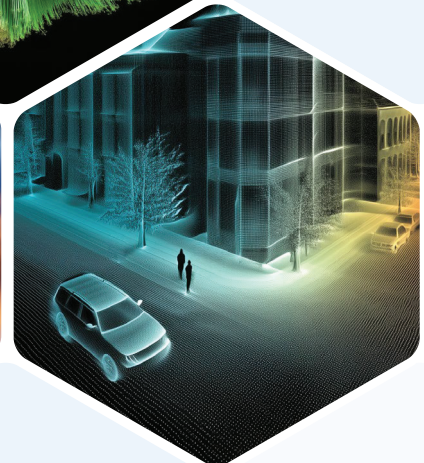
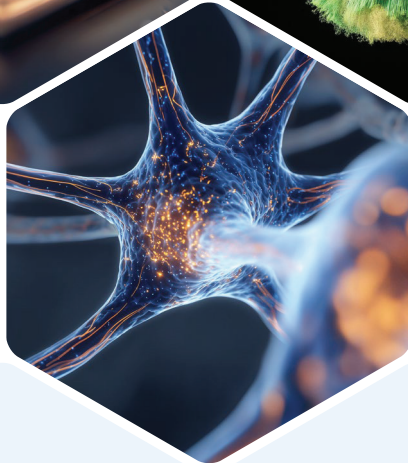
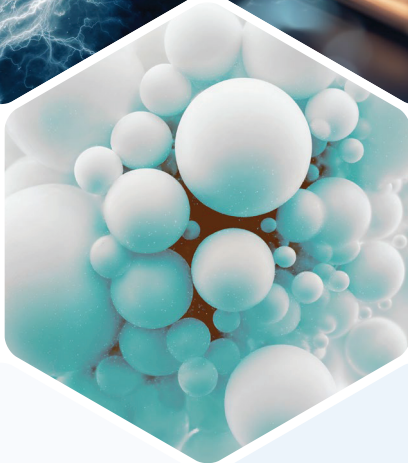
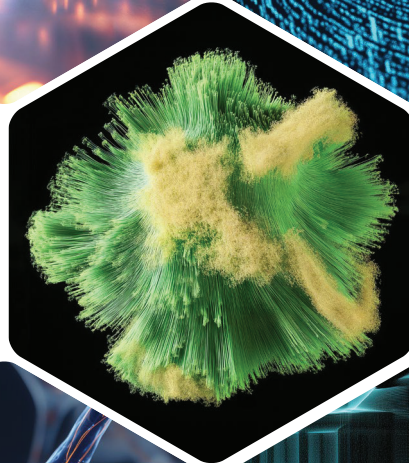
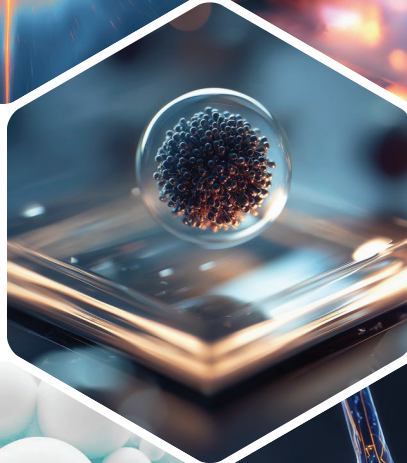
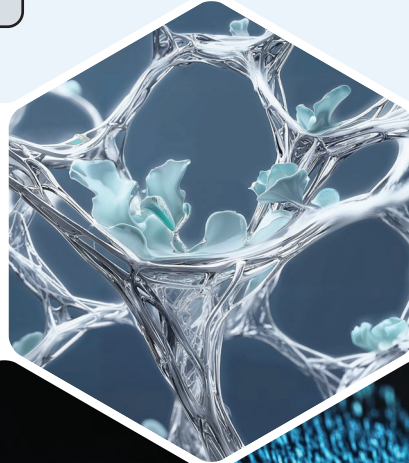
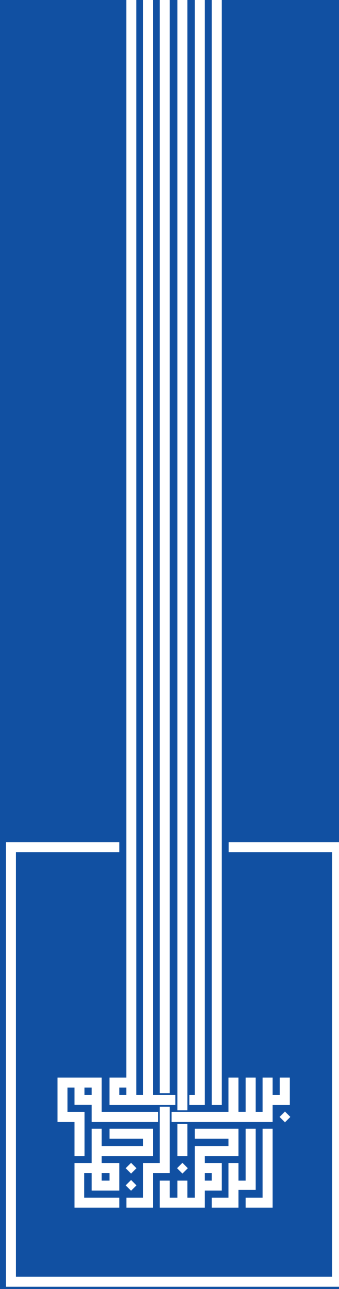


۱۰ فناوری نوظهور برتر سال ۲۰۲۵

بهار ۱۴۰۵

ترجمان







اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
Yazd Chamber of Commerce,
Industries, Mines and Agriculture
مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

عنوان گزارش

۱۰ فناوری نوظهور برتر سال ۲۰۲۵

تهیه و تدوین

محمد عربی ندوشن

ترجمان

علاقه‌مندان می‌توانند از طریق پست الکترونیک زیر نظرات خود را به مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد منعکس نمایند.

Res.center@yazdccima.com

آدرس: یزد، بلوار ۱۷ شهریور، روبروی ۵۲ متری امامشهر

کدپستی: ۸۹۱۶۹۵۹۱۱

وبسایت: www.yazdccima.com

اردیبهشت ۱۴۰۵

چرا این گزارش ترجمه شد؟

در عصر حاضر که تحولات فناوری و ژئوپلیتیک با سرعتی بی‌سابقه در حال تغییر معادلات اقتصاد جهانی، زنجیره‌های ارزش و مدل‌های کسب‌وکار است، آگاهی از روندهای آینده نه یک انتخاب، بلکه پیش‌شرطی برای بقا و رقابت‌پذیری در بازارهای بین‌المللی است. هر ساله، نوآوری‌های چشمگیری از آزمایشگاه‌های تحقیقاتی جهان پدیدار می‌شوند که پتانسیل دگرگونی صنایع مختلف را دارند، اما تنها بخشی از آن‌ها می‌توانند از مرحله کشف علمی عبور کرده و تأثیرات واقعی و ملموس بر اقتصاد و جامعه بگذارند.

گزارش حاضر با عنوان «۱۰ فناوری نوظهور برتر سال ۲۰۲۵» که توسط مجمع جهانی اقتصاد (مرکز انقلاب صنعتی چهارم) و با همکاری موسسه فرانتیرز تهیه شده است، یکی از اسناد آینده‌پژوهی در سطح جهانی به شمار می‌رود. این گزارش به شناسایی فناوری‌هایی می‌پردازد که در نقطه عطف خود قرار دارند و به‌زودی تحولات شگرفی در حوزه‌های سلامت، ارتباطات، زیرساخت‌ها و محیط‌زیست ایجاد خواهند کرد.

مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد در راستای پشتیبانی فکری و راهبردی به بخش خصوصی و سیاست‌گذاران اقتصادی استان یزد و کشور اقدام به ترجمه و انتشار این گزارش با اهداف زیر نموده است:

۱. **آگاهی بخشی به بخش خصوصی:** فعالان اقتصادی، کارآفرینان و صاحبان صنایع در ایران نیازمند شناخت دقیق از فناوری‌های مرز دانش هستند تا بتوانند استراتژی‌های توسعه، سرمایه‌گذاری و تحقیق و توسعه خود را با روندهای جهانی همسو کنند.

۲. **جهت‌دهی به سیاست‌گذاری‌های کلان:** آشنایی با این فناوری‌ها به سیاست‌گذاران دولتی و حاکمیتی کمک می‌کند تا قوانین و زیرساخت‌های لازم برای پذیرش و بومی‌سازی این نوآوری‌ها را پیش از مواجهه انفعالی با آن‌ها فراهم سازند.

۳. **تسریع گفت‌وگوی آینده‌نگرانه:** این گزارش همانند گزارش‌های مشابه دیگر می‌تواند به‌عنوان کاتالیزوری برای شکل‌گیری بحث‌های تخصصی میان دانشگاه‌ها، شرکت‌های دانش‌بنیان و صنایع بزرگ عمل کرده و به پر کردن شکاف میان علم و کاربرد تجاری در کشور کمک کند. امید است مطالعه این گزارش، بینش‌های ارزشمندی را در اختیار رهبران کسب‌وکار، پژوهشگران و تصمیم‌گیران اقتصادی قرار دهد و گامی مؤثر در جهت ارتقای تاب‌آوری و نوآوری در اقتصاد ایران باشد.

مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

فهرست

فهرست	۵
پیشگفتار	۶
مقدمه	۸
۱. کامپوزیت‌های باتری ساختاری	۱۳
۲. سیستم‌های توان اسمزی (انرژی آبی)	۱۸
۳. فناوری‌های هسته‌ای پیشرفته	۲۳
۴. درمان‌های زنده مهندسی شده	۲۸
۵. داروهای جی‌ال‌پی-۱ (GLP-1s) برای بیماری‌های عصبی - تخریب کننده	۳۳
۶. حسگرهای بیوشیمیایی خودکار	۳۸
۷. تثبیت نیتروژن سبز	۴۳
۸. نانوزیم‌ها	۴۸
۹. حسگری اشتراکی	۵۳
۱۰. نهان‌گذاری مولد (واترماک گذاری)	۵۹
نتیجه‌گیری: از سیگنال‌های ضعیف تا دگرگونی اجتماعی	۶۶
منابع	۶۸

پیشگفتار

فردریک فنتر^۱، سردبیر اجرایی، فرانتیرز

جرمی یورگنس^۲، مدیر عامل، مجمع جهانی اقتصاد

هر سال نوآوری‌های بسیاری از آزمایشگاه‌های پژوهشی سراسر جهان سر برمی‌آورند. بسیاری از آن‌ها وعده‌های بزرگی می‌دهند، اما تنها شماری اندک موفق می‌شوند از کشف علمی به کاربرد واقعی برسند. طی ۱۳ سال گذشته، گزارش «۱۰ فناوری نوظهور برتر» مجمع جهانی اقتصاد تلاش کرده توجه‌ها را به فناوری‌هایی جلب کند که نه تنها توانایی عبور از این مرز را دارند، بلکه می‌توانند به جوامع کمک کنند تا در برابر چالش‌های دشوار ایستادگی کرده و رشد کنند.

هدف این گزارش ساده است: پل زدن میان آنچه در آزمایشگاه‌ها رخ می‌دهد و کسانی که می‌توانند این دستاوردها را به دنیای واقعی برسانند. با شناسایی فناوری‌ها، در لحظه‌ای که علم با امکان کاربردی ساختن آن‌ها پیوند می‌خورد، ابزاری در اختیار رهبران دولت‌ها، کسب‌وکار و محققین می‌گذاریم تا در فضایی که هر روز تغییر می‌کند، تصمیم‌های درست‌تری بگیرند.

این گزارش در لحظه‌ای حساس منتشر می‌شود. روابط تجاری در حال بازتعریف است، زنجیره‌های تأمین جابجا می‌شوند و توازن قدرت منطقه‌ای تغییر می‌کند. در چنین شرایطی، فناوری‌هایی که در این گزارش معرفی شده‌اند بیش از هر زمان دیگری اهمیت دارند. برخی از این فناوری‌ها راه خودکفایی و استقلال بیشتر را نشان می‌دهند؛ برخی دیگر، حتی در میان تنش‌های بین‌المللی، می‌توانند زمینه همکاری میان کشورها را فراهم کنند.

بسیاری از آن‌ها در حوزه‌هایی هستند که منافع مشترک جهانی در آن‌ها سنگین‌تر از اختلافات روزمره است. هر فناوری در این گزارش بر اساس سه معیار تازگی، میزان پیشرفت در توسعه و توانایی ایجاد تحول واقعی ارزیابی شده است. از موادی که انرژی را در ساختار خود ذخیره می‌کنند تا درمان‌های تازه برای بیماری‌های تخریب‌کننده عصبی، این نوآوری‌ها از نظریه فراتر رفته و نشان داده‌اند که می‌توانند تاب‌آوری جوامع را در برابر چالش‌های سخت افزایش دهند. ارزش اصلی این گزارش خود را در جایی نشان می‌دهد که به جای توصیف وضعیت امروز هر فناوری، تصویری از آنچه این فناوری‌ها می‌توانند بسازند را ترسیم می‌کند.

1) Frederick Fenter

2) Jeremy Jurgens

هر فصل یک چشم‌انداز راهبردی دارد که نشان می‌دهد اگر این فناوری به بلوغ کامل برسد، چه آینده‌ای شکل خواهد گرفت. این سناریوها که با همکاری بنیاد آینده دبی^۱ تدوین شده‌اند، به خوانندگان کمک می‌کنند ظرفیت واقعی این فناوری‌ها را درک کنند و انگیزه لازم برای تبدیل آن‌ها از وعده به واقعیت را دریابند.

فناوری‌های این گزارش یک وجه مشترک دارند: همه آن‌ها، مرز میان دو حوزه جدا را برمی‌دارند. مواد با انرژی درهم می‌آمیزند، زیست‌شناسی به داروخانه تبدیل می‌شود، فرایندهای صنعتی کهنه با نگاهی تازه بازآفرینی می‌شوند و پایه‌های اعتماد در دنیای دیجیتال محکم‌تر می‌شوند.

هر یک از این فناوری‌ها نه تنها یک دستاورد فنی است، بلکه راهی است به سوی جوامعی که بهتر می‌توانند در برابر تغییرات ایستادگی کنند. این کار بدون رهبری ماریت دیکریستینا^۲ و برنارد میرسون^۳، رؤسای مشترک کمیته راهبری فناوری‌های نوظهور، شکل نمی‌گرفت. نقش آن‌ها هم در تدوین این گزارش و هم در فرآیند انتخاب فناوری‌ها بنیادی بوده است. همچنین از اعضای کمیته راهبری صمیمانه سپاسگزاریم؛ کسانی که تنوع تخصص‌هایشان به شناسایی فناوری‌هایی کمک می‌کند که به طور واقعی توانایی تغییر جهان را دارند.

امسال در ادامه تکامل گزارش، «نقشه‌های آمادگی اکوسیستم^۴» هم معرفی شده‌اند که نشان می‌دهند برای گسترش هر فناوری و رسیدن آن از وعده به اثرگذاری واقعی، چه اقدامات مشخصی لازم است. این گزارش پایان راه نیست بلکه آغازی است برای همکاری‌هایی که می‌توانند این فناوری‌ها را از وعده به واقعیت برسانند. در روزگار سراسر از چالش و ابهام، این نوآوری‌ها ابزارهای قدرتمندی هستند برای آنکه بتوانیم خود را با تغییرات تطبیق دهیم و راهی رو به جلو پیدا کنیم.

-
- 1) Dubai Future Foundation
 - 2) Mariette DiChristina
 - 3) Bernard Meyerson
 - 4) Ecosystem Readiness Maps

مقدمه

پیامی از سوی رؤسای مشترک گروه راهبری ۱۰ فناوری نوظهور برتر

ماریت دی کریستینا^۱

(رئیس دانشکده و استاد، تخصص در روزنامه‌نگاری، دانشکده ارتباطات دانشگاه بوستون)

برنارد اس. میرسون^۲

(مدیر ارشد نوآور، استاد ممتاز بازنشسته آی بی ام)

انقلاب صنعتی چهارم^۳ شتاب گرفته و فهرست امسال را از پیشرفت‌های ترکیبی پر کرده است؛ پیشرفت‌هایی که هر کدام پاسخی به یک نگرانی واقعی جهانی هستند. انتخاب‌های ما نشان می‌دهد فناوری‌ها از راه‌های گوناگونی ظهور می‌کنند. برخی مانند کامپوزیت‌های باتری ساختاری^۴ راه‌حل تازه‌ای برای حل مسائل قدیمی هستند. در مقابل، برخی دیگر مانند داروهای GLP-1 برای بیماری‌های عصبی، و فناوری‌های هسته‌ای پیشرفته^۵ نشان می‌دهند که فناوری‌های شناخته‌شده هم می‌توانند کاربردهای کاملاً تازه‌ای پیدا کنند. هر یک از این موارد نشان‌دهنده لحظه درآمیختن علم با امکان کاربرد آن در دنیا واقعی است.

