در اولین روز از سال جدید میلادی به بررسی تازه‌های حوزه‌های علم و فناوری پرداخته‌ایم

۲۰۲۴ چشم‌انتظار کدام نوآوری‌ها باشیم؟

ندا اظهری
مترجم

هر سالی که می‌گذرد فناوری‌ها و نوآوری‌ها و پیشرفت‌های علم و فناوری شگرفی در دنیا رخ می‌دهد که پیش از شروع سال جدید پیش‌بینی می‌شود که بشر در سال پیش‌رو شاهد آن خواهد بود و فرصتی برای بررسی دستاوردهای گذشته و دستاوردهای پیش‌رو ایجاد می‌شود. همان‌طور که در سال ۲۰۲۳ برترین پیشرفت‌های علمی را پشت سر گذاشتیم سال ۲۰۲۴ نیز جهان دستاوردهای متعددی را تجربه می‌کند و دانشمندان و محققان در حوزه‌های مختلف پزشکی، شیمی، محیط زیست، فضا و... توانسته‌اند به اکتشافات قابل توجهی دست پیدا کنند که تداوم این مطالعات می‌تواند آینده روشنی را پیش‌روی کره زمین و بشر قرار دهد. انجمن شیمی آمریکا به تازگی تازه‌ترین دستاوردهایی که در سال ۲۰۲۴ انتظار آن را خواهیم داشت، بیان کرده است.

افزایش سهم هوش مصنوعی در R&D

در حالی که هوش مصنوعی چشم‌اندازی روشن داشته، تحول هوش مصنوعی در حوزه شیمی و کشف دارو هنوز به‌طور کامل محقق نشده است. درحالی‌که این حوزه شکست‌های متعددی را نیز تجربه کرده اما نمی‌توان از پیشرفت‌هایی غافل شد که در این زمینه‌ها ایجاد شده است. هوش مصنوعی مولد نقش مهمی در کشف داروها ایفا می‌کند به‌طوری که یادگیری ماشینی بیشتر در تحقیقات محیطی و مدل‌های زبانی بزرگ مانند ChatGPT در برنامه‌های مراقبت‌های بهداشتی و تنظیمات بالینی مورد آزمایش و استفاده قرار می‌گیرند. بسیاری از دانشمندان به‌دقت در جست‌وجوی AlphaFold، نرم‌افزار پیش‌بینی ساختار پروتئینی شرکت DeepMind هستند که چگونگی درک پروتئین‌ها را متحول می‌کند. شرکت DeepMind و آزمایشگاه‌های «ایزومورفیک» به‌تازگی اعلام کرده‌اند که چگونه آخرین مدل آنها که دقت بالایی را نشان می‌دهد قادر است پیش‌بینی‌هایی را برای تمام مولکول‌های موجود در بانک داده پروتئین انجام داده و پوشش لیگاندها، اسیدهای نوکلئیک و تغییرات پس از انتقال را گسترش دهد. کشف آنتی‌بادی درمانی که توسط هوش مصنوعی هدایت می‌شود نیز محبوبیت پیدا می‌کند و پلتفرم‌هایی چون موتور کشف آنتی‌بادی، یعنی RubrYc Therapeutics به پیشرفت تحقیقات در این زمینه کمک می‌کند. اگرچه بسیاری با هیجان بالایی به توسعه هوش مصنوعی می‌نگرند، نگرانی درمورد داده‌های آموزشی دقیق و قابل دسترس، انصاف و تعصب، عدم نظارت قانونی، تاثیر بر دانشگاه، تحقیقات و انتشارات علمی، توهمات در مدل‌های زبانی بزرگ و حتی نگرانی درمورد تهدیدات اطلاعاتی برای سلامت عمومی مورد بحث قرار می‌گیرند. باوجوداین، پیشرفت مستمر در زمینه هوش مصنوعی اجتناب‌ناپذیر است بنابراین انتظار می‌رود که در طول سال ۲۰۲۴ شاهد پیشرفت‌ها و نوآوری‌های جدید باشیم.

حفظ سلامت محیط‌زیست با «شیمی سبز»

شیمی سبز رشته‌ای است که به‌سرعت درحال تکامل است و به‌طور مداوم به دنبال راه‌های نوآورانه‌ای برای به حداقل رساندن تاثیرات زیست‌محیطی فرآیندهای شیمیایی است و در سال ۲۰۲۴ شاهد پیشرفت‌های چشمگیری خواهیم بود.

