

# یک کامپیوتر ابری واقعی

«نویسنده: مایکل ورنر، لنی اولایکر و جان شلف» منبع: IEEE Spectrum، اکتبر ۲۰۰۹ «ترجمه: احمد شریف پور»

## ابر کامپیوتری برای مدل سازی آب و هوا

تلاش برای محاسبه ریاضی آب و هوا قدمتی طولانی دارد. نخستین گام در این مسیر در دانشگاهی مدرن و تکنولوژیک یاد آزمایشگاه‌های دولتی صورت نگرفته است. بلکه آن گونه که تنها محاسب آن عنوان می‌کند «روی توده‌ای کاه در سنگری سرد» انجام شده است. لوئیس فرای ریچاردسون، که در جنگ جهانی اول به عنوان راننده آمبولانس خدمت می‌کرد و ابزارهای مورد استفاده‌اش تنها کمی مدرن‌تر از جدول‌های لگاریتمی بود، در سال ۱۹۱۷ برای محاسبه تغییرات آب و هوای اروپای مرکزی تلاش جانانه‌ای را براساس اصولی ابتدایی آغاز کرد. روزی را که او برای شبیه‌سازی انتخاب کرده بود، هیچ ویژگی خاصی نداشت. تنها مجموعه‌ای از اندازه‌گیری‌های خام بالون‌های هواشناسی در دست بود که او از آن‌ها به عنوان نقطه شروع بسیاری از محاسبات دستی خود استفاده کرد و تعجب‌آور نبود که هیچ یک از نتایج به دست آمده با واقعیت انطباق نداشت.



## در تلفن‌های همراه و سایر دستگاه‌های قابل حمل

پس از گذشت سه دهه (و یک جنگ جهانی دیگر) ریاضیدانی به نام جان فون نویمان - از پیشگامان دنیای کامپیوتر - دوباره، اما این بار به کمک ابزارهای الکترونیک، به سراغ مسئله محاسبه وضعیت جوی رفت. با این حال، محدودیت‌های کامپیوترهای اوایل دهه ۱۹۴۰ که از آن‌ها استفاده می‌کرد، تلاش او را برای شبیه‌سازی طبیعت بسیار محدود می‌کردند. اما پیشرفت‌های شگفت‌انگیز در قدرت محاسباتی کامپیوترها نسبت به زمان نویمان؛ دقت پیش‌بینی‌های عددی و محاسباتی آب و هوا را افزایش داده و این امکان را فراهم کرده است که این پیش‌بینی‌ها به بخشی از زندگی روزمره ما تبدیل شوند. آیا امروز عصر باران خواهد بارید؟ از متخصص پیش‌بینی آب و هوا پرسید و او نیز به توبه خود از یک محاسبه کامپیوتری کمک خواهد گرفت.

شبیه‌سازی و وضعیت اقلیمی نیز همانند پیش‌بینی‌های هفتگی آب و هوا، به شدت از پیشرفت مداوم قدرت محاسباتی کامپیوترها سود برده است. اما هنوز راه زیادی در پیش است. به‌ویژه پیش‌بینی تأثیر توده‌های ابر هنوز حلقه ضعیف زنجیر استدلال‌هایی است که برای گمانه‌زنی درباره تغییرات اقلیمی زمین به‌کار می‌رود. بخشی از این مشکل به این دلیل است که دقت مدل جهانی آب و هوایی که اکنون مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار پایین‌تر از آن است که بتواند سیستم‌های ابری را جداگانه شبیه‌سازی کند. برای محاسبه تأثیرات این توده‌ها، مدل‌های امروزی باید بر تخمین‌های آماری تکیه کنند و بسیاری از اقلیم‌شناسان خوشحال‌تر خواهند شد اگر مدل توده‌های ابری را به‌طور مستقیم در اختیار داشته باشند. اما مشکل اینجا است که دنیای محاسبات کامپیوتری علاقه‌ای به این کار ندارد و احتمالاً در آینده نزدیک هم نخواهد داشت.