برای نمونه، ادغام سیستم‌های انرژی و مواد را در نظر بگیرید؛ ترکیبی که در فهرست امسال بازتاب خوبی داشته و بهبودهای قابل توجهی در کارکرد و بهره‌وری به همراه آورده است. در کامپوزیت‌های باتری ساختاری، بخش حمل‌ونقل متحول می‌شود؛ چون سیستم‌های ذخیره انرژی دیگر باری جداگانه نیستند^۶، بلکه خود بخشی از اسکلت وسیله نقلیه می‌شوند. در زمینه منابع انرژی دیگر هم پیشرفت‌هایی به چشم می‌خورد. غشاهای نیمه‌تراوای پیشرفته‌تر حالا امکان استفاده از اختلاف شوری میان آب شور و شیرین^۷ را در سیستم‌های توان اسمزی^۸ فراهم می‌کنند و طرح‌های تازه برای نیروگاه‌های هسته‌ای نسل آینده به عنوان یکی از منابع انرژی بدون کربن، در حال تبدیل شدن به واقعیت هستند.

زیست‌فناوری هم در این فهرست جای خود را محکم کرده و دستاوردهای مهمی برای سلامت انسان به ارمغان می‌آورد. فراتر از داروهای متعارف، درمان‌ها و روش‌های پایش مبتنی بر زیست‌شناسی با شتاب قابل توجهی در حال پیشرفت هستند. نمونه بارز این روند، درمان‌های زنده مهندسی شده است. میکروب‌هایی که از نظر ژنتیکی طراحی شده‌اند تا در بدن بیمار و درست در جایی که لازم است، داروی

1) Mariette DiChristina

2) Bernard S. Meyerson

3) Fourth Industrial Revolution

4) Structural Battery Composites

5) Advanced Nuclear Technologies

6) Massless Energy Systems

7) Salt Power

8) Osmotic Power Systems

موردنیاز را تولید کنند. داروهای GLP-1 که پیش‌تر برای دیابت نوع ۲ و کاهش وزن به کار می‌رفتند، حالا برای درمان بیماری‌های مغزی مانند آلزایمر و پارکینسون هم در دست بررسی هستند. حسگرهای زیست‌شیمیایی خودکار هم که بدون وقفه نشانگرهای شیمیایی بدن را رصد می‌کنند، به زودی جای آزمایش‌های یک‌بارمصرف را خواهند گرفت.

فرایندهای اصلی صنعتی نیز برای پایداری و کارایی بیشتر به‌طور بنیادین بازاندیشی می‌شوند. یکی از این نمونه‌ها تثبیت نیتروژن سبز^۱ است؛ فرایندی که نیتروژن هوا را به آمونیاک (ماده اصلی کود کشاورزی) تبدیل می‌کند و در این حال انتشار کربن بسیار کمتری نسبت به روش‌های سنتی به همراه دارد.

نانوزیم‌ها^۲ یا نانوموادهای با خواص آنزیمی، مزایای عملی مهمی نسبت به آنزیم‌های طبیعی دارند که می‌توان به پایداری بیشتر، ارزان‌تر بودن در تولید و ساده‌تر بودن در ساخت اشاره کرد.

اعتماد و امنیت در سیستم‌های به‌هم‌پیوسته، پیش‌شرط ضروری آینده دیجیتال ما هستند. حسگری اشتراکی^۳ یک نمونه روشن از این نیاز است. حسگرهایی که امروز در خانه‌ها، خودروها و محیط‌های کاری پراکنده‌اند، به تدریج به هم وصل شده و با کمک هوش مصنوعی، تصویری جامع‌تر از محیط می‌سازند.

گزارش ریسک‌های جهانی ۲۰۲۵ مجمع جهانی اقتصاد هم بار دیگر، اطلاعات غلط^۴ و اطلاعات دروغ عمدی^۵ را در صدر فهرست خطرات کنونی قرار داده است. در این زمینه، نهان‌گذاری^۶ در هوش مصنوعی مولد (یعنی جاسازی نشانگرهای نامرئی برای تأیید اصالت و منشأ محتوا) می‌تواند راه‌حلی مؤثر باشد.

همان‌گونه که تاریخ همواره گواه بوده است، نوآوری‌های نوظهور، چنانچه هوشمندانه و در سایه همکاری مشترک به کار گرفته شوند؛ امید و اطمینان ما را به توانمندی بشر برای بهبود وضعیت جهان مضاعف می‌سازند. از شما دعوت می‌کنیم این فهرست را با نگاهی دقیق و موشکافانه بررسی کرده و بازخوردهای ارزشمند خود را با ما به اشتراک بگذارید

1) Green Nitrogen Fixation

2) Nanozymes

3) Collaborative Sensing

4) Misinformation

5) Disinformation

6) Watermarking

متدولوژی (روش شناسی)

فناوری‌های نوظهور سال ۲۰۲۵ از طریق معرفی توسط کارشناسان، تحلیل هوش مصنوعی، ارزیابی آمادگی و ارزیابی راهبردی انتخاب شدند. نظرسنجی برای شناسایی این فناوری‌ها در میان شبکه شوراهای آینده جهانی وابسته به مجمع جهانی اقتصاد توزیع شد که شبکه سردبیران ارشد فرانتیرز و اعضای کمیته راهبری نیز در این فرایند شرکت داشتند. گزارش «فناوری‌های نوظهور» هم شامل نوآوری‌های کاملاً تازه بوده و هم شامل فناوری‌های شناخته‌شده‌ای است که در کاربردهای جدید و تحول‌آفرین به کار گرفته می‌شوند. چنین رویکرد فراگیری نشان می‌دهد که فناوری از مسیرهای مختلف ظهور می‌کند؛ گاه از دل کشف‌های کاملاً جدید و گاه از به‌کارگیری دانش موجود در راه‌حلهایی که تأثیر تازه‌ای می‌آفرینند. شرکت‌کنندگان در نظرسنجی شامل دانشگاهیان و پژوهشگران معتبر از سراسر جهان، اطلاعاتی درباره فناوری پیشنهادی ارائه دادند: از نام و توضیح گرفته تا پیشرفت‌های کلیدی، مطالعات موردی، تأثیر بر اقتصاد، جامعه و محیط‌زیست، و ریسک‌های احتمالی.

در سال ۲۰۲۵، بیش از ۲۵۰ فناوری معتبر از سوی متخصصان حوزه‌های صنعت و دانشگاه برای این گزارش نامزد شدند. به‌منظور غربالگری دقیق این فهرست، «ابزار تحلیل روند» مبتنی بر هوش مصنوعی (توسعه‌یافته توسط مؤسسه فرانتیرز)، این فناوری‌های پیشنهادی را با مفاهیم کلیدی مرتبط نگاشت کرد و سپس، بسامد حضور آن‌ها را در مقالات علمی طی یک دوره ده‌ساله (به‌صورت پیوسته و غلتان) مورد سنجش قرار داد. خروجی این تحلیل، استخراج میانگینی تحت عنوان «شاخص روندپذیری^۱» بود؛ شاخصی که نشان‌دهنده میزان نفوذ فزاینده و شتاب رشد^۲ هر فناوری در ادبیات پژوهشی جهان است.

هر فناوری همچنین با چارچوب تاب‌آوری برای رشد پایدار و فراگیر (۲۰۲۲) مجمع جهانی اقتصاد ارزیابی شد تا مشخص شود آیا می‌تواند چالش‌های ساختاری را پوشش دهد و برای نسل‌های آینده ظرفیت انطباق بسازد. در مرحله بعد، فناوری‌هایی که پیش‌تر در نسخه‌های قبلی گزارش معرفی شده بودند از فهرست حذف شدند. داده‌های سرمایه‌گذاری تجاری هم به تحلیل هر یک از ۲۰ فناوری برتر اضافه شد تا دیدی از اعتماد بازار و امکان تجاری‌سازی هر کدام بدهد.

این فهرست ۲۰ تایی پالایش شده سپس توسط کمیته راهبری کارشناسان با سه معیار زیر ارزیابی شد:

◀ **تازگی:** فناوری در مرحله پذیرش اولیه است اما هنوز فراگیر نشده است.

◀ **تأثیر:** ظرفیت ایجاد مزایای قابل توجه اجتماعی و اقتصادی

◀ **عمق:** در چندین نهاد در حال توسعه بوده و علاقه به آن پایدار و فراگیر است.

این فرایند دقیق و چندمرحله‌ای تلاش می‌کند تا ارزیابی آمادگی و توانایی تحول‌آفرینی هر فناوری تا حد ممکن جامع و بی‌طرفانه باشد.

(۱) شاخص روندپذیری (Trendiness Score): در سرمایه‌گذاری خطرپذیر (VC) و مدیریت نوآوری، این شاخص ابزاری استراتژیک است که به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا «هیاهوی رسانه‌ای زودگذر» (Hype) را از «روند رشد واقعی و پایدار» متمایز سازند. فناوری‌هایی که از شتاب رشد مستمری در پایه علمی و پژوهشی برخوردارند، ریسک سرمایه‌گذاری کمتری داشته و با احتمال بسیار بالاتری به فاز تجاری‌سازی و خلق ثروت می‌رسند.

2) Momentum

آمادگی اکوسیستم^۱

امسال برای اولین بار، یک نقشه آمادگی اکوسیستم برای هر فناوری ارائه شده است. این تحلیل نشان می‌دهد که بستر اجتماعی، اقتصادی و قانونی هر کشور تا چه اندازه برای رشد و گسترش این فناوری‌ها آماده است. برای هر فناوری، دیدگاه‌های کمیته راهبری، سردبیران فرانتیرز و آینده‌پژوهان بنیاد آینده دبی گردآوری و ترکیب شد. این کارشناسان آمادگی را در پنج بعد ارزیابی کردند که در مجموع به اختصار STEEP نامیده می‌شوند: اجتماعی، فناورانه، زیست‌محیطی، اقتصادی و سیاسی.

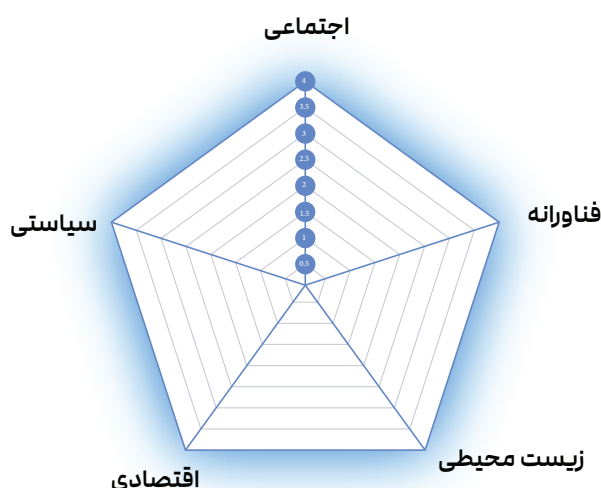
◀ **اجتماعی:** آگاهی عمومی، میزان پذیرش در جامعه، سطح آموزش و ارزش‌های فرهنگی مرتبط با این فناوری.

◀ **فناورانه:** بلوغ فناوری‌های پایه‌ای، نیازهای پژوهشی باقی‌مانده و آمادگی زنجیره تأمین. **زیست‌محیطی:** دسترسی به منابع لازم، پایداری مواد استفاده‌شده و سازگاری با مقررات زیست‌محیطی.

◀ **اقتصادی:** تقاضای بازار، جریان سرمایه‌گذاری و توجیه اقتصادی مدل کسب‌وکار.

◀ **سیاستی:** چارچوب‌های قانونی و مقرراتی، هماهنگی سیاست‌های بین‌المللی و موانع تجاری موجود.

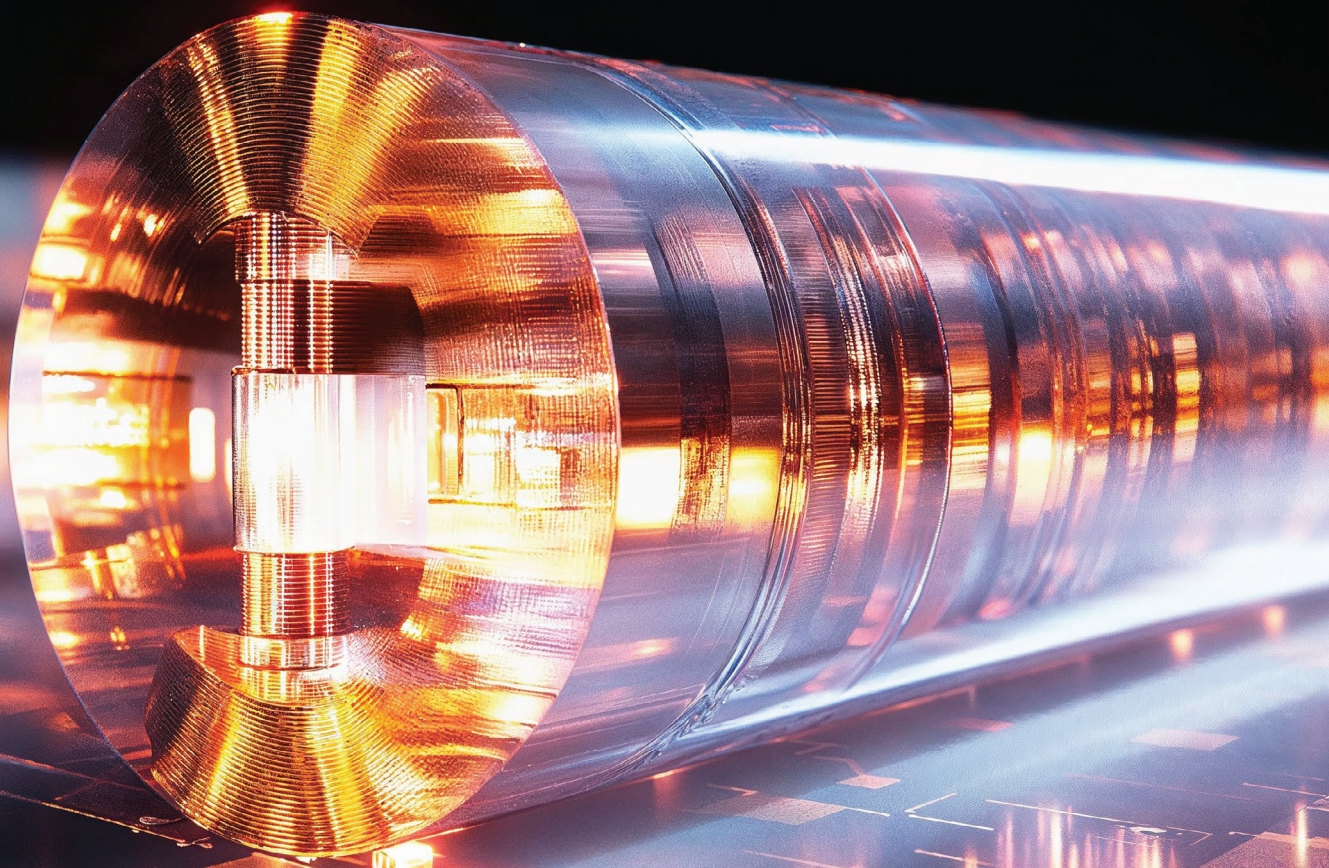
هر بعد در یک مقیاس چهار سطحی از «آمادگی ندارد» تا «آمادگی بالا» ارزیابی شد. نتایج در قالب نمودارهای راداری، که در شکل ۱ نمونه آن نشان داده شده در بخش مربوط به هر فناوری آمده است. این نمودارها با فهرستی از اقدامات کلیدی لازم برای رسیدن به مقیاس گسترده همراه‌اند. این ارزیابی‌ها به شناسایی خلأهای مهمی کمک می‌کنند که باید پیش از رسیدن هر فناوری به ظرفیت کامل خود برطرف شوند و دیدگاه مفیدی برای تصمیم‌گیرندگان در بخش‌های مختلف فراهم می‌آورند.



شکل ۱: نقشه آمادگی اکوسیستم

1) Ecosystem Readiness

۱. کامپوزیت‌های باتری ساختاری
تلفیق انرژی و مهندسی در حرکت



۱-۱. مقدمه

داگ آرنت^۱؛ مدیر اجرایی، بنیاد آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر.
 اندرو مینارد^۲؛ استاد دانشکده آینده نوآوری در جامعه، دانشگاه ایالتی آریزونا.
 دیوید پارخ^۳؛ مدیرعامل، موسسه تحقیقاتی *SRI International*.

