بیانیه سازمان جهانی هواشناسی (WMO) درباره تعدیل وضع هوا

۱۴ ژوئن ۲۰۲۵

این بیانیه تاریخ‌دار است و بنا به الزامات هفتادونهمین اجلاس شورای اجرایی(EC-79) ، تنها اطلاعات تا ژوئن ۲۰۲۴ را دربر می‌گیرد. این سند به‌صورت منظم به‌روزرسانی خواهد شد.

تعدیل وضع هوا به مداخله آگاهانه در جو زمین با هدف تأثیرگذاری بر شرایط جوی محلی اطلاق می‌شود که معمولاً از طریق روش‌هایی مانند باروری ابرها انجام می‌گیرد. این اقدامات عمدتاً شامل پخش مواد درون ابرها برای تغییر الگوهای بارش، افزایش بارندگی، کاهش تگرگ یا پراکندگی پوشش ابری است. سازمان جهانی هواشناسی (WMO) نه مروج و نه مخالف اجرای تعدیل وضع هوا است. فعالیت‌های WMO در این حوزه بر تشویق پروژه‌های پژوهشیِ مبتنی بر مبانی علمی معتبر و هدایت بهترین رویه‌ها برای پروژه‌های پژوهشی و عملیاتی متمرکز است.

موضوع «مداخله اقلیمی» ــ یعنی اقدام‌های عامدانه برای کاهش اثرات تغییر اقلیم ــ محور این سند نیست. تعدیل وضع هوا بر مقیاس‌های مکانی محلی تا منطقه‌ای و مقیاس‌های زمانی متناظر تمرکز دارد، در حالی که مداخله اقلیمی عمدتاً در مقیاس جهانی و مقیاس‌های زمانی اقلیمی مطرح است. هرچند ممکن است همپوشانی‌هایی میان تعدیل وضع هوا و مداخله اقلیمی وجود داشته باشد (برای مثال، روشن‌سازی ابرهای دریایی)، هدف این سند ارائه وضعیت کنونی تعدیل وضع هوا است.

باید توجه داشت که انرژی درگیر در سامانه‌های جوی آن‌قدر عظیم است که ایجاد سامانه‌های ابریِ باران‌زا، تغییر الگوهای باد برای انتقال بخار آب به یک منطقه، یا حذف پدیده‌های شدید جوی عملاً غیرممکن است. فناوری‌های تعدیل وضع هوا که ادعای دستیابی به چنین اثرات گسترده یا چشمگیری را دارند، فاقد پشتوانه علمی معتبر بوده و باید با تردید به آن‌ها نگریست.

باروری رطوبت‌دوست (Hygroscopic seeding) با افزودن ذرات به ابر با هدف تغییر تعداد و اندازه قطرات مایع انجام می‌شود، در حالی که باروری یخ‌زا (Glaciogenic seeding) تعداد و اندازه بلورهای یخ را هدف می‌گیرد. اگرچه فناوری‌های باروری ابر برای اهدافی مانند افزایش بارش، کاهش خسارت تگرگ و پراکندگی مه همچنان در حال توسعه‌اند، پژوهش‌های اخیر در زمینه باروری یخ‌زای ابرهای اوروگرافیکِ (کوهستانی) زمستانه پیشرفت قابل‌توجهی را نشان داده و رابطه علّی مبتنی بر شواهد را برای این روش خاص به اثبات رسانده‌اند. یکی از دلایل موفقیت باروری ابرهای اوروگرافیک (کوهستانی) به محدود بودن دینامیک ابر بازمی‌گردد. در ابرهایی با پیچیدگی دینامیکی بالا، مانند سوپرسل‌ها، اثر باروری تا حد زیادی در نوسانات طبیعی سامانه پنهان می‌شود. شواهد علمی درباره اثرگذاری توپ‌های ضدتگرگ و روش‌های یونیزاسیون در مقیاس ابر هنوز در دسترس نیست.