سرعت کلاک ریزپردازنده‌ها دیگر در هر نسل جدید تولید افزایش نمی‌یابد. بنابراین، راهکار معمول برای به‌دست آوردن قدرت پردازش بیشتر، اتصال تعداد زیادی پردازنده به یکدیگر است که هر یک از آن‌ها روی بخشی از مسئله به کار پردازنده. اما این راه حل نیز مشکلات خاص خود را به همراه دارد که شاید نیاز به توان الکتریکی بسیار زیاد ساده‌ترین آن‌ها نباشد. به‌یقین هزینه تأمین نیروی مورد نیاز چنین سیستم کامپیوتری می‌تواند از کل منابع مالی موجود فراتر رود. این مشکل در تمام بخش‌های صنعت وجود خواهد داشت. شرکت‌هایی نظیر گوگل که به قدرت پردازش کامپیوتری بسیار بالایی نیاز دارند، ساختمان‌های خود را در نزدیکی سدها بنا می‌کنند تا بتوانند برای دیتاست‌هایی که ممکن است مصرفی معادل ۴۰ مگاوات یا بیشتر داشته باشند، الکتریسیته ارزان تهیه کنند. این بحران نیرو همچنین به این معنا است که محاسبات با کارایی بالا برای مواردی نظیر مدل‌سازی اقلیمی، هرگز آهنگ رشدی را که در دو دهه گذشته تجربه کرده است، تکرار نخواهد کرد. مگر آن‌که ایده‌هایی کاملاً نوین و بنیادی در این زمینه به‌کار گرفته شود. ما در این مقاله یکی از راهکارهای ممکن را تشریح خواهیم کرد.

به جای ساختن ابر کامپیوترها با روش فعلی، یعنی با کنار هم گذاشتن قطعات اولیه نظیر پردازنده‌هایی که در کامپیوترهای شخصی یا سرورهای سریع امروزی یافت می‌شود، پیشنهاد می‌کنیم که از طرح‌ها و اصول طراحی

حاکم بر بازار تجهیزات الکترونیک همراه استفاده شود. تنها در این صورت است که می‌توانیم هزینه و انرژی لازم را برای راه‌اندازی نسل جدید ابر کامپیوترها به سطح قابل‌کنترلی کاهش دهیم.

پیش‌تر در دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، تمرکز صنعت کامپیوترهای قدرتمند بر ساخت چیزهایی معادل خودرو فراری بود. ساخت ماشین‌هایی رده بالا براساس آن دسته از سخت‌افزارها که تهیه آن خارج از توان افراد عادی بود. اما در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل ۱۹۹۰، تحقیق و توسعه در صنایع در حال رشد کامپیوترهای شخصی کارایی ریزپردازنده‌های استاندارد را به شدت افزایش داد. گام‌های بعدی پیشرفت آنچنان سریع برداشته شدند که کلاستری از پردازنده‌های معمولی - فورها و فولکس واگن‌های صنعت کامپیوتر - که در حالت

## سرعت کلاک

**ریزپردازنده‌ها دیگر در هر نسل جدید تولید افزایش نمی‌یابد. بنابراین، راهکار معمول برای به‌دست آوردن قدرت پردازش بیشتر، اتصال تعداد زیادی پردازنده به یکدیگر است که هر یک از آن‌ها روی بخشی از مسئله به کار پردازنده.**

موازی کار می‌کردند، توانستند به قدرتی معادل ابر کامپیوترهای با طراحی خاص، البته با کسری از هزینه آن‌ها، دست پیدا کنند.

بسیاری از گروه‌های علمی که برای باقی ماندن در رده پیشگامان تحقیق و پژوهش به محاسبات سریع نیاز داشتند نیز از نتایج این پیشرفت بهره‌مند شدند. اگرچه این تجهیزات ممکن است به لحاظ قدرت پردازش یا میزان انرژی مورد نیاز با ابر کامپیوترهای خاص قابل قیاس نباشند، اما تفاوت مشکل‌سازی با آن‌ها ندارند و تعویض آن‌ها با سری جدید در هنگام لزوم به نسبت ساده‌تر است.

اگرچه ممکن است اکنون بدیهی به نظر برسد که بهترین راه ساخت ابر کامپیوترها استفاده از ریزپردازنده‌های تجاری تولید شده به صورت انبوه است، اما این موضوع هنوز نکته‌های

دیگری برای بحث دارد. از میانه دهه ۱۹۹۰، برخی گروه‌های تحقیقاتی بارها و بارها تلاش کردند سخت‌افزارهای محاسباتی تک‌منظوره‌ای را با کارایی محاسباتی بالا و ظرفیت‌های خاص، برای حل مشکلات خاص بسازند. اما این تلاش‌ها اغلب تحت الشعاع پیشرفت‌های روزافزونی قرار می‌گرفت که در کارایی پردازنده‌های عادی با تولید انبوه به‌وجود می‌آمد. در این پردازنده‌ها تراکم ترانزیستورها و سرعت کلاک تقریباً هر هجده ماه دو برابر می‌شد. به همین دلیل است که در طول یک دهه تنها جاسورترین و جاه‌طلبانه‌ترین برنامه‌های تحقیقاتی برای نیازهای محاسباتی سنگین خود از استفاده از فناوری‌های تجاری معمول روز روی گردانده‌اند.

