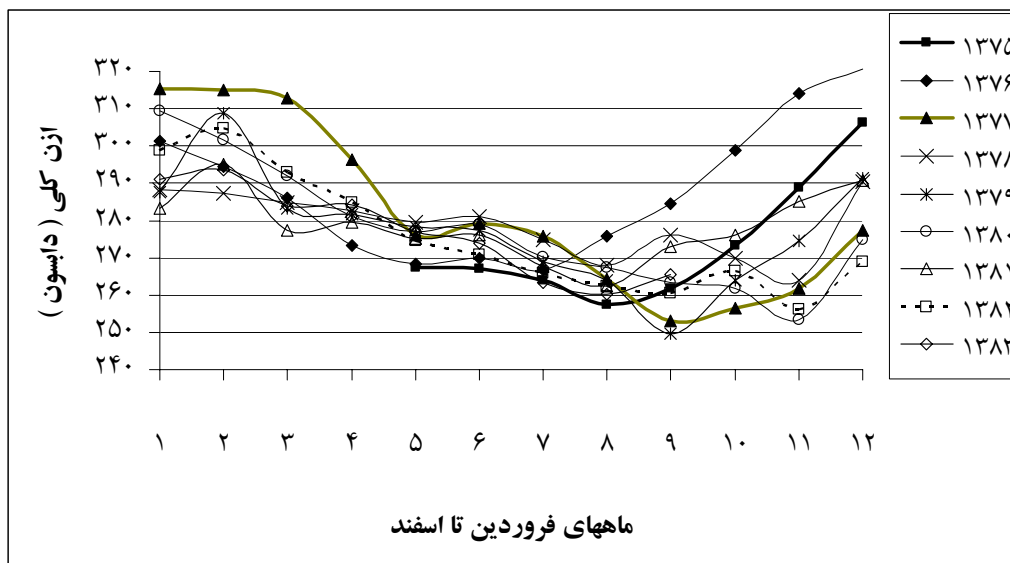
این یافته نیاز به پژوهش بیشتر دارد که در اینجا اصفهان را به عنوان مطالعه موردی انتخاب می کنیم که علت آن می تواند مرکزیت نسبت به کشور و صنعتی بودن این منطقه باشد. برای این کار میانگین ماهانه ازن کلی را برای سالهای ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۳ انتخاب می کنیم.

شکل شماره (۷) این تغییرات را به نمایش می گذارد. همانگونه که ملاحظه می شود، تقریباً در بهار دارای بیشینه ازن بوده و در پاییز میزان آن به کمترین مقدار خود می رسد (Lubin and Frederick, 1989; Ziemke, et al., 2005). البته این میزان در یک فصل ولی برای سال های مختلف کاملاً متفاوت است. مثلاً در فصل بهار در سال ۷۷ بیشترین و در سال ۷۸ کمترین میزان ازن کلی را داشته ایم. در فصل پاییز، در سال ۷۹ کمترین و در سال ۷۶ بیشترین مقدار را شاهد بوده ایم. با این حال نمی توان روندی مشخص را برای تغییرات

