

هوش مصنوعی و مسئله ناویر-استوکس

نویسنده: دکتر عبدالرضا عشقی پور | تاریخ انتشار: 2026/10/06



بررسی جامع فیزیک سیالات، چالش‌های ریاضی و حواشی علمی

پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی، مرزهای علوم محاسباتی و ریاضیات محض را به طرز بی‌سابقه‌ای جابه‌جا کرده است. یکی از مهم‌ترین و جنجالی‌ترین اخبار اخیر، ادعای حل یکی از مسائل پیچیده ریاضیات معروف به «مسائل هزاره» (Millennium Prize Problems) یعنی معادله ناویر-استوکس (Navier-Stokes) توسط سیستم‌های هوش مصنوعی شرکت OpenAI است. این مقاله با بررسی دقیق ماهیت فیزیکی و ریاضیاتی معادله ناویر-استوکس، به تحلیل چالش «تکینگی» (Singularity) و انفجار (Blow-up) در سیالات تراکم‌ناپذیر می‌پردازد. در ادامه، ابعاد فنی و پردازشی مدل هوش مصنوعی استفاده شده، شامل به‌کارگیری هزاران عامل (Agent) و مصرف میلیون‌ها توکن با هزینه‌های نجومی، بررسی می‌شود. همچنین، این رویداد با حواشی بسیاری از جمله اتهام سرقت علمی از دو ریاضیدان که یکی از آنها کارمند شرکت رقیب، یعنی Anthropic بوده است (و نگرانی‌های مربوط به حریم خصوصی داده‌ها همراه بوده است. در نهایت، مقاله به بررسی واکنش جامعه علمی و محدودیت‌های فیزیک کلاسیک در برابر این دستاوردهای صرفاً تئوریک می‌پردازد.

تقاطع فیزیک، ریاضیات و هوش مصنوعی

علم فیزیک در بنیادین‌ترین تعریف خود، تلاشی است برای درک قوانین طبیعت به منظور پیش‌بینی آینده. مبنای بسیاری از این پیش‌بینی‌ها، معادلات دیفرانسیلی هستند که رفتار اجرام مادی را توصیف می‌کنند. با این حال، زمانی که از اجسام صلب به سمت سیالات (مایعات و گازها) حرکت می‌کنیم، پیچیدگی این معادلات به شدت افزایش می‌یابد. معادله ناویر-استوکس، که قلب تپنده مکانیک سیالات است، بیش از یک قرن است که ریاضیدانان و فیزیک‌دانان را درگیر خود کرده است.

اخيراً، ادعای حل بخش مهمی از معمای ناویر-استوکس توسط هوش مصنوعی، موجی از شگفتی و انتقاد را در مجامع علمی به راه انداخته است. این دستاورد نه تنها از منظر ریاضیاتی حائز اهمیت است، بلکه سؤالات بنیادینی را درباره نقش هوش مصنوعی در آینده پژوهش‌های علمی، مرزهای مالکیت فکری و رقابت تجاری میان غول‌های فناوری مطرح کرده است. آیا هوش مصنوعی واقعاً یکی از سخت‌ترین مسائل حل‌نشده تاریخ را حل کرده است، یا صرفاً با تکیه بر قدرت پردازشی عظیم و احتمالاً استفاده از داده‌های محرمانه دیگر پژوهشگران، به این نقطه رسیده است؟