کامپوزیت‌های باتری ساختاری (SBCs) دو کارکرد جداگانه، یعنی تحمل بار مکانیکی و ذخیره‌سازی انرژی قابل شارژ را در یک ساختار ترکیب می‌کنند. به عبارت دیگر، این کامپوزیت‌ها می‌توانند مثل باتری‌های لیتیوم-یون انرژی ذخیره کنند و در عین حال بخشی از اسکلت سخت^۴ خودرو یا ساختمانی باشند که به آن توان می‌دهند. در مقابل، در باتری‌های سنتی، اجزای الکتروشیمیایی داخل یک محفظه جداگانه جای می‌گیرند که هیچ نقش سازه‌ای ندارد و فقط به وزن کلی می‌افزاید.

این کامپوزیت‌ها معمولاً از فیبر کربن^۵، رزین اپوکسی^۶ یا دیگر مواد سبک و محکم ساخته می‌شوند و می‌توان آن‌ها را با چاپ سه‌بعدی برای بهینه‌سازی سطح و استحکام سازه‌ای تنظیم کرد. کاربردهای این کامپوزیت‌ها گسترده است که از خودروهای الکتریکی تا صنعت هوافضا را شامل می‌شود. ایده کامپوزیت‌های باتری ساختاری در دو دهه گذشته و در پی پیشرفت‌هایی در علم مواد (به‌ویژه در حوزه کامپوزیت‌ها، باتری‌ها و الکتروشیمی) شکل گرفت. این فناوری هنوز در ابتدای مسیر تجاری‌سازی است، اما گام‌های قابل توجهی برداشته شده است.

اگرچه در خودروهای الکتریکی کنونی، باتری‌ها تا حدودی با ساختار خودرو یکپارچه شده‌اند، اما کامپوزیت‌های باتری ساختاری این مفهوم را به سطح بالاتری ارتقا می‌دهند؛ در این فناوری، هر پنل بدنه^۷ با هر هندسه و ابعادی می‌تواند توأمان به عنوان باتری و عنصری باربر عمل کند. با این رویکرد، در آینده می‌توان تمامی پنل‌های سخت بدنه را به واحدهای ذخیره‌ساز انرژی تبدیل کرد. در همین راستا، شرکت‌هایی نظیر ایرباس^۸ در حال آزمایش این کامپوزیت‌ها در سازه هواپیماها هستند و پژوهش‌های گسترده‌ای برای دستیابی به مواد و روش‌های بهینه‌تر همچنان جریان دارد.

-
- 1) Doug Arent
 - 2) Andrew Maynard
 - 3) David Parekh
 - 4) Rigid
 - 5) Carbon Fibre
 - 6) Epoxy Resin
 - 7) Body Panels
 - 8) AirBus

کاربردهای کنونی در حال توسعه برای این فناوری، مواردی چون پنل‌های بدنه خودرو و اسکلت پهپادها^۱ را در بر می‌گیرد؛ در حالی که استفاده از آن‌ها در بدنه هواپیماهای تجاری^۲ نیز در چشم‌انداز آتی قرار دارد. با وجود این پتانسیل چشمگیر، فناوری مذکور تا رسیدن به مرحله تجاری‌سازی و پذیرش گسترده، مسیر طولانی در پیش دارد و چالش‌هایی نظیر چگالی انرژی پایین، پایداری بلندمدت، ایمنی و هزینه‌های تولید همچنان پابرجا هستند. افزون بر این، پیش از کاربرد گسترده این مواد، تدوین مقررات و استانداردهای ایمنی جدید متناسب با ماهیت عملکرد دوگانه آن‌ها ضروری است.

یکی از دستاوردهای برجسته در این حوزه، تلفیق موادی چون فیبر کربن با فناوری باتری جهت توسعه کامپوزیت‌های چندلایه‌ای است که به‌طور هم‌زمان نقش باربری مکانیکی و ذخیره‌سازی انرژی را ایفا می‌کنند. پیامدهای اقتصادی این کامپوزیت‌ها بسیار قابل توجه خواهد بود؛ تقلیل نیاز به عناصر سازه‌ای مجزا به معنای کاهش وزن کلی خودروها و هواپیماهاست و این کاهش وزن، مستقیماً به افت مصرف انرژی و سوخت می‌انجامد.

از منظر زیست‌محیطی نیز، توسعه اصولی این فناوری می‌تواند به طراحی‌هایی منتهی شود که علاوه بر نیاز کمتر به مواد خام، فرآیند بازیافت ساده‌تر و مقرون‌به‌صرفه‌تری داشته باشند. در نهایت، به‌کارگیری این کامپوزیت‌ها در بخش‌های هوانوردی و حمل‌ونقل، گذار این صنایع به سوی پایداری و قابلیت اطمینان بیشتر را تسهیل خواهد کرد.

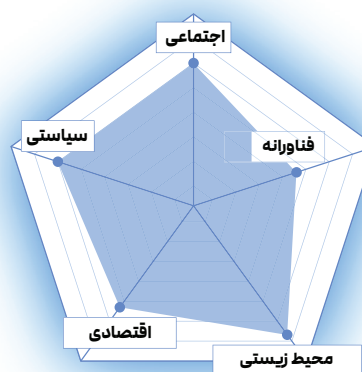
اقدامات کلیدی برای دستیابی به مقیاس‌پذیری:

ساخت نمونه‌های اولیه کاربردی با همکاری تولیدکنندگان اصلی در صنایع خودروسازی، هوافضا و دریایی برای اثبات عملی این فناوری.

هدف این است که مزایای کاهش وزن، افزایش برد و حفظ استحکام سازه به‌صورت عددی و قابل اندازه‌گیری نشان داده شوند.

ایجاد ظرفیت تولید تخصصی:

سرمایه‌گذاری در تأسیسات تولید آزمایشی که بتوانند دانش فنی باتری‌سازی را با روش‌های پیشرفته ساخت کامپوزیت در یک خط تولید ترکیب کنند، ضروری است. هدف، حل چالش‌های تولیدی خاصی است که این مواد دوگانه به همراه دارند.



شکل ۳: نقشه آمادگی اکوسیستم کامپوزیت‌های باتری ساختاری

1) Drone Frames

2) Aircraft Fuselages

۲-۱. چشم‌انداز راهبردی: کامپوزیت‌های باتری ساختاری

توسط بنیاد آینده دبی

تلفیق علم مواد و فناوری‌های نوین انرژی در قالب کامپوزیت‌های باتری ساختاری، نقطه عطفی حیاتی برای صنایع جهانی به شمار می‌رود. پیش‌بینی می‌شود در دهه پیش رو، این مواد نوآورانه، پارادایم‌های حاکم بر زیرساخت‌ها، ذخیره‌سازی انرژی و طراحی محصول را در صنایع گوناگون دستخوش تحولی بنیادین کنند. با این وجود، از آنجا که حدود ۸۵ درصد از ظرفیت پالایش لیتیوم جهان تنها در انحصار سه کشور قرار دارد، ژئوپلیتیک مواد معدنی استراتژیک در مقطعی بحرانی و تعیین‌کننده قرار گرفته است.

توسعه کامپوزیت‌های باتری ساختاری می‌تواند راهکاری استراتژیک برای تنوع‌بخشی به منابع و تمرکززدایی از زنجیره تأمین مواد اولیه انرژی‌زا باشد. این تحول فناورانه قادر است وابستگی‌های اقتصادی در سطح بین‌الملل را بازآرایی کرده و پارادایم‌های حاکم بر زیرساخت‌های انرژی و استقلال تکنولوژیک کشورها را دگرگون سازد. با این وجود، عمیق‌ترین پیامد این فناوری، فراتر از حلقه تأمین، در صنعت حمل‌ونقل نمودار می‌گردد.

در صنعت خودروسازی، کاهش ۱۰ درصدی وزن سازه می‌تواند به بهبود ۶ تا ۸ درصدی بهره‌وری سوخت انجامیده و بُرد پیمایش خودروهای الکتریکی را تا ۷۰ درصد ارتقا دهد. بخش هوانوردی نیز از پتانسیل مشابهی برخوردار است؛ به‌گونه‌ای که در یک پرواز ۱۵۰۰ کیلومتری، دستیابی به ۱۵ درصد صرفه‌جویی در مصرف سوخت کاملاً امکان‌پذیر خواهد بود. این ارقام صرفاً نشان‌دهنده بهبودهای حاشیه‌ای نیستند، بلکه می‌توانند به‌عنوان پیشران تحولی بنیادین در طراحی سیستم‌های حمل‌ونقل و الگوهای کلان مصرف انرژی عمل کنند.

برای دستیابی به این مزایا در مقیاس کلان، رهبران راهبردی باید چالش‌هایی را مد نظر قرار دهند که بسیار فراتر از صرف «نوآوری فناورانه» بسط می‌یابند. چارچوب‌های نظارتی و رگولاتوری کنونی، به‌هیچ‌وجه پاسخگوی الزامات و ظرفیت‌های «مواد با کارکرد دوگانه» نیستند. از این رو، استانداردهای ایمنی، پروتکل‌های آزمایش و آیین‌نامه‌های ساخت‌وساز نیازمند بازطراحی بنیادین هستند؛ بازطراحی برای پذیرش و ادغام موادی که به‌طور هم‌زمان، هم «یکپارچگی ساختاری» سازه‌ها را حفظ می‌کنند و هم به‌عنوان بستری برای «ذخیره‌سازی انرژی» به‌کار می‌روند.

مقوله «پایداری» در این عرصه، هم‌زمان یک چالش حیاتی و یک فرصت استثنایی به‌شمار می‌رود. برای نمونه، فیبر کربن با وجود بر خورداری از استقامتی پنج برابر بیشتر از فولاد، در حال حاضر با محدودیت‌های زیست‌محیطی چشمگیری دست‌به‌گریبان است؛ محدودیت‌هایی که ریشه در فرآیند تولید کربن‌محور و چالش‌های پیچیده در مسیر بازیافت آن دارند. با این وجود، پیشرفت‌های حاصل‌شده در زمینه «طراحی مواد کامپوزیتی با هدایت هوش مصنوعی»، نویدبخش ظهور جایگزین‌های زیست‌پایه و مقیاس‌پذیرتری برای صنایع است.

سازمان‌های پیشرو و آینده‌نگر، این فناوری را بسیار فراتر از «بهبود محصول» ارزیابی می‌کنند. این تحول، در واقع نشان‌دهنده بازطراحی بنیادین در شیوه درک و مفهوم‌سازی ما از «کارکرد مواد» است. در صنعت ساخت‌وساز، این مفهوم بدان معناست که ساختمان‌ها دیگر صرفاً یک «سرپناه» نخواهند بود، بلکه به «سیستم‌های فعال انرژی» تغییر ماهیت می‌دهند. در حوزه الکترونیک نیز، این رویکرد به خلق تجهیزاتی می‌انجامد که «یکپارچگی ساختاری» و «ذخیره‌سازی نیرو» را به‌شکلی کاملاً پیوسته و بدون نقص در هم می‌آمیزند.

در مقطع کنونی، رهبران صنایع با یک نقطه تصمیم‌گیری استراتژیک مواجه‌اند؛ چراکه سازمان‌های پیشگام در این عرصه قادر خواهند بود طراحی محصولات، الگوهای مصرف انرژی، زیرساخت‌ها و مدل‌های کسب‌وکار خود را به شکلی بنیادین بازآرایی کنند. پیش‌تازان دهه آینده، مجموعه‌هایی خواهند بود که کامپوزیت‌های باتری ساختاری را نه صرفاً یک «محصول ارتقایافته»، بلکه یک «بستر فناورانه کاملاً نوین» در نظر بگیرند. با این وجود، تحقق چنین موفقیتی در گرو هم‌افزایی عمیق میان مهندسان مواد، طراحان صنعتی، متخصصان حوزه انرژی و نهادهای تنظیم‌گر (رگولاتوری) خواهد بود.

کلان‌روندهای مرتبط در بنیاد آینده دبی: مرزهای مواد و انرژی.

۲. سیستم‌های توان اسمزی (انرژی آبی)
هدایت نمک به سمت تولید انرژی



۲-۱-۱ مقدمه

کاترین دنیل^۱، مدیر و استاد دانشکده سایبرنتیک، دانشگاه ملی استرالیا

الیسون لوئیس^۲، رئیس دانشکده مهندسی و محیط ساخته شده، دانشگاه کیپ تاون

سیستم‌های توان اسمزی^۳ از اختلاف میزان نمک میان دو منبع آبی برای تولید انرژی استفاده می‌کنند و برای این کار سازوکارهای مختلفی به کار می‌گیرند. این سیستم‌ها، پاک، تجدیدپذیر و کم‌اثر بر محیط‌زیست هستند و مهم‌تر از همه، منبعی پایدار و بدون وقفه از انرژی فراهم می‌کنند. برخلاف انرژی خورشیدی و بادی که به شرایط آب‌وهوا وابسته‌اند و در طول روز نوسان دارند، توان اسمزی پیوسته و قابل پیش‌بینی است.

این ایده اولین بار در سال ۱۹۷۵ مطرح شد، اما استفاده عملی از آن به دلیل محدودیت‌های غشاهای موجود ممکن نبود. این محدودیت‌ها شامل جریان عبوری ناکافی از غشا و توان خروجی پایین، حتی در سیستم‌های بزرگ‌تر، می‌شد. برای رفع این دو مشکل، پیشرفت‌های اخیر منجر به ساخت مواد جدید و طراحی‌های نوآورانه‌ای شده که جریان عبوری از غشاها را بهبود می‌بخشند.

دو طرح اصلی برای این سیستم‌ها وجود دارد. در طرح اول که اسمز با تأخیر فشار^۴ نام دارد، یک غشای نیمه‌تراوای ویژه^۵ تنها به آب اجازه می‌دهد از سمت کم‌نمک به سمت پرنمک عبور کند. این اختلاف حجم آب در دو طرف غشا، فشاری ایجاد می‌کند که می‌تواند توربینی را چرخانده و برق تولید کند. طرح دوم بر «الکترودیالیز معکوس^۶» متکی است که از غشاهای تبادل یونی بهره می‌گیرد. این غشاها به شکلی گزینشی کاتیون‌ها (بار مثبت) و آنیون‌ها (بار منفی) را در جهت‌های مخالف هدایت می‌کنند؛ نیروی محرکه‌شان هم همان اختلاف نمک میان دو سمت غشا است. این جابجایی بار، مستقیماً جریان الکتریکی ایجاد می‌کند.

این دستاوردها نه تنها مرحله آزمایشگاهی را با موفقیت پشت سر گذاشته‌اند، بلکه هم‌اکنون در مقیاس نیروگاه‌های تجاری نیز در مسیر توسعه و استقرار قرار دارند. برای نمونه، یکی از این تلاش‌های تجاری، پروژه «آسمورون ۱»^۷ با هدایت شرکت سوئیچ انرژی^۸ است که عملیات پیاده‌سازی و نصب تجهیزات آن از سال ۲۰۲۴ کلید خورده است. در همین راستا، شرکت دانمارکی سالت‌پاور^۹ که در سال ۲۰۱۵ تأسیس شده، هم‌اکنون با بهره‌گیری از محلول‌های نمکی فوق‌غلظتی که از سایت‌های زمین‌گرمایی^{۱۰} استخراج می‌شوند، تولید توان الکتریکی را عملاً آغاز کرده است.

1) Katherine Daniell

2) Alison Lewis

3) Osmotic Power Systems

4) Pressure Retarded Osmosis (PRO)

5) Semipermeable Membrane

6) Reverse ElectroDialysis (RED)

7) OsmoRhône 1

8) Sweetch Energy

9) SaltPower

10) Geothermal Sites

همچنین، در یک نمونه‌ی موفق از اقتصاد چرخشی، «پروژه سیستم آب مگا-تن» در شهر فوکوئوکای ژاپن، از پساب بسیار شور به‌جای مانده از فرآیند تصفیه و شیرین‌سازی آب دریا، انرژی استخراج می‌کند؛ مایعی که پیش از این به عنوان پسماند دور ریخته می‌شد.

فراتر از تولید انرژی، یافته‌های پژوهشی حاکی از آن است که فناوری الکترودیالیز معکوس دارای ظرفیت‌های کاربردی در زمینه تولید آب تصفیه‌شده و همچنین بازیابی عناصر ارزشمندی نظیر لیتیوم، نیتروژن و دی‌اکسید کربن از آب‌های فرآیندی است.

