لایهٔ ازون
ویژگی ها
چگونگی
و علل تخریب

دکتر رضا برنا
عضو هیئت علمی گروه جغرافیای دانشگاه یزد
dbarnashahi@yazduni.ac.ir

چکیده

از دههٔ ۱۹۲۰ میلادی که چند تن از اتمسفرشناسان، از جمله دابسون[1]، وجود لایه‌ای از ازون را درون استراتوسفر تشخیص دادند، تا سال ۱۹۸۵، اطلاعات ما دربارهٔ ویژگی های فیزیکی و شیمیایی این لایه بسیار ناچیز بود. در این سال بود که اتمسفرشناسان انگلیسی گزارش تکان دهنده ای مبنی بر کاهش چهل درصدی میزان ازون بهاره بالای قطب جنوب ارائه کردند. از آن زمان تاکنون، مطالعات و تحقیقات زیادی دربارهٔ نحوهٔ عملکرد شیمیایی ـ فیزیکی و جغرافیایی این لایه انجام شده است. این بررسی ها نشان می دهند، چگونگی و روند تخریب این لایهٔ بسیار حیاتی برای بقای موجودات زندهٔ روی زمین، تابعی است از ویژگی های شیمیایی آن، وضعیت هواشناسی و جغرافیایی و تغییر فصل ها، و میزان رها شدن گازهای مصنوعی از قبیل گازهای کلروفلوئور کربن و اکسید نیتروژن در هوا بر اثر فعالیت های صنعتی خاص.

این مواد شیمیایی با فراهم آمدن شرایط مناسب درقطب جنوب، به تخریب لایه ازون منجر می شوند. وجود شرایط خاص هواشناسی و تسلط ورتکس قطبی، سرمای شدید و تشکیل ابر استراتوسفری، واکنش های شیمیایی ناهمگن و برخورد ناگهانی اشعهٔ خورشید و به ویژه طیف ماورای بنفش آن به ترکیبات شیمیایی متمرکز دراطراف این ابر سرد، مجموعه ای هستند از عواملی که در کاهش شدید و ناگهانی لایهٔ ازون بر فراز قطب جنوب نقش دارند.

مقالهٔ حاضر، ضمن مروری بر تاریخچهٔ این بررسی ها، جزئیات نحوهٔ عملکرد ازون به عنوان یک لایهٔ محافظ حیات و ویژگی های شیمیایی و جغرافیایی آن راتوضیح و علل تخریب آن را با استفاده از اطلاعات جدید شرح می دهد.

مقدمه

ازون، یعنی همان مادهٔ شیمیایی که [illegible] دارد، در ساختار استراتوسفر، بخشی حیاتی برای [illegible] شمار می رود. در ارتفاعی ما بین ۱۰ الی ۲۴ کیلومتر [illegible] ازون حفاظ ویژه‌ای را تشکیل می دهد که به دور جو [illegible] است. این حفاظ که از تراکم ازون به وجود آمده است، از [illegible] حیات بر روی کرهٔ زمین، درمقابل امواج مرگ آور فرابنفش [illegible] می کند(گتیس و دیگران[۲]، ۱۹۹۶).

در سال ۱۹۸۵، اخباری مبنی بر کاهش شدید میزان تراکم [illegible] ازون[۳] در بالای خلیج هالی[۴] (قطب جنوب) منتشر شد. این گزارش نشان می داد که از سال ۱۹۷۷ تا ۱۹۸۴، بیش از ۴۰ درصد از میزان ازون در این قسمت کاسته شده است (غروی، ۱۳۶۶ ترجمه). گزارش های بعدی از آن جا که این موضوع را تأئید کردند و در ضمن نشان دادند که منطقهٔ کاهش ازون ناحیهٔ وسیعی را در بالای قطب جنوب فرا می گیرد، موجب بروز نگرانی هایی شدند.

نگرانی ها به این خاطر بود که بیش ترین تابش اشعهٔ فرابنفش خورشید توسط هیچ لایه ازون جذب می شود که از اثرات مخرب آن بر موجودات زنده، از جمله انسان جلوگیری می کنند (غروی، ۱۳۶۶ ترجمه؛ بریگر و سمیتسون[۵]، ۱۹۹۳).

به طور کلی، اتمسفر یا جو (هواکره) از چهار لایه اصلی تشکیل می شود که به ترتیب از پائین به بالا شامل: تروپوسفر، استراتوسفر، مزوسفر[۶] و ترموسفر[۷] است (رجایی، ۱۳۶۶ ترجمه؛ کاویانی و علیمحمدی، ۱۳۷۹؛ ارشکلی، ۱۳۸۰).

تروپوسفر پائین ترین لایه از لایه های اصلی هواکره است و تا ارتفاع ۲۰ کیلومتری از سطح زمین دراستوا، و بطور [illegible] کیلومتر در قطبین را شامل می شود. این تنها لایه ای است که [illegible] در آن به زندگی ادامه می دهند و به راحتی زندگی کنند.

استراتوسفر از ارتفاع حداقل ۱۰ کیلومتری [illegible] ۶۰ـ۵۰ کیلومتری از سطح زمین را شامل می شود. سرد است و دمای آن [illegible] درجهٔ سلسیوس می رسد. قسمت عمدهٔ لایه ازون که در این جا مورد بحث است نیز در بخش پائینی همین لایه متمرکز شده است.