اما پیشرفت سرعت کلاک پردازنده‌ها که برای مدت‌های مدیدی مدیون کوچک‌کردن اندازه ترانزیستورها بود، اکنون دیگر به پایان راه رسیده است. دلیل این امر به زبان ساده این است که حفظ رابطه قدیمی میان کوچک کردن اندازه ترانزیستور و افزایش سرعت پردازنده، به توان بسیار زیادی نیاز دارد و پردازنده از شدت حرارت خواهد سوخت. بنابراین، تولیدکنندگان به‌صورت فزاینده‌ای برای افزایش سرعت پردازش، هسته‌های پردازنده بیشتری را روی یک تراشه جای می‌دهند.

افزون بر این، سرمایه‌گذاری در برنامه‌های تحقیق و توسعه به سرعت از کامپیوترهای شخصی به سمت دستگاه‌های قابل حمل که بر پایه هسته‌های ساده و کم‌مصرف ساخته شده‌اند، گرایش پیدا کرده است. زیرا این دستگاه‌ها که تنها برای برآوردن نیاز محاسباتی برنامه‌های معینی طراحی شده‌اند، نسبت به پردازنده‌های چندمنظوره سیستم‌های رومیزی، توان بسیار کمتری مصرف می‌کنند. کارایی چنین پردازنده‌های توکار به یقین محدودتر از پردازنده‌های معمول است، اما آن‌ها می‌توانند به لحاظ محاسباتی و مصرف انرژی بهره‌وری بالاتری را ارائه کنند. هم‌اینک قابلیت محاسبات ممیز شناور با دقت مضاعف نیز به این پردازنده‌های کم مصرف نیز اضافه شده، که آن‌ها را برای محاسبات علمی نیز مناسب می‌سازد.

همان‌گونه که معماران ابر کامپیوترهای امروزی در ابتدای دهه ۹۰ استفاده از قطعات سازنده بر پایه فناوری کامپیوترهای رومیزی را توصیه می‌کردند، ما اکنون همکارانمان را به استفاده از ابزارهای بسیار معمول تشویق می‌کنیم، یعنی استفاده از پردازنده‌های طراحی‌شده برای دستگاه‌های قابل حمل و



شکل ۱ دقت مدل‌های آب و هوایی امروزی محدود به ۲۰۰ کیلومتر یا بیشتر است. دقتی مانند این تصویر ماهواره‌ای که خلیج مکزیک را نشان می‌دهد (سمت چپ)، آنقدر کم است که نمی‌توان سیستم‌های ابری را تک‌تک ردگیری کرد. مدلی که بتواند سیستم‌های ابری را محاسبه و تحلیل کند، به دقتی معادل ۱/۵ کیلومتر نیاز دارد (سمت راست).

برنامه‌های محاسبات توکار. در نگاه اول ممکن است ساخت ابرکامپیوترها با استفاده از پردازنده‌های محدود شده که در دستگاه‌هایی نظیر تلفن‌های همراه به کار می‌روند، عجیب به نظر برسد. اما زمانی که توجه کنید که هر دو انتخاب (استفاده از قطعات دستکتاپ و قطعات موبایل) ناشی از ملاحظات میزان نیروی مورد نیاز بوده‌اند، پیشنهاد ما منطقی‌تر به نظر می‌رسد. به یقین در هر دو مورد کارایی و بهره‌وری عامل اساسی بوده است.

روندی که ما پیشنهاد کرده‌ایم به‌طور منطقی دنباله‌رو سخنی است که سیمور کری، پیشتاز عرصه ابرکامپیوترها در سال ۱۹۹۵ بیان کرده است: «هیچ چیز اضافی و غیر الزامی را در آن قرار ندهید.»

همچنین در نظر داشته باشید که بازار پردازنده‌های توکار به تازگی به واسطه نیاز شدید به دستگاه‌های قابل حمل با کارایی بالا نظیر اسمارت‌فون‌ها (که می‌توانند وظایف پیچیده‌ای را نیز انجام دهند) به شدت رونق گرفته است. به عنوان نمونه، این روزها می‌توانید وسیله‌ای بخرید که بتواند از پس تشخیص گفتار، اجرای بازی‌ها، مرور اینترنت و حتی برنامه‌های نوین واقعیت افزوده برآید و در عین حال در یک کف دست جا شود.