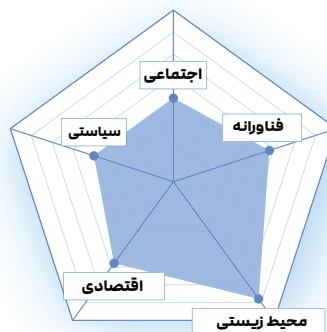
موانع بنیادین در مسیر توسعه این فناوری، عمدتاً ریشه در چالش‌های فنی و اقتصادی دارند. اگرچه نیروگاه‌های نسل پیشین با معضلاتی نظیر گرفتگی غشا مواجه بودند، اما دستاوردهای فناورانه اخیر این محدودیت‌ها را به میزان قابل توجهی تعدیل کرده‌اند. با وجود این موانع عملیاتی، مبانی نظری فناوری مذکور بسیار مستحکم است؛ چراکه استحصال توان از طریق اختلاف شوری، یک اصل علمی کاملاً اثبات‌شده به شمار می‌رود. از این رو، با فرض تأمین مالی و سرمایه‌گذاری مناسب، به استثنای الزامات قانونی نظیر اخذ مجوزها و ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی، مانع عمده دیگری بر سر راه تجاری‌سازی و پذیرش گسترده این فناوری وجود نخواهد داشت.

اقدامات کلیدی برای دستیابی به مقیاس‌پذیری:

راه‌اندازی پروژه‌های نمایشی، از طریق مشارک‌های دولتی خصوصی برای احداث نیروگاه‌های اسمزی آزمایشی در مناطق جغرافیایی متنوع و سنجش عملکرد فناوری در شرایط واقعی.

توسعه برنامه‌های مشارکت جامعه:

اجرای برنامه‌های آموزشی در جوامع هدف برای نشان دادن مزایای دوگانه این فناوری: تولید انرژی پاک و مدیریت بهتر منابع آب.



شکل ۴: نقشه آمادگی اکوسیستم سیستم‌های توان اسمزی

۲-۲. چشم‌انداز راهبردی سیستم‌های توان اسمزی

بنیاد آینده دبی

سیستم‌های توان اسمزی می‌توانند سالانه تا ۵,۱۷۷ تراوات ساعت انرژی تولید کنند (نزدیک به یک پنجم کل مصرف برق جهان) و این رویکردی منحصربه‌فرد برای تولید انرژی پایدار است. اگر این فناوری در مقیاس بزرگ توسعه یابد، می‌تواند هم شیوه مدیریت آب در جوامع را تغییر دهد و هم منابع جدیدی از انرژی در مناطق ساحلی و دهانه رودخانه‌ها^۱ ایجاد کند.

جذاب‌ترین ویژگی این فناوری توانایی آن در ترکیب تولید انرژی با مدیریت آب است. شرکت‌های برق می‌توانند سیستم‌هایی ترکیبی طراحی کنند که با به‌کارگیری توان اسمزی، در کنار انرژی باد، خورشید و آب، شبکه‌هایی پایدارتر و مقاوم‌تر بسازند. به‌ویژه جوامع ساحلی می‌توانند از چنین سیستم‌های غیرمتمرکزی بهره‌برده و وابستگی خود را به شبکه‌های بزرگ انرژی کاهش دهند.

با بلوغ این فناوری، شیوه نگاه جهانی به مدیریت منابع آب تغییر خواهد کرد. همچنین شتاب پژوهشی^۲ در این حوزه چشمگیر بوده است: بین سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۴ تنها ۲۸۱ مقاله در این حوزه منتشر شده است؛ در حالی که در تمام دوره زمانی ۱۹۶۸ تا ۲۰۱۰ فقط ۲۶۳ مقاله چاپ شده بود. این آمار نشان می‌دهد این حوزه به نقطه اوج خود رسیده است. سرمایه‌گذاری ۲۵ میلیون یورویی در سوئیچ انرژی نشان‌دهنده اعتماد روزافزون بازار به این فناوری است.

پتانسیل این فناوری که از صرف «تولید انرژی» فراتر رفته و رویکردهای نوینی را برای تصفیه آب و بازیابی منابع امکان‌پذیر می‌سازد که به همان اندازه تحول‌آفرین است. فناوری‌های توان اسمزی می‌توانند مسیرهای تازه‌ای را برای نمک‌زدایی^۳ هموار کنند؛ در حالی که هم‌زمان، بازیابی منابع راهبردی نظیر لیتیم را در طول این فرآیند، میسر می‌سازند. این دستاورد می‌تواند به خلق سیستم‌های به‌هم‌پیوسته‌ای بینجامد که در آن‌ها، مدیریت آب، تولید انرژی و استخراج منابع، پیوندی عمیق و یکپارچه با یکدیگر پیدا می‌کنند.

آینده‌ای را تصور کنید که در آن، صنایع آب‌بر^۴، جریان آب خروجی را نه به‌عنوان «پساب»، بلکه به‌مثابه یک «پلتفرم راهبردی منابع» در نظر می‌گیرند. جوامع بشری قادر خواهند بود مدل‌های اقتصادی نوینی را توسعه دهند که محدودیت‌های جغرافیایی را به فرصت‌های طلایی بدل می‌سازند. این صنایع می‌توانند زیرساخت‌های خود را برای تولید اشکال متنوعی از ارزش از جمله انرژی، آب تصفیه‌شده و مواد بازیافتی در هر بار تعامل با آب، بازطراحی کنند.

1) Estuarine Environments

(این واژه به منطقه‌ای اشاره دارد که آب شیرین رودخانه با آب شور دریا مخلوط می‌شود.)

2) Research Momentum

3) Desalination

4) Water-Intensive

برای تحقق این مزایا در مقیاس کلان، نوآورترین سازمان‌ها، توان اسمزی را چیزی بسیار فراتر از یک «فناوری تولید انرژی» ارزیابی خواهند کرد؛ این فناوری در واقع پلتفرمی بالقوه برای بازتعریف شیوه خلق ارزش اقتصادی در صنایع آب‌بر محسوب می‌شود. با این رویکرد، یک تأسیسات آب‌شیرین‌کن می‌تواند از یک «مرکز هزینه» به یک «مولد چندمنظوره منابع» ارتقا یابد که هم‌زمان به تولید انرژی، آب خالص و مواد معدنی قابل‌بازیابی^۱ می‌پردازد؛ فرآیندی که زیرساخت‌ها را از یک سیستم خطی، به یک اکوسیستم انطباق‌پذیر و ارزش‌آفرین^۲ متحول می‌سازد.

جوامع از طریق ادغام سیستم‌های توان اسمزی، رویکردهای بسیار تاب‌آورتر و پایدارتری را برای مدیریت منابع توسعه خواهند داد. این فناوری به دگرگونی در شیوه تولید انرژی، تصفیه آب و خلق ارزش اقتصادی کمک شایانی خواهد کرد؛ و بدین ترتیب، زیرساخت‌هایی را محقق می‌سازد که می‌توانند به‌طور هم‌زمان کارکردهای چندگانه‌ای را در دو حوزه مدیریت آب و تولید انرژی ارائه دهند.

کلان‌روندهای مرتبط بنیاد آینده دبی: مرزهای مواد و انرژی^۳

۱) **بازیابی لیتیوم و منابع راهبردی (Resource Recovery):** لیتیوم عنصر کلیدی عصر «گذار انرژی» و تولید باتری برای خودروهای الکتریکی (EV) است. با توجه به انحصار جغرافیایی و هزینه‌های سنگین استخراج از معادن، فناوری‌هایی که بتوانند این فلز گران‌بها را مستقیماً از پساب آب‌شیرین‌کن‌ها استخراج کنند، ارزش ژئوپلیتیک و تجاری فوق‌العاده‌ای داشته و اهرم قدرتمندی برای جذب تأمین مالی پروژه‌های کلان به شمار می‌روند.

۲) **زیرساخت خطی در برابر اکوسیستم انطباق‌پذیر (Linear vs. Adaptive Infrastructure):** در اقتصاد سنتی، زنجیره ارزش، یک فرآیند خطی است (مواد اولیه وارد سیستم شده، مصرف می‌شود و پساب دور ریخته می‌شود). تبدیل این روند به یک «اکوسیستم» بدان معناست که خروجی یک بخش، دقیقاً ماده اولیه بخش دیگر است. این مدل، نه‌تنها ریسک نوسانات قیمت مواد اولیه را در بازارهای جهانی پوشش می‌دهد، بلکه نرخ بازگشت سرمایه (ROI) را به دلیل تولید هم‌زمان چند محصول کلیدی، به‌شدت افزایش می‌دهد.

3) Materials and Energy Boundaries

۳. فناوری‌های هسته‌ای پیشرفته
به کارگیری هسته‌ای نسل آینده برای پیشبرد پیشرفت



۳-۱. مقدمه

داگ آرنت^۱، مدیر اجرایی، بنیاد آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر

کارن هالبرگ^۲، پژوهشگر ارشد، مرکز اتمی باریلوچه (CONICET)

برنارد میرسون^۳، مدیر ارشد نوآوری بازنشسته، آی‌بی‌ام (IBM)

تقاضای جهانی برای انرژی با شتابی فزاینده رو به افزایش است؛ روندی که توسعه ناوگان حمل‌ونقل برقی، ظهور فناوری‌های پرمصرفی نظیر هوش مصنوعی و الزام به کربن‌زدایی در مسیر تحقق اهداف اقلیمی، نیروی محرکه آن به شمار می‌رود. برای پاسخگویی به این بار مصرفی سنگین، شبکه‌های توزیع برق در سراسر جهان ناگزیر به توسعه ظرفیت‌های خویش‌اند؛ توسعه‌ای که باید ضمن تضمین قابلیت اطمینان^۴، تاب‌آوری^۵ و مقرون‌به‌صرفه بودن^۶ جریان انرژی را برای تداوم تولید حفظ نماید.

در این راستا، راکتورهای نسل سوم^۷ که غالباً بر پایه تکنولوژی آب تحت فشار^۸ طراحی شده‌اند، با بهره‌گیری از سوخت‌های بهینه‌شده و سیستم‌های ایمنی پیشرفته، استانداردهای جدیدی را تعریف کرده‌اند. با این وجود، راکتورهای نسل چهارم^۹ گامی فراتر نهاده و با بهره‌گیری از خنک‌کننده‌های جایگزین نظیر فلزات مایع^{۱۰}، نمک‌های مذاب و یا گاز هلیوم، پارادایم جدیدی را معرفی می‌کنند. این سیالات پیشرفته قابلیت عملکرد در دماهای بالاتر و فشارهای پایین‌تر را دارا هستند؛ ویژگی‌هایی که در نهایت موجب ساده‌سازی معماری سیستم، ارتقای ایمنی و کاهش هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی می‌گردند.

روند نوظهور دیگری که در حال تکوین است، تمرکز بر کوچک‌سازی ابعاد نیروگاه‌هاست؛ این الگو مبتنی بر طراحی‌هایی است که امکان ساخت قطعات و ماژول‌های اصلی در کارخانه و سپس انتقال آن‌ها به سایت پروژه را فراهم می‌آورد. این «راکتورهای کوچک ماژولار^{۱۱}» معمولاً ظرفیتی معادل یک سوم راکتورهای متداول دارند. استقرار زنجیره‌ای چندین واحد SMR همسان برای دستیابی به توان خروجی هدف، ضمن حذف هزینه‌های گزاف، زمان طولانی مرتبط با طراحی و احداث راکتورهای سفارشی را به حداقل می‌رساند. این ویژگی، SMRها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای تأمین انرژی در شبکه‌های پراکنده و مناطق دورافتاده تبدیل کرده است.

1) Doug Arent

2) Karen Hallberg

3) Bernard Meyerson

4) Reliability

5) Resiliency

6) Affordability

7) Generation III Reactors

8) Pressurized Water-cooled Reactors

9) Generation IV Reactors

10) Molten Metals

11) Small Modular Reactors (SMRs)

کشورهای مختلف در حال تخصیص بودجه‌های عمومی کلانی برای حمایت از استقرار راکتورهای کوچک ماژولار (SMR) در مقیاس وسیع و همچنین طراحی سیستم‌های خنک‌کننده جایگزین هستند. دامنه این سرمایه‌گذاری‌ها تا تأسیسات نوین تولید سوخت و سایت‌های غنی‌سازی نیز گسترش می‌یابد؛ رویکردی که استقرار نهایی و عملیاتی این فناوری‌ها را تا پایان دهه جاری میلادی امکان‌پذیر خواهد ساخت.

در شرایط کنونی و خارج از مرزهای روسیه و چین، تنها محدود کشورهای در حال تزریق سرمایه‌های کلان به پروژه‌های راکتورهای بزرگ هستند. برجسته‌ترین نمونه، کره جنوبی است که با در اختیار داشتن ۲۶ راکتور فعال، یک سوم از کل تقاضای برق کشور را تأمین می‌کند. به علاوه، استراتژی انرژی پاک امارات متحده عربی نیز مبتنی بر سرمایه‌گذاری ۱۶۳ میلیارد دلاری تا سال ۲۰۵۰ پایه‌ریزی شده است؛ با این هدف که نیمی از سبد انرژی این کشور از منابع هسته‌ای و تجدیدپذیر تأمین گردد. طی سال‌های اخیر نیز، دو راکتور تحت فشار اروپایی و دو پلنفرم AP1000 در ایالات متحده با موفقیت وارد مدار بهره‌برداری شده‌اند.

در عرصه راکتورهای SMR، در حالی که روسیه و چین هم‌اکنون از نیروگاه‌های عملیاتی برخوردارند، کشورهای غربی با شتابی فزاینده در حال توسعه طراحی‌ها، زیرساخت‌های ساخت‌وساز و تدوین چارچوب‌های رگولاتوری هستند تا صنعتی کاملاً رقابتی را در این حوزه پایه‌ریزی کنند. در همین راستا، مجمع جهانی اقتصاد در نوامبر ۲۰۲۴ و با همکاری شرکت اکسنچر^۱، سندی با عنوان «چارچوب مشارکتی برای تسریع استقرار راکتورهای هسته‌ای پیشرفته و ماژولار کوچک^۲» منتشر کرد. این سند به‌عنوان یک ابزار راهبردی عمل می‌کند تا ذی‌نفعان بازار را بر سر اقدامات کلیدی لازم برای تجاری‌سازی این فناوری حیاتی، هم‌سو و هماهنگ سازد.

گرچه در آینده کوتاه‌مدت، توسعه هسته‌ای در گرو راکتورهای «شکافت^۳» ارزیابی می‌شود، اما هدف غایی و بلندمدت بسیاری از بازیگران کلان در این عرصه، دستیابی به بلوغ در «گداخت هسته‌ای^۴» خواهد بود. این فناوری که شامل هم‌جوشی اتم‌های هیدروژن برای تشکیل هلیوم است مقادیر عظیمی از انرژی را آزاد می‌سازد؛ فرآیندی که دقیقاً بازتاب‌دهنده همان مکانیزم قدرتمند تأمین‌کننده انرژی در خورشید است. هرچند تا به امروز استخراج یک «بازده توان خالص مثبت^۵» از این سیستم‌ها محقق نشده است، اما سطح بالایی از اطمینان وجود دارد که طی یک الی دو دهه آینده، این منبع نامحدود از انرژی پاک به تکامل تجاری خواهد رسید.

این چرخش استراتژیک به‌سوی فناوری‌های پیشرفته هسته‌ای، در کنار ارتقای راهبردهای انرژی تجدیدپذیر و بهینه‌سازی راهکارهای ذخیره‌سازی انرژی، بر ضرورت و فوریت جهانی برای گذار از سوخت‌های فسیلی و تضمین آینده‌ای پایدار و عاری از کربن تأکید می‌ورزد.

1) Accenture

2) A Collaborative Framework for Accelerating Advanced Nuclear and Small Modular Reactor Deployment

3) Fission

4) Nuclear Fusion

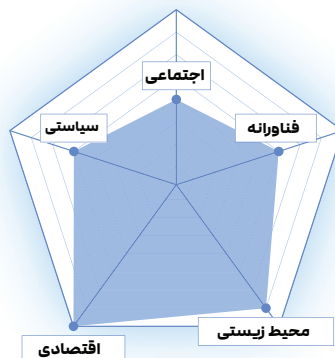
5) Net Power Gain

اقدامات کلیدی برای دستیابی به مقیاس پذیری:

راه اندازی برنامه‌های ایمنی جامعه‌محور که ویژگی‌های امنیتی طراحی‌های جدید هسته‌ای را به شکل شفاف و قابل فهم برای عموم توضیح دهند.