عناصر غالب در ترکیب شیمیایی حدود ۱۶ کیلومتر پائین هواکره (تروپوسفر)، عمدتاً نیتروژن و اکسیژن هستند که بر روی هم، حدود ۹۹ درصد کل حجم آن را تشکیل می دهند. مقدار ازون در این قسمت فوق العاده ناچیز است، ولی در صورتی که در صفحه‌ای روی سطح زمین، یعنی در محیط زندگی موجودات زنده، جمع شود، حتی به مقدار کمی هم افزایش یابد، خطرناک و مرگبار است. ازون درسطوح بالاتر هواکره، و بنابراین ارتفاع تقریباً ۲۰ تا ۵۵ کیلومتر از سطح زمین، افزایش می یابد و به صورت لایه ای در قسمت پائین تر استراتوسفر متراکم می شود. ازون شکل سه ظرفیتی از اکسیژن است، درحالی که اکسیژن معمولی که ما تنفس می کنیم، دوظرفیتی است. اکسیژن سه ظرفیتی، به واسطهٔ واکنش مابین امواج فرابنفش نور خورشید و اتم های معمولی اکسیژن تولید می شود. تمرکز ازون هراین قسمت باعث شده است که سطح زمین و [illegible] طبیعهٔ امواج پرگزار فرابنفش محافظت [illegible] (بریگر و سمیتسون، ۱۹۹۳). در [illegible] تشخیص داده شد؟

[illegible] ازون در قسمت زیرین [illegible] توسط گروهی [illegible] اکتشافی آنان در قطب [illegible] است، وقتی که نخستین [illegible] گیری [illegible] انجام گرفت، افت میزان ازون استراتوسفر [illegible] چنان شدید بود که تصور کرده بود، نقصی [illegible] گیری به وجود آمده است! اما نصب دستگاه های [illegible] گیری مجدد، موضوع کاهش شدید ازون را تأئید [illegible] و مولر[۱۱]، ۱۹۹۳؛ کارور[۱۲]، ۱۹۹۸) دیگری هم مطرح بود که ماهواره های TOMS[۱۳] برای سال ها قادر به نمایش کاهش فوق العادهٔ ازون نبودند، زیرا نرم افزاری که داده های خام مربوط به ازون را پردازش می کرد، چنان برنامه‌ریزی شده بود که مقادیر بسیار کم را به عنوان [illegible] قلمداد می کرد. تجزیه و تحلیل داده های [illegible] و تتابع به عمل آمده توسط گروه اکتشافاتی ایستگاه انگلیسی درقطب جنوب نشان داد که یافته های پیشین درست بوده اند و کاهش ازون برفراز قطب، هم بسیار سریع و هم بسیار بزرگ مقیاس بوده است.

ازون چیست و چگونه تشکیل می شود؟

ازون اکسیژن سه ظرفیتی است که به طور طبیعی در جو پیدا می شود. جو زمین از لایه های متعددی تشکیل شده است. بیشتر [illegible] قسمت زیرین تروپوسفر زندگی می کنند. [illegible] فعل و انفعالات شیمیایی، و هوایی، [illegible] آن صورت می پذیرد (بلیزر [illegible]).

استراتوسفر قرار دارد. [illegible] ازون و [illegible] گرم شدن [illegible] از آن منشأ می گیرد. [illegible] ابرهای مافوق بنفش، [illegible] کنید)، قسمت پائین استراتوسفر را [illegible] می کنند، در حالی که هواپیماهای با سرعت کم ترمعمولاً تروپوسفر را پرواز می کنند. قسمت کم ضخامت بین این دو لایه را تروپوپوز می نامند. ازون تشکیل لایه ای را در قسمت زیرین استراتوسفر می دهد که در بالای استوا ناکم تراست و به سمت قطبین ضخامت آن افزایش می یابد؛ به طوری که باید در سطوح عادی حداکثر تراکم را در قطبین داشته باشند.

میزان ازون در سطح زمین با واحد دابسون[۱۴] اندازه گیری می شود. واحد دابسون عمده ترین واحد اندازه گیری درمطالعهٔ ازون است. نام آن از اسم جی. ام. ب. دابسون، یکی از نخستین دانشمندانی که بین سال های ۱۹۲۰ الی ۱۹۶۰ درباره ازون جو تحقیق می کرد، گرفته شده است. این دانشمند دستگاهی طیف سنج با عنوان «طیف سنج دابسون»[۱۵] اختراع کرد (مک پیترز، ۲۰۰۱) که به دستگاه استاندارد برای اندازه گیری ازون از زمین تبدیل شد. طیف سنج دابسون، میزان شدت امواج فرابنفش (UV) را در چهار طول موج متفاوت که دو تای آن ها به

وسیلهٔ ازون جذب می شوند، اندازه می گرفت. میزان ازون با توجه به محاسبات خاصی، نسبت به میزان امواج فرابنفش رسیده به زمین (به دستگاه)، محاسبه می شود. همهٔ ازون بالای یک سطح معین از زمین تا استراتوسفر، در شرایط صفر درجهٔ سلسیوس و یک اتمسفر فشار (موسوم به دما و فشار سطح زمین[۱۶]) فشرده می شود.