برنامه‌های عملیاتی در زمینه پراکندگی مه، افزایش باران و برف و مهار تگرگ در بیش از ۵۰ کشور جهان در حال اجرا است. هدف اصلی این پروژه‌ها تأمین آب بیشتر، کاهش خسارت تگرگ، حذف مه یا دستیابی به نتایج عملی مشابه در پاسخ به نیازهای شناخته‌شده است. تحقق اهداف اعلام‌شده اغلب با قطعیت کافی دشوار است. تحلیل‌های اقتصادی نشان می‌دهد که عملیات افزایش بارش و مهار تگرگ، در صورت موفقیت، می‌تواند منافع اقتصادی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد؛ با این حال، عدم قطعیت در اثرات تعدیل،

سرمایه‌گذاری در این فعالیت‌ها را با ریسک‌های قابل‌ملاحظه‌ای مواجه می‌کند. در عین حال، تقاضا برای این فعالیت‌های تعدیل وضع هوا به‌طور پیوسته در حال افزایش است که عمدتاً ناشی از بروز خشکسالی‌ها و سایر بلایاست.

پژوهش‌های راهبردی مستمر برای مشاهده، بررسی و تبیین فرضیه‌های علمیِ زیربنای تعدیل وضع هوا ضروری است. از آنجا که این پژوهش‌ها ذاتاً بر فرآیندهای مهم جوی تمرکز دارند، نه‌تنها برای تعدیل وضع هوا، بلکه برای بهبود پیش‌بینی‌های هوا و اقلیم که از طیف وسیعی از کاربردها مانند مدیریت آب، سامانه‌های هشدار سریع و سازگاری با تغییر اقلیم پشتیبانی می‌کنند، نیز اهمیت دارند. با دستیابی به درک علمی مستحکم از فرآیندهای جوی مرتبط، می‌توان یک آزمایش تعدیل وضع هوا را برای آزمون امکان‌پذیری فعالیت، اعتبار فرضیه علمی زیربنایی و فراهم‌سازی مبنایی برای فعالیت‌های عملیاتی طراحی و اجرا کرد. پژوهش‌های راهبردی همچنین باید فراتر از مطالعات سنتی علوم جوی رفته و جنبه‌های میان‌رشته‌ای را برای پاسخ‌گویی به نیازهای ابتدا تا انتهای فعالیت‌های تعدیل وضع هوا ــ مانند هیدرولوژی، اقتصاد و مدیریت آب، علوم اجتماعی و پژوهش‌های سیاستی ــ دربر گیرند. بهبود در تأسیسات مشاهده‌ای که اندازه‌گیری متغیرهای کلیدی را فراهم می‌کنند و نیز ارتقای توانمندی‌های مدل‌سازی عددی پیشرفته، اکنون امکان بررسی دقیق‌تر فرآیندهای ابر و بارش را مهیا ساخته و فرصت‌های تازه‌ای برای پیشبرد علم و عملِ تعدیل وضع هوا ایجاد کرده است.

ارزیابی صحیح یک فعالیت تعدیل وضع هوا مستلزم چندین پیش‌شرط است. برای ارزیابی آماری، نخست لازم است در طراحی آزمایش، فرایند تصادفی‌سازی مبتنی بر یک فرضیه فیزیکی لحاظ شود؛ به‌گونه‌ای که تنها برخی از رویدادهای مناسب برای تعدیل، تحت عملیات قرار گیرند. این امر مستلزم معیارهای عینی برای تعریف آغاز یک رویداد است تا از ورود سوگیری ناشی از انتخاب ذهنی رویدادها برای عملیات جلوگیری شود. دوم، در «تحلیل اولیه»، اثر باروری با استفاده از روش‌های آماری عینی مختلف ارزیابی می‌شود که رویدادهای بدون باروری را با رویدادهای بارورشده مقایسه کرده و برآوردی از افزایش/کاهش بارش به‌همراه بازه‌های اطمینان ارائه می‌دهد که اثر واقعی در آن‌ها قرار می‌گیرد. در نهایت، تحلیل اولیه باید با مجموعه‌ای از «تحلیل‌های ثانویه» مبتنی بر فیزیک پشتیبانی شود تا فرضیه باروری اعتبارسنجی گردد. روش‌های ارزیابی جدیدی اخیراً توسعه یافته‌اند که شامل مدل‌سازی عددی با تفکیک مکانی بالا هستند. برای پذیرش روش‌های ارزیابی مبتنی بر مدل عددی، لازم است عدم قطعیت‌های مدل کمی‌سازی شده و شبیه‌سازی‌ها تا حد امکان با مشاهدات مقید شوند.