مبانی فیزیکی؛ از قانون دوم نیوتون تا معادله ناویر-استوکس

برای درک عظمت مسئله ناویر-استوکس، ابتدا باید به مفاهیم پایه فیزیک کلاسیک بازگردیم. آشناترین و کاربردی‌ترین معادله در فیزیک مکانیک، قانون دوم حرکت نیوتون ($F = ma$) است. این معادله بیان می‌کند که نیروی خالص وارد بر یک جسم، برابر است با حاصل ضرب جرم آن جسم در شتابی که می‌گیرد. برای یک «جسم صلب» (Solid Body)، اعمال این قانون بسیار ساده است. وقتی نیرویی به یک توپ یا خودرو وارد می‌شود، کل آن جرم به صورت یکپارچه شتاب می‌گیرد؛ اما جهان پیرامون ما تنها از جامدات تشکیل نشده است. سیالات (مایعات و گازها) بخش عظیمی از محیط ما را شکل می‌دهند. ویژگی ذاتی سیالات این است که نمی‌توان آن‌ها را به عنوان یک توده یکپارچه و صلب در نظر گرفت. وقتی به یک ظرف آب نیرویی وارد می‌کنید، تمام ذرات آب به یک شکل و در یک جهت یکسان حرکت نمی‌کنند. آبی که در یک رودخانه جریان دارد یا بادی که می‌وزد، از میلیاردها ذره تشکیل شده که هر کدام می‌توانند مستقل از دیگری حرکت کرده و تحت تأثیر نیروهای محلی متفاوتی قرار گیرند.

برای حل این مشکل، فیزیکدانان و ریاضیدانان تلاش کردند تا قانون دوم نیوتون را برای «المان‌های بی‌نهایت کوچک» یک سیال بازنویسی کنند. نتیجه این تلاش‌ها، شکل‌گیری معادلات ناویر-استوکس بود. این معادله در واقع همان $F = ma$ است که برای یک قطعه میکروسکوپی از سیال بسط داده شده است. نیروهای وارد بر این قطعه کوچک از سیال به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

- **نیروی ناشی از گرادیان فشار (Pressure):** هر قطعه از سیال از سوی مولکول‌های اطراف خود تحت فشار است. این پدیده را زمانی که در عمق یک استخر شنا می‌کنید، به وضوح احساس خواهید کرد؛ آبی که شما را احاطه کرده است، از تمام جهات به شما نیرو وارد می‌کند.
- **نیروی ناشی از گرانروی یا ویسکوزیته (Viscosity):** این نیرو معادل اصطکاک داخلی سیال است. ویسکوزیته نشان‌دهنده میزان مقاومت سیال در برابر جاری شدن است. به عنوان مثال، آب ویسکوزیته پایینی دارد و به راحتی جاری می‌شود، اما عسل ویسکوزیته بالایی دارد. ذرات عسل چسبندگی بیشتری به هم دارند و حرکت یک لایه از آن، لایه‌های مجاور را نیز با شدت بیشتری به دنبال خود می‌کشد.
- **نیروهای خارجی (External Forces):** نیروهایی مانند گرانش یا نیروهای الکترومغناطیسی که از بیرون به کل حجم سیال وارد می‌شوند و مسیر حرکت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

چالش حل معادلات: تقریب در برابر دقت مطلق

یکی از ویژگی‌های کلیدی معادله ناویر-استوکس این است که «جواب دقیق و فرمول‌بندی شده» (Analytical Solution) برای حالت کلی آن وجود ندارد. برای درک این موضوع، تفاوت یک معادله خطی ساده ($ax = b$) را با معادلات پیچیده‌تر در نظر بگیرید. در معادله خطی، مقدار متغیر به سادگی از رابطه $x = b \div a$ به دست می‌آید. اما در معادلات دیفرانسیل غیرخطی (مانند معادله نوسان آونگ در دامنه‌های بزرگ یا خود ناویر-استوکس)، نمی‌توان به چنین فرمول‌تر و تمیزی رسید.

مهندسان در دنیای واقعی (مانند طراحی آئرودینامیک هواپیماها، پیش‌بینی وضعیت آب‌وهوا یا مدل‌سازی جریان خون در رگ‌ها) از روش‌های «تقریب و تخمین عددی» (Numerical Methods) استفاده می‌کنند. همان‌طور که برای محاسبه مساحت زیر یک منحنی نامنظم، آن را به مستطیل‌های بی‌نهایت کوچک تقسیم می‌کنیم (مفهوم انتگرال‌گیری ریمان)، مهندسان نیز حجم سیال را به شبکه‌های بسیار ریزی تقسیم کرده و معادلات را برای هر سلول با استفاده از ابررایانه‌ها حل می‌کنند.