نمونه ای از این محاسبه فرابالای لابرادور کانادا برای سطحی معادل ده درجهٔ عرض و پنج درجهٔ طول جغرافیایی و به ارتفاع تا استراتوسفر پائینی، انجام شده است. اگر همهٔ ازون موجود در این ستون را در یک درجهٔ سلسیوس و یک اتمسفر فشار متراکم و به صورت یکنواخت در همان سطح پراکنده سازیم، یک صفحه به ضخامت سه میلی متر در سطحی معادل ده درجه در پنج درجه عرض و طول جغرافیایی، حاصل می شود.

دانشمندان ازون شناس پس از این محاسبات توافق کرده اند، یک واحد دابسون عبارت است از یکصدم میلی متر از چنان صفحه ای در شرایط یک درجهٔ سلسیوس و یک اتمسفر فشار. بنابراین با توجه به این قرارداد، میزان ازون بر فراز لابرادور معادل ۳۰۰ واحد دابسون (۳۰۰Du) می شود. میزان ازون در واحد دابسون برای نواحی استوایی حدود ۲۶۰ و برای نواحی دیگر بیش تر است، اگر چه توسان های شدید فصلی رؤیت می شوند.

لایهٔ ازون هنگامی تولید می شود که امواج فرابنفش نور خورشید به استراتوسفر برخورد می کنند و مولکول های اکسیژن دوظرفیتی (O_2) را به اتم های اکسیژن (O) می شکنند. این اتم های آزاد شدهٔ اکسیژن به سرعت با سایر مولکول های اکسیژن دو ظرفیتی موجود در جو ترکیب می شوند و اکسیژن سه ظرفیتی (O_3) تولید می کنند (فرمول های ۱ و ۲)

$$O_2 + h\nu \rightarrow O + O \qquad (۱)$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3 \qquad (۲)$$

(۲۴۰ نانومتر ~> طول موج = $1/\nu$)

مهم است بدانیم، تراکم ازون در سطح زمین از نظر سلامت موجودات زنده بسیار خطرناک است و این عنصر جزو ترکیبات اصلی فتوشیمیایی دود و غبار کارخانجات است. با این حال، ذخیرهٔ همین مادهٔ کشنده در استراتوسفر است که موجب بقای موجودات زنده در زمین شده است. یعنی بار دیگر از دیدگاه فلسفی می توان دید که هیچ چیز مطلقاً بد و یا مطلقاً خوب وجود ندارد و ارزش هر موضوعی، در رابطه با شرایط متفاوت، نسبی است. وجود این ماده در استراتوسفر موجب جلوگیری از عبور اشعهٔ مخرب فرابنفش (در طول موج های بین ۲۴۰ تا ۳۲۰ نانومتر) می شود که در صورت رسیدن ممتد به بدن موجودات زنده، می تواند موجب سرطان پوست، اختلالات ژنتیکی و چشمی و نابودی گیاهان شود. اگر چه امواج فرابنفش موجب شکستن مولکول های ازون هم می شوند، ولی با ترکیب سریع اکسیژن دو و یک ظرفیتی، دوباره ازون تجدید و جانشین می شود و به این ترتیب، یک دور تعادلی ایجاد می شود که نتیجهٔ آن در حالت طبیعی، موازنهٔ میزان ازون وارد شده به جو و خارج شده از آن می شود (فرمول های ۳ و ۲).

$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O \qquad (۳)$$

$$O + O_2 \rightarrow O_3 \qquad (۲)$$

همچنین فروپاشی ازون طبق فرمول زیر نیز انجامپذیر است:

$$O + O_3 \rightarrow O_2 + O_2 \qquad (۴)$$

واکنش های چاپمن

فعل و انفعالات شیمیایی فوق را باعنوان واکنش های **چاپمن**[۱۷] می شناسند. واکنش ۲ با افزایش ارتفاع آهسته تر می شود، در حالی که واکنش ۳ با افزایش ارتفاع سریع تر می شود. میزان تراکم ازون، موازنه ای است بین این دو واکنش رقیب. در قسمت بالایی اتمسفر، جایی که میزان اشعه های فرابنفش زیاد است، اکسیژن اتمی غالب است. در قسمت پائین تر استراتوسفر، هوا متراکم تر و درنتیجه باعث جذب مقدار بیش تری از این اشعه ها می شود. بنابراین فرایند تولید ازون تشدید می شود و تقریباً در ارتفاع ۲۰ کیلومتری از سطح زمین، میزان آن به حداکثر می رسد. همچنان که ما به سمت زمین نزدیک می شویم، مقدار اشعه های فرابنفش کاهش می یابد و از میزان ازون نیز کاسته می شود. به لایه ای از ازون که بر اثر این واکنش ها در استراتوسفر تشکیل می شود، گاهی اوقات لایهٔ «چاپمن» نیز گفته می شود. چاپمن هواشناسی است که وقوع این روابط شیمیایی را در استراتوسفر کشف و به همین ترتیب، نحوهٔ پیدایش و تمرکز ازون را در قسمتی از استراتوسفر تبیین کرده است.