مطالعات منتشرشده نشان داده‌اند که استفاده از یدید نقره (AgI) یا سایر مواد رایج مورد استفاده در عملیات گذشته تعدیل وضع هوا، اثر قابل‌توجهی بر سلامت انسان یا محیط زیست نداشته است. با این حال، هرگونه برنامه برای استفاده از مقادیر به‌مراتب بیشتر از این مواد یا به‌کارگیری یک عامل باروری جدید، باید با ارزیابی اثرات بالقوه آن بر محیط زیست و سلامت انسان همراه باشد. برخی مطالعات پیامدهای ناخواسته تعدیل وضع هوا ــ از جمله اثرات پایین‌دست و پیامدهای محیط‌زیستی و بوم‌شناختی ــ را مطرح کرده‌اند، اما این موارد نیازمند بررسی‌های بیشتر به‌عنوان بخشی از هر تلاش تعدیل وضع هوا هستند.

شواهد رو به افزایشی وجود دارد که فعالیت‌های انسانی بر ویژگی‌های ابر و بارش در مقیاس‌های محلی و گاه منطقه‌ای اثر می‌گذارند (برای مثال، کلان‌شهرها و ردکشتی‌ها). روشن‌سازی وجود و فرآیندهای چنین تعدیل وضع هوای ناخواسته (غیرعمدی) می‌تواند بینش‌های مهمی درباره امکان‌ها و محدودیت‌های تعدیل وضع هوای عمدی فراهم آورد. در بیشتر مواردِ تعدیل وضع هوای ناخواسته ــ در مقابل

آزمایش‌های باروری ابر ــ تعیین و تفکیک نوع ذرات مشارکت‌کننده در فرآیندهای میان‌مقیاس و ابری دشوار و گاه غیرممکن است، مگر آنکه اندازه‌گیری‌های بلندمدت در دسترس باشد.

وضعیت فناوری‌های مختلفِ به‌کاررفته برای پدیده‌های جوی متفاوت و مفاهیم فیزیکی زیربنای آن‌ها در ادامه خلاصه شده است.

مه

در اصل، همه انواع مه را می‌توان با گرمایش کافی یا اختلاط مکانیکی پراکنده کرد، هرچند این روش‌ها اغلب غیرعملی و پرهزینه‌اند. از این‌رو، هرگونه آزمون پراکندگی مه باید شرایط ترمودینامیکی غالب و عوامل ویژه مؤثر در تشکیل مه را به‌طور کامل بررسی کند و پیش از هرگونه مداخله باروری، درک جامعی از وضعیت فراهم آورد. پراکندگی مه‌های فوق‌سرد با استفاده از مواد یخ‌زا یا مواد سردکننده به‌عنوان روشی قابل‌اعتماد در برخی شرایط هواشناختی به‌خوبی تثبیت شده است.