تسریع آزمایش نمونه اولیه:

سرمایه‌گذاری در برنامه‌های آزمایشی برای راکتورهای نسل آینده، به ویژه مدل‌های خنک‌شونده با گاز، برای تأیید عملکرد ایمنی و کارایی عملیاتی در شرایط گوناگون.



شکل ۵: نقشه آمادگی اکوسیستم فناوری‌های هسته‌ای پیشرفته

۲-۳. چشم‌انداز راهبردی: فناوری‌های هسته‌ای پیشرفته

توسط بنیاد آینده دبی

فناوری‌های پیشرفته هسته‌ای، به ویژه راکتورهای ماژولار کوچک (SMR) و راکتورهای خنک‌شونده با گاز، مسیری نویدبخش را برای تأمین نیروی پاک و قابل اتکا ارائه می‌دهند. این فناوری‌ها با ترکیب «انعطاف پذیری در مکان‌یابی» و «ایمنی ارتقایافته» در قیاس با نیروگاه‌های سنتی، جایگاه خود را به عنوان توانمندسازهای کلیدی آینده پایدار انرژی تثبیت کرده‌اند.

تا سال ۲۰۳۰، راکتورهای SMR پتانسیل آن را دارند که معماری توزیع نیرو را بازتعریف کنند. این واحدهای پیش‌ساخته (کارخانه‌ای) از ظرفیت لازم برای خدمت‌رسانی به جوامع دورافتاده یا الحاق به سایت‌های صنعتی موجود برخوردارند؛ رویکردی که دسترسی به برق پایدار و بدون کربن را به شدت گسترش می‌دهد. چنین انعطاف‌پذیری بالایی، ادغام منابع متغیر انرژی تجدیدپذیر^۱ را تسهیل می‌نماید و طراحی ماژولار آن‌ها، ثبات شبکه را دوچندان می‌کند. این فناوری امکان نفوذ انرژی هسته‌ای را به مناطق دور از دسترس نیروگاه‌های عظیم و سنتی فراهم می‌آورد.

به موازات راکتورهای SMR، راکتورهای خنک‌شونده با گاز نیز در حال دگرگون‌سازی الگوهای توزیع انرژی‌اند. این سیستم‌ها با تأمین «حرارت فرآیندی دمابالا» (۶۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد) برای کاربردهای دشواری نظیر تولید هیدروژن و صنایع سنگین، فرصتی بی‌نظیر برای پیشبرد «کربن‌زدایی صنعتی» فراهم می‌آورند. با توجه به سهم تقریبی ۱۵ درصدی این بخش‌ها در انتشار جهانی CO₂، فناوری هسته‌ای می‌تواند راهکاری قطعی برای مهار آلاینده‌هایی باشد که کاهش آن‌ها از جمله دشوارترین چالش‌های اقلیمی به‌شمار می‌رود.

(۱) پشتیبانی از ادغام منابع متغیر (Integration of Variable Renewables): انرژی‌های بادی و خورشیدی ماهیتاً نوسان دارند (وابسته به آب‌وهوا هستند). برای مدیران شبکه‌های برق صنعتی، این نوسانات به معنای قطعی خطوط تولید و ناپایداری است. نیروی هسته‌ای نقش یک «بار پایه» (Baseload) قدرتمند و بدون کربن را ایفا می‌کند که این نوسانات را پوشش داده و پایداری شبکه را برای مراکز داده (Data Centers) و کارخانجات مدرن که نیازمند آپتایم (Uptime) ۱۰۰ درصدی هستند، تضمین می‌نماید.

با نگاهی به افق‌های دورتر، ظرفیت جهانی انرژی هسته‌ای برای حمایت از اهداف «انتشار خالص صفر»، پتانسیل دوبرابر شدن در فاصله سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ را داراست. اگرچه هزینه‌های سنگین سرمایه‌گذاری اولیه همچنان یک چالش جدی محسوب می‌شود، اما حرکت به سوی طراحی‌های استاندارد راکتور و بهره‌گیری از «صرفه‌های ناشی از مقیاس»، مسیر روشنی را برای استقرار مقرون به صرفه‌تر این فناوری‌ها ترسیم می‌کند.

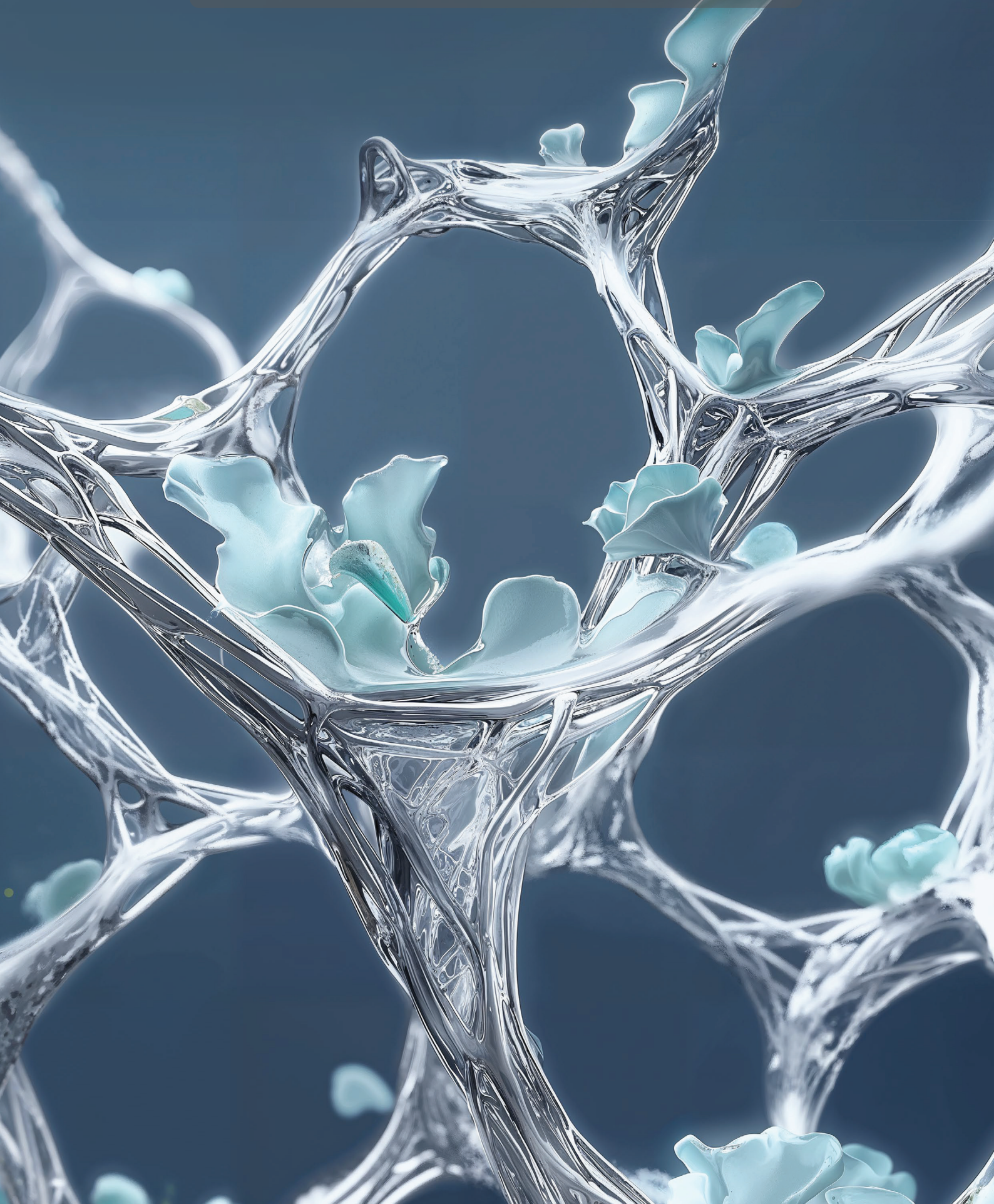
برای مقیاس‌پذیری مؤثر این فناوری‌ها، رفع تنگناهای زنجیره تأمین و چالش‌های نیروی کار نقشی محوری ایفا می‌کند. دسترسی پایدار به مواد تخصصی (نظیر آلیاژهای مقاوم در برابر تشعشع)، در کنار غلبه بر بحران کمبود استعداد‌های مهندسی هسته‌ای (که با افت ۲۵ درصدی فارغ‌التحصیلان این رشته در فاصله سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۲ نمایان شده است) برای حفظ شتاب توسعه و استقرار راکتورها حیاتی خواهد بود.

پذیرش فراگیر فناوری‌های پیشرفته هسته‌ای، کاملاً در گرو بازسازی اعتماد عمومی از طریق ارتباطات شفاف و اثبات ایمنی راکتورهای نسل جدید است. افزون بر این، با دیجیتالی شدن روزافزون نیروگاه‌ها، پیاده‌سازی ساختارهای قدرتمند امنیت سایبری برای حفاظت از زیرساخت‌ها و تضمین تولید انرژی امن و تاب‌آور، الزامی است. کشورهای پیشگام در استقرار SMRها (شامل چین، بریتانیا و ایالات متحده)، هم‌اکنون خود را در خط مقدم یک پارادایم نوین فناوریانه جای داده‌اند؛ تا جایی که امروزه، رهبری در عرصه هسته‌ای، نشانگری روشن از ظرفیت‌های راهبردی فناوری به شمار می‌رود.

فناوری‌های پیشرفته هسته‌ای به جای پیروی از یک مدل استقرار واحد، احتمالاً مسیرهای پذیرش متمایزی را بر اساس کاربردهای خاص خود طی خواهند کرد. برای مثال، راکتورهای SMR ممکن است در گام نخست به جوامع دورافتاده و تأسیسات صنعتی نیازمند به برق مستقل از شبکه، خدمت‌رسانی کنند؛ در حالی که طراحی‌های پیشرفته‌تر راکتور، جایگزین نیروگاه‌های فرسوده و سنتی در شبکه‌های توزیع فعلی خواهند شد. در نهایت، بزرگترین ارزش افزوده این حوزه، دقیقاً در نقطه تلاقی انرژی هسته‌ای با منابع تجدیدپذیر، هیدروژن و کربن‌زدایی صنعتی خلق می‌گردد.

کلان‌روندهای مرتبط بنیاد آینده دبی: مرزهای مواد و انرژی.

۴. درمان‌های زنده مهندسی شده
میکروبی‌هایی که به منظور ارائه درمان‌های موردنیاز طراحی شده‌اند



۱-۴. مقدمه

توماس هارتونگ^۱، استاد، صاحب کرسی دورنکمپ زبیدن در سم‌شناسی مبتنی بر شواهد، دانشکده بهداشت عمومی

بلومبرگ جانز هاپکینز

سانگ-یوپ لی^۲، معاون ارشد پژوهشی؛ استاد برجسته، مؤسسه علوم و فناوری پیشرفته کره (کایست^۳)

ویلفرید وب^۴، مدیر علمی و استاد مواد نوین، مؤسسه لایب‌نیتس برای مواد نوین

درمان‌های زنده مهندسی‌شده، میکروب‌ها، سلول‌ها و قارچ‌هایی هستند که به صورت ژنتیکی طراحی شده‌اند تا داروها، آنزیم‌ها و هورمون‌های موردنیاز بدن را به شکل کنترل‌شده و پایدار تولید کنند. برای این کار، کد ژنتیکی حاوی دستورالعمل ساخت مواد درمانی به این موجودات زنده وارد می‌شود. یکی از مزایای مهم این رویکرد این است که می‌توان مکانیسم‌هایی برای کنترل تولید دارو در آن تعبیه کرد؛ این کنترل یا توسط خود بیمار انجام می‌شود یا در پاسخ به سیگنال‌های بیماری به صورت خودکار فعال می‌شود تا دارو دقیقاً در زمان و مقدار لازم تولید شود.

تولید دارو درون بدن بیمار می‌تواند یکی از بزرگ‌ترین مشکلات داروهای زیستی یعنی هزینه تولید بالا را حل کند. این داروها در حال حاضر در آزمایشگاه‌ها با استفاده از سلول‌های اصلاح‌شده تولید می‌شوند و پس از آن مراحل پرهزینه خالص‌سازی، فرآوری و فرمول‌بندی را طی می‌کنند. تولید مستقیم دارو در داخل بدن به معنای حذف مراحل فرآوری و خالص‌سازی پرهزینه‌ای است که به طور معمول بالغ بر ۷۰ درصد از کل هزینه‌های تولید را به خود اختصاص می‌دهند. برای داروهایی که باید مکرراً تزریق شوند، تولید پیوسته در بدن بیمار می‌تواند تأمین پایدار دارو را تضمین کند، نیاز به مراجعه مکرر را کم کرده و التزام بیمار به درمان را بالا ببرد؛ این موضوع به‌ویژه در دیابت بسیار مهم است. چنین پیشرفت‌هایی مدیون دستاوردهای اخیر در زیست‌شناسی مصنوعی^۵ و مهندسی ژنتیک هستند.

این پژوهش‌ها در ایالات متحده، اروپا و چین با توجه روزافزونی همراه شده‌اند. چندین شرکت هم‌اکنون در حال توسعه این فناوری برای کاربرد تجاری هستند. برای نمونه، شرکت چاریوت بایوساینس^۶ در ایالات متحده پلتفرم‌های میکروبی را بررسی می‌کند که با یک دوز واحد، مواد درمانی را به جریان خون رها می‌کنند و نیاز به تزریق‌های مکرر را به طور چشمگیری کاهش می‌دهند. شرکت فنلاندی اورنالیس تراپیوتیکس^۷ هم در کارآزمایی‌های بالینی فاز دوم از باکتری‌های اسید لاکتیک اصلاح‌شده برای تولید هم‌زمان سه پروتئین درمانی در زخم پای دیابتی استفاده می‌کند. شرکت NEC هم کارآزمایی‌های فاز یک و دو^۸ را با یک سویه تضعیف‌یافته سالمونلا^۹ پیش می‌برد تا سیستم ایمنی بیمار را برای مقابله با سلول‌های سرطانی تحریک کند.

1) Thomas Hartung

2) Sang-Yup Lee

3) Kaist

4) Wilfried Weber

5) Synthetic Biology

6) Chariot Bioscience

7) Aurealis Therapeutics

8) Clinical Phase I/II Trials

9) Salmonella Bacteria

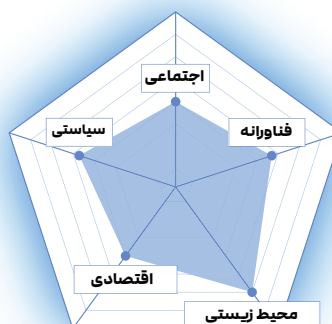
ایمنی یک محور بنیادی در این حوزه است که نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. توسعه‌دهندگان فعالانه با نگرانی‌هایی مثل انتقال ژنتیکی ناخواسته، واکنش‌های ایمنی بیش از حد و نشت به محیط زیست روبرو هستند. از جمله راه‌حل‌های در دست بررسی می‌توان به برنامه‌های ژنتیکی که رشد باکتری را محدود می‌کنند یا آن را با دستور خاموش می‌کنند و همچنین محصورسازی ایمن در محفظه‌های پلیمری اشاره کرد. در کنار پیشرفت‌های علمی، چارچوب‌های نظارتی هم باید توسعه یابند (مثل آنچه در اروپا تحت عنوان «محصولات دارویی درمانی پیشرفته» شناخته می‌شود) تا مقامات بهداشتی بتوانند اثربخشی و ایمنی را ارزیابی کنند و مجوز بازار صادر کنند.

ایجاد سندباکس‌های نظارتی:

ایجاد چارچوب‌های نظارتی تخصصی که آزمایش کنترل‌شده درمان‌های زنده مهندسی‌شده را ممکن می‌کنند، در حالی که دستورالعمل‌های ایمنی پایدار نیز به‌موازات آن تدوین می‌شوند.

راه‌اندازی طرح‌های ارتباطی بیمار محور:

تهیه منابع اطلاعاتی ساده و در دسترس که مبانی علمی، مزایا و اقدامات ایمنی درمان‌های ژنتیکی را به زبانی قابل‌فهم برای بیماران و پزشکان توضیح دهند.



شکل ۶: نقشه آمادگی اکوسیستم درمان‌های زنده مهندسی‌شده

۲-۴. چشم‌انداز راهبردی: درمان‌های زنده مهندسی شده

توسط بنیاد آینده دبی

درمان‌های زنده مهندسی شده، فراتر از یک روش درمانی رایج، نشان‌دهنده بازطراحی راهبردی علم پزشکی بر پایه استقرار سیستم‌های زنده در داخل بدن هستند. این رویکرد می‌تواند مرکز ثقل تولید دارو را از کارخانجات صنعتی به فرآیندهای زیستی درون بیمار منتقل کند و از این طریق، افق‌های کاملاً جدیدی را پیش روی مفاهیم درمان بگشاید.