مشکل اینجاست که هرچه بازه زمانی پیش‌بینی طولانی‌تر شود، خطاهای محاسباتی این تقریب‌ها روی هم انباشته می‌شود (اثر پروانه‌ای در سیستم‌های آشوبناک). میلیاردها ذره سیال که به طور مداوم بر روی یکدیگر تأثیر می‌گذارند و از یکدیگر تأثیر می‌پذیرند، پیش‌بینی دقیق و بلندمدت را از نظر عملی غیرممکن می‌سازند. اما مسئله هزاره، اصلاً در مورد پیش‌بینی وضعیت هوا یا ساخت هواپیما نیست؛ بلکه یک چالش کاملاً انتزاعی و ریاضیاتی است.

مسئله هزاره و معمای «تکینگی» (Blow-up)

مؤسسه ریاضیات کلی (Clay Mathematics Institute) در سال ۲۰۰۰ میلادی، هفت مسئله حل‌نشده مهم در ریاضیات را معرفی کرد و برای حل هر کدام، یک میلیون دلار جایزه تعیین نمود. یکی از این مسائل، اثبات وجود و همواری جواب‌های معادلات ناویر-استوکس (Navier-Stokes existence and smoothness) بود.

طرح مسئله به این شکل است: آیا ممکن است تحت شرایطی خاص در یک سیال تراکم‌ناپذیر (Incompressible Fluid) مانند آب یا روغن که برخلاف گازها حجمشان به سادگی فشرده نمی‌شود - از

یک جریان کاملاً هموار و آرام، در یک زمان محدود، به وضعیتی برسیم که سرعت در یک نقطه خاص به بی‌نهایت میل کند؟ این پدیده در ریاضیات فیزیک تحت عنوان «تکینگی» (Singularity) یا شرایط «بلو-آپ» (Blow-up) شناخته می‌شود.

برای تصور این وضعیت، گردابی را در نظر بگیرید که در حال مکش آب به داخل یک چاه است. با چرخش آب، سرعت در مرکز گرداب به طور پیوسته افزایش می‌یابد. از آنجا که سیال تراکم‌ناپذیر است، در صورت افزایش بی‌نهایت سرعت، ابعاد فیزیکی آن جریان باید به صفر میل کند (تشکیل یک خط با ضخامت صفر و طول بی‌نهایت). مسئله هزاره از ریاضیدانان می‌خواست که ثابت کنند آیا چنین انفجار ریاضیاتی در چارچوب معادلات ناویر-استوکس امکان‌پذیر است یا خیر. این مسئله برای چهار حالت مختلف (سیال محدود یا نامحدود، با حضور یا بدون حضور نیروهای خارجی) تعریف شده بود.

ورود غول‌های هوش مصنوعی به میدان ریاضیات محض

اخیراً، شرکت توسعه‌دهنده هوش مصنوعی OpenAI مدعی شده است که با استفاده از مدل‌های زبانی بسیار پیشرفته و داخلی خود، توانسته است این مسئله را برای حالت «سیال تراکم‌ناپذیر تحت تأثیر نیروهای خارجی» (در هر دو فضای محدود و نامحدود) حل کند. مدل هوش مصنوعی این شرکت ظاهراً اثبات کرده است که یک سیال تراکم‌ناپذیر می‌تواند در یک زمان محدود، از حالت یکنواخت به حالت تکینگی (بی‌نهایت شدن یکی از پارامترها) برسد.

ابعاد پردازشی این دستاورد به شدت حیرت‌انگیز است. بر اساس گزارش‌ها، مدل استفاده شده بسیار توانمندتر از نسخه‌های عمومی مانند ChatGPT یا حتی نسخه‌های پیشرفته‌تر است. شرکت OpenAI برای رسیدن به این اثبات ریاضی، از ۱۰۰۰ عامل (Agent) هوش مصنوعی به صورت همزمان استفاده کرده است که طی ۸۸ ساعت کار مداوم، حدود ۲۰۷ میلیون پیام را با یکدیگر رد و بدل کرده‌اند.