بارش

شواهد قابل‌توجهی وجود دارد که نشان می‌دهد ریزساختار ابر می‌تواند در شرایط مناسب با باروری یخ‌زا یا رطوبت‌دوست تغییر یابد. معیارهای این شرایط بسته به نوع ابر به‌طور گسترده‌ای متفاوت است. باروری یخ‌زای ابرها در ابرهای دارای آب مایع فوق‌سرد و ابرهای دو فازی برای القای بارش فاز یخ به‌کار می‌رود. شواهد آماری و نیز شواهد فیزیکی حاصل از مشاهدات وجود دارد که افزایش بارش ناشی از باروری یخ‌زای ابرهای اوروگرافیکِ (کوهستانی) دارای آب مایع فوق‌سرد و دو فازی، و همچنین برخی ابرهای مرتبط با سامانه‌های جبهه‌ایِ حاوی آب مایع فوق‌سرد را نشان می‌دهد. باروری رطوبت‌دوست بر بخش فاز مایع ابرها اعمال می‌شود و هدف آن تقویت برخورد و ادغام قطرات آب است که در نهایت به افزایش کارایی بارش می‌انجامد. معمولاً ابرهای همرفتی با دینامیک پیچیده و نوسانات طبیعی بزرگ در بارش، هدف باروری رطوبت‌دوست هستند. این نوسانات طبیعی بزرگ، نسبت سیگنال به نویز ضعیفی ایجاد می‌کند که دستیابی به نتایج آماری معنادار در تحلیل اولیه را دشوار می‌سازد.

در حالی که برخی آزمایش‌های اخیرِ باروری ابر ــ چه یخ‌زا و چه رطوبت‌دوست ــ که در مجلات معتبر داوری‌شده منتشر شده‌اند، افزایش بارش را گزارش کرده‌اند، نتایج به ویژگی‌های طبیعی ابرها، وابسته است. نتایج یک آزمایش را نمی‌توان مستقیماً به محیطی متفاوت تعمیم داد. در برخی آزمایش‌های تاریخی، نتایج حتی با فرضیه اولیه باروری ناسازگار بوده‌اند. برای کمی‌سازی بهتر شرایط محیطی مساعد و ظرفیت تغییرپذیری این ابرها، به پژوهش‌ها و مشاهدات بیشتری نیاز است. روش‌های جایگزین برای افزایش بارش همچنان در جامعه علمی به‌شدت بحث‌برانگیز هستند و دیدگاه غالب نسبت به این روش‌ها با تردید همراه است. پیش از آنکه این روش‌ها به‌طور جدی مدنظر قرار گیرند، به پژوهش‌های بسیار بیشتری نیاز است.

تگرگ

در بسیاری از نقاط جهان، فناوری‌های باروری یخ‌زا به‌صورت عملیاتی برای کاهش خسارت تگرگ به‌کار گرفته می‌شوند. در بسیاری از این تلاش‌ها، هدف باروری نواحی رشد جدید توفان‌های تگرگ‌زا یا به‌اصطلاح ابرهای تغذیه‌کننده است. در برخی پروژه‌ها که توفان‌های تگرگ بر اساس شدت و مرحله تکامل به چند دسته تقسیم شدند و ارزیابی ایستای اثربخشی به‌طور جداگانه برای هر گروه انجام گرفت،

کاهش اندازه دانه‌های تگرگ گزارش شد. در چندین پروژه مشخص شد هرچه توفان‌های تگرگ ضعیف‌تر بوده و عملیات باروری در مراحل اولیه‌تری انجام شده است، تغییرات ویژگی‌های ابر سریع‌تر حاصل شده و اثرگذاری بر تگرگ زودتر امکان‌پذیر بوده است. با این حال، به دلیل انرژی بالا، دینامیک پیچیده و نوسانات طبیعی این توفان‌ها، آزمایش‌های باروری توفان‌های تگرگ هنوز برای پذیرش قانع‌کننده فرضیات و مفاهیم علمی زیربنای این فناوری کافی نیستند.

تلاش‌هایی برای باروری توفان‌های تگرگ با هسته‌های رطوبت‌دوست انجام شده است، اما نتایج قابل‌اثباتی به‌دست نیامده است.