از منظر اقتصاد سلامت، این فناوری پاسخی کلیدی به چالش‌های ساختاری و مستمر در زنجیره توزیع جهانی به شمار می‌رود. با توجه به اینکه درمان‌های زنده امکان ارائه راهکارهای موضعی، کپسول‌محور یا غنی‌شده در مواد غذایی را میسر می‌سازند، پارادایم‌های سنتی تولید و زنجیره تأمین به‌طور کامل بازآرایی خواهند شد. پیامد این تحول، حرکت پرشتاب به سمت «تولید غیرمتمرکز» و بهره‌برداری بهینه از زیرساخت‌های دارویی فعلی است که در نهایت، چالش دسترسی عادلانه در مناطق محروم و منزوی را به شکل مؤثری برطرف خواهد نمود.

برای بیماران، این تحول از مرز «راحتی بیشتر» فراتر می‌رود؛ می‌تواند تجربه زندگی با بیماری‌های مزمن را از بنیان تغییر دهد. الگوی کنونی درمان، که نیازمند مراجعه مکرر به پزشک و تزریق‌های دوره‌ای است می‌تواند به رویکردهایی تکامل یابد که بی‌صدا و خودکار در پس‌زمینه زندگی روزمره عمل می‌کنند. وقتی درمان خودکار و سازگار می‌شود، بار روانی مدیریت بیماری هم کم می‌شود؛ و این یعنی نه‌تنها نتایج بالینی، بلکه کیفیت زندگی بیمار نیز بهتر می‌شود.

صنعت دارو ممکن است دگرگونی بزرگی را تجربه کند. شرکت‌های داروسازی، بیوتکنولوژی و دانشگاه‌های تحقیقاتی احتمالاً پیش‌تاز خواهند بود، اما شاید بازیگران غیرمنتظره‌ای مثل تولیدکنندگان لبنیات و پروبیوتیک هم به این عرصه وارد شوند. با تکامل این حوزه، مشارکت‌هایی میان شرکای غیرسنتی شکل خواهد گرفت؛ برخی پژوهشگران هم در حال بررسی این موضوع هستند که آیا پلتفرم‌های مبتنی بر پروبیوتیک، با نظارت و مقررات دقیق می‌توانند از کاربردهای سلامت مصرف‌کننده حمایت کنند.

ادغام این درمان‌ها با فناوری‌های پوشیدنی می‌تواند حلقه‌هایی از بازخورد میان ارگان‌های درمانی و سیستم‌های پایش خارجی ایجاد کند. ابزارهای پوشیدنی می‌توانند پایش لحظه‌به‌لحظه باکتری درمانی را ممکن سازند و ایمنی و اثربخشی درمان را تضمین کنند. برای رشد این فناوری به مقیاس بزرگ، پیشرفت‌های هم‌زمان در هوش مصنوعی، بیوتکنولوژی و فناوری سلامت ضروری است. هوش مصنوعی می‌تواند طراحی ایمن‌تر و هدفمندتر عملکردهای باکتریایی را پشتیبانی کند و به بهینه‌سازی عملکرد درمانی در شرایط کنترل‌شده بالینی کمک کند.

ترکیب زیست‌شناسی و فناوری، هم در تولید باکتریایی و هم در پایش لحظه‌ای برای موفقیت درمان‌های زنده حیاتی خواهد بود. برای آمادگی واقعی در این حوزه، باید چند چالش اساسی حل شود. توانایی متوقف کردن فعالیت میکروبی در صورت لزوم، برای کاهش خطر تکثیر بی‌رویه یا انتقال ژنتیکی ناخواسته یک ضرورت فنی است. پژوهشگران روی مکانیسم‌های ایمنی نواورانه‌ای مثل سیستم‌های باکتریایی حساس به نور کار می‌کنند که می‌توانند از بیرون کنترل شوند و لایه‌های کنترلی بیشتری نسبت به روش‌های سنتی ارائه دهند.

چارچوب‌های نظارتی بخشی جدایی‌ناپذیر از توسعه مسئولانه هستند؛ محیط‌های آزمایشی کنترل‌شده راهی برای آزمون این نوآوری‌ها تحت شرایط مشخص فراهم می‌کنند و در عین حال نظارت اخلاقی و پاسخگویی عمومی را تضمین می‌نمایند. رهبران نظام سلامت با یک لحظه تعیین‌کننده روبرو هستند.

سازمان‌هایی که زودتر وارد این حوزه شوند می‌توانند مدیریت بیماری‌های مزمن را از درمان‌های دوره‌ای به مراقبت مداوم تبدیل کنند، زنجیره‌های دارویی را بازطراحی کنند، تولید محلی ایجاد کنند، درمان‌هایی متناسب با هر بیمار توسعه دهند و در شکل دادن به چارچوب‌های نظارتی متوازن پیش‌تاز باشند. در دهه پیش رو، سازمان‌های بهداشتی، داروسازی‌ها و شرکت‌های بیوتکنولوژی که وارد این حوزه شوند، می‌توانند در تغییر بنیادین نحوه ارائه و تجربه خدمات درمانی سهیم باشند.

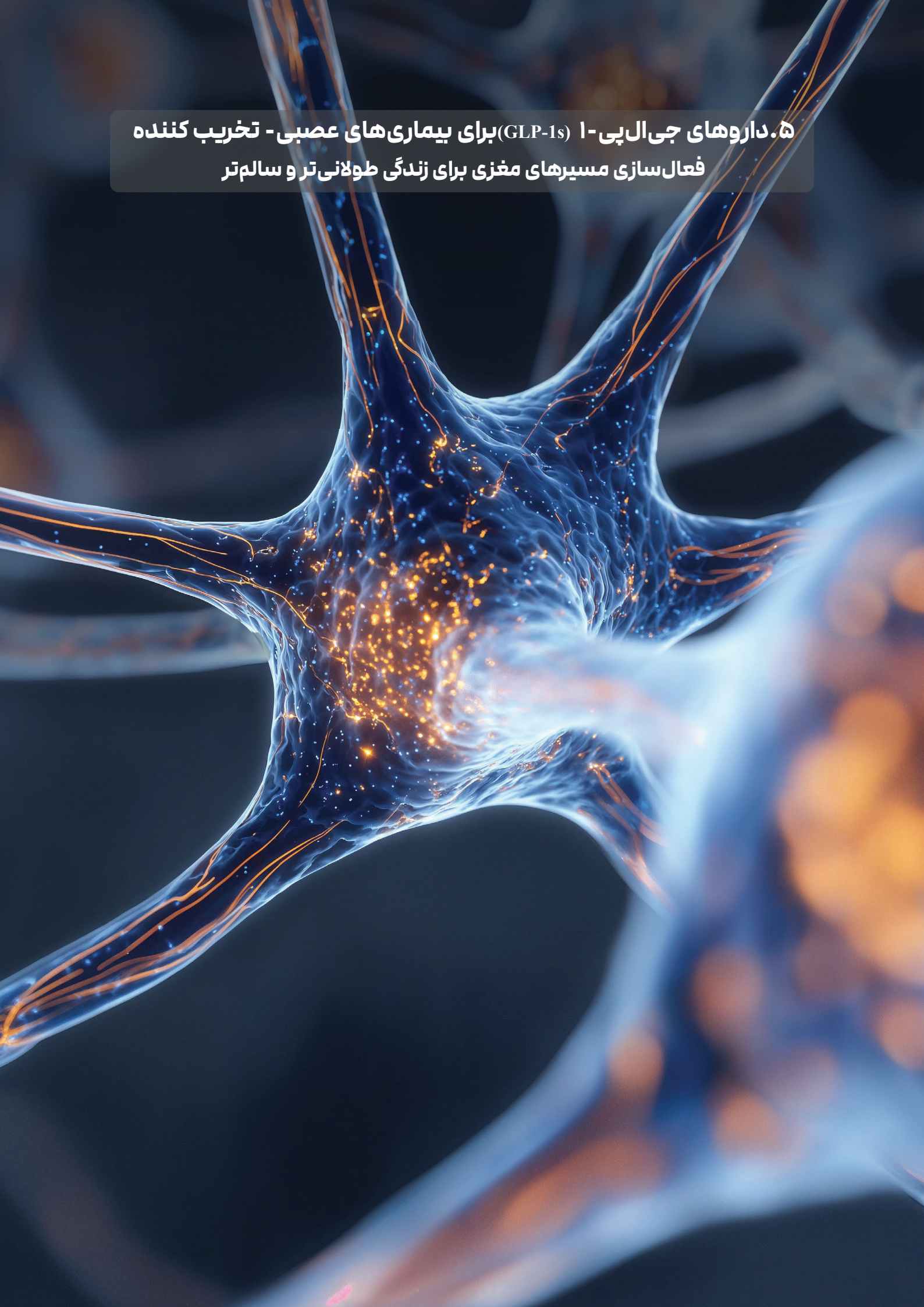
موفقیت در این مسیر به همکاری واقعی میان زیست‌شناسان مصنوعی، متخصصان هوش مصنوعی، پزشکان بالینی، حامیان حقوق بیماران و ناظران دارویی نیاز دارد تا به آینده‌ای برسیم که در آن درمان با بیمار سازگار می‌شود و نه برعکس.

کلان‌روندهای مرتبط در بنیاد آینده دبی: آینده بشریت^۱ و سلامت و تغذیه پیشرفته^۲

1) Future Humanity

2) Advanced Health and Nutrition

۵. داروهای جی ال پی-۱ (GLP-1s) برای بیماری‌های عصبی - تخریب کننده
فعال سازی مسیرهای مغزی برای زندگی طولانی تر و سالم تر



۵-۱. مقدمه

توماس هارتونگ^۱، استاد، کرسی دورنکامپ زینندن در سم‌شناسی مبتنی بر شواهد، دانشکده بهداشت عمومی بلومبرگ جانز هاپکینز.

دسته‌ای از داروها که ابتدا برای دیابت نوع دو و چاقی توسعه یافتند (که به‌طور فنی آگونیست‌های گیرنده پپتید شبه‌گلوکاگون ۱ (GLP-1RAs) نامیده می‌شوند.) برای پتانسیل‌شان در درمان بیماری‌های عصبی تخریب‌کننده مثل آلزایمر^۲ و پارکینسون^۳ بررسی می‌شوند. پژوهش‌های اولیه نشان می‌دهد این داروها ممکن است ویژگی‌های محافظت‌کننده عصبی^۴ داشته باشند (از جمله اثرات ضدالتهابی، آنتی‌اکسیدانی و تنظیم انسولین) که می‌توانند روند پیشرفت بیماری را کند یا معکوس کنند.

این داروها پس از تجویز از سد خونی مغزی عبور می‌کنند و با نورون‌ها و سلول‌های گلیال^۵ تعامل می‌کنند؛ شواهد نشان می‌دهد که التهاب را کاهش می‌دهند و دفع پروتئین‌های سمی مرتبط با آلزایمر و پارکینسون را تسهیل می‌کنند. همچنین این داروها به نظر می‌رسد طول عمر سلول‌های مغزی را افزایش داده و تنظیم انرژی مغز را بهبود می‌بخشند که می‌تواند به عملکرد شناختی و حرکتی کمک کند. فرمولاسیون‌های تازه‌تری هم در حال توسعه هستند که هدف‌شان رساندن بهتر دارو به مغز و افزایش اثرات درمانی است. داده‌های اولیه از جمعیت عمومی نشان‌دهنده پیوندهای احتمالی با بهبود وضعیت بیماران است که با بیماری‌های عصبی تخریب‌کننده زندگی می‌کنند.

کارآزمایی‌های بالینی اولیه نتایج متفاوتی داشته‌اند، اما نشانه‌های امیدوارکننده‌ای هم در آن‌ها دیده می‌شود. خوش‌بینی نسبت به پتانسیل بلندمدت این داروها وجود دارد، اما برای تأیید قطعی و تعیین بهترین پروتکل مصرف، به کارآزمایی‌های دقیق‌تری نیاز است که هم‌اکنون در جریان هستند. اگر اثربخشی این داروها در آلزایمر و پارکینسون اثبات شود، تأثیر اقتصادی‌شان در مقیاس جهانی بسیار بزرگ خواهد بود.

با بیش از ۵۵ میلیون نفر مبتلا به زوال عقل^۶ در جهان، پیش‌بینی می‌شود بازار جهانی GLP-1 تا ۲۰۳۱ به ۵۵.۷ میلیارد دلار برسد. کاهش بار عاطفی و مالی مراقبت از بیماران مبتلا به این بیماری‌ها برای خانواده‌ها و جامعه به همان اندازه مهم خواهد بود. دریافت تأییدیه نظارتی هنوز یک مانع جدی است، چون داده‌های کافی از اثربخشی بلندمدت هنوز در دسترس نیست. هزینه بالای این داروها هم دسترسی را محدود می‌کند و برای کاهش آن، مداخلات سیاست‌گذارانه ضروری است.

دریافت تأییدیه نظارتی هنوز یک مانع جدی است، چون داده‌های کافی از اثربخشی بلندمدت هنوز در دسترس نیست. هزینه بالای این داروها هم دسترسی را محدود می‌کند و برای کاهش آن، مداخلات سیاست‌گذارانه ضروری است.

1) Thomas Hartung

2) Alzheimer

3) Parkinson

4) Neuroprotective

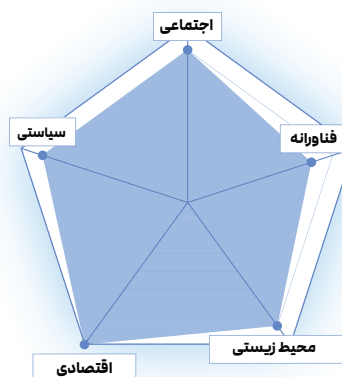
5) Glial Cells

6) Dementia

پایش دقیق ایمنی، به‌ویژه برای جلوگیری از کاهش وزن بیش از حد در بیماران ضعیف و ناتوان، ضروری است. با پیشرفت کارآزمایی‌های بالینی، داروهای GLP-1RA به دلیل پتانسیل خود در بهبود وضعیت بیماران عصبی تخریب‌کننده زیر ذره‌بین هستند. اگرچه یافته‌های اولیه امیدوارکننده‌اند، موفقیت نهایی به استحکام شواهد در حال شکل‌گیری و همکاری مستمر میان جوامع علمی، نظارتی و بهداشتی بستگی خواهد داشت.

اقدامات کلیدی برای دستیابی به مقیاس‌پذیری:

گسترش کارآزمایی‌های بالینی تخصصی طراحی و اجرای کارآزمایی‌های بالینی فاز ۱ و ۲ با تمرکز ویژه بر کاربرد GLP-1RA در بیماری‌های عصبی تخریب‌کننده، با بازه‌های زمانی طولانی‌تر برای ثبت اثرات احتمالی تغییر مسیر بیماری.



شکل ۷: نقشه آمادگی اکوسیستم

داروهای جی‌ال‌پی-۱ برای بیماری‌های عصبی - تخریب‌کننده

۲-۵. چشم انداز راهبردی: داروهای GLP-1 برای بیماری‌های عصبی-تخریب‌کننده

توسط بنیاد آینده دبی

آلزایمر و پارکینسون دهه‌هاست که با پیری یکی دانسته می‌شوند؛ تسلیمی که باید پذیرفت. اما این داروها ممکن است اولین چالشگر جدی این باور باشند. پژوهش‌های اولیه نشان می‌دهند این داروها در مقابله با آلزایمر و پارکینسون، که در مجموع نزدیک به ۵۰ میلیون نفر را در جهان گرفتار کرده‌اند پتانسیل قابل توجهی دارند. اگر اثربخشی تأیید شود، پیامدها فراتر از نتایج بالینی خواهند بود؛ شیوه ارائه خدمات سلامت، مراقبت از سالمندان و حتی نگاه جامعه به پیری هم تغییر خواهد کرد.

در دهه پیش رو، نظام‌های سلامت قادر خواهند بود از رویکرد سنتی «مدیریت علائم» به سوی «مداخلات زود هنگام» و «درمان قطعی» بیماری‌ها گذار کنند. این تغییر پارادایم می‌تواند به تدریج وابستگی به مراکز تخصصی مراقبت از حافظه را تقلیل داده و معماری زیرساخت‌های مراقبت از سالمندان را از بنیان بازطراحی نماید. در این چشم‌انداز، مدل‌های نوین مراقبتی به جای تمرکز صرف بر کنترل علائم بالینی، رسالت خود را بر حفظ عملکردهای شناختی و فیزیکی، ارتقای کیفیت زندگی و تضمین استقلال فردی پایه‌گذاری خواهند کرد.