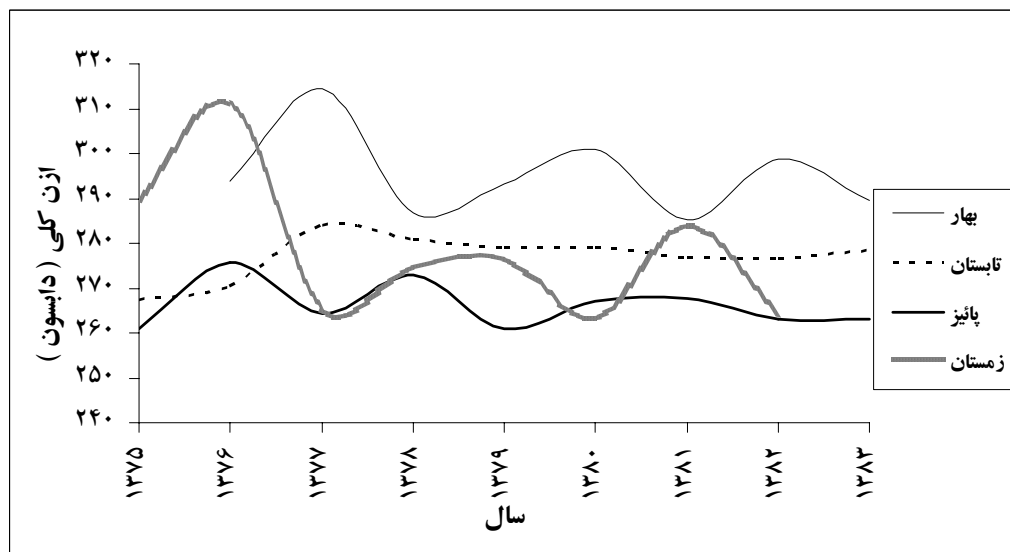


شکل شماره (۶): تغییرات ۱۵ ساله ازن کلی در طول های مختلف برای مدار ۳۵/۵ درجه

(TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۷): میانگین ماهانه ازن کلی برای سال‌های ۱۳۷۵ تا ۱۳۸۳ (TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۸): تغییرات فصلی ازن کلی را برای اصفهان در مدت ۹ سال (TOMS home page, 2007)

۳۲۰ دابسون بیشتر نشده است. شکل شماره (۱۰) تغییرات ۲۶ ساله میزان ازن کلی در فروردین ماه را نشان می‌دهد. متأسفانه بنظر می‌رسد که میزان ازن کلی جو این شهر (و تا حدودی تمامی مناطق کشور) روندی کاهشی را در پیش دارد. به طوری که بیشینه آن از مقدار ۳۴۰ دابسون در سال ۵۸ به ۲۹۸ دابسون در سال ۸۲ رسیده است. در مقابل کمینه آن از ۳۰۹ دابسون در سال ۵۹ به ۲۸۳ دابسون در سال ۸۱ افت پیدا کرده است. این امر خطراتی را بدنبال خواهد داشت که در بخش بعد توضیح داده خواهد شد.

شکل شماره (۹) تغییرات میانگین ماهانه ازن کلی در جو اصفهان را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل و با مطالعه این داده‌ها می‌توان نتیجه گرفت که:

- تغییرات از قاعده خاصی پیروی نمی‌کند؛
- برای بررسی دقیق‌تر نیاز به تجزیه و تحلیل همزمان مشخصه‌های هواشناسی و آلوده کننده‌های محیط زیستی داریم.
- تغییرات ازن در فروردین نشان می‌دهد که در این ماه میزان ازن بطور میانگین در مدت مورد مطالعه هیچگاه از ۲۸۰ دابسون کمتر و از



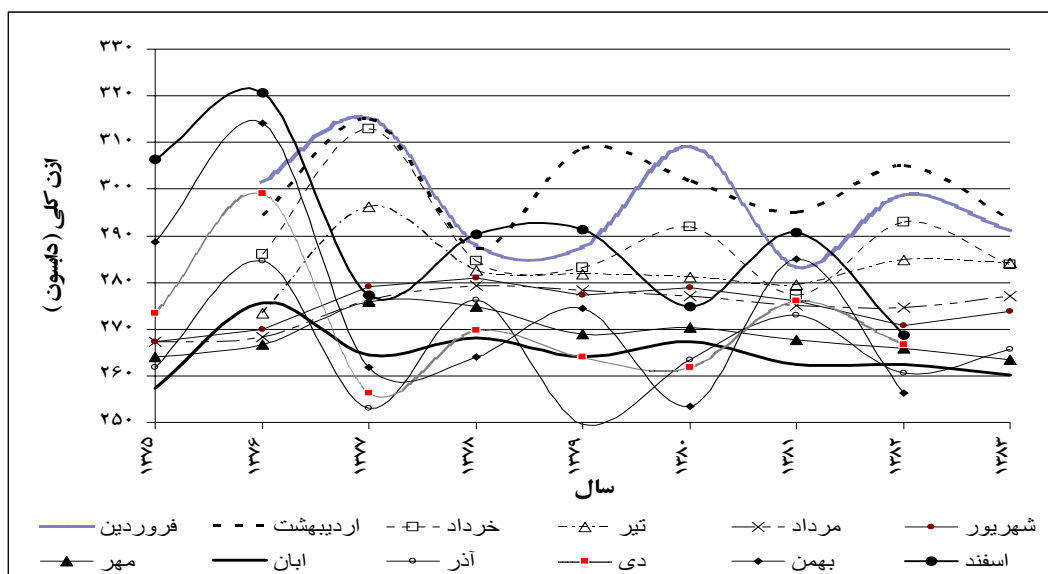
سال ۷۶ بخوبی مشاهده می‌شود. ولی در سال‌های بعد این افزایش ازن در فصل زمستان تا حدود زیادی متوقف شده است. حتی در بهمن ماه به میزان بی سابقه ۲۵۵ دابسون رسیده است. با این حال شدت گرایش به سمت یکنواختی که در فصل‌های تابستان و پاییز دیده می‌شد، در فصل زمستان و بهار مشاهده نمی‌شود. این مهم در شکل شماره (۸) بخوبی مشهود می‌باشد. یکی از سنجنده های ارزشمند که در مطالعات جوی کاربردهای وسیعی دارد سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره Terra است که دارای ۳۶ باند با قدرت تفکیک‌های مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر و قدرت تفکیک رادیومتری ۱۲ بیتی می‌باشد و از جمله سنجنده‌های شبه پُرتیفی قابل استفاده در مطالعات جوی به شمار می‌آید.