سایر پدیده‌ها

هیچ شواهد مورد پذیرش عمومی دال بر امکان تعدیل سیکلون‌های حاره‌ای (توفندها و تایفون‌ها) وجود ندارد. هیچ روش اثبات‌شده‌ای برای تعدیل گردبادها، خطر برخورد صاعقه، سیلاب‌ها و سایر پدیده‌های شدید جوی از طریق باروری ابرها ارائه نشده است.

ملاحظات کلی

وضعیت علمی تعدیل وضع هوا همچنان در حال پیشرفت است، اما این حوزه همچنان بازتاب‌دهنده محدودیت‌های ما در درک تفصیلی دینامیک ابرها، ریزفیزیک و فرآیند تشکیل بارش است. افزون بر این، کاستی‌هایی در اندازه‌گیری‌های دقیق درجا و دورسنجیِ ذرات مایع و یخی ابر و بارش حاصل از آن‌ها وجود دارد. برای مواجهه با این چالش‌ها، دولت‌ها و نهادهای علمی باید تلاش‌های خود را در پژوهش‌های پایه فیزیک و شیمی مرتبط با تعدیل وضع هوا به‌طور چشمگیری افزایش دهند. این امر از طریق تمرکز هدفمند بر مشاهدات کنترل‌کیفیت‌شده و مدل‌سازی عددی، و نیز پیشرفت با بهره‌گیری از روش‌های علم داده قابل تحقق است. آزمون‌ها و ارزیابی‌های بیشترِ مفاهیم فیزیکی و راهبردهای باروری از اهمیت حیاتی برخوردارند. پذیرش تعدیل وضع هوا تنها با افزایش تعداد آزمایش‌هایِ به‌درستی طراحی و اجراشده و تقویت پایه نتایج علمی بهبود می‌یابد. همکاری‌های بین‌المللی ــ برای نمونه تحت نظر WMO ــ هم در حوزه مشاهدات و هم در مدل‌سازی عددی می‌تواند اعتبار چنین آزمایش‌هایی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد.

چالش‌های مهمی در پذیرش عمومی، اجتماعی و محلی به‌طور گسترده مشاهده می‌شود؛ از جمله ملاحظات مرتبط با اخلاق و عدالت محیط‌زیستی. دولت‌ها، نهادهای علمی و همکاری‌های بین‌المللی باید تلاش‌های خود را در کاوش علوم اجتماعی افزایش دهند؛ از جمله نحوه چارچوب‌بندی تعدیل وضع هوا، اثرات آن بر شکل‌گیری سیاست‌ها و مشارکت عمومی/ذی‌نفعان، و ملاحظات اقتصادی. دولت‌ها و سایر نهادهای درگیر در فعالیت‌های تعدیل وضع هوا باید در آموزش، تربیت نیروی انسانی و توسعه ظرفیت‌های مرتبط از طریق فرصت‌های محلی و بین‌المللی سرمایه‌گذاری کنند. همچنین، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های علوم اجتماعی مرتبط با پروژه‌ها و فعالیت‌های تعدیل وضع هوا در چارچوب ملاحظات اجتماعی ضروری است.

اذعان می‌شود که اغلب پروژه‌های تعدیل وضع هوا با نیازهای مستند و مشخص انگیزه می‌گیرند، اما ممکن است با ریسک‌هایی همراه باشند و نتایج آن‌ها همچنان نامطمئن بماند. هر پروژه جدید باید از نظر منافع مورد انتظار، ریسک‌های درگیر، بهینه‌ترین فناوری‌های قابل‌استفاده و پیامدهای محتمل، از نظر خبرگان مشورت بگیرد. مشاوران باید تا حد امکان مستقل از پروژه باشند تا دیدگاه‌های آنان بی‌طرفانه تلقی شود. پروژه‌های عملیاتی تعدیل وضع هوا باید به‌طور دوره‌ای (در صورت امکان سالانه) بازبینی شوند تا اطمینان حاصل شود بهترین رویه‌ها رعایت می‌گردد و WMO باید از تمامی فعالیت‌های تعدیل وضع هوا آگاه نگه داشته شود.