۱ **بهبود پیش‌بینی‌ها و نتایج شیمی سبز:** یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در شیمی سبز پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی مواد شیمیایی و فرآیندهای جدید است. محققان در حال توسعه ابزارها و مدل‌های محاسباتی جدید هستند که به پیش‌بینی این اثرات با دقت بالاتر کمک می‌کند. این امر به شیمیدانان امکان می‌دهد تا مواد شیمیایی ایمن و سازگار با محیط زیست را طراحی کنند.

۲ **کاهش پلاستیک‌ها در محیط زیست:** سالانه بیش از ۳۵۰ میلیون تن زباله‌های پلاستیکی در جهان تولید می‌شود. در چشم‌انداز تولیدکنندگان، تامین‌کنندگان و خرده‌فروشان کاهش استفاده از پلاستیک‌های یکبارمصرف و میکروپلاستیک‌ها اهمیت بالایی دارد. رویکردهای ارزش‌محور نوآورانی مانند MiTerro که از محصولات جانبی صنعتی و زباله‌های زیست توده برای جایگزینی پلاستیک سازگار با محیط زیست و ارزان‌تر استفاده مجدد می‌کنند، به‌زودی انتظارات صنایع را برآورده خواهد کرد. کاهش هزینه‌ها و ردپای پلاستیک در کل زنجیره تامین اهمیت پیدا خواهد کرد.

۳ **شیمی باتری جایگزین:** در فضای ذخیره باتری و انرژی، یافتن جایگزین‌هایی برای «عناصر کمیاب و در معرض خطر» مانند لیتیوم و کبالت بسیار مهم است. این درحالی است که اجزای ضروری بسیاری از باتری‌ها کمیاب و گران هستند. سرمایه‌گذاری‌های جدید روی باتری‌های لیتیوم آهن فسفات (LFP) که از نیکل و کبالت استفاده نمی‌کنند، گسترش یافته به‌طوری که ۴۵ درصد از سهم بازار خودروهای خودران برای LFP در سال ۲۰۲۹ پیش‌بینی شده است. تحقیقات مداوم برای توسعه بیشتر در مواد جایگزین مانند سدیم، آهن و منیزیم که فراوان‌تر، ارزان‌تر و پایدارتر هستند برنامه‌ریزی شده است.

۴ **کاتالیست‌های پایدارتر:** کاتالیست‌ها واکنش‌های شیمیایی را تسریع بخشیده یا حتی انرژی موردنیاز را بدون اینکه مصرف شود، کاهش می‌دهد. فلزات نجیب، مانند طلا، نقره کاتالیزورهای عالی هستند. باوجوداین، گرانقیمت بوده و استخراج آنها آب‌های زیست‌محیطی را به دنبال دارد. حتی کاتالیزورهای فلزات غیرنجیب نیز می‌توانند به دلیل آلودگی و چالش‌های دفع آنها سمی باشند. کاتالیزورهای پایدار از عناصر فراوانی در زمین ساخته شده‌اند که طبیعتا غیرسمی نیز هستند. در سال‌های اخیر تمرکز بیشتری روی توسعه کاتالیزورهای پایدار انجام شده که سازگارتر با محیط زیست بوده و کمتر به فلزات گرانبها وابسته هستند. پیشرفت‌های جدیدی که در کاتالیست‌ها رخ می‌دهد نقش‌ها و اثرات زیست‌محیطی آنها باعث پیشرفت معنادار در کاهش ردپای کربن می‌شود.

۵ **بازیافت باتری‌های لیتیومی:** سرمایه‌گذاری روی بازیافت باتری‌های لیتیومی با بیش از ۸۰۰ پتنت در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته است. استفاده از الکترولیت‌های جامد یا الکترولیت‌های مایع غیرقابل اشتعال ممکن است ایمنی و دوام این باتری‌ها را بهبود بخشیده و استفاده از مواد به کار رفته در آنها را کاهش دهد. درنهایت، روشی برای تولید الکترودهای بدون حلال می‌تواند استفاده از حلال‌های منسوخ شده را کاهش دهد که برای جلوگیری از انتشار نیاز به بازیافت و مدیریت دقیق دارند.