وجود چنین اعوجبه‌هایی توضیح می‌دهد که چرا در حال حاضر سهم ابزارهای قابل حمل در بازار ریزپردازنده‌ها از سهم کامپیوترهای

شخصی بیشتر است و چون طراحی پردازنده‌های توکار به نسبت ساده‌تر است، این نوع پردازنده‌ها سریع‌تر با نیازها و تقاضای بازار هماهنگ می‌شوند. در حالی که از سازندگان پردازنده‌های سرور یا دستکتاپ انتظار می‌رود تقریباً هر دو سال یک هسته جدید پردازنده شکر ارائه کنند، سازنده یک پردازنده معمول توکار می‌تواند تقریباً دو بیست نوع متفاوت از پردازنده در هر سال عرضه کند.

شرکت‌هایی که بازار تراشه‌های توکار را تغذیه می‌کنند، می‌توانند به سادگی با این روند رو به رشد هماهنگ شوند، زیرا آن‌ها ابزارهایی در اختیار دارند که به آن‌ها امکان می‌دهد در صورت نیاز مشتریان به یک تراشه کم مصرف و نیمه سفارشی جهت استفاده در یک ابزار دیجیتال قابل حمل، با تغییر جهت طراحی پردازنده‌ها آن نیاز را برآورده کنند. این شرکت‌ها حتی می‌توانند نرم‌افزارهایی نظیر کامپایلر، دیباگر، ابزارهای پروفایلینگ و حتی سیستم‌عامل‌های کامل لینوکسی را برای تراشه خاصی که ارائه می‌کنند، تهیه و بهینه‌سازی کنند.

سازندگان ابرکامپیوترها می‌توانند جهت ساخت ماشین‌های کم مصرف برای محاسبات سنگین، به خوبی از این قابلیت‌ها استفاده کنند. این روش از روش‌های قبلی بهینه‌سازی تراشه‌ها برای ابرکامپیوترها متمایز خواهد بود، زیرا ما در فکر استفاده از طرح‌ها و ابزارهای طراحی هستیم که پیش‌تر در صنعت به کار گرفته شده‌اند.

چنین رویکردی امکان ساخت ابرکامپیوترهای منحصر به فردی را به وجود می‌آورد که هر یک برای برآوردن نیازهای وظیفه مورد انتظار بهینه شده‌اند. با این اوصاف، دیگر سؤال این نیست: «کدام مسئله جالب را می‌شود با بهترین ماشین‌های در دسترس حل کرد؟» در عوض محققان خواهند پرسید: «برای حل مسئله علمی مورد نظرمان، به چه نوع سخت‌افزاری نیاز داریم؟» و در نهایت فراهم کردن هزینه ساخت و راه‌اندازی چنین کامپیوتری در حد امکانات موجود خواهد بود. در باره پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی، که نیازمند آگاهی از تحولات آتی سطح زمین، اقیانوس‌ها و اتمسفر است، مدل‌سازی آخرین مورد (اتم‌سفر) دشوارترین قسمت خواهد بود. بیشتر مدل‌های امروزی اتم‌سفر، زمین را بر اساس خطوط مدارها و نصف‌النهارها تقسیم و تفکیک می‌کنند. دقت این تقسیم‌بندی به طرز عجیبی پایین است. غالباً هر سلول محاسباتی حدود دو درجه یا بیشتر از طول و عرض جغرافیایی را شامل می‌شود. به عبارت دیگر، یک سلول - یک پیکسل در نقشه جهانی حاصل از مدل‌سازی - ممکن است به گستردگی چند صد کیلومتر باشد. بسیاری از پدیده‌های جوی قابل توجه نظیر شکل‌گیری ابرها، طوفان‌ها و حتی مرزهای آب و هوایی در چنین گستره‌ای شکل می‌گیرند که باید الگوهای آن‌ها را با شیوه‌ای غیر از معادلات ساده حرکت مورد توجه و بررسی قرار داد.