در این فرآیند، بالغ بر ۱۳۰ میلیون «توکن» (Token) مصرف شده است. توکن‌ها در واقع واحد پردازش ذهنی مدل‌های هوش مصنوعی هستند که نشان‌دهنده حجم عظیم محاسبات منطقی برای رسیدن به جواب است. برآوردها نشان می‌دهد که اگر یک کاربر عادی بخواهد چنین حجم پردازشی را از طریق پلتفرم‌های تجاری موجود خریداری کند، نیازمند پرداخت ده‌ها میلیون دلار خواهد بود. کارشناسان، هزینه صرف‌شده توسط منابع پردازشی اختصاصی OpenAI برای حل این مسئله را بین ۱۰ تا ۴۰ میلیون دلار (به طور واقع‌بینانه حدود ۲۰ میلیون دلار) تخمین می‌زنند.

اما چرا شرکتی باید ۲۰ میلیون دلار برای حل مسئله‌ای هزینه کند که جایزه آن تنها یک میلیون دلار است؟ پاسخ در رقابت استراتژیک غول‌های فناوری نهفته است. در مقطع فعلی، هدف اصلی شرکت‌هایی نظیر OpenAI، Anthropic، و Google، سودآوری مستقیم از فروش اشتراک‌های ماهانه نیست؛ بلکه هدف نهایی، اثبات برتری در مسیر دستیابی به «هوش مصنوعی جامع» (AGI) و قدرت‌نمایی در برابر رقبا است. حل یکی از پیچیده‌ترین مسائل ریاضی تاریخ، یک بیانیه قدرت بی‌نظیر برای جذب سرمایه‌گذاران و تسلط بر آینده فناوری است.

جنجال‌ها، اتهام سرقت علمی و بحران حریم خصوصی داده‌ها

اعلام این خبر توسط OpenAI، به جای اینکه تنها موجی از تشویق را به همراه داشته باشد، بلافاصله درگیر یکی از پیچیده‌ترین جنجال‌های علمی سال‌های اخیر شد. درست ۱۲ ساعت پیش از انتشار خبر موفقیت OpenAI، دو ریاضیدان مقاله‌ای منتشر کردند که در آن نسخه‌ای ساده‌تر از این مسئله را حل کرده بودند. آن‌ها روی «معادلات اویلر» (Euler Equations) کار کرده بودند؛ معادلاتی که در آن‌ها نیروی ویسکوزیته و اصطکاک لایه‌های سیال حذف شده و سیستم به شدت ساده‌تر می‌شود. آن‌ها همچنین روشی برای ورود محدود مقادیر ویسکوزیته به معادلات پیشنهاد داده بودند.

انتشار راه‌حل کامل هوش مصنوعی بلافاصله پس از انتشار مقاله این دو ریاضیدان، شک و تردیدهای فراوانی را برانگیخت. با بررسی‌های دقیق‌تر مشخص شد که رویکرد استفاده شده توسط هوش مصنوعی OpenAI، شباهت بسیار زیادی به رویکرد ابداعی این دو پژوهشگر داشته است. ماجرا زمانی پیچیده‌تر شد که مشخص گردید یکی از این دو ریاضیدان، کارمند شرکت رقیب یعنی Anthropic بوده است (اگرچه او تأکید کرد که این یک پروژه کاملاً شخصی بوده و ارتباطی به کارفرمای وی نداشته است).

نقطه اوج این جنجال، مسئله حریم خصوصی داده‌ها بود. این دو ریاضیدان اظهار داشتند که طی دو سال گذشته برای تحلیل داده‌ها، انجام محاسبات و کدنویسی از سیستم‌های هوش مصنوعی از جمله پلتفرم Codex متعلق به شرکت OpenAI استفاده کرده‌اند. این افشاگری این فرضیه را تقویت کرد که OpenAI احتمالاً به نحوی به داده‌ها و پرامپت‌های (Prompts) خصوصی این پژوهشگران دسترسی داشته، مدل خود را با استفاده از آن‌ها آموزش داده، و با تکیه بر قدرت پردازشی عظیم خود، زودتر از ریاضیدانان انسانی به راه‌حل نهایی و اثبات کامل رسیده است. اگرچه شرکت OpenAI هرگونه استفاده غیرمجاز از داده‌های خصوصی برای حل این مسئله را تکذیب کرده است، اما جامعه علمی هنوز قانع نشده و این رویداد، زنگ خطری جدی برای حفظ مالکیت فکری در عصر ابزارهای هوش مصنوعی به شمار می‌رود.