کاربرد گسترده مواد زیستی در حفظ سلامت بشر

مواد جدید برای کاربردهای زیست پزشکی می‌توانند بسیاری از بخش‌های مراقب‌های بهداشتی را در سال ۲۰۲۴ متحول کنند. یکی از نمونه‌ها، مواد بیوالکترونیک (الکترونیک زیستی) است که رابط بین دستگاه‌های الکترونیکی و بدن انسان را تشکیل می‌دهد مانند سیستم رابط مغز و کامپیوتر که توسط شرکت Neuralink توسعه یافته است. این سیستم که از شبکه‌ای از الکترودهای زیست سازگاری استفاده می‌کند به‌طور مستقیم داخل مغز کار گذاشته می‌شود، مجوز سازمان غذا و داروی آمریکا را برای شروع آزمایش‌های انسانی در سال ۲۰۲۳ دریافت کرده است.

۱ **مواد بیوالکترونیک:** این مواد اغلب هیبریدهایا کامپوزیت‌ها را شامل می‌شوند که دارای مواد نانومقیاس، پلیمرهای رسانای مهندسی‌شده و مواد قابل جذب زیستی هستند. دستگاه‌هایی که به‌تازگی ساخته شده‌اند را می‌توان در بدن کار گذاشت، به‌طور موقت از آنها استفاده کرد و سپس بدون نیاز به برداشته شدن، به‌طور خودبه‌خودی توسط بدن دوباره جذب می‌شود. این مواد توسط یک گیرنده برقی بی‌سیم با حسگر کاملا قابل جذب زیستی نشان داده شده که از روی پلیمر زیست تخریب، و اسید لاکتیک ساخته شده است.

۲ **مواد زیستی طبیعی:** این مواد مانند کیتوزان، نانومواد سلولزی و ابریشم، زیست سازگار و مشتق‌شده به‌طور طبیعی بوده و برای ساخت مواد زیستی چندمنظوره پیشرفته در سال ۲۰۲۳ مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌عنوان مثال، محققان یک ایمپلنت مغزی تزریقی هیدروژلی برای درمان بیماری پارکینسون طراحی کرده‌اند که براساس ارتباطات برگشت‌پذیری بین کیتوزان، اسید تانیک و نانوذرات طلا شکل گرفته‌اند.

۳ **جوهرهای زیستی:** از این جوهرهای زیستی در پرینت سه‌بعدی اندام‌های بدن و پیشرفت پیوند اعضا استفاده می‌شود که می‌تواند مراقبت از بیماران را در دنیای امروز متحول کند. در حال حاضر این مدل‌ها برای مطالعه ساختار اندام‌ها مانند مدل قلب پرینت سه‌بعدی برای اختلالات قلب و عروق و مدل ریه پرینت سه‌بعدی به‌منظور آزمایش روی کارآمدی داروها مورد استفاده قرار می‌گیرند. جوهرهای زیستی تخصصی، کیفیت، کارایی و تطبیق‌پذیری اندام‌ها، ساختارها و نتایج پرینت سه‌بعدی را بهبود می‌بخشند. درنهایت، رویکردهای جدید مانند تولید افزودنی حجمی جوهرهای زیستی مبتنی بر ابریشم دست‌نخورده، مرزهای جدیدی از نوآوری را به روی پرینت سه‌بعدی باز می‌کند.

گامی فراتر در اکتشافات فضایی

برنامه جهانی آرتمیس، یک برنامه اکتشاف فضایی بین‌المللی به رهبری ناساست که هدف آن فرود نخستین زن و اولین فرد رنگین‌پوست در کره ماه تا سال ۲۰۲۵ به‌عنوان بخشی از هدف بلندمدت حضور انسان در کره ماه است. علاوه‌براین، مأموریت ناسا با عنوان Europa Clipper که برای پرتاب در سال ۲۰۲۴ برنامه‌ریزی شده است، به دور مشتری خواهد چرخید و در کنار یکی از قمرهای سیاره مشتری موسوم به «اروپا» به بررسی وجود آب و قابلیت سکونت در این سیاره خواهد پرداخت. مأموریت فضایی چین با عنوان Chang'e 6 نیز قصد دارد نمونه‌هایی از سطح کره ماه را برای مطالعات بیشتر با خود به زمین بیاورد. مأموریت کاوش در قمرهای مریخ هم توسط ماهنورد JAXA ژاپن قرار است نمونه‌هایی از یکی از قمرهای سیاره مریخ با عنوان «فوبوس» را به زمین بازگرداند. همچنین انتظار می‌رود کمپانی بوئینگ، یک پرواز آزمایشی را با کپسول فضایی خود یعنی Starliner انجام دهد که قابلیت استفاده دوباره هم دارد و می‌تواند افراد را به مدار پایین زمین منتقل کند. نقش اثرگذار R&D آرتمیس به حوزه‌هایی فراتر از مهندسی هوافضا گسترش می‌یابد که عبارتند از:

۱ **رباتیک:** حوزه رباتیک نقشی حیاتی در طرح آرتمیس دارد و کارهای متعددی را چون جمع‌آوری نمونه، ایجاد زیرساخت و هدایت پژوهش‌های علمی انجام می‌دهد. این امر منجر به توسعه فناوری‌های جدید رباتیک شامل سیستم‌های خودکار می‌شود.

۲ **پزشکی فضایی:** طرح آرتمیس مستلزم توسعه فناوری‌های جدید برای حفاظت از فضانوردان در برابر خطرات سفرهای فضایی مانند قرارگرفتن در معرض اشعه‌ها و میکروگرانش است. این امر شامل اکتشافات علمی در حوزه تشخیص‌های پزشکی، درمان و اقدامات متقابل می‌شود.

۳ **علوم زمین:** طرح آرتمیس همچنین فرصت منحصربه‌فردی را برای مطالعه کره ماه و محیط اطراف آن ایجاد می‌کند که منجر به ایجاد درک جدید نسبت به تاریخچه کره‌زمین، زمین‌شناسی و آب و هوای آن می‌شود.

۴ **علم مواد:** محیط دورافتاده فضا مستلزم استفاده از مواد جدیدی است که علاوه‌بر سبک‌وزن بودن، بادوام و مقاوم در برابر تشعشعات باشند. این مواد کاربردهای بسیار زیادی در صنایع مختلف شامل هوافضا، ساخت‌وساز و انرژی خواهد داشت.

۵ **فناوری اطلاعات:** طرح آرتمیس، داده‌های زیادی را خلق می‌کند که نیاز به پردازش، تجزیه و تحلیل و اشتراک‌گذاری در زمان واقعی دارد. این امر منجر به توسعه فناوری‌های جدیدی چون محاسبات ابری، هوش مصنوعی و یادگیری ماشینی خواهد شد.

تازه‌ترین درمان‌های بیماری‌های عصبی

بیماری‌های تخریب‌کننده عصبی ازجمله نگرانی‌های عمده در حوزه سلامت عمومی است که به‌ویژه در سال‌های اخیر مشکلات متعددی را ایجاد کرده و یکی از علل اصلی مرگ‌ومیر در دنیاست. درحالی‌که اکنون هیچ درمانی برای این نوع بیماری‌ها وجود ندارد، اکتشافات علمی جدید و درک این مسیرها ممکن است به بیماران در فرآیند درمان کمک کند.

آلزایمر: آلزایمر یکی از شایع‌ترین نوع بیماری‌های تخریب‌کننده عصبی به‌شمار می‌رود. در این بیماری، محققان توانسته‌اند تاییدیه سازمان غذا و داروی آمریکا را برای دو ایمونوتراپی موثر در کاهش زوال عقل شناختی و عملکردی در افراد مبتلا به آلزایمر دریافت کنند. تولید «آدوکانوماب» در سال ۲۰۲۱ تایید شتاب گرفت و نخستین درمان جدید تایید شده برای آلزایمر از سال ۲۰۰۳ به‌شمار می‌رود و نخستین درمانی است که پاتوفیزیولوژی بیماری را هدف قرار می‌دهد و پلاکت‌های بتاآمیلوئید را در مغز بیماران مبتلا به آلزایمر اولیه کاهش می‌دهد. داروی Lecanemab نیز در سال ۲۰۲۳ تاییدیه سنتی را دریافت کرده و اولین دارویی است که سرعت پیشرفت بیماری را کاهش داده و زوال شناختی و عملکردی را در بزرگسالانی که در مراحل ابتدایی بیماری هستند، کاهش می‌دهد.