راهبرد به کار رفته برای ردگیری تغییرات آب و هوایی در هر سلول شامل چندین میانگین آماری متفاوت و محاسبات پارامتری است که خود عدم قطعیت را در نتایج به همراه خواهند داشت. به همین دلیل، بیشتر پژوهشگران و کارشناسان حوزه اقلیم تمایل بسیاری برای افزایش دقت مدل جهانی اتمسفر از خود نشان می دهند. حد ایده آل برای محاسبات کاهش اندازه سلول ها تا یک یا دو کیلومتر خواهد بود. اما تاکنون چنین چیزی غیر قابل تصور بوده است، زیرا نیاز به ابزارهای کامپیوتری بسیار قدرتمندی خواهد داشت. مطمئناً تلاش برای برآورده کردن این نیاز با نوعی از ابرکامپیوتر که ما امروزه در دسترس داریم بسیار گران تمام خواهد شد. تنها بهای الکتریسیته مورد نیاز، کل بودجه موجود را به خود اختصاص خواهد داد.

پنج سال پیش، گروهی از محققان کامپیوتر از دانشگاه های کالیفرنیا، برکلی و لابراتور ملی برکلی لاورنس بحث هایی غیررسمی را درباره

محاسبه کند. ما برای این ابرکامپیوتر فرضی که می توانست چنین مدل اقلیمی را به وجود آورد و در عین حال در حد معقول برق مصرف کند، نامی انتخاب کرده ایم: درخشش سبز (Green Flash). شبیه نام ابرقهرمان ها به نظر می رسد و به نوعی هم چنین است.

اما درخشش سبز با چه سرعتی کار خواهد کرد؟ برای حفظ حال و هوای ابرقهرمانی باید بگوییم سرعت این سیستم به اندازه گلوله ای خواهد بود که با سرعتی هزار برابر قدم زدن یک فرد عادی حرکت می کند. به عبارت دیگر، درخشش سبز باید بتواند تغییرات اتمسفریک را هزار برابر سریع تر از رخ دادن واقعی آن ها شبیه سازی کند. به عنوان مثال، مدل سازی اقلیمی زمین در یک بازه صد ساله نباید بیش از حدود یک ماه زمان لازم داشته باشد. در غیر این صورت، سرعت این کامپیوتر برای دانشمندی که روی مسائل اقلیمی کار می کنند بسیار پایین خواهد بود. زیرا آن ها باید مدل

### انتخاب پردازنده

ایجاد مدل اقلیمی تحلیل ابرها نیاز به ابرکامپیوتری غول پیکر خواهد داشت. اگر این ابرکامپیوتر با پردازنده های همه منظوره معمول (نظیر AMD Opteron) ساخته شود، مصرف انرژی آن به شدت بالا خواهد بود. همان گونه که مقادیر زیر نشان می دهند، انتخاب یک تراشه کم مصرف، چیزی شبیه Xtensa LX2 محصول Tensilica، که به صورت معمول برای دستگاه های توکار (Embedded) به کار می رود، بسیار منطقی تر خواهد بود.

پردازنده	سرعت کلاک	گیگافلاپ در هر هسته	هسته های مورد نیاز	نیرو
AMD Opteron	۲/۸ گیگاهرتز	۵/۶	۱/۷۰۰/۰۰۰	۱۹۷ مگاوات
Xtensa LX2	۵۰۰ مگاهرتز	۱	۱۰۰/۰۰۰/۰۰۰	۳ مگاوات

آینده کامپیوترها و محاسبات شروع کردند. آن ها به این ایده رسیدند که قطعات سازنده سیستم های کامپیوتری آینده در هر مقیاسی، هسته های پردازشگر ساده ای خواهد بود؛ مانند آن هایی که اکنون در دستگاه های الکترونیکی باتری خور (کم مصرف) استفاده می شود. با این روش حتی می توان ابرکامپیوترهای پر قدرتی را که برای چیزهایی نظیر مدل سازی اقلیمی به کار می روند، تولید کرد. هر سه گروه برای امکان سنجی این ایده، یکی از چشم گیرترین مدل های آب و هوایی موجود را (نسخه ای از چیزی که به اصطلاح مدل اتمسفری جمعی نامیده می شود) به دقت مورد بررسی قرار دادند تا بتوانند آنچه را که برای افزایش دقت فضایی این مدل در حد مدل سازی تک تک سیستم های ابری مورد نیاز است، تخمین بزنند. هدف ما این بود که در مدل سازی اندازه سلول ها بیش از ۱/۵ کیلومتر نباشد و اتمسفر به جای ۲۵ لایه معمول فعلی به ۱۰۰ لایه تفکیک شود. چنین مدلی باید بیست میلیارد سلول را