در صورتی که این مداخلات درمانی بتوانند روند پیشرفت بیماری را به‌طور مؤثری کند نمایند، «بار مراقبتی» به میزان قابل توجهی تقلیل خواهد یافت؛ تحولی که پیامد مستقیم آن، آزادسازی زمان و تسهیل مشارکت پایدار مراقبان غیررسمی (که بخش عمده آنان را زنان تشکیل می‌دهند) در بازار کار است. از سوی دیگر، استمرار پویایی و استقلال سالمندان در سال‌های متمادی، به تحکیم پیوندها و هم‌بستگی بین‌نسلی در سطح جوامع کمک شایانی خواهد کرد.

از سوی دیگر، جهش بی‌سابقه تقاضا برای این نسل نوظهور از داروها، زنجیره‌های تأمین جهانی را تحت فشاری مضاعف قرار داده است. در واکنش به این چالش، چندین ابرشرکت داروسازی از تخصیص سرمایه‌گذاری‌های کلان به منظور ارتقای ظرفیت تولید خود خبر داده‌اند؛ اقدامی راهبردی که از یک سو بازتاب‌دهنده اقبال روزافزون به ظرفیت‌های درمانی داروهای مبتنی بر GLP-1 است و از سوی دیگر نشان می‌دهد که مقیاس‌پذیری و همگامی با این نیاز روبه‌رشد، مستلزم پیاده‌سازی نوآوری‌های ساختاری در تکنولوژی‌های تولید صنعتی است.

مسئله مقرون به‌صرفه بودن همچنان یکی از موانع کلیدی در مسیر توسعه این درمان‌هاست. داروهای دسته GLP-1RA، اگرچه در افق بلندمدت نویدبخش صرفه‌جویی‌های کلان در هزینه‌های مراقبتی هستند، اما به واسطه قیمت بالا و خلأ مکانیزم‌های حمایتی در بسیاری از کشورها، می‌توانند فشارهای بودجه‌ای فوری و سنگینی را ایجاد کنند. این تناقض، ضرورت عبور به سوی الگوهای جدید قیمت‌گذاری را برجسته می‌سازد؛ الگوهایی که قادر باشند نقطه تعادلی بهینه‌ای میان مخارج کوتاه‌مدت و دستاوردهای درمانی آینده برقرار کنند. چنین الزامی، در نهایت می‌تواند به‌عنوان کاتالیزوری برای اصلاحات کلان عمل کند تا نحوه ارزش‌گذاری نظام‌های مراقبت بهداشتی به نفع توسعه مداخلات پیشگیرانه بازتعریف شود.

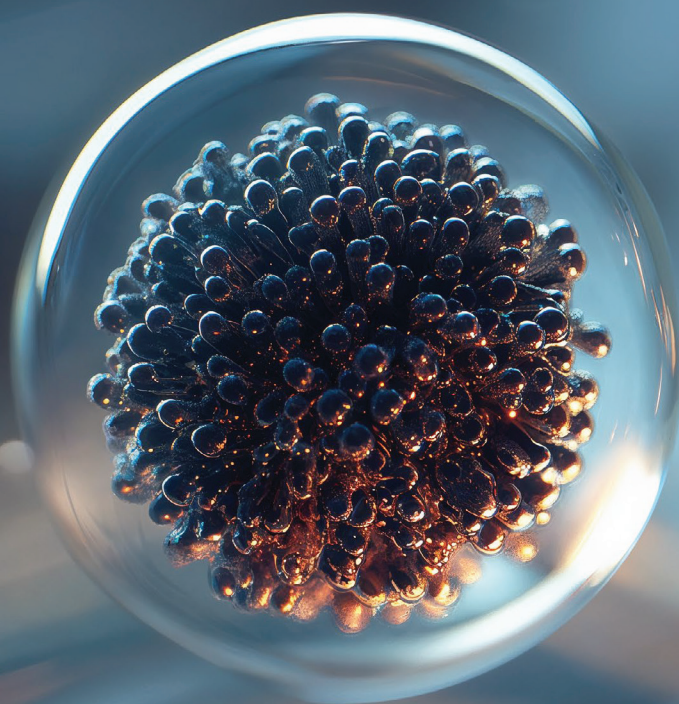
با توجه به نتایج امیدوارکننده اما متفاوت کارآزمایی‌های بالینی اخیر، داروهای GLP-1RA به عنوان یک جزء بالقوه از استراتژی‌های درمانی آینده (در انتظار اعتبارسنجی بالینی بیشتر) مورد بررسی قرار می‌گیرند. رویکردهای مکمل مانند آگونیست‌های گیرنده GIP (پلی‌پپتید انسولینوتروپیک وابسته به گلوکز) نیز در دست بررسی هستند، که با تکامل درک بالینی به یک چشم‌انداز درمانی بالقوه شخصی‌سازی شده‌تر و متناسب با مرحله خاص بیماری کمک می‌کنند.

پتانسیل داروهای GLP-1RA در حال حاضر برای نقش آن‌ها در تغییر رویکرد درمانی بیماری‌های عصبی-تخریب‌کننده، از مدیریت علائم به سمت اصلاح احتمالی بیماری در دست بررسی است. اگر تحقیقات آینده از این مسیر پشتیبانی کند، می‌تواند بر نحوه رویکرد سیستم‌های مراقبت‌های بهداشتی و جوامع به پیری و سلامت شناختی تاثیر بگذارد و پیامدهای گسترده‌تری برای مدل‌های مراقبتی و ساختارهای حمایتی جامعه داشته باشد.

کلان‌روندهای مرتبط بنیاد آینده دبی: آینده بشریت، سلامت و تغذیه پیشرفته.

۶. حسگرهای بیوشیمیایی خودکار

اتصال حسگرهای زیستی برای دریافت اطلاعات لحظه‌ای



۶-۱. مقدمه

کترین دنیل^۱، مدیر و استاد دانشکده سایبرنتیک، دانشگاه ملی استرالیا

ویلفرید وبر^۲، مدیر علمی و استاد مواد جدید، موسسه مواد جدید لایبنتیس

حسگرهای بیوشیمیایی خودکار دستگاه‌هایی هستند که به‌طور مستقل و پیوسته پارامترهای بیوشیمیایی مشخصی را اندازه می‌گیرند؛ نشانگرهای بیماری برای پایش سلامت شخصی‌سازی شده یا تغییرات شیمیایی خاک و آب برای مدیریت محیط‌زیست نمونه‌هایی از این دستگاه‌ها هستند.

برای شناسایی ماده موردنظر، این حسگرها از مبدل‌های فیزیکیوشیمیایی^۳ سفارشی یا حسگرهای زیستی استفاده می‌کنند که از آنزیم‌ها، آنتی‌بادی‌ها یا حتی سلول‌های زنده مهندسی شده بهره می‌گیرند. این حسگرها طوری طراحی شده‌اند که بدون نیاز به دخالت انسانی کار کنند و نتایج را مستقیماً گزارش دهند. برای پایش پیوسته و در لحظه، از ارتباطات بی‌سیم و منابع انرژی خودپایدار مثل سلول‌های سوختی زیستی استفاده می‌کنند. چون داده‌های این حسگرها از راه دور قابل دریافت هستند، برای مناطق دورافتاده یا صعب‌العبور گزینه‌ای ایده‌آل محسوب می‌شوند. این ویژگی، رصد پیوسته سلامت انسان و شرایط محیط‌زیستی را در مناطق دور هم ممکن می‌کند.

در حالی که حسگرهای رایج مثل تست‌های کووید-۱۹ یک‌بار مصرف هستند، چالش اصلی در سنجش بیوشیمیایی خودکار این است که پایش پیوسته برقرار باشد و داده‌ها به‌صورت الکترونیکی ثبت شوند. همین محدودیت‌های فنی بوده که تا کنون کاربرد این حسگرها را به حوزه‌های بسیار تخصصی محدود کرده است.

موفق‌ترین نمونه تا کنون حسگر پوشیدنی گلوکز است که سطح قند خون را در لحظه اندازه می‌گیرد و با گوشی هوشمندی که پمپ انسولین را کنترل می‌کند ارتباط برقرار می‌کند. از بزرگ‌ترین شرکت‌هایی که در این حوزه سرمایه‌گذاری می‌کنند می‌توان به ابوت^۴، ژش^۵ و دوپونت^۶ اشاره کرد. با پیشرفت‌های هم‌زمان در علم مواد، نانوفناوری، زیست‌تقلید و فناوری بی‌سیم، این حسگرها در حال گسترش به کاربردهای تازه‌تری هستند.

یک نمونه، ادغام قابلیت بازنشانی خودکار در حسگرهای پوشیدنی نشانگرهای التهابی است که پایش مستمر را به جای استفاده یک‌بار جایگزین می‌کند. شرکت پرسپریتی هلت^۷ در ایالات متحده دستگاه‌های پوشیدنی برای پایش پیوسته هورمون‌های زنانه توسعه می‌دهد تا تخمک‌گذاری، درمان ناباروری و مراقبت‌های یائسگی را رصد کند.

- 1) Katherine Daniell
- 2) Wilfried Weber
- 3) Physicochemical Transducers
- 4) Abbott Laboratories
- 5) Roche
- 6) DuPont
- 7) US-based Persperity Health

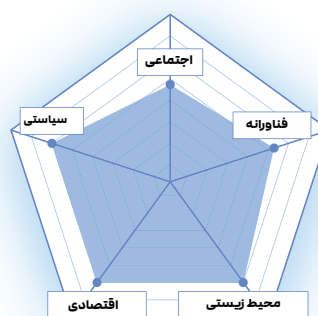
زیست‌حسگرهای سلول کامل میکروبی هم در حال توسعه هستند؛ این حسگرها از میکروب‌هایی استفاده می‌کنند که وقتی با ماده هدف مواجه می‌شوند، آنزیمی تولید یا مصرف می‌کنند تا سیگنال «تشخیص» بفرستند. این اشکال نوظهور از فناوری می‌توانند زندگی افرادی را که نیازمند پایش دائمی وضعیت سلامت خود هستند به‌طور اساسی تغییر دهد. کاربردهای ایمنی مواد غذایی و پایش محیط‌زیستی، به‌ویژه برای شناسایی زودهنگام آلودگی، هم می‌توانند منافع اجتماعی و زیست‌محیطی چشمگیری به همراه بیاورند.

بسیاری از حسگرها هنوز عمر کوتاهی دارند و باید مرتباً تعویض شوند؛ اما پیش‌بینی می‌شود نسل‌های بعدی با پیشرفت‌هایی همراه باشند که این هزینه را کاهش دهند. زیست‌حسگرهای سلول کامل میکروبی با موانع نظارتی و اخلاقی بیشتری نسبت به دستگاه‌های پزشکی یا زیست‌محیطی معمول روبرو هستند، چون ارگانسیم‌هایی هستند که از نظر ژنتیکی مهندسی شده‌اند و می‌توانند در محیط‌زیست رها شوند.

اقدامات کلیدی برای دستیابی به مقیاس‌پذیری:

تدوین استانداردهای صنعتی شفاف درباره حریم خصوصی، مالکیت داده و ایمنی زیستی با مشارکت متخصصان اخلاق زیستی و نهادهای نظارتی.

برگزاری نمایش‌های عمومی از کاربردهای غیرتهاجمی: نمایش عمومی کاربردهای این فناوری در محیط‌زیست و کشاورزی برای آشنا کردن مردم با آن، پیش از گسترش آن به حوزه سلامت.



شکل ۸: نقشه آمادگی اکوسیستم حسگرهای بیوشیمیایی خودکار

۲-۶. چشم انداز راهبردی: حسگرهای بیوشیمیایی خودمختار

توسط بنیاد آینده دبی

حسگرهای بیوشیمیایی خودکار می‌توانند توانایی حفاظت از سلامت را در مقیاس‌های مختلف، از سلامت فرد تا سلامت اکوسیستم تقویت کنند. این سیستم‌ها از ابزارهای وابسته به اپراتور به شبکه‌های خودکفا و پیش‌بینانه تکامل می‌یابند؛ می‌توانند بدون دخالت انسان سیگنال‌های زیستی و شیمیایی را رصد کنند و به آن‌ها پاسخ دهند و بدین گونه حفاظت قوی‌تری برای جوامع، زنجیره‌های غذایی و محیط طبیعی فراهم آورند.

استقرار شبکه‌های یکپارچه و خودکار حسگری، ظرفیت آن را دارد که ساختار سیستم‌های هشدار سریع را در تأسیسات استراتژیک دستخوش تحولی بنیادین سازد. با تکیه بر این نوآوری، سازمان‌های پیشگام قادرند رهیافت «نمونه‌برداری دوره‌ای» را کنار گذاشته و به سوی «پایش پیوسته و در لحظه» حرکت کنند. دستاورد این گذار راهبردی از «نظارت واکنشی» به «رویکرد پیشگیرانه»، تجهیز زیرساخت‌های پاسخ‌گو به قابلیت است که به جای ثبت رویدادهای آلودگی پس از بروز بحران، می‌توانند کانون‌های خطر را ساعت‌ها یا روزها پیش از گسترش، شناسایی و با دقت مدیریت نمایند.

سیستم‌های ایمنی مواد غذایی هم می‌توانند تحول مشابهی داشته باشند. حسگرهایی که سموم غذایی را با حساسیتی هزار برابر بیشتر و در کمتر از ۶۰ ثانیه تشخیص می‌دهند، می‌توانند آزمایش‌های دوره‌ای را با اعتبارسنجی پیوسته جایگزین کنند. این تحول می‌تواند هم مقررات نظارتی و هم اقتصاد تولید را تغییر دهد؛ تعداد فراخوان‌های ایمنی غذایی را کاهش دهد و ردیابی دقیق‌تری در زنجیره‌های توزیع جهانی ممکن سازد.

مدل‌های ارائه مراقبت‌های بهداشتی ممکن است با پیشرفت حسگری بیوشیمیایی بازآرایی اساسی داشته باشند. غیرمتمرکز کردن فرایند تشخیص از طریق حسگرهای پوشیدنی و ابزارهای در محل، این توانایی را از بیمارستان‌ها و کلینیک‌ها به خانه‌ها و جوامع دورافتاده می‌برد. این توزیع هوش تشخیصی می‌تواند مسیر ارائه مراقبت را از بنیان تغییر دهد یعنی مداخله زود هنگام را ممکن سازد و هم‌زمان داده‌های سلامت در مقیاس جمعیتی تولید کند.

چالش‌های فنی موجود جدی اما قابل حل هستند؛ یکی این چالش‌ها ایجاد توازن بهینه میان «حساسیت دقیق مولکولی» و «پایداری و دوام عملکردی بلندمدت در محیط‌های طبیعی» است به‌ویژه در شرایطی که تداخلات ناشی از حضور میکروبیوم‌های رقیب می‌تواند کارایی و دقت حسگرها را تحت الشعاع قرار دهد. برای نمونه، حسگرهای باکتریایی مهندسی شده برای تشخیص تری‌نیتروتولون^۱ تنها چند هفته کارایی دارند و پس از آن عملکردشان به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. این محدودیت‌های بیولوژیک، ضرورت توسعه نوآوری‌هایی در طراحی حسگر را ایجاد می‌کند که از طریق رویکرد «زیست‌تقلید^۲» از سیستم‌های طبیعی الهام می‌گیرند.

1) Trinitrotoluene (TNT)

2) Biomimicry

فراتر از طراحی فیزیکی حسگرها، یکپارچه‌سازی داده‌ها حوزه حیاتی دیگری برای پیشرفت به شمار می‌رود. از آنجا که شبکه‌های حسگری خودکار اطلاعات مولکولی پیوسته‌ای را در حوزه‌های مختلف تولید می‌کنند، جریان‌های داده‌ی حاصل از آن‌ها به چارچوب‌های تحلیلی و مدل‌های حکمرانی جدیدی نیاز خواهند داشت. پیامدهای حریم خصوصی و امنیت، به‌ویژه در حسگری مرتبط با سلامت، نیازمند رویکردهای مقرراتی (نظارتی) است که میان نوآوری و حفاظت از اطلاعات حساس، تعادل برقرار کنند.