واکنش های شیمیایی دیگر

نظریهٔ چاپمن درمورد واکنش های شیمیایی مذکور، پرسش هایی را نیز به دنبال داشت. در دههٔ ۱۹۶۰ تشخیص داده شد، از دست رفتن ازون بنابر واکنش ۴ بسیار کند صورت می پذیرد. کندی بسیار زیاد این واکنش موجب می شد، نتواند از نظر تئوری میزان ازون را تا آن حد که در واقعیت در حال اتفاق افتادن بود، پائین بیاورد. در نتیجه، به تدریج تشخیص داده شد که باید فعل و انفعالات دیگری نیز، با سرعت بیش تر، وجود داشته باشند تا بر میزان تراکم ازون در جو تأثیر بگذارند. دربارهٔ این واکنش ها که بخش عمدهٔ آن ها از مواد شیمیایی مصنوعی منشأ گرفته اند، و نیز تأثیر این مواد در ایجاد حفرهٔ ازون، در قسمت انتهایی این مبحث صحبت می کنیم. قبل از رسیدن به این قسمت، می خواهیم ببینیم اصولاً حفرهٔ ازون چیست؟

حفرهٔ ازون چیست؟

معمولاً در مطبوعات بحث حفرهٔ ازون را با مشکل گرم شدن عمومی زمین، مخلوط می کنند یا اشتباه می گیرند. اگر چه از آن جا که میزان ازون بر اثر گلخانه ای تأثیر می گذارد، بین این دو رابطه ای موجود است، اما مسألهٔ حفرهٔ ازون، موضوعی جداست. با این حال، همین معضل نیز خود نشانه ای دیگر است از تأثیر منفی فعالیت های انسانی بر محیط طبیعی.

همان طور که ذکر شد، ازون در جو زمین زمانی تشکیل می شود که اشعهٔ فرابنفش حاصل از نور خورشید، مولکول اکسیژن دوظرفیتی را به دو اتم اکسیژن (اکسیژن اتمی) تفکیک می کند. سپس این اتم اکسیژن با سایر مولکول های دو ظرفیتی اکسیژن موجود در محیط ترکیب می شود و اکسیژن سه ظرفیتی یا همان ازون را به وجود می آورد. قسمت عمدهٔ ازون

موجود در جو زمین، در بخش پائین تر استراتوسفر و در ارتفاع بین ۲۰ تا ۵۰ کیلومتر از سطح کرهٔ زمین متمرکز است (انکارتا[۱]، ۲۰۰۲).

در ابتدای تاریخ زمین و پس از تکوین اکسیژنی که از زندگی موجودات و گیاهان دریایی ناشی می شد، پیدایش تدریجی لایهٔ ازون، حیات را در سطح خشکی ها امکانپذیر ساخت (انکارتا، ۲۰۰۲). کاهش میزان تمرکز ازون را در استراتوسفر جو زمین «حفرهٔ ازون» می خوانند.

در طول ۱۵ سال گذشته (نسبت به سال ۲۰۰۰ میلادی) بر فراز قطب جنوب، در سال های اخیر در قطب شمال، میزان ازون استراتوسفر در زمان به خصوصی از سال، کاهش شدید نشان داده است و شواهدی از روندی دراز مدت در تغییرات ازون دیده می شود. بین سال های ۱۹۷۹ تا ۱۹۹۱، برای مثال، ازون عرض های میانی (بین ۲۵ تا ۶۰ درجه)، به طور متوسط ۳ درصد در سال کاهش یافت. در عرض های میانی نیمکرهٔ شمالی، این کاهش در زمستان و بهار بیش تر و در تابستان و پائیز کم تر است، در حالی که در عرض های میانی نیمکرهٔ جنوبی، کاهش ازون نسبت به نیمکرهٔ شمالی نوسان فصلی کم تری نشان می دهد (انکارتا، ۲۰۰۲). باید توجه داشت، کاهش ازون در ناحیهٔ بالای قطب جنوب بسیار شدیدتر و سریع تر بوده تا آنجه که در عرض های میانی اتفاق افتاده است (کارور، ۱۹۹۸).

این کاهش عمدتاً بر اثر پخش شدن مواد شیمیایی ساختهٔ بشر که کلرین[۱۹] (کلردار) هستند، از قبیل خانوادهٔ کلروفلوئوروکربن[۲۰] اتفاق افتاده است. اما در ضمن، ترکیباتی هم که برومین[۲۱] (برم دار) هستند و نیز هالوژن و اکسیدهای نیتروژن دارند، در این مسأله نقش ایفا می کنند (کارور، ۱۹۹۸).

ترکیبات کلروفلوئوروکربن (CFC"s) یکی از تولیدات رایج صنعتی به شمار می روند که در سیستم های سرد کننده، تهویهٔ هوا، آئروسل ها، حلال ها و در تولید برخی از مصنوعات مخصوص بسته بندی به کار می روند. اکسیدهای نیتروژن نیز محصول جانبی فرایندهای احتراقی هستند، از جمله در موتور و اگزوز هواپیماهای ماورای صوت.

