www.pecritiue.com

بهمن
۱۴۰۴

نقد اقتصاد سیاسی

تا مرگِ گرمایی زمین

درباره‌ی آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از مواد منفجره و نقش جنگ‌ها در تغییرات اقلیمی

پیتر ی. پلات* و ارنست-کریستوف هاس†

ترجمه‌ی محسن خوش‌بین‡

* شیمیدان و استاد پیشین دانشگاه برمن

† شیمیدان و مهندس نرم‌افزار صنعتی

‡ ترجمه‌ی اولیه‌ی متن حاضر با چت جی‌بی‌تی انجام و سپس به یاری دوستی ویرایش شد.

بیش از صد سال پیش، فیزیک‌دانانی چون هرمان فون هلمهولتس،[۱] رودلف کلازیوس،[۲] ماکس پلانک[۳] و والتر نرنست،[۴] سه قانون اصلی ترمودینامیک را کشف کردند؛ قوانینی که بر همه‌ی فرایندهای مرتبط با انرژی و گرما در زمین ـ و در نتیجه اقلیم ـ حاکم است. کلازیوس به‌ویژه اثر گرما را از راه «تجزیه و پراکندگی ماده»[۵] توضیح داد. این تجزیه برای مواد جامد، به معنای از بین رفتن پیوندهای درونی و در نتیجه تخریب جسم جامد یا تبدیل آن به مایع هنگام ذوب شدن است. در مواد مایع و گازی، این فرایند برابر است با انبساط یا افزایش حجم! گرما در واقع همان توزیع انرژی میان همه‌ی اشکال ممکن حرکت ذرات در حالت پراکنده‌ی آن‌هاست.

در روند ذوب شدن، با وجود دریافت پیوسته‌ی انرژی، دمای ماده ثابت می‌ماند. اگر این انرژی را با دما مقایسه کنیم، اندازه‌ای به دست می‌آید که نشان‌دهنده‌ی میزان تجزیه یا پراکندگی ـ یعنی آنتروپی ـ است. به‌عکس، هنگامی‌که مایع منجمد می‌شود، همان انرژی آزاد می‌گردد. اما برای این کار باید آنتروپی از آن گرفته شود ـ و این تنها با صرف انرژی بیشتر امکان‌پذیر است. این امر برای همه قابل درک است؛ چون بازگرداندن یک جسم تخریب‌شده به حالت اولیه‌اش همیشه نیازمند کار و انرژی زیاد است. در مورد بخار، برای مثال تبخیر آب، نیز همین قاعده صادق است.

کلازیوس برای توضیح تولید آنتروپی، مثال خروج یک گاز به درون خلأ را می‌آورد. این فرایند خودبه‌خودی و برگشت‌ناپذیر است و آنتروپی افزایش می‌یابد. هرگز دیده نمی‌شود که گاز به‌طور داوطلبانه از حجم بزرگ‌تر به حجم کوچک‌تر بازگردد. تنها با صرف کار یا انرژی اضافی می‌توان حجم را کاهش داد. این مثال‌ها همان قانون دوم ترمودینامیک را نشان می‌دهند: همه‌ی فرایندهای واقعی در طبیعت عملاً برگشت‌ناپذیرند- این یک قاعده‌ی کلی و مستقل از شئ یا ماده در فرایند مورد بررسی است.

هدف واحد: نابودی

هدفِ استفاده از مهمات انفجاری، نابودی کامل هدف است. نمونه‌ی اخیر آن، استفاده از بمب‌های سنگرشکن با ۲٫۶ تُن مواد منفجره برای ویران‌سازی تأسیسات غنی‌سازی اورانیوم ایران در ژوئن ۲۰۲۵ است. یک تُن معادل TNT می‌تواند ساختمانی

با ابعاد ۱۰ در ۱۰ در ۱۰ متر (هزار متر مکعب) را کاملاً نابود کند. اگر تنها یک سانتی‌متر مکعب از آن به ذرات ریز گرد وغبار با اندازه‌ی ۰٫۰۱ تا ۰٫۱ میلی‌متر تبدیل شود، میلیاردها ذره‌ی معلق ایجاد می‌گردد. آسیب زیست‌محیطی ناشی از این تخریب نه تنها خود ویرانی فیزیکی، بلکه افزایش شدید آنتروپی است که همراه آن رخ می‌دهد.

با این حال وقتی شهرها در نتیجه‌ی بمباران گسترده در جنگ جهانی دوم، یا ماریوپول در جنگ اوکراین یا نوار غزه ویران می‌شوند، بطور واقعی بیش از یک سانتی‌متر مکعب ماده‌ی جامد به گردوغبار ریز تبدیل می‌شود. در این روند، بیابان‌های مصنوعی تازه‌ای ساخته می‌شوند -فرایندی که با تولید عظیم آنتروپی همراه است.