- باند ۳۰ این سنجنده با محدوده طول موج ۹/۸۸۰-۹/۵۸۰ میکرومتر صرفاً جهت آشکارسازی تغییرات ازن جو زمین طراحی گردیده و سازمان فضایی ایالات متحده با استفاده از داده‌های این سنجنده برای آشکارسازی تغییرات ازن در آن کشور تحقیقات فراوانی را انجام داده است. این سازمان اطلاعات کالیبره شده این داده‌ها را تهیه و به‌طور روزانه جهت استفاده برای عموم در دسترس اهالی آن کشور قرار داده است (MODIS home page, 2006).

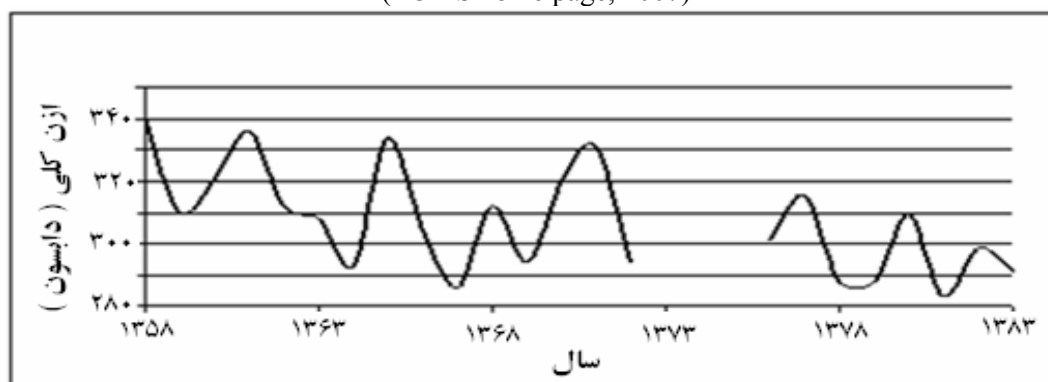
از این اطلاعات بخشهای مختلف کشور می‌توانند در زمینه‌های مختلف علمی تحقیقاتی استفاده کنند. با توجه به دریافت مستقیم داده‌های MODIS در ایران، با انجام کالیبراسیون با استفاده از Sunphotometer (موجود در کشور)، می‌توان اطلاعات به‌روز از میزان ازن را تولید و در اختیار عموم قرار داد. با استفاده از الگوریتم MODIS و بدون انجام تصحیحات جوی محلی (بعلت اینکه بیشینه ازن در ارتفاع ۲۵ تا ۳۰ کیلومتری بوده و این ارتفاع در پوش سپهر قرار داشته و اثرات سطح زمین و لایه سیاره‌ای در آن قابل چشم‌پوشی است).

همچنین با استفاده از مشخصه‌های کالیبراسیون عرض‌های میانه، تصویری از وضعیت لایه ازن برای شهر اصفهان برای روز ۸۳/۳/۱۰ تهیه شد که در شکل شماره (۱۱) نشان داده شده است. روش پردازش این تصاویر بطور مشروح توسط این مولف ارائه شده است (مباشری، ۱۳۸۴). این شکل بیان می‌دارد که میزان ازن کلی در بخش اعظم منطقه کمتر از ۲۶۰ دابسون است که مقداری کمتر از میانگین ماهانه نشان داده شده در شکل شماره (۹) برای این منطقه می‌باشد (مباشری، ۱۳۸۴).