همگرایی قابلیت‌های پایش پیوسته در حوزه‌های محیط‌زیست، ایمنی غذایی و مراقبت‌های بهداشتی، نشانگر آینده‌ای است که در آن تشخیص مولکولی، به جای یک کارکرد تخصصی، به لایه‌ای یکپارچه از زیرساخت زندگی روزمره تبدیل می‌شود. سازمان‌هایی که حسگری بیوشیمیایی خودکار را با موفقیت پیاده‌سازی می‌کنند، احتمالاً از به‌کارگیری این فناوری‌ها برای مشکلات مجزا فراتر رفته و در عوض، شبکه‌های پایش به‌هم‌پیوسته‌ای را توسعه خواهند داد که داده‌ها را فراتر از مرزهای سنتی به اشتراک می‌گذارند.

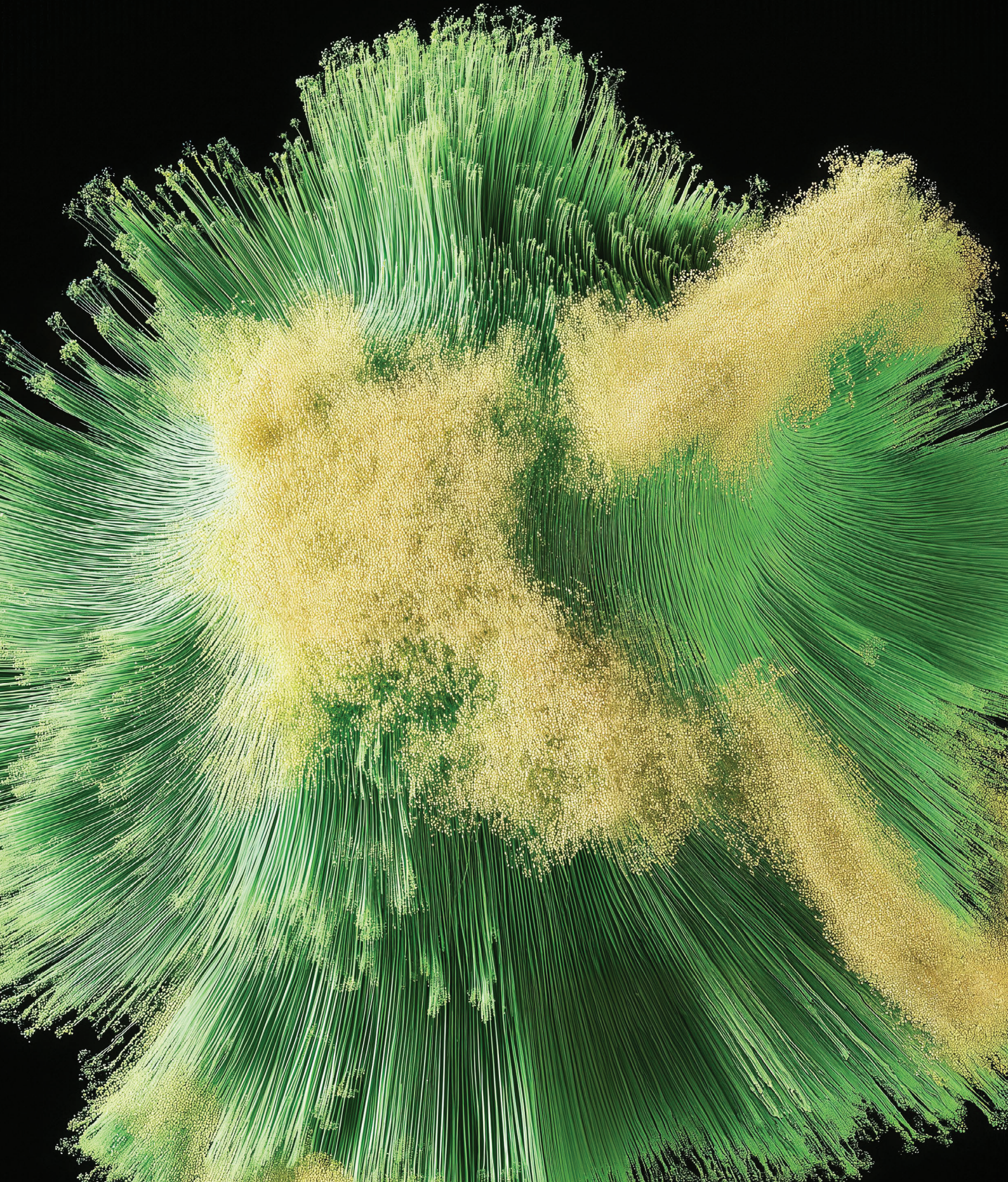
این یکپارچگی، قابلیت‌های جدیدی خلق خواهد کرد: آلاینده‌های زیست‌محیطی می‌توانند تا منشأ خود ردیابی شده و در لحظه با پیامدهای احتمالی سلامت مرتبط شوند؛ عوامل بیماری‌زای ناشی از غذا ممکن است پیش از رسیدن به مصرف‌کننده شناسایی و مهار شوند و نشانگرهای زودهنگام بیماری می‌توانند پیش از بروز علائم، مداخلات پیشگیرانه را فعال کنند. سازمان‌های پیشرو در این فضا، آن‌هایی خواهند بود که نه تنها به چالش‌های فنی طراحی حسگر می‌پردازند، بلکه الزامات پیچیده حکمرانی داده و همکاری‌های بین‌حوزه‌ای را نیز برآورده می‌سازند؛ الزاماتی که این فناوری‌ها را قادر می‌سازد به جای ابزارهایی پراکنده، به عنوان یک سیستم منسجم عمل کنند.

کلان‌روندهای مرتبط بنیاد آینده‌نگری دبی: آینده بشریت^۱ و سلامت و تغذیه پیشرفته^۲

-
- 1) Future Humanity
 - 2) Advanced Health and Nutrition

۷. تثبیت نیتروژن سبز

بازاندیشی تولید آمونیاک برای آینده‌ای با کربن صفر



۱-۷. مقدمه

خاویر گارسیا-مارتینز^۱، استاد و مدیر آزمایشگاه نانوفناوری مولکولی، دانشگاه آلیکانته

کریشنا کومار^۲، مدیرعامل Cropin Sage

سانگ یپ لی^۳، معاون ارشد پژوهش و استاد برجسته، مؤسسه پیشرفته علوم و فناوری کره (KAIST)

ویلفرید وبر^۴، مدیر علمی و استاد مواد نو، مؤسسه لایبنتس برای مواد نو

فرایند تثبیت نیتروژن که تنها در ایالات متحده بازاری ۲۰۰ میلیارد دلاری را به خود اختصاص داده است؛ سالانه افزون بر ۱۵۰ میلیون تن نیتروژن جو را به آمونیاک تبدیل می‌کند؛ ماده‌ای که تولید کود مورد نیاز برای نیمی از تولیدات غذایی جهان به آن متکی است. در حال حاضر، رویکرد «تثبیت نیتروژن سبز» با هدف کاهش ردپای کربنی قابل توجه در تولید سنتی نیتروژن توسعه یافته است؛ فرایندی که هم‌اکنون ۲ درصد از کل مصرف انرژی در جهان را می‌بلعد.

در فرایند تثبیت نیتروژن، میکروارگانیسم‌ها نیتروژن موجود در جو را به اشکالی تبدیل می‌کنند که گیاهان و سایر ارگانیسم‌ها بتوانند از آن‌ها به‌عنوان مواد مغذی استفاده کنند (عمدتاً به صورت آمونیاک). چالش کلیدی در تثبیت نیتروژن، شکستن پیوند سه‌گانه و بسیار پایداری است که دو اتم نیتروژن سازنده نیتروژن جوی (N_2) را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد. در پیشرفته‌ترین روش فعلی، یعنی فرایند هابر-بوش^۵، این مرحله نیازمند دماهای ۴۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشاری ۱۳۰ تا ۱۵۰ برابر فشار جو زمین و هیدروژنی است که عمدتاً از گاز طبیعی و طی یک واکنش تولیدکننده دی‌اکسید کربن تأمین می‌شود.

اگرچه اصول تثبیت جایگزین نیتروژن در دهه ۱۹۳۰ میلادی کشف شد، اما تنها در سال‌های اخیر پیشرفت‌های چشمگیری در راستای تجاری‌سازی آن در مقیاس کلان صورت گرفته است. برای نمونه، رویکردهای زیست‌بنیان^۶ از باکتری‌ها و آنزیم‌های مهندسی‌شده برای تثبیت نیتروژن بهره می‌برند که در آن‌ها نور خورشید یا الکتریسیته سبز می‌تواند انرژی و «عوامل احیاکننده»^۷ مورد نیاز را تأمین کند. همچنین، سیستم‌های الهام‌گرفته از زیست^۸ که با استفاده از پلی‌اکسومتالات‌های معدنی^۹ یا خوشه‌های اکسید فلزی آنیونی^{۱۰}، با شبیه‌سازی عملکرد آنزیم‌ها، نتایج نویدبخشی نشان داده‌اند. علاوه بر این، فناوری‌های الکتروشیمیایی که بر واسطه‌های لیتیومی متکی هستند، در آستانه کاربرد تجاری قرار دارند.

- 1) Javier Garcia-Martinez
- 2) Chief Executive Officer, Cropin Sage
- 3) Sang-Yup Lee
- 4) Wilfried Weber
- 5) Haber-Bosch
- 6) Bio-Based
- 7) Reduction Equivalents
- 8) Bio-inspired
- 9) Inorganic Polyoxometalates
- 10) Anionic Metal-Oxide Clusters

فناوری‌های تثبیت سبز نیتروژن هم‌اکنون توسط شرکت‌های با سابقه و همچنین استارت‌آپ‌ها در دست بررسی هستند. شرکت استرالیایی ژوپیترا آیونیکس^۱ پیشگام فناوری تثبیت نیتروژن مبتنی بر لیتیوم است، در حالی که شرکت کالیفرنایی آموبیا^۲ بر توسعه کاتالیزورهای جدیدتر و کارآمدتر تمرکز دارد. چنین فناوری‌های جایگزینی همچنین امکان احداث واحدهای تولید غیرمتمرکز را فراهم می‌آورند؛ امری که اجازه می‌دهد آمونیاک با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر فراوان محلی، نظیر باد و خورشید، تولید شود. آمونیاک تولیدشده در محل، می‌تواند به‌طور کارآمدی در همان سایت ذخیره و یا به‌کود پردازش شود که این امر موجب صرفه‌جویی در هزینه‌ها و انرژی مرتبط با حمل‌ونقل می‌گردد.

پیشرفت در ایجاد تولید محلی آمونیاک سبز، نه‌تنها ردپای کربنی^۳ تولید آمونیاک را کاهش می‌دهد، بلکه منابع مرتبط با انتشار دی‌اکسید کربن نظیر الزامات حمل‌ونقل را نیز تقلیل خواهد داد. وسایل نقلیه نیز از این روند منتفع خواهند شد؛ چراکه هم‌اکنون کشتی‌های تجاری در حال به‌کارگیری آمونیاک به‌عنوان سوخت دیزل هستند و برآوردها حاکی از آن است که تا سال ۲۰۵۰، بیش از ۳۰ درصد از سوخت دریایی جهان را آمونیاک بدون کربن تشکیل خواهد داد.

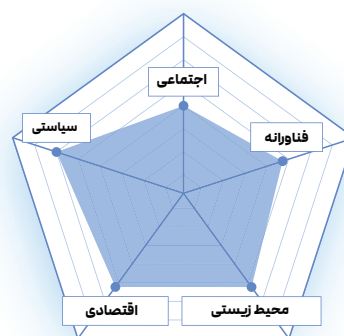
فناوری‌های نسل آینده که از شیمی لیتیوم یا رویکردهای زیست‌بنیان برای تثبیت نیتروژن بهره می‌برند، در دست بررسی هستند، اما توجیه تجاری آن‌ها هنوز به اثبات نرسیده است. در مقابل، واحدهای تولید آمونیاک که به‌جای گاز طبیعی از هیدروژن سبز استفاده می‌کنند، دوام‌پذیری^۴ خود را ثابت کرده و هم‌اکنون در مقیاس جهانی در حال گسترش‌اند. صنعت آمونیاک در دوران گذار قرار دارد؛ جایی که افزایش تلاش‌های تحقیق و توسعه در فناوری تثبیت سبز آمونیاک، همگام با افزایش تقاضا (به‌عنوان مثال، از سوی بخش حمل‌ونقل)، جرقه نوآوری‌ها و سرمایه‌گذاری‌های بیشتری را به سوی تولید آمونیاک با «انتشار خالص صفر کربن»^۵ خواهد زد.

ایجاد مشارکت‌های صنعت و کشاورزی:

ایجاد مشارکت‌های هدفمند میان توسعه‌دهندگان فناوری نیتروژن سبز و بازیگران اصلی کشاورزی برای راه‌اندازی برنامه‌های آزمایشی است که مزایای هزینه‌ای و زیست‌محیطی را به‌صورت ملموس نشان دهند.

تسریع فناوری‌های فرآیندی جایگزین:

سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های هدفمند برای بهبود روش‌های لیتیوم-واسطه و بیولوژیکی تثبیت نیتروژن، به‌منظور ارائه جایگزین‌هایی کارآمد و عملی برای فرایندهای سنتی.



شکل ۹: نقشه آمادگی اکوسیستم تثبیت نیتروژن سبز

- 1) Jupiter Ionics
- 2) Ammobia
- 3) Carbon Footprint
- 4) Viability
- 5) Net-Zero Carbon

۲-۷. تثبیت نیتروژن سبز: چشم‌انداز راهبردی

توسط بنیاد آینده دبی

فرایند هابر-بوش که بیش از یک قرن پیش توسعه یافت، با فراهم آوردن امکان تثبیت نیتروژن در مقیاس صنعتی، رابطه بشر با تولید غذا را از اساس دگرگون ساخت. اکنون، فرایندهای الکتروشیمیایی مبتنی بر واسطه‌گری لیتیوم می‌توانند نمایانگر پیشرفت چشمگیر دیگری باشند یعنی قابلیت بالقوه‌ای که صرفاً از هوا، آب و الکتروسیته تجدیدپذیر، برای تولید آمونیاک استفاده می‌شود. این تحول فناورانه می‌تواند تولید جهانی آمونیاک را از یک صنعت متمرکز و متکی بر کربن، به شبکه‌ای بیشتر توزیع شده و کربن‌خنثی متحول سازد.

اهمیت راهبردی این تحول، بسیار فراتر از مقوله کربن‌زدایی است. فرایند فعلی هابر-بوش، ۱ تا ۲ درصد از انرژی کل جهان را مصرف می‌کند و به ازای تولید هر تن آمونیاک، ۲.۴ تن دی‌اکسید کربن منتشر می‌سازد؛ مقداری که تقریباً دو برابر تولید فولاد و چهار برابر ساخت سیمان است. تولید آمونیاک سبز، فرصتی حیاتی برای دگرگونی این شالوده پرکربن در کشاورزی جهانی به شمار می‌رود که به‌طور هم‌زمان، بستر را برای کاربردهای جدید در حوزه انرژی فراهم می‌آورد.

در این میان، بخش کشاورزی مستعد تجربه عمیق‌ترین تحولات است. با توجه به اینکه نزدیک به ۸۰ درصد از آمونیاک تولیدشده در مقیاس صنعتی در کودها مصرف می‌شود بنابراین، تثبیت سبز نیتروژن می‌تواند کاتالیزوری برای گذار به سمت تأسیسات تولیدی توزیع‌شده و در مقیاس کوچک‌تر باشد؛ رویکردی که آسیب‌پذیری‌های حمل‌ونقل را کاهش داده، قیمت کود را تثبیت نموده و تاب‌آوری سیستم غذایی را ارتقا می‌بخشد. این مدل توزیع‌شده قادر است زنجیره‌های تأمین کشاورزی را از بنیان بازطراحی کرده و مناطق مختلف را توانمند سازد.

آمونیاک سبز فراتر از کاربرد در بخش کشاورزی، به عنوان یک حامل انرژی چندمنظوره^۱ با مزایای راهبردی نسبت به هیدروژن مایع مطرح شده است. با توجه به اینکه هزینه‌های ذخیره‌سازی آمونیاک تا ۳۰ برابر کمتر از هیدروژن مایع است، این ماده بستر عملیاتی‌تری را برای ذخیره‌سازی و انتقال انرژی هیدروژنی فراهم می‌آورد. صنعت کشتیرانی با درک این پتانسیل، شاهد تحول در مقررات دریایی جهت پذیرش شناورهای با سوخت آمونیاک است؛ امری که مسیر روشنی را برای کربن‌زدایی از شبکه‌های حمل‌ونقل دریایی جهانی ترسیم می‌کند.

اگرچه آمونیاک نسبت به هیدروژن در فرایند هابر-بوش مزایایی دارد، اما چالش‌های فنی و منابع همچنان قابل