مقدار کنونی کاهش در سال های اخیر تا آن حد بوده است که میزان بی ثباتی تکاندهندهٔ جو، و روند در حال افزایش تضعیف لایهٔ ازون را مشخص ساخته است (کارور، ۱۹۹۸). میزان این کاهش در سال ۲۰۰۱ نسبت به سال های قبل از ۱۹۷۵، به ۳۳ درصد می رسد (دونبار[۲۲]، ۲۰۰۱). در مورد علت های چنین تخریب سریع و شدیدی در لایهٔ ازون، در بخش بعدی توضیح بیش تر داده خواهد شد.

ویژگی های هواشناسی و شیمیایی مؤثر در تخریب لایهٔ ازون

برای این که نحوهٔ تخریب لایهٔ ازون را به خوبی درک کنیم، باید عواملی را که در ایجاد این پدیده مشارکت دارند بشناسیم. برای این کار باید پرسش هایی را مطرح کنیم. مهم ترین پرسش این است که چرا احتمالاً تخریب لایهٔ ازون در قطب جنوب اتفاق افتاده است (عامل هواشناسی)؟ دوم این که آیا در حالت عادی (نرمال) و پیش از پیدایش ترکیبات مصنوعی، کلروفلوئوروکربن دار میزان ازون در قطبین، کم تر از سایر نواحی بوده است یا خیر؟ همچنین تأثیر این نوع گازها و عناصر شیمیایی بر شرایط ازون چگونه است و به چه دلیل در قطب جنوب تخریب این لایه شدیدتر بوده است؟ در این جا، برای کمک به حل مسأله، به هر یک از این پرسش ها، در حد یافته های علمی موجود پاسخ می دهیم.

در مورد پرسش نخست، باید به ویژگی های هوا در بالای قطب جنوب بپردازیم. پرسش دوم را باید با نگاهی بر شرایط گذشتهٔ ازون در بالای عرض های جغرافیایی متضاد (قطبین و استوا) دریافت. برای جواب سؤال سوم، باید به واکنش های شیمیایی عناصر مؤثر در تخریب ازون در جو نگاه کرد.

۱. ویژگی های جریان هوا و شرایط استراتوسفر بالای قطب جنوب

حفرهٔ ازون در قطب جنوب در آغاز بهار، بین سپتامبر و اوایل دسامبر، پدید می آید. این زمانی است که بادهای غربی پر قدرت شروع به چرخیدن به دور قارهٔ قطب جنوب می کنند و فضای بسته بر فراز قطب پدید می آورند (دونبار، ۲۰۰۱). ناحیهٔ قطبی نسبت به نقاط دیگر سطح کرهٔ زمین، نوسانات پیش تری از نور خورشید را شاهد است. در طول ماه های زمستان نیمکرهٔ جنوبی، نور خورشید به قطب نمی رسد و این ناحیه، برای سه ماه در تاریکی به سر می برد. در طول این زمان، یک جریان باد شدید دور قطبی[۲۳]، در بخش میانی و پائینی استراتوسفر به گردش در می آید. این بادهای قوی به «ورتکس قطبی[۲۴]» موسومند. تأثیر ورتکس قطبی این است که موجب جدا ساختن یا ایزوله کردن هوای بالای قطب درون این جریان گردباد مانند می شود و چون آن جا نور خورشید وجود ندارد، هوای داخل گردباد قطبی به شدت سرد می شود. این سرما به حدی است که ابرهای ویژه ای در دمای منهای هشتاد درجه شکل می گیرند. این ابرها به «ابرهای استراتوسفری قطبی[۲۵]» موسومند، اما از نوع ابرهایی نیستند که در آسمان بر اثر تراکم بخار آب پدید می آیند. ابرهای استراتوسفری قطبی ابتدا به صورت ذرات اسید نیتریک تری هیدرات تشکیل می شوند، همچنان که دما کاهش می یابد و محیط ابر سردتر می شود، قطره های بزرگ تری از آب یخزده که اسید نیتریک در آن حل شده است، شکل می گیرند. اگرچه هنوز هم ترکیبات دقیق این نوع ابر یخی کاملاً شناخته شده نیست، ولی وجود ابر استراتوسفری قطبی نقش بسیار ضروری و اساسی در پیدایش حفرهٔ ازون دارد. بنابراین دو عامل هواشناسی مهم در این مورد عبارتند از:

الف) زمستان قطبی که با شرایط خاص خود موجب تشکیل گردباد قطبی یا همان ورتکس قطبی گردد که هوای بالای قطب درون آن اسیر و جدا افتاده می شود.

ب) دمای فوق سرد، یعنی تا آن حد سرد که موجب پیدایش ابرهای یخزدهٔ استراتوسفری شود. در این حالت، تا آن زمان که ورتکس قطبی دوام دارد، ابرهای استراتوسفری قطبی نیز پا بر جا می مانند.

