

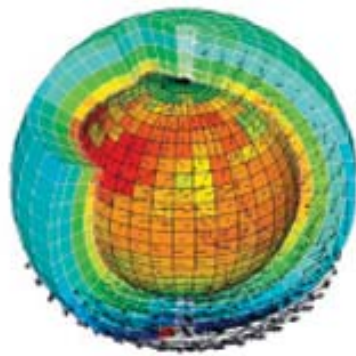
هوا چگونه خواهد بود

نویسنده: کلود بادوان^۱

مترجم: ارسلان شادمان

ویراستاران: فرج‌الله محمودی، شهناز عباسپور

پیش‌بینی وضع هوا یا اقلیم کار ساده‌ای نیست، بلکه مستلزم مدل‌سازی پدیده‌های متعدد با طبیعت گوناگون و دخالت چندین رشته علمی از ریاضیات گرفته تا زیست‌شناسی، انفورماتیک، فیزیک و شیمی است.



نمای هنری جعبه‌های محاسبه یک مدل پیش‌بینی هوا یا اقلیم

(تهیه تصویر از L.Fairhead LMD/CNRS)

^۱ Basdevant, Claude: *Le temps qu'il fera*,
in: L'explosion des mathématiques, SMF et SMAI, Paris, 2002, p. 7-10

دیرزمانی است پشت صحنه گزارش پیش‌بینی وضع هوا برای دوره‌های آینده، که هر شب در تلویزیون به وسیله گوینده جذابی برای ما تشریح می‌شود، دیگر از قورباغه و دماسنج خبری نیست، و به جای آن‌ها، رایانه‌های ابرقدرتی وجود دارند که اندازه‌گیری‌های بی‌شمار به دست آمده از ماهواره‌ها، و هم‌چنین قوانینی از مکانیک، فیزیک و ریاضیات (گاهی اوقات بسیار جدید) را به خورد آن‌ها داده‌اند.

برای آن که رایانه‌ها بتوانند پیش‌بینی‌هایی فراهم کنند، باید قبلاً آنچه را یک مدل عددی پیش‌بینی هوا نامند، با پختگی تدارک ببینند. اجمالاً، یک چنین مدل پیش‌بینی که حالت جو زمین را نشان می‌دهد، مدت ۸ تا ۱۰ روز اعتبار دارد، و در این راستا از مقادیر معیارهای هواشناختی (سرعت باد، دما، رطوبت، فشار، ابرها و غیره) در مرکز «جعبه‌هایی» که حدود ۵۰ کیلومتر طول و عرض و چند ده تا چند صد متر ارتفاع دارند، کمک می‌گیرند. تقسیم کردن سرتاسر جو زمین به شکل تخیلی به چنین جعبه‌هایی اجتناب‌ناپذیر است، زیرا مشخص کردن معیارهای هواشناختی در همه نقاط جو زمین ممکن نیست (زیرا تعداد این نقاط بینهایت است!). اصولاً هر قدر این جعبه‌ها کوچکتر باشند، توصیف حالت جو مشخص‌تر و به همین نسبت پیش‌بینی وضع هوا هم دقیق‌تر خواهد بود. اما، در عمل طول و عرض جعبه‌ها را نمی‌توان کوچکتر از ۵۰ کیلومتر در نظر گرفت، وگرنه، توان بزرگترین رایانه‌ها هم برای پردازش داده‌ها کفایت نخواهد کرد. در واقع، لازم است که محاسبات در مدت زمان مفیدی، یعنی دقیقاً کمتر از ۲۴ ساعت، تکمیل شود.

با فرض بر این که در آغاز دوره پیش‌بینی، حالت جو شناخته شده باشد، مدل مورد بحث، با استفاده از قوانین دینامیک و فیزیک، محاسبه تحول حالت جو را به رایانه می‌سپارد. تحول برحسب زمان، گام به گام و به فاصله‌های زمانی چند دقیقه محاسبه می‌شود. پیش‌بینی عددی وضع هوا بر قاعدی استوار است که از اوایل قرن بیستم شناخته شده بود، اما بکارگیری عملی آن تا سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰ و ظهور نخستین رایانه‌ها به تأخیر افتاد.