بیست میلیون ناحیه حدود هزار سلول از شبکه شطرنجی محاسبات ابرها را در برخواهد گرفت و به توان محاسباتی برابر پانصد مگا فلاپ نیاز خواهد داشت؛ توانی که پردازنده های توکار رده بالای امروزی به آن دست یافته اند مدل سازی اقلیمی با این روش به ازای هر پردازنده به پنج مگابایت رم نیاز دارد و سیستم باید بتواند با سرعتی معادل پنج گیگابایت در ثانیه با این حافظه رم تبادل اطلاعات کند. چون پردازش یک ناحیه از این مدل اتمسفری تنها به اتفاقاتی وابسته است که در همان محدوده رخ می دهد، نیاز پردازنده ها به ارتباط با یکدیگر بسیار کم است. هر ثانیه ممکن است حدود یک گیگابایت اطلاعات بین یک پردازنده و چندین پردازنده دیگر رد و بدل شود که این نرخ جابه جایی باید برای سخت افزارهای توکار امروزی قابل دسترس باشد.

از آنجا که ما تاکنون نمونه ای از ابرکامپیوتر درخشش سبز را نساخته ایم، تنها می توانیم طرح اولیه ای از نحوه ساخت آن ارائه کنیم. قطعات سازنده این ابرکامپیوتر می تواند چیزی شبیه پردازنده های شرکت Tensilica باشد. شرکتی در سانتا کلارا کالیفرنیا که طراحی پردازنده های توکار به نسبت ساده خود را براساس نیاز مشتریان تغییر می دهد. به عنوان مثال، پردازنده های Xtensa LX2 محصول این شرکت می توانند به سادگی با سرعت پانصد مگاهرتز کار کنند و بدون هیچ مشکلی به نرخ پردازش یک گیگافلاپ برسند.

یکپارچه سازی ۳۲، ۶۴ یا حتی ۱۲۸ عدد از این پردازنده ها در یک بسته به همراه حافظه کافی و نرخ انتقال اطلاعات مورد نیاز برای مسئله مدل سازی اقلیمی نباید چندان دشوار باشد. اما برای رسیدن به قدرت پردازشی مورد نظر به ده میلیون هسته پردازنده نیاز خواهیم داشت.

استفاده از چنین پردازنده های ارزان قیمتی، هزینه مورد نیاز را برای پردازنده و حافظه به شدت کاهش خواهد داد. اما شما هنوز باید قیمت معمول هارد دیسک ها را بپردازید، ساختمانی برای جای دادن این کامپیوتر غول پیکر تهیه و کارمندی را برای نگهداری آن استخدام کنید و هزینه قهوه این کارمندان را نیز بپردازید. جمع کلی هزینه های ساخت یک ابرکامپیوتر با چنین روشی ممکن است به چند صد میلیون دلار برسد که البته این مبلغ بیش از هزینه برخی از ابرکامپیوترهای موجود در آزمایشگاه های ملی ایالات متحده یا حتی در برخی شرکت های فیلم سازی نخواهد بود. در حقیقت، این هزینه را باید با هزینه ساخت چنین ابرکامپیوتری با سیستم قطعی، یعنی با استفاده از پردازنده های مدرن دستکتاپ یا سرور مقایسه کنید.

مورد نظرشان را چندین بار اجرا کنند تا بتوانند پارامترهای متعددی را تنظیم کنند، سناریوهای مختلف اقلیمی را با یکدیگر و با یک یا چند مدل خط زمانی هزار ساله مقایسه کنند. دستیابی به سرعت مورد نظر یعنی هزار برابر سرعت اتفاقات طبیعی، در کمترین حالت نیاز به ۱۰ به توان ۱۶ محاسبه ممیز شناور با دقت مضاعف در هر ثانیه خواهد داشت و این یعنی ۱۰ پتافلاپ. خوشبختانه اتمسفر به خوبی خود را با مدل سازی روی یک ماشین با تعداد زیادی پردازنده هماهنگ، منطبق کرده است، یعنی می توان تغییرات آب و هوایی یک نقطه مشخص را بدون دانستن اتفاقاتی که در همسایگی آن رخ می دهد، محاسبه کرد. تمام آنچه لازم است اطلاعاتی است درباره وقایعی که دقیقاً در شمال، جنوب، شرق و غرب رخ می دهند.