واکنش جامعه ریاضیات و محدودیت‌های فیزیک کلاسیک

ورود یک ماشین به حریم مقدس ریاضیات محض، با واکنش‌های دوگانه و گاه منفی از سوی ریاضیدانان مواجه شده است. برخی معتقدند که حل شدن مسائل ریاضی توسط منابع مالی بی‌کران

شرکت‌های خصوصی و قدرت بی‌رحم کامپیوترها، روح زیبایی‌شناسی ریاضیات و لذت کشف انسانی را از بین می‌برد. رقابت تک‌نفره یک ریاضیدان با یک مسئله تاریخی، اکنون جای خود را به لشکرکشی هزاران عامل هوش مصنوعی داده است.

از سوی دیگر، باید به ماهیت کاملاً انتزاعی این مسئله دقت کرد. این بخش از مسئله هزاره، هیچ کاربرد مستقیمی در مهندسی یا فیزیک روزمره ندارد. در دنیای واقعی، ما هرگز شرایطی نداریم که یک پارامتر فیزیکی در یک زمان محدود به بی‌نهایت مطلق میل کند. علاوه بر این، معادلات ناویر-استوکس در چارچوب فیزیک کلاسیک (نیوتنی) تعریف شده‌اند. وقتی در ریاضیات فرض می‌کنیم سرعت سیال به بی‌نهایت می‌رسد، از نظر فیزیکی دچار تناقض می‌شویم؛ زیرا با نزدیک شدن سرعت به سرعت نور، قوانین مکانیک کلاسیک فروپاشیده و باید از معادلات «نسبیت خاص» انیشتین استفاده کرد که مسائلی همچون اتساع زمان و افزایش جرم را در نظر می‌گیرد و ناویر-استوکس در ذات خود برای چنین شرایطی نوشته نشده است. علاوه، برخی از ریاضیدانان برجسته همچنان نسبت به اعتبار منطقی اثبات ارائه شده توسط هوش مصنوعی تردید دارند، زیرا هوش مصنوعی حالت بسیار خاصی را در نظر گرفته است که در آن نیروهای خارجی به صورت ضربه‌ای (Impulsive) به سیال وارد می‌شوند، و تعمیم این حالت به چارچوب کلی مسئله هزاره هنوز محل مناقشه است.

پایان سخن و چشم‌انداز آینده

پرونده ادعای حل معادله ناویر-استوکس توسط هوش مصنوعی، چه آن را یک پیشرفت خیره‌کننده بدانیم و چه یک سرقت علمی بزرگ‌شده، نقطه عطفی در تاریخ علم محسوب می‌شود. ماشین‌ها دیگر تنها ابزاری برای تسریع محاسبات مکانیکی نیستند؛ آن‌ها وارد قلمرو استدلال انتزاعی و تفکر عمیق ریاضی شده‌اند. این اتفاق به وضوح نشان داد که پیشرفت هوش مصنوعی توقف‌ناپذیر است. جامعه علمی به جای مقاومت بی‌ثمر در برابر ورود ماشین‌ها به عرصه‌های تحقیقاتی، باید به دنبال بازتعریف نقش انسان باشد. چالش‌های آینده علم تنها وابسته به یافتن راه‌حل برای معادلات پیچیده نخواهد بود، بلکه در پرسیدن پرسش‌های درست، وضع قوانین اخلاقی برای حفظ حقوق مؤلفین، و جهت‌دهی به این ابرقدرت پردازشی نهفته است. هوش مصنوعی شاید بتواند در ۸۸ ساعت چیزی را حل کند که انسان‌ها یک قرن روی آن متوقف شده بودند، اما هنوز این ذهن انسان است که ارزش و معنای واقعی این اکتشافات را در بستر هستی درک می‌کند. بحث و جدل بر سر ناویر-استوکس به این زودی‌ها پایان نخواهد یافت، اما بی‌شک مسیر آینده پژوهش در سایه هم‌زیستی با هوش مصنوعی رقم خواهد خورد.