از اندازه‌های هواشناختی نمی‌توان مستقیماً بهره‌برداری کرد

برای پیش‌بینی مطابق طرح مطلوب فوق، نخستین مسأله، شناختن «حالت آغازین جو زمین» است. مشاهدات معمول برای مطابقت با این مسأله فاصله زیادی دارند. ایستگاه‌های هواشناسی زمینی به صورت مناسبی در سطح کره زمین توزیع نشده‌اند و

اندازه‌گیری‌های اندکی هم از نقاط مرتفع جو فراهم می‌سازند. اما ماهواره‌ها هم غالباً پشت سر هم حرکت می‌کنند یعنی دائماً برداشت‌های متوالی از زمین دارند. بنابراین، اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده در همهٔ نقاط مربوط به یک لحظهٔ مشترک نیستند. از سوی دیگر، ماهواره‌ها کمیتهایی را اندازه‌گیری می‌کنند که مربوط به تمام ضخامت قشر جوی است (و آن هم عموماً به جریان انرژی دریافتی برای طیف معینی از طول موج‌ها محدود می‌شود) و در واقع اندازهٔ کمیتهای هواشناختی (باد، دما، رطوبت و غیره) را که در معادلات مدل‌ها دخالت دارند، به‌دست نمی‌دهند.

پس آنچه در اختیار داریم، انبوهی از داده‌های پراکنده مربوط به ۲۴ ساعت است که به شکل ناهماهنگی روی سطح کرهٔ زمین توزیع شده‌اند. حال باید با این داده‌ها به تدوین «اولین» پیش‌بینی، یعنی ساختن یک حالت هواشناسی «آغازین» پردازیم که مدل مورد بحث بتواند تحول آن را شبیه‌سازی کند. و اما، بر اثر تحقیقاتی که در رشتهٔ بهینه‌سازی دینامیک صورت گرفته است و دانشمند روسی لِف پونتریاگین^۱ (۱۹۰۸-۱۹۸۸) و مکتب ریاضی فرانسه سهم به‌سزایی در آن داشته‌اند، خوشبختانه در سال‌های ۱۹۸۰ روش‌هایی به نام «شبیه‌سازی تغییراتی» فراهم شد و بدین ترتیب موفق شدند حالت آغازین را به شکلی بهینه بازسازی نمایند. فکر زیربنایی این روش‌های عملی، از سال ۲۰۰۰ در موسسهٔ هواشناسی فرانسه (میتئوفرانس)^۲ این بود که به‌گونه‌ای مسیرِ مدلِ عددی را مجبور کنند از «نزدیک» داده‌های مشاهده شده در ۲۴ ساعت گذشته عبور کند. البته، شبیه‌سازی تغییراتی، یگانه تکنیک جدید ریاضی نیست که پردازش مشاهدات را زیر و رو کرده است: استفاده از شبکه‌های عصبی مانند^۳ یا کاربرد موجک‌ها، که کمتر از ۲۰ سال از اختراع آنها می‌گذرد، فواید عمده‌ای برای کارایی، دقت و سرعت در پردازش داده‌های به‌دست آمده به‌وسیلهٔ ماهواره‌ها داشته‌اند.

وقتی آنالیز عددی وارد عمل شود ...

به محض شناسایی حالت آغازین جو، که مورد نیاز مدل عددی پیش‌بینی است، آنچه برای نوشتن باقی می‌ماند یک برنامهٔ انفورماتیکی است که بتواند وضع هوای آینده را بر مبنای حالت آغازین و قوانین فیزیک محاسبه نماید. این قوانین متکی بر یک توصیف

^۱ Lev Pontriaguine

^۲ Météo-France

^۳ réseaux neuromimétiques

پیوسته از فضا و زمان هستند؛ اما مدل عددی ما فقط تعدادی متناهی، هر چند بزرگ، از جعبه‌ها را می‌شناسد؛ همچنین فاصله زمانی بین دو حالت محاسبه شده به چند دقیقه می‌رسد. این است که می‌گویند مسأله را «گسسته‌سازی» کرده‌ایم. رسیدن از معادلات پیوسته به الگوهایی عددی برای مدل گسسته‌سازی شده، و در عین حال حفظ بیشترین دقت ممکن، حوزه مورد بحث آنالیز عددی است. این شاخه ریاضیات، پس از رسیدن رایانه‌ها توسعه انفجار آمیزی داشته است. هدف آنالیز عددی این است که بتواند معادلات را حل کند و محاسبات را به پایان برساند، یعنی تا آنجا پیش رود که مقادیر عددی دقیقی را به دست آورد و در عین حال زمان و تلاش‌های به کار گرفته را به حداقل برساند. ضرورت آنالیز عددی هم از آن جهت است که شبیه‌سازی مترادف با شبیه‌سازی تعبیر نشود و هم از آن رو که به ارزیابی خطاها و تردیدهای موارد پیش‌بینی بپردازد. به عنوان مثال، اخیراً، در زمینه جابجایی گونه‌های شیمیایی و ذرات توربولانس جوی، و به ویژه در مورد روش‌های شبیه‌سازی آنها، پیشرفت‌های مهمی به دست آمده است. این پیشرفت‌ها، مطالعه و پیش‌بینی آلودگی هوا را به شکل قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده‌اند.