۲. شرایط لایهٔ ازون پیش از بحران کنونی

در مورد توزیع ازون در جو زمین در شرایط طبیعی (پیش از سال های ۱۹۷۰)، باید توجه داشت که بالاترین میزان تراکم آن در نواحی قطبی و کم ترین میزان آن در نزدیکی استوا دیده می شود (غروی، ۱۳۶۶ و اردکانی، ۱۳۸۰). جریان هوای استراتوسفری از استوا به سوی قطب هاست و ازون تولید شده در استوا، که خاستگاه آن است، در شرایط

معمولی به حداکثر خود نمی رسد، بلکه با جابه جایی درون الگوی چرخشی استراتوسفری، به سمت قطبین جریان می یابد و در آن جاست که به اوج میزان خود می رسد (هروی، ۱۳۶۶). بنابراین میزان ازون در شرایط طبیعی در نواحی حاره ای کم تر از نواحی قطبی است. در این جا شاید جالب باشد یادآوری کرد که مساحت حفرهٔ ازون در سال ۱۹۹۲ بر فراز قطب جنوب، به حداکثر خود، یعنی ۲۴/۳ میلیون کیلومترمربع (کم تر از پنج برابر قارهٔ اروپا) رسیده است (گنیس و دیگران، ۱۹۹۶).

۳. منابع مواد شیمیایی مؤثر در تخریب لایهٔ ازون

هم اکنون ثابت شده است، ترکیبات کلر و برم انسان موجب کاهش ازون و ایجاد حفرهٔ ازون بر فراز قطب جنوب و شمال می شوند. اگر چه هنوز نسبت اهمیت این دو عنصر در تخریب ازون نواحی مختلف جو به درستی شناخته نشده، ولی مشخص شده است که تقریباً تمامی کلر و نیمی از برم موجود در لایهٔ استراتوسفر، از فعالیت های انسانی ناشی می شوند.

عمده ترین منابع غیر آلی تولید کلر عبارتند از: اسید هیدروکلریک[۲۶] و نیترات کلر[۲۷]. این مواد از تجزیهٔ ترکیبات کلروفلوئوروکربن (CFCs) به وجود می آیند. CFCها موادی هستند که صدها مصرف گوناگون دارند، تقریباً غیر سمی هستند و در مقابل حرارت (شعله) به راحتی تجزیه نمی شوند و به عبارت دیگر، قابل اشتعال نیستند (کارور، ۱۹۹۸). این مواد به، خاطر همین پایداری خوب، در صورت آزاد شدن در جو تا ۱۵۰ سال باقی خواهند ماند.

مهم ترین موادی که در تخریب لایهٔ ازون همکاری دارند با ذکر کاربردشان عبارتند از (اردکانی، ۱۳۸۰، ص ۳۱۲):

الف) ترکیبات کلروفلوئوروکربن که در صنایع سرماساز، تهویهٔ مطبوع و صنایع اسفنج سازی، برای حمل ونقل کالاها به کار می روند.

ب) هالون ها که مواد اطفای حریق هستند و در کپسول های دستی آتش نشانی و سیستم های ثابت در مکان های حساس به کار می روند و هالون ها برم ندارند، برم نسبت به کلر، اثر تخریبی بیش تری در از بین بردن لایهٔ ازون نشان می دهد.

ج) حلال ها که عمدتاً به عنوان پاک کننده و چربی زدا در صنایع فلز کاری، الکترونیکی و خشکشویی کاربرد دارند. از این نوع حلال ها می توان به متیل کلروفرم و تترا کلرید کربن اشاره کرد.

د) آفت کش ها که در بخش کشاورزی هم به عنوان مادهٔ سمی برای از بین بردن آفات گیاهی و هم ماده ضد عفونی کننده به کار می روند، مانند متیل بروماید (اردکانی، ۱۳۸۰، ص ۳۱۲).

۴. فرایندها و واکنش های شیمیایی ویژهٔ مؤثر در فروپاشی ازون

یکی از مهم ترین نکات برای درک شیمی حفرهٔ ازون این است که واکنش های شیمیایی آن در شرایط غیر معمولی انجام می گیرند، یعنی فقط تحت شرایط خاص هواشناسی امکانپذیرند که عبارتند از: وجود زمستان قطبی و دمای بسیار پائین. مهم ترین ویژگی های این واکنش های غیر معمول آن است که در آن ها منابع کلر مثل اسید هیدروکلریک و نیترات کلر و مشابه آن ها از خانوادهٔ برم به ترکیبات فعالی بر سطح ابرهای استراتوسفری تبدیل می شوند. مهم ترین واکنش ها در تخریب ازون به شرح زیرند (کارور، ۱۹۹۸):

$$HCL + ClONO_2 \rightarrow HNO_3 + Cl_2 \quad (۱)$$

$$ClONO_2 + H_2O \rightarrow HNO_3 + HOCl \quad (۲)$$

$$HCl + HOC \rightarrow HNO_3 + ClONO \quad (۳)$$

$$N_2O_5 + HCl \rightarrow HNO_3 + ClONO \quad (۴)$$

$$N_2O_5 + H_2O \rightarrow 2HNO_3 \quad (۵)$$

دو مادهٔ شیمیایی بادوام غیر آلی یعنی اسید هیدروکلریک (HCL) و نیترات کربن $ClONO_2$ ناقل[۲۸] یا منبع[۲۹] تولید کلر به شمار می روند. دی نیتروژن پنتوکساید (N_2O_5) منبع اکسیدهای نیتروژن هستند و در شیمی تخریب ازون نقش مهمی نیز دارند. اسید نیتریک (HNO_3) نیز در تأمین مقدار زیادی از کلر فعال (به ترتیبی که توضیح داده می شود) اهمیت دارد. فعل و انفعالات فوق که به واکنش های ناهمگن[۳۰] موسومند و به تولید منابع کلر منجر می شوند، تا همین اواخر مورد بی توجهی قرار گرفته بود.