مثلاً می توانید زمین را به دو میلیون قطعه مسطح تقسیم کنید که هر کدام از آن ها بعدها در ده لایه عمودی برش زده خواهند شد. هر یک از این

به عنوان مثال، هسته‌های پردازنده Opteron ساخت AMD به راحتی می‌توانند پردازنده‌های ساخت Tensilica را به لحاظ سرعت پردازش شکست دهند. برای به دست آوردن قدرت پردازش ده پتافلاپی مورد نیاز برای شبیه‌سازی اتمسفر زمین با دقتی که سیستم‌های ابری قابل محاسبه باشند، «تنها» ۱/۷ میلیون پردازنده Opteron مورد نیاز خواهد بود. به همین دلیل، شاید وسوسه شوید که ابر کامپیوتر مدل‌سازی اقلیمی را براساس تراشه‌های دو هسته‌ای استاندارد Opteron بسازید. اما این کار ساده‌انگارانه خواهد بود؛ حتی اگر بتوانید هزینه اولیه را که با برآورد ما بیش از یک میلیارد دلار است بپردازید، به احتمال هرگز نخواهید توانست هزینه استفاده از آن را تأمین کنید. زیرا این سیستم مصرف برقی معادل دویست مگاوات خواهد داشت که هزینه برق مصرفی آن را در سال به دویست میلیون دلار می‌رساند. در مقابل درخشش سبز، برق را مزه خواهد کرد و تنها به سه مگاوات برق نیاز خواهد داشت. میزانی که بسیاری از مراکز کامپیوتری امروزی در حال حاضر مصرف می‌کنند.

این اعداد با این فرض محاسبه شده‌اند که تمام چند میلیون پردازنده مورد استفاده در حداکثر سرعت و کارایی خود فعالیت کنند. یعنی هر محاسبه مورد نیاز نباید برای تکمیل به محاسبات ممیز شناور زیادی نیاز داشته باشد. دستیابی به این هدف به‌ویژه با پردازنده‌های همه منظوره نظیر Opteron به احتمال مشکل خواهد بود. استفاده از هسته‌هایی که برای برنامه‌های توکار در نظر گرفته شده‌اند، در این زمینه بسیار نوبدبخش خواهد بود، زیرا مدارهای چنین پردازنده‌هایی را می‌توان برای مسئله علمی مورد نظر بهینه‌سازی کرد. می‌خواهید یک بخش سخت‌افزاری دیگر اضافه کنید؟ مشکلی نیست. لازم است که پردازنده شما دستورالعمل‌های پرکاربرد مدل‌سازی اقلیمی را سریع‌تر انجام دهد؟ آن هم امکان‌پذیر است. اما اگر در این امر زیاده‌روی کنید، خطری دیگر در کمین شما خواهد بود: یافتن الگوریتمی بهتر و کاراتر برای حل مسئله، در یک آن ابرکامپیوتر گران‌قیمت شما را از رده خارج خواهد کرد. ایده ما برای ساخت درخشش سبز، شامل استفاده از قدرت پردازشی، حافظه و مسیرهای انتقال اطلاعات مورد نیاز هر یک از محدوده‌های محاسباتی است. پس از آن طراحان سخت‌افزاری می‌توانند سیستم مدارها را برای مسئله مدل‌سازی اقلیمی بهینه کنند و به احتمال زیاد این کار از طریق استفاده از کلیشه‌های سخت‌افزاری

ساخته شده با FPGA (آرایه دروازه با فیلدهای قابل برنامه‌نویسی Field-Programmable Gate Array) انجام خواهد شد. اما آن‌ها دقت خواهند کرد که سیستم مدارها به شدت مختص یک نوع خاص از مدل‌سازی اقلیمی نشود. با چنین روشی، ابرکامپیوتر ساخته شده می‌تواند در طول زمان با تغییر محاسبات عددی مورد نیاز برای مدل‌سازی اقیانوس‌ها و اتمسفر دوباره برنامه‌نویسی شود و این ابرکامپیوتر می‌تواند تعداد زیادی از روش‌های متفاوت شبیه‌سازی اقلیمی را با کارایی بالا اجرا کند که این خود به دانشمندان این امکان را می‌دهد تا مدل‌های مختلف را با یکدیگر مقایسه کنند. در نهایت، این امکان مقایسه به شدت به ارزیابی اعتبار نتایج و پیش‌بینی‌ها کمک خواهد کرد. به وضوح ساخت ابرکامپیوتر درخشش سبزکاری دشوار خواهد

## همان گونه که معماران ابر کامپیوترهای امروزی در ابتدای دهه ۹۰ استفاده از قطعات سازنده بر پایه فناوری کامپیوترهای رومیزی را توصیه می‌کردند، ما اکنون همکارانمان را به استفاده از ابزارهای بسیار معمول تشویق می‌کنیم

بود و به همین دلیل ما با گام‌هایی کوچک به آن نزدیک خواهیم شد. یکی از مهم‌ترین گام‌ها در این راه، در سال گذشته برداشته شد.