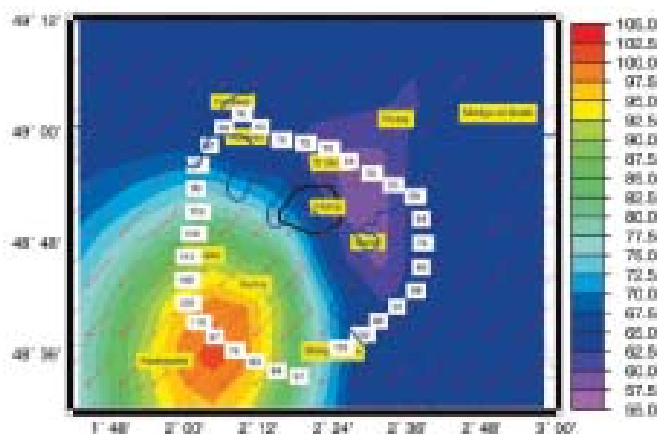
آیا می‌توان وضع هوا را برای مدت مدیدی پیش‌بینی کرد؟ نظریه سیستم‌های دینامیک پاسخ منفی به این پرسش می‌دهد

تاکنون راجع به پیش‌بینی وضع هوا برای مدت کوتاه ۸ تا ۱۰ روز مطالبی را مطرح کرده‌ایم. اما به چه علت پیش‌بینی‌هایی برای مدت طولانی‌تر انجام نمی‌شود؟ هواشناس آمریکایی ادوارد ل. لورنز^۱ در مقاله مشهوری به سال ۱۹۶۳ نشان داد که احتمالاً امیدی به این کار نیست. جو زمین، سیستمی آشوبناک^۲ است، یعنی هرگونه اشتباه در حالت آغازین، ولو بسیار کوچک هم باشد، در طول زمان با چنان سرعتی تشدید می‌شود که پیش‌بینی پس از ده روز، دقت خود را به کلی از دست می‌دهد. با این وصف، منظور این نیست که نمی‌توان اقلیم را پیش‌بینی کرد. یعنی، پیش‌بینی باید بیشتر به صورت آماری باشد تا قطعی و بیشتر ناظر به ارائه متوسط بارش‌ها و دماها باشد، نه این که مثلاً بگوید هوای ناحیه بروتانی در فلان روز از ماه ژوئیه دقیقاً چه خواهد بود. این موضوع بسیار مهم است: وضع اقلیم آینده در معرض خطر ناشی از گازهایی است که از فعالیت‌های

^۱ Edward L. Lorenz

^۲ Chaotique

انسانی برمی خیزد و باید آثار این اغتشاش‌ها را در دراز مدت پیش‌بینی کرد. در این زمینه، نظریه سیستم‌های دینامیک ابزار لازم را برای توجیه مدل‌سازی اقلیم در اختیار ما قرار می‌دهد. قلمرو سیستم‌های دینامیک، که یکی از بنیان‌گذاران آن در اوایل قرن بیستم، ریاضیدان فرانسوی هانری پوانکاره بود، در طول بیست سال اخیر پیشرفت‌های مهمی داشته است. به عنوان مثال، نظریه سیستم‌های دینامیک امکان دست‌یابی به پدیده‌ای را فراهم ساخت که ریاضیدانان از آن با عنوان جاذب‌ها^۱ یاد می‌کنند و هواشناسان آن را رژیم‌های هوا^۲ می‌نامند. هم‌چنین به کمک این نظریه می‌توان تشخیص داد در بین رژیم‌های هوا کدام یک پیش‌بینی‌پذیرترند و کدام یک ناپایدارترند. در وضعیت‌های ناپایدار، مدل‌سازی احتمالی^۳ را می‌توان ابزار مناسبی دانست. یعنی در این وضعیت‌ها باید مدل‌هایی را طراحی کرد که به‌طور آشکار، ویژگی تصادفی بودن پیش‌بینی را در نظر می‌گیرند. مدل‌سازی‌هایی از این نوع که هنوز توسعه زیادی نیافته‌اند، باید بر ابزارهای بسیار جدید نظریه معادلات با مشتقات جزئی تصادفی^۴، و آمار متکی باشند.