- تغییرات ازن در اردیبهشت ماه بجز سال‌های ۷۸ تا ۸۱، مشابه تغییرات فروردین ماه است.
- میزان ازن در خردادماه کاهشی نسبتاً شدید را نشان می‌دهد. همچنین تفاوت بین بیشینه‌ها و کمینه‌ها نیز کاهش یافته است. در مجموع میانگین فصلی ازن کلی در بهار همانگونه که در شکل شماره (۸) نشان داده شده است به سمت یکنواختی در مقدار در حدود ۲۹۰ دابسون میل پیدا کرده است. این مقدار به میزان زیادی از متوسط ۲۶ ساله کمتر است.
- میزان ازن از تیر ماه سال ۷۸ به بعد به یکنواختی گراییده و در حدود ۲۸۰ دابسون ثابت مانده است.
- در مردادماه، میزان ازن بین ۲۶۷ تا ۲۸۰ دابسون متغیر بوده است و به سمت یکنواختی در حدود ۲۷۵ دابسون گرایش داشته است.
- افت و خیز میزان ازن در شهریور ماه بین مقدار بیشینه ۲۸۰ و کمینه ۲۷۰ دابسون بوده و همانند دو ماه قبل از آن به سمت یکنواختی میل کرده است. در مجموع میزان ازن کلی موجود در جو در فصل تابستان که بیشترین تابش اشعه UV را داریم، به کمترین میزان رسیده و این میزان نیز رو به کاهش است. این مسئله کاملاً هشدار دهنده است.
- این کاهش و گرایش به یکنواختی ازن در تابستان، در دو ماه اول پائیز نیز ادامه یافته است به‌طوری‌که در مهرماه به سمت ۲۶۵ و در آبانماه به ۲۶۰ دابسون گرایش پیدا کرده است.
- با نزدیک‌تر شدن به فصل زمستان نیمکره شمالی و کاهش ارتفاع خورشید، تولید ازن در جو مخصوصاً در نواحی استوایی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر ناپایداری‌های شدید جوی در نواحی برحاره‌ای و عرض‌های میانه باعث انتقال بیشتر ازن موجود در عرض‌های پایین به عرض‌های بالاتر می‌شود. این تحولات از آذر ماه شروع شده است. در نتیجه میزان ازن در آذر ماه بطور میانگین نسبت به ماه‌های قبل از آن افزایش یافته است. ولی در هر صورت تمایل به یکنواخت شدن در سال‌های اخیر برای این ماه نیز مشاهده می‌شود. با توجه به شکل شماره (۸) در فصل پاییز کمترین میزان ازن را در جو مشاهده می‌کنیم ولی با توجه به ارتفاع پایین خورشید (ضخامت بالای جو) و شرایط پوشش مردم، خطر اشعه ماورای بنفش جدی نخواهد بود.
- با شروع فصل زمستان و ورود ناپایداری‌های جوی، انتقال ازن به عرض‌های بالاتر افزایش می‌یابد. این مورد در دی، بهمن و اسفند



شکل شماره (۹): تغییرات میانگین ماهانه ازن کلی در جو اصفهان برای سال‌های ۷۵ تا ۸۳ (TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۱۰): تغییرات ۲۶ ساله فروردین ماه میزان ازن در جو اصفهان (TOMS home page, 2007)



شکل شماره (۱۱): تغییرات مکانی ازن کلی برای اصفهان در تاریخ ۱۰/۳/۸۳ (مباشری، ۱۳۸۴ و MODIS home page, 2006)

**نتیجه گیری و پیشنهاد**

- میزان ازن در فصول تابستان و پاییز کاهش می یابد. میزان اشعه ماورای بنفش در این دو فصل به طور چشمگیری افزایش می یابد.
- این یکنواختی برای عرض های میانه (همچون اصفهان) به مقادیر بسیار پایین در حال همگرایی است.
- این یکنواختی کم و بیش در تمامی حوزه های صنعتی ایران قابل مشاهده است.
- در مناطقی همچون کوه های البرز، استان اردبیل و دامنه جنوبی رشته کوه های البرز، آنومالی هایی در توزیع ازن دیده می شود ولی تا کنون به زیر حد مجاز نرسیده است.
- رابطه معنی داری بین مناطق صنعتی و کاهش میزان ازن در این مناطق دیده می شود.

**یادداشت ها**

- 1-Back-scattering UV
- 2-Occultation Technique
- 3-Limb Emission
- 4-Limb Scattering
- 5-Profile
- 6-Hyperspectral

مطالعات فوق بر مبنای اندازه گیری های سنجنده TOMS صورت پذیرفته است. این اندازه گیری ها زمانی بطور مطلق قابل استناد بوده و از ارزش علمی کامل برخوردار است که با اندازه گیری های همزمان توسط سنجنده هایی همچون Brewer, Dubson و اسپکتروفتومتری همراه بوده و کالیبره شوند. این سنجنده ها هم اکنون به طور پراکنده در برخی از نقاط ایران وجود دارد ولی از داده های آنها هیچگونه استفاده ای نمی شود و شاید در نگهداری آنها نیز تمهیدات لازم صورت نمی پذیرد. در هر صورت نتایج مطالعات فوق گرچه به طور مطلق قابل استناد نمی باشد ولی به طور نسبی می توان آنها را پذیرفته و هشدار شان را جدی بگیریم. نتایجی را که از این مطالعه می توان استنتاج کرد به شرح ذیل می باشند:

- میانگین سالانه ازن دارای افت و خیزهایی می باشد که توجه آن را در گردش جو و فعالیت های صنعتی می توان یافت. این افت و خیزها به سمت یکنواختی میل می کند.
- این یکنواختی در فصول تابستان و پاییز به سرعت در حال وقوع است.

**منابع مورد استفاده**

مباشری، م.ر. ۱۳۸۴. امکان سنجی پایش (مانیتورینگ) تغییرات لایه ازن در جو ایران با استفاده از اندازه گیری های مکانی و تصاویر MODIS، گزارش طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مباشری، م.ر. ۱۳۸۵. مبانی فیزیک در سنجش از دور و فناوری ماهواره. انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Chandra, S, et al. 2004. Elevated ozone in the troposphere over the Atlantic and Pacific oceans in the Northern Hemisphere, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23102, doi:10.1029/2004GL020821.

Considine, D. B. 2004. Simulating ozone in the near-tropopause region with a new combined model of the stratosphere and troposphere, paper presented at Quadrennial Ozone Symposium, Int. Ozone Comm., Kos, Greece, June.

Davies, R. 1993. Increased transmission of ultraviolet radiation to the surface due to stratospheric scattering, *J. Geophys. Res.*, 98, 7251-7253.

de Laat, A. T. J., Aben, I. and, Roelofs, G. J. 2005. A model perspective on total tropospheric O<sub>3</sub> column variability and implications for satellite observations, *J. Geophys. Res.*, 110, D13303, doi:10.1029/2004JD005264.

Edwards, D. P. 2003. Tropospheric ozone over the tropical Atlantic: A satellite perspective, *J. Geophys. Res.*, 108(D8), 4237, doi:10.1029/2002JD002927.

Fishman, J., Wozniak, A. E. and Creilson, J. K. 2003. Global distribution of tropospheric ozone from satellite measurements using the empirically corrected tropospheric ozone residual technique: Identification of the regional aspects of air pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 893–907.

Kerr, J. B. , McElroy, C. T. .1993. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion, *Science*, 262, 1032-1034.

Levelt, P. F. 2006a. The Ozone Monitoring Instrument, *IEEE Trans. Geophys. Remote Sens.*, 44(5), 1093– 1101.

Levelt, P. F. 2006.b. Science objectives of the Ozone Monitoring Instrument, *IEEE Trans. Geophys. Remote Sens.*, 44(5), 1199–1208.

Liu, X. .2005. Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment: Algorithm description and validation, *J. Geophys. Res.*, 110, D20307, doi:10.1029/2005JD006240.

Liu, X. .2006. First directly-retrieved global distribution of tropospheric column ozone from GOME: Comparison with the GEOS-CHEM model, *J. Geophys. Res.*, 111, D02308, doi:10.1029/2005JD006564.

Lubin, D. , Frederick, J. E. .1989. Measurements of enhanced springtime ultraviolet radiation at Palmer station, Antarctica, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 783-785.

Madronich, S. , Granier, C. .1994. Tropospheric chemistry changes due to increases in UV-B radiation, in *Stratospheric Ozone Depletion/UV-B Radiation in the Biosphere*, H. R. Biggs, (ed.), NATO ASI Series, vol. I18, pp 3-10, Springer-Verlag.

MODIS home page 2006. (<http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/> )

TOMS home page .2007. (<http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>), [http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/today\\_v8.html](http://toms.gsfc.nasa.gov/ozone/today_v8.html) , <http://toms.gsfc.nasa.gov/>

UNEP. 1991. Environmental Effects of Stratospheric Ozone Depletion –Update, J. C. van der Leun, M. Tevini and R. C. Worrest, (eds.), United Nations Environmental Programme, Nairobi, Kenya, November 1991.

WMO. 1994. Scientific Assessment of Ozone Depletion, World Meteorol. Org., in press,

Ziemke, J. R., Chandra, S. , Bhartia, P. K. .2005. A 25-year data record of atmospheric ozone in the Pacific from Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) cloud slicing: Implications for ozone trends in the stratosphere and troposphere, *J. Geophys. Res.*, 110, D15105, doi:10.1029/2004JD005687.