یعنی زمانی که ما و همکارانمان با استفاده از چیزی که «شتاب دهنده تحقیقات برای پردازنده‌های چندگانه» یا RAMP نامیده می‌شود، نمونه‌ای از پردازنده‌های درخشش سبز را شبیه‌سازی کردیم. سیستم RAMP (سرنام Research Accelerator for Multiple Processors) در واقع یک شبیه‌ساز سخت‌افزار بر پایه FPGA است که توسط همکاران ما در دپارتمان علوم کامپیوتری و مهندسی الکتریک دانشگاه UC برکلی برای تحقیق در زمینه معماری کامپیوتر ساخته شده است.

ما با همکاری کریس روان و گروهی دیگر از Tensilica توانستیم به این طرح دست پیدا کنیم. طرح ما از هسته‌های پردازنده XTensor ساخت

این شرکت به عنوان قطعات اصلی سازنده سیستم استفاده می‌کند. شبیه‌سازی RAMP که ما براساس هسته‌های پردازنده بهینه‌شده برای محاسبات علمی به وجود آوردیم، نسخه‌ای ساده شده از مدل جهانی آب و هوا را اجرا می‌کرد که توسط دیوید رندال و همکارانش در دانشگاه ایالتی کلرادو در شهر فورت کالینز برای محاسبه شکل‌گیری ابرها ابداع شده بود. هدف این آزمایش محاسبات اقلیمی نبود، بلکه ما می‌خواستیم طرح خود را که در RAMP شبیه‌سازی شده بود، آزمایش کنیم.

رنдал و همکارانش برای اجرای مدلشان امید زیادی به آینده درخشش سبز دارند. با استفاده از سریع‌ترین ابرکامپیوتری که هم‌اکنون در دسترس است و با کم کردن دقت مدل تا آخرین حد ممکن برای کنترل تک تک ابرها (حدود ۴ کیلومتر)، مدل آن‌ها تغییرات اقلیمی را تنها چهار برابر سریع‌تر از واقعیت مدل‌سازی می‌کند و این یعنی ۰/۴ درصد سرعت مورد نیاز. بنابراین، چنین مدل‌هایی تنها به کمک چیزی شبیه درخشش سبز می‌توانند صحت عملکرد خود را برای پیش‌بینی طولانی مدت آب و هوا اثبات کنند. نتایج آزمایش‌های RAMP به ما این امکان را می‌دهد که تا اواخر امسال یک مدل اقلیمی را روی نمونه شبیه‌سازی شده درخشش سبز اجرا کنیم و این خود تنها به ما نشان خواهد داد که کارایی تراشه اصلی تا چه اندازه خوب خواهد بود و اگر همه چیز خوب پیش برود، امید داریم که بتوانیم ظرف سال آینده، نمونه‌ای کوچک را با ۶۴ یا ۱۲۸ پردازنده و اتصالات داخلی آن‌ها تولید کنیم.

اما ساخت یک ابرکامپیوتر کامل و بهینه‌سازی کدها برای اجرای آن، ما و بسیاری از دست‌اندرکاران علوم کامپیوتر را برای مدتی بسیار طولانی‌تر - شاید یک دهه یا حتی بیشتر - مشغول نگاه خواهد داشت. به همین دلیل، شروع پروژه در زمان حاضر از اهمیت زیادی برخوردار است. در غیر این صورت تغییرات آب و هوایی زمین بسیار از ما جلوتر خواهند بود.

### برای اطلاعات بیشتر:

- مؤلفان نتایج کارشان را درباره نیازهای اولیه برای ساخت درخشش سبز با جزئیات بیشتر در مقاله «پیش به سوی مدلی با دقت بسیار بالا از اقلیم و آب و هوا» درمی‌سال ۲۰۰۸ (ژورنال بین‌المللی برنامه‌های محاسباتی سنگین) منتشر کرده‌اند. آخرین دستاوردهای این تحقیقات نیز در آدرس <http://www.lbl.gov/cs/html/greenflash.html> در دسترس است.