درک این موضوع حائز اهمیت است که بدانیم، این واکنش ها تنها در سطح ابرهای استراتوسفری بسیار سرد قطبی روی می دهند و سرعت انجام آن ها نیز بسیار زیاد است. به همین دلیل است که پیدایش حفرهٔ ازون چنین باعث شگفتی و غافلگیری بشر شده است.

اسید نیتریکی که در واکنش های فوق تشکیل می شود، در ذرات ابر استراتوسفری باقی می ماند و مرحله گازی متمرکز شدن اکسیدهای نیتروژن را کاهش می دهد. این نوع حالت کاهش مرحلهٔ گازی که به «دی نوکسی فیکیشن[۳۱]» موسوم است، درکم کردن سرعت تغییر حالت اکسید کلر (CLO) بسیار مؤثر است که درغیر این صورت، این اکسید طبق واکنش زیر از دور فعالیت خارج می شد:

(M در این جا هر گونه مولکول هوای موجود است)

$$ClO + NO_2 + M \rightarrow ClONO_2 + M \quad (۶)$$

به این ترتیب، وجود اسید نیتریک کمک می کند، میزان کلر فعال موجود در حد بالایی باقی بماند.

در واکنش های ۱ الی ۵، فقط مولکول های دو اتمی کلر (Cl_2) به وجود می آیند، در حالتی که برای تخریب ازون، کلر اتمی (Cl) یا همان کلر فعال لازم است. این یکی از کلیدی ترین فعل و انفعالاتی است که در آن نور خورشید مؤثر است. به این ترتیب که مولکول کلر به وسیلهٔ نور خورشید به آسانی از هم می پاشد و طبق فرمول زیر، کلر اتمی حاصل می شود:

$$Cl_2 + h\nu \text{ (امواج فرابنفش)} \rightarrow Cl + Cl$$

به این ترتیب، با بازگشت نور خورشید در آغازهای بهار، این فرایند نقش کلیدی خود را در پیدایش حفرهٔ ازون بازی می کند.

در اثنای زمستان قطبی، دمای بسیار سرد که «ورتکس» یا گردباد قطبی را می سازد، به تشکیل ابرهای استراتوسفری دارای ذرات یخ منجر می شود. درسطح این ابرهاست که واکنش های ناهمگن مخرب ازون، یعنی کلر و برم را، به صورت مولکولی آن ها می سازند. زمانی که در بهار نیمکرهٔ جنوبی مصادف با پائیز نیمکرهٔ شمالی نور خورشید به نواحی قطبی باز می گردد، کلر مولکولی به سرعت به اتم های یک ظرفیتی کلر تجزیه می شود که باعث فقدان ناگهانی ازون می شود. ترتیب این تغییر و تبدیلات، با اندازه گیری های دقیق، قبل، همزمان و

بعد از پیدایش حفرهٔ ازون، ثابت شده است (کارور، ۱۹۹۸).

تا این جا همهٔ واکنش های شیمیایی مؤثر در نابودی ازون، به جز آخرین آن ها که درواقع مرحلهٔ پایانی مخرب ازون است، تشریح شد. این واکنش تخریب کاتالیتیک[32] ازون نامیده می شود. اندازه گیری هایی که بر فراز قطب انجام گرفته اند، نشان می دهند، مقدار کلر اتمی نسبت به میزان ازون بسیار کم تر است و در نتیجه این سؤال پیش می آید که این مقدار کلر چگونه قادر است در پاره ای مواقع بخش عمدهٔ ازون بالای قطب را تحلیل ببرد؟ پاسخ این پرسش در فرایندی به نام «چرخه های کاتالیتیک»[33] نهفته است. یک چرخهٔ کاتالیتیک چرخه ای است که در طی آن یک مولکول به شدت فعال است یا واکنش چرخه ای را میسر می سازد، بدون آن که طی آن، چرخهٔ خود آن مولکول از میان برود.

تولید کلر فعال (اتمی) به نور خورشید نیاز دارد و نور خورشید موجب چرخه های زیر می شود که درایجاد کلر و برم فعال نقش عمده ای دارند:

(I) $ClO + ClO + M \rightarrow Cl_2O_2 + M$

$Cl_2O_2 + h\nu$ (امواج فرابنفش) $Cl + ClO_2$

$ClO_2 + M \rightarrow Cl + O_2 + M$

و سپس:

$2 \times (Cl + O_2) \rightarrow 2 \times (ClO + O_2)$

و در نتیجه:

$2O_3 \rightarrow 3O_2$

(II) $ClO + BrO \rightarrow Br + Cl + O_2$

$Cl + O_3 \rightarrow ClO + O_2$

$Br + O_3 \rightarrow BrO + O_2$

دیمر Cl_2O_2 از رادیکال های مونو اکسید کلر که در مرحلهٔ I موجود است، از نظر حرارتی ناپایدار است. این مرحله در دماهای پائین بیش تر مؤثر است. بنابراین دمای کم ورتکس قطبی در طول زمستان بسیار مهم است. چنین تصور می شود که این مرحله و فعالیت مونو اکسید کلر مسؤول قسمت عمدهٔ کاهش ازون ۷۰ درصدی قطب جنوب است. در قطب شمال که نسبتاً گرم تر است، بخش مهمی از کاهش ازون تحت فعل و انفعالات مرحلهٔ II روی می دهد.