پارکینسون: در درمان علائم پارکینسون، روش‌های درمانی جدید خارج از داروها و تحریک عمقی مغز در حال تحقیق و تایید از سازمان غذا و داروی آمریکا هستند. دستگاه غیرتهاجمی Exablate Neuro که تاییدیه‌های لازم را در ۲۰۲۱ دریافت کرد، از سونوگرافی متمرکز در یک طرف مغز برای تسکین علائم شدیدی چون لرزش، سفتی اندام‌ها و... استفاده می‌کند. سال ۲۰۲۳ با تایید شاخص‌های زیستی آلفا سینوکلئین، ابعاد تازه‌ای از درمان پیش روی بیماران قرار گرفت. محققان ابزاری تولید کرده‌اند که نشانگر زیستی را در مایع نخاعی افراد مبتلا به پارکینسون و افرادی که علائم بالینی نشان نداده‌اند، شناسایی می‌کند.

اسکلروز جانبی آمیوتروفیک (ALS): در دو سال گذشته، دو شرکت داروساز توانستند تاییدیه سازمان غذا و دارو را برای کاهش سرعت ALS دریافت کنند. داروی این بیماری که درواقع به بیماری تحلیل عضلانی نیز شناخته می‌شود، در ۲۰۲۲ تایید شد که با جلوگیری یا کاهش مرگ سلول‌های عصبی بیشتر در این بیماران عمل می‌کند. به تازگی تحقیقات ژنتیکی روی این بیماری صورت گرفته که طی آن محققان چگونگی جهش‌های ژنی را در این بیماری نشان داده است. این کشف یک رویکرد درمانی منطقی را در بیماران ALS آشکار کرده است.

از درمان سرطان تا بیماری‌های ژنتیکی با فناوری CRISPR

پس از سال‌ها تحقیق، شکست‌ها و پیشرفت‌ها، اولین شواهد رسمی از فناوری CRISPR به‌عنوان یک فناوری در بستر درمان در کلینیک محقق شد. شرکت Intellia Therapeutics مجوز سازمان غذا و داروی آمریکا را دریافت کرد تا بتواند فاز سوم آزمایش محوری دارویی جدید را برای درمان بیماری‌ای ارثی آغاز کند و با استفاده از Cas9 Mrna مشابه، داروی جدیدی را دریافت کند که بیماری «آنژیوادم» (ادم عروقی) را درمان می‌کرد. محققان در شیوه جدید، ۲۰ نوکلئوتید RNA را تغییر دادند که نشان می‌دهد CRISPR می‌تواند به‌عنوان یک فناوری پلتفرم درمانی در کلینیک مورد استفاده قرار گیرد. اما موفقیت محققان در شیوه فناورانه CRISPR تنها به اینجا ختم نشد، بلکه توانستند با کمک این فناوری، نخستین درمان با ویرایش ژنی را برای درمان بیماری سلول‌های داسی شکل و بتا وابسته به انتقال خون ابداع کنند. درمان تالاسمی نخستین بیماری ژنتیکی بود که در درمان مبتنی بر CRISPR مجوز تست انسانی را دریافت کرد که لحظه‌ای منحصربه‌فرد در بهبود سلامت انسان به شمار می‌رود.

علاوه‌بر قابلیت قابل توجه ویرایش ژنوم، این فناوری در بسیاری از کاربردها از جمله تشخیص زودهنگام سرطان نیز موثر واقع شده است. به‌نظر می‌رسد مهندسی ژنوم و رونوشت مبتنی بر فناوری CRISPR دارای ویژگی‌هایی برای تشخیص مبتنی بر درمان و تشخیص سرطان هستند. سیستم حسگر زیستی مبتنی بر این فناوری، عصر جدیدی را برای تشخیص دقیق سرطان‌ها در مراحل ابتدایی ایجاد می‌کند. محققان دانشگاه MIT به تازگی یک نانوحسگر جدید رمزگذاری شده با نانوذرات DNA برای نشانگرهای زیستی ادرار طراحی کرده‌اند که می‌تواند تشخیص زودهنگام سرطان را با یک آزمایش ساده ادرار امکان‌پذیر کند. حسگرهایی که می‌توانند پروتئین‌های سرطانی را شناسایی کرده و نوع تومور یا چگونگی واکنش آنها را به درمان نیز تشخیص دهند.