نمای رنگی اوزون روی ناحیه پاریس، در روز ۱۷ اوت ۱۹۹۸، ساعت ۱۶ و در ارتفاع ۳۰۰ متری. تمرکزهای نشان داده شده وسیله مدل عددی (CHIMERE) از LMD/IPSL وسیله رنگها کُدگذاری شده‌اند. اندازه‌ها به وسیله هواپیما گرفته شده و به صورت برجسب‌های زینتی در شکل درج شده‌اند (تهیه تصویر توسط MERLIN از متئو فرانس).

^۱ attracteur

^۲ régimes de temps

^۳ Modélisation probabiliste

^۴ théorie des équations aux dérivées partielles stochastiques

از پیش‌بینی‌های هواشناسی تا پیش‌بینی‌های اقلیمی

مدل‌های عددی پیش‌بینی اقلیم و مدل‌های پیش‌بینی هوا شباهت زیادی با هم دارند اما دو تفاوت اساسی بین آنها وجود دارد. بنابر دلایل مربوط به زمان محاسبه، جعبه‌های انتخابی آنها بزرگترند و ابعادی در حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ کیلومتر دارند. از سوی دیگر، زمان‌های مورد بحث، از چند ماه گرفته تا چند صد و گاهی چند هزار سال در نظر گرفته می‌شوند، زیرا دقیق‌تر از آن امکان ندارد. اما اختلاف اساسی ناشی از آن است که تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های زمانی طولانی رخ می‌دهند و از این رونمی‌توان از تأثیرات متقابل بین جو، اقیانوس‌ها، یخ‌های دریایی، و جو زیستی چشم پوشید. به همین دلیل، یک مدل‌سازی اقلیم ناچار است یک مدل جوی، یک مدل اقیانوسی، یک مدل یخ‌های دریایی و یک مدل کره زیستی را با هم تلفیق کند. علاوه بر پیچیدگی‌هایی که این ساخت از نظر انفورماتیک دارد، در مورد برقراری بهترین راه ایجاد هماهنگی بین این قلمروها، مسائل ریاضی حساسی مطرح می‌شوند، و همین‌طور در مورد شرایط محل تماس جو با اقیانوس، اقیانوس با یخ و غیره. نهایتاً برای آن که محاسبه در «جعبه‌های بزرگ» محاسبه‌ای با معنی تلقی شود، باید در مقیاس این جعبه‌ها، تأثیر آماری فرایندهایی را که در مقیاس بسیار کوچک‌تر ایجاد می‌شوند، ارزیابی کرد (مثلاً مطالعه شود که تأثیر آماری بر بیلان انرژی جعبه‌ای با ابعاد ۳۰۰ کیلومتر توسط توده‌های کوچک و ابرهای کومولوسی که با قطر چند کیلومتر در آن به وجود می‌آیند چیست؟) در تمام این مسائل، مطالب فراوانی برای مطالعه و بسط ریاضی آنها باقی مانده است.

کلود بادوان

آزمایشگاه هواشناسی دینامیک،

دانشسرای عالی پاریس،

آزمایشگاه آنالیز، هندسه و کاربردهایشان،

دانشگاه پاریس - شمال

چند مرجع

- *La Météorologie*, n° 30, numéro spécial sur la prévision météorologique numérique (2000).
- M. Rochas, et J.-P. Javelle, *La Météorologie - La prévision numérique du temps et du climat* (collection “ Comprendre”, Syros, 1993).
- R. Temam et S. Wang, “ Mathematical Problems in Meteorology and Oceanography ”, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, pp. 319-321(2000).

Claude Basdevant
Laboratoire de météorologie dynamique,
École normale supérieure, Paris et
Laboratoire Analyse, géométrie et applications,
Université Paris-Nord.