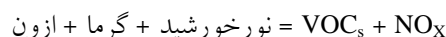


## Ozone

ازون به‌طور کلی به دو دسته خوب و بد تقسیم می‌شود؛ ازون خوب، ازون پوشن سپهری (استراتوسفری) است که به‌طور طبیعی بخش خطرناک تابش فرابنفش یعنی UVC و UVB را جذب و کره زمین، انسان و سایر موجودات زنده را در برابر آثار زیانبار آن محافظت می‌کند و با فعالیت‌های آدمی که منجر به تولید ترکیبات کلر می‌انجامد در حال تخریب است؛ دیگری ازون بد است که در وردسپهر (تروپوسفر) و از طریق واکنش شیمیایی بین آلاینده‌های هوا، چون اکسیدهای نیتروژن (NO<sub>x</sub>) و ترکیبات آلی فرار در حضور نور خورشید و گرما تشکیل می‌شود و سلامت افراد و محیط زیست را به خطر می‌اندازد.

ازون (O<sub>3</sub>) عبارت است از گازی متشکل از سه اتم اکسیژن که به دو دسته ازون خوب و ازون بد تقسیم می‌شود. ازون خوب در واقع همان ازونی است که به‌طور طبیعی در پوشن سپهر و در ارتفاع ۱۶ تا ۴۸ کیلومتری (۱۰ تا ۳۰ مایلی) از سطح زمین تشکیل می‌شود و از زمین در برابر پرتوهای خطرناک خورشیدی محافظت می‌کند. ازونی را که در جو پایینی (وردسپهر) و از طریق واکنش شیمیایی بین اکسیدهای نیتروژن (NO<sub>x</sub>) و ترکیبات آلی فرار در حضور نور خورشید و گرما تشکیل می‌شود، (مطابق رابطه زیر) ازون بد می‌گویند [۱-۳]:



حدود ۹۰ درصد ازون جو، در پوشن سپهر حضور دارد. ازون پوشن سپهری از واکنش اکسیژن اتمی (O) با اکسیژن مولکولی (O<sub>2</sub>) تشکیل می‌شود و حاصل این فرآیند، لایه ازون نامیده می‌شود. جو زمین دارای یک لایه ازون است که این لایه در ارتفاع ۱۶ تا ۴۸ کیلومتری از سطح زمین و در بخش پوشن سپهر قرار گرفته است. لایه ازون به‌طور طبیعی بخش خطرناک پرتو فرابنفش، یعنی UVC و UVB، را که از خورشید گسیل می‌شود، جذب و از موجودات زنده در مقابل آثار زیانبار آن محافظت می‌کند. برای بیان ضخامت لایه ازون یکای دابسون (DU: Dobson) را به‌کار می‌برند؛ در واقع، این یکا بیانگر ضخامت لایه‌ای است که منحصراً

به‌واسطه مولکول‌های خالص ازون جو تشکیل شده باشد. هر ۱۰۰ یکای دابسون، معادل یک میلی‌متر است. ضخامت لایه ازون جو ۳۰۰ دابسون، یا به بیان دیگر، ۳ میلی‌متر است. در اوایل دهه ۱۹۸۰م، غلظت لایه ازون بر فراز قطب جنوب براساس سنجش از راه دور اندازه‌گیری و مشخص شد که لایه ازون بر فراز قطب جنوب سال به سال نازک‌تر می‌شود؛ بنابراین، به کاهش ضخامت لایه ازون که معادل با کاهش غلظت مولکول‌های ازون در پوشن سپهر است، اصطلاحاً سوراخ شدن لایه ازون یا تخریب لایه ازون می‌گویند. در متون علمی، از ضخامت DU ۱۰۰ لایه ازون تحت عنوان سوراخ لایه ازون یاد می‌شود.

ترکیبات مختلف کلره (ترکیباتی که در ساختار شیمیایی آنها اتم کلر وجود دارد) سبب تخریب لایه ازون می‌شوند. در واقع، ترکیبات کلروفلوئوروکربن (CFCs) اصلی‌ترین ترکیبات مخرب لایه ازون به شمار می‌آیند. از دیگر عوامل ویرانگر لایه ازون می‌توان به کربن تتراکلرید، کلروفرم متیل و هالون‌ها اشاره کرد. این ترکیبات شیمیایی از فرآیندهای صنعتی چون دستگاه‌های تهویه مطبوع تجاری، یخچال‌ها و فریزرها و عایق‌هایی از جنس فوم تولید می‌شوند [۱-۳]. با افزایش غلظت گازهایی مانند ترکیبات کلروفلوئوروکربن (CFCs)، این سپر حفاظتی روز به روز دچار آسیب بیشتری (نازک‌تر) می‌شود. داده‌های جدید نشان می‌دهد که از سال ۱۹۷۹م به بعد در هر دهه ۳/۴ درصد از میانگین کل غلظت ازون پوشن سپهری نیمکره شمالی کاهش یافته است. هنگامی که لایه ازون نازک‌تر شود، بخش خطرناک پرتوهای فرابنفش، یعنی UVC و UVB، بیشتر به سطح زمین می‌رسد که به آسیب‌های بهداشتی (سرطان پوست) و محیطی بسیاری می‌انجامد.

### کلروفلوئوروکربن‌ها چگونه لایه ازون را تخریب می‌کنند؟

در دهه ۱۹۷۰م نظر داده شد که ترکیبات کلروفلوئوروکربن انسان ساخت، طی نورکافت یا فوتولیز (تجزیه شیمیایی بر

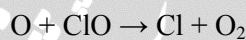
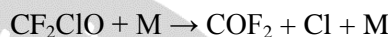
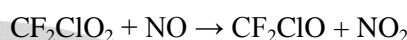
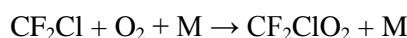
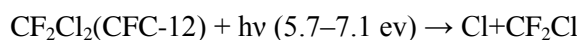
ODP بیان می‌کنند که در آن پتانسیل تخریب CFC-11 مبنا قرار می‌گیرد. برای به‌دست آوردن پتانسیل تخریب لایه ازون می‌توان از این فرمول بهره گرفت [۴]:

$$ODP = \frac{\text{تخریب ازون به واسطه کنش یک ترکیب خاص}}{\text{تخریب ازون به واسطه کنش CFC-11}}$$

برخی ترکیباتی که منجر به تخریب لایه ازون می‌شوند همراه با طول عمر و ODP آنها را در جدول زیر درج کرده‌ایم [۴]:

با توجه به آثار زیانبار بهداشتی و محیطی تخریب لایه ازون، جهانیان به این فکر افتادند که تولید و انتشار گازهای ویرانگر ازون را متوقف کنند. در همین خصوص، در سال ۱۹۸۷م نخستین توافق بین‌المللی برای محدود کردن انتشار CFCs در قالب پروتکل مونترال به امضای بیشتر کشورها رسید که هدف آن کاهش این گازها به نصف تا سال ۲۰۰۰م مشخص شده بود. دو مرحله تجدید نظر در این پروتکل صورت گرفت که آخرین آن به سال ۱۹۹۲م برمی‌گردد و در آن مقرر شد که تعدادی از گازهای صنعتی را تا سال ۲۰۳۰م کنترل کنند. امضاکنندگان این پروتکل، تولید CFCهای اصلی (CFC-11 و CFC-12) را جز برای کاربردهای محدود در کاربری‌های بسیار ضروری از قبیل مصارف پزشکی بعد از ۱۹۹۵م ممنوع اعلام کردند. همچنین، در این پروتکل کاهش دیگر گازها و آلاینده‌های ویرانگر لایه ازون

اثر تابش نور) می‌توانند به‌عنوان منبع چشمگیری از اتم کلر در جو عمل کنند و خواص شیمیایی اتم کلر به‌گونه‌ای است که می‌تواند به تخریب کاتالیزوری ازون منجر شود. ماندگاری طولانی این ترکیبات در لایه وردسپهر به آنجا منجر می‌شود که این گازها به لایه بالاتر (پوشن سپهر) بروند و آنگاه طی واکنش‌های شیمیایی که یک نمونه از آن در زیر آورده شده است، لایه ازون را تخریب کنند و از بین ببرند:



درواقع، هر اتم کلر در لایه پوشن سپهر قادر است ۱۰۰۰ مولکول ازون را تخریب کند. CFCs ترکیبات مختلفی دارند که دو نوع از پرکاربردترین آنها عبارت‌اند از CFC-11 و CFC-12. پتانسیل تخلیه و تهی شدن لایه ازون (Ozone depletion potentials (ODP) این ترکیبات را با کمیّت

نام	فرمول شیمیایی	طول عمر در جو (سال)	ODP
CFC-11	CFCl <sub>3</sub> تری‌کلروفلورومتان	۶۰	۱
CFC-12	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> دی‌کلروفلورومتان	۱۲۰	۱
CFC-113	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub> تری‌کلروتتری‌فلورومتان	۹۰	۰/۸
CFC-114	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub> دی‌کلروتترافلورواتان	۲۰۰	۱
CFC-115	C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> Cl <sub>5</sub> کلروپنتافلورواتان	۴۰۰	۰/۶
Halon-1211	CF <sub>2</sub> ClBr بروموکلرودی‌فلورومتان	۱۱	۳
Halon-1301	CF <sub>3</sub> Br بروموتتری‌فلورومتان	۶۵	۱۰

به تصویب رسید. تصویب و اجرای این قوانین به آنجا منجر شد که در اواسط دهه ۱۹۹۰م غلظت این گازهای مخرب لایه ازون به تدریج کاهش یافت تا این پیش‌بینی یا نوید را بدهد که سوراخ لایه ازون در قطب جنوب ترمیم یابد [۱؛ ۲؛ ۴].

#### کتاب‌شناسی

1. Calvert, J. G., Orlando, J. J., Stockwell, W. R., & Wallington, T. J. (2015). *The mechanisms of reactions influencing atmospheric ozone*. Oxford University Press.
2. Fabian, P., & Dameris M. (2014). *Ozone in the atmosphere*: Springer.
3. Lu, Q-B. (2015). *New theories and predictions on the ozone hole and climate change*. World Scientific.
4. Tiwary, A., & Colls, J. (2009). *Air pollution: measurement, modelling & mitigation*. CRC Press.

محمدصادق حسونند، فاطمه مؤمنی‌ها، ساسان فریدی

عضو هیات علمی دانشگاه علوم پزشکی تهران، دانشجوی دکتری

دانشگاه علوم پزشکی ایران، دانشجوی دکتری دانشگاه علوم پزشکی

تهران