روش‌های درمانی امیدوارکننده، خط پایانی برای سرطان

رشته ایمونوآنکولوژی در سال‌های اخیر رشد چشمگیری داشته است. محصولات تایید شده مانند سیتوکین‌ها، واکسن‌ها، آنتی‌صبادی‌های تک‌کاناله هدایت شده توسط تومور و مسدودکننده‌های ایمنی همچنان در ابعاد بازار رشد می‌کنند. در حال حاضر، درمان‌های جدیدی مانند TAC01-HER2 مرحله آزمایش‌های بالینی را می‌گذرانند. این درمان منحصربه فرد از سلول‌های T استفاده می‌کند که به‌طور ژنتیکی مهندسی شده‌اند تا گیرنده‌های جفت‌کننده آنتی زن سلول T را که حضور گیرنده ۲ فاکتور رشد اپیدرمی انسانی را روی سلول‌های تومور تشخیص می‌دهند، برای حذف آنها ترکیب کنند. این می‌تواند یک درمان امیدوارکننده برای تومورهای جامد متاستاتیک باشد. از دیگر استراتژی‌های درمانی، استفاده از سلول‌های CAR-T در برابر تومورهای جامد همراه با واکسنی است که واکنش ایمنی را تقویت می‌کند. تقویت سیستم ایمنی به بدن کمک می‌کند تا سلول‌های T میزبان بیشتری ایجاد کنند که می‌توانند آنتی‌ژن‌های تومورزی را هدف قرار دهند که سلول‌های CAR-T قادر به نابودی آنها نیستند. همچنین درمان‌های شخصی بهبودیافته از دیگر روش‌های موثر درمانی به شمار می‌روند. به‌عنوان مثال دانشمندان به‌تازگی یک واکسن «نئوآنتی ژن RNA» را به‌طور شخصی‌سازی شده تولید کرده‌اند که براساس نانوذرات mRNA در برابر سرطان برون ریز پانکراس موثر واقع شده است. چالش‌های اصلی در ایمونوآنکولوژی عبارتند از مقاومت درمانی، فقدان شاخص‌های زیستی قابل پیش‌بینی و ناهمگنی تومور؛ درنتیجه، ابداع استراتژی‌های درمانی جدید می‌تواند روی تحقیقات آینده تمرکز داشته باشد.

کربن‌زدایی از فرآیند تولید انرژی

محققان تلاش‌های خوبی را برای کربن‌زدایی از فرآیند تولید انرژی با جایگزینی منابع انرژی مبتنی بر سوخت فسیلی انجام داده‌اند که قرار است طبق پیش‌بینی‌هایی که صورت گرفته در سال ۲۰۲۴ هیچ CO_2 تولید نشود. یکی از این اقدامات، گنجاندن دستگاه‌های ذخیره انرژی در مقیاس بزرگ در شبکه برق است که بخش مهمی از امکان استفاده از منابع تجدیدپذیر هستند؛ چراکه عرضه و تقاضای اضافی برای برق جهت تکمیل منابع تجدیدپذیر را فراهم می‌کنند. چندنوع ذخیره‌سازی در مقیاس شبکه در حال توسعه هستند که از نظر مقدار انرژی قادر به ذخیره‌سازی بوده و سرعت تخلیه آن در شبکه متفاوت است. برخی از این مدل‌های ذخیره‌سازی مانند هیدرولیک پمپ‌شده و هوای فشرده، فیزیکی بوده و برخی نیز مانند باتری‌های سنتی، باتری‌های جریان‌دار، ابرخازن‌ها و هیدروژن نیز شیمیایی هستند اما همه آنها موضوع تحقیقات شیمی فعال و توسعه مواد هستند. دولت آمریکا توسعه در این زمینه را به‌واسطه اعتبارات مالیاتی به‌عنوان بخشی از قانون کاهش تورم و یک برنامه ۷ میلیارد دلاری برای ایجاد مراکز هیدروژن منطقه‌ای تقویت می‌کند. درعین حال، انرژی هسته‌ای در سال ۲۰۲۴ یک حوزه تحقیق و توسعه فعال خواهد بود. در شکافت هسته‌ای، شرکت‌های متعددی در حال توسعه رآکتورهای مدولار کوچک (SMR) به منظور استفاده در تولید برق و تولید مواد شیمیایی از جمله هیدروژن هستند. توسعه رآکتورهای همجوشی هسته‌ای شامل تحقیقات اساسی در فیزیک و علم مواد است. یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، یافتن موادی است که بتوان از آن برای دیواره رآکتوری استفاده کرد که با پلاسمای همجوشی در تماس است. تاکنون موادی که برای این منظور مدنظر قرار گرفته‌اند، آلیاژهایی با آنتروپی بالا و حتی فلزات مذاب را دربرمی‌گیرند.