نتیجه

تخریب لایهٔ ازون یکی از پدیده های ناشی از تبعات فعالیت های انسانی در زمینه های صنعت به شمار می رود. این پدیده از زمانی آغاز شده است که تولید گازهای کلروفلوروکربن، به افزایش کلر آزاد در استراتوسفر منجر شده است. شدت بیش تر تخریب این لایه و پیدایش حفرهٔ ازون بر فراز قطب جنوب، ناشی از گرد هم آمدن ویژگی های طبیعی، فیزیکی و شیمیایی خاص دراین ناحیه است. سرمای بسیارشدید، وجود بادهای قوی موسوم به ورتکس قطبی، ایجاد ابرهای استراتوسفری قطبی با فقدان نورخورشید و ایجاد ذرات یخ، همگی در پدید آوردن شرایط مناسب برای وقوع واکنش های شیمیایی تولید کنندهٔ کلر آزاد شرکت دارند. میزان تراکم کلر آزاد وقتی به اوج می رسد که نور خورشید پس از زمستانی طولانی دوباره باز می گردد و امواج فرابنفش آن منجر به فروپاشی یون کلر می شود. اتم کلر در چرخه ای به نام تخریب کاتالیتیک ازون، به صورت زنجیره ای یا چرخه ای موجب تبدیل اکسیژن سه طرفیتی به دو ظرفیتی می شود که نتیجهٔ آن، همان ایجاد حفرهٔ ازون است. برای جلوگیری از تخریب لایهٔ ازون، از سال ۱۹۸۷ در کنفرانس مونترال کانادا قرار شده است، بر اساس همکاری بین المللی بین کشورهای امضا کنندهٔ عهدنامه، مصرف گازهای تخریب کنندهٔ لایه ازون به تدریج کاهش یابد. در صورتی که چنین امری عملاً تحقق یابد، بشر توانسته است برای یکی از خطرناک ترین معضلات زیست محیطی ناشی از فعالیت های سودجویانهٔ خود راه چاره ای بیابد.

زیرنویس

1. Dobson
2. Getis, Getis and Fellmann
3. ozone
4. Halley Bay
5. Briggs and Smithson
6. Troposphere
7. Stratosphere
8. Mesosphere
9. Thermosphere
10. British Antarctic Survey (BAS)
11. Blij and Muller (P.59)
12. Carver, G (1998): The Ozone Hole Tour; Centre for Athmospheric Science; Cambridge Universtiy, UK
http: // www. atm. ch. cam. ac. uk/ tour/ atmosphere. html
13. Total Ozone Mapping Spectrometer
14. DU (Dobson Unit)
15. Dobson Spectrometer
16. Surface Temperatue and Pressure (STP)
17. Chapman Reactions
18. Encarta Encyclopedia, 2002 (Microsoft)
19. chlorine
20. Chloro Fluoro Carbons or CFC's
21. bromine
22. Dunbar
23. cirumpolar winds
24. polar vortex
25. polar stratosperic clouds
26. hydrochloric acid (HCl)
27. chlorine nitrate ($ClONO_2$)
28. carrier
29. reservoir
30. heterogeneous
31. denoxification
32. catalitic destruction
33. catalitic cycles

منابع

۱. ازدکانی، م. ح. اکولوژی، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰، ص ۲۲.

۲. گوارد، آ. اسپیه ین، پ. آب و هواشناسی، ترجمهٔ ع رجایی، انتشارات نیمای تبریز، ۱۳۶۶.

۳. «فرخنه ای در لایهٔ ازون آسمان قطب جنوب»، ترجمهٔ ع غزوی، رشد آموزش زمین شناسی، شماره ۱۱، زمستان ۱۳۶۶، ص ۲۰-۱۴. (از Scientific American, January 1988)

۴. کاویانی، م. ر و علیجانی، ب. آب و هواشناسی، انتشارات سمت، ۱۳۷۹، تهران.

5. Carver, G (1998): The Ozone Hole Tour; Centre for Athmospheric Science; Cambridge Universtiy, UK
http: // www. atm. ch. cam. ac. uk/ tour/ atmosphere. html.

6. Brigge and Smithson ., 1993: Fundamentals of Physical Geography; Routledge, London, pp.558.

7. Blij, H. J. and Muller, P. O . 1993: Physical Geography of the Global Environment; John Wiley & Sons, New York. pp.576.

8. Mcpeters , P. , 2001: Principal Investigator for Earth TOMS.

9. Microsoft ® Encarta ® Online Encyclopedia 2002"Ozone Layer," at: http://encarta.msn. co. uk.

10. Getis, A., Getis, J., and fellmann, J. D. 1996: Introduction to Geography; W.C. Brown Publisher, London, Fifth Edition.