احتمال زیاد دارد که در شدت انفجارهای امروزی، نه تنها گرد وغبار ریز ($PM_{2.5}$) بلکه گرد وغبار فوق ریز (نانوذرات ۱ تا ۱۰ نانومتر) نیز تولید شود. این ذرات می‌توانند کیلومترها جابه‌جا شوند و حتی به لایه‌های بالایی جو برسند. گسترش چنین گرد وغباری آنتروپی را به طرز چشمگیری افزایش می‌دهد - در مقایسه با گرد وغبار عادی، بیش از ده میلیارد برابر، ریزتعداد ذرات به‌شدت بیشتر است. این گرد وغبار مانند غبار صحرا می‌تواند هزاران کیلومتر جابجا شود و اثرات گسترده‌ای بر آب‌وهوا داشته باشد.

ماده‌ی منفجره‌ی جامد تری‌نیتروتولوئن (TNT) هنوز هم به‌عنوان ماده‌ی اصلی بسیاری از مواد منفجره در بمب‌ها و گلوله‌هاست. بر اثر احتراق یا برخورد، موج ضربه‌ای درشبکه‌ی کریستالی تی ان تی ایجاد می‌شود که موجب واکنش بین مولکول‌های مجاور بدون نیاز به اکسیژن خارجی می‌گردد. از دو مولکول تی‌ان‌تی ، حدود ۱۴٫۵ مولکول به‌عنوان محصول این واکنش تولید می‌شود. این تخریب شدید شیمیایی، انرژی عظیمی به صورت گرما و فشار آزاد می‌کند - و این یعنی تولید آنتروپی بسیار بالا. درجریان انفجار، اکسیژن هوا، با محصولات واکنش ترکیب می‌شود و گوی آتشینی عظیم با دمای تا دو هزار درجه سانتی‌گراد و موج فشار قوی پدید می‌آورد. این گوی آتشین تابش حرارتی خطرناکی گسیل می‌کند که با سرعت نور در همه سو پخش می‌شود. هرچیز قابل‌احتراق در نزدیکی - انسان، حیوان یا گیاه - در دم می‌سوزد. تابش حرارتی مانند نور مرئی از فوتون‌ها تشکیل شده و می‌توان آن را از نظر فیزیکی همانند یک «گاز فوتونی» دانست. پراکندگی آن نیز با افزایش آنتروپی همراه است و میزان این آنتروپی با توان سوم دمای تابش متناسب است.

ویرانی زمین

هدف همه‌ی بمب‌ها و گلوله‌ها این است که روزی به کار گرفته شوند. حتی اگر فقط برای بازدارندگی ساخته شوند، تولید، نگهداری، و نهایتاً خنثی‌سازی آن‌ها نیز با افزایش آنتروپی عظیم، اتلاف انرژی، تخریب زمین و هزینه‌های کلان همراه است.

همه‌ی این فرایندها برگشت‌ناپذیرند. همین امر سبب شد که فیزیک‌دانان بزرگی چون کلازیوس در قرن نوزدهم به این نتیجه برسند که جهان در نهایت به یک حالت تعادل نهایی خواهد رسید - حالتی که آن را «مرگِ گرمایی» نامیدند. در مورد کُل کیهان این نتیجه‌گیری درست نیست، اما درباره‌ی زمین، که در معرض تابش خورشید است و خود نیز انرژی و آنتروپی را به فضا بازمی‌فرستد، چنین تعادلی می‌تواند برقرار شود. شدت این جریان‌ها بستگی به دمای سطح دو جرم تابشی (خورشید و زمین) دارد.

برای حفظ و تداوم حیات برروی زمین، آنتروپی تولیدشده باید به بیرون دفع شود. اما این دفع آنتروپی به دمای سطح زمین، به‌ویژه دمای جوّ در ارتفاع حدود ۹۰ کیلومتری، محدود است. اگر فعالیت‌های انسانی ـ مانند تولید بیش از حد و جنگ‌افروزی‌ها ـ آنتروپی بیشتری تولید کند از آنچه در هر لحظه می‌تواند به فضا منتقل شود، سطح زمین و لایه‌های پایین جوّ گرم می‌شوند. این آنتروپی باقیمانده در سطح زمین به شکل ویرانی و بیابان‌زایی، و در جوّ به صورت گرمایش اقلیمی، موج‌های گرمایی، باران‌های سیل‌آسا و طوفان‌های شدید بروز می‌کند. ما شاهد انقراض فزاینده‌ی گونه‌های جانوری و گیاهی هستیم.

در ادامه‌ی راه اندیشه‌ی هلم هولتس، کلازیوس و ویلهلم اوستوالد باید گفت که بقای زندگی در جهان در گرو رعایت موازنه‌ی مادی، انرژیایی و آنتروپیایی جهانی است. ازاین‌رو، جنگ‌ها باید بی‌درنگ پایان یابند، در آینده از آن‌ها پرهیز شود و اختلافات از راه دیپلماسی و گفت‌وگو حل گردد.

پیوند با متن اصلی: این‌جا

---

[۱] Hermann von Helmholtz
[۲] Rudolf Clausius
[۳] Max Planck
[۴] Walther Nernst
[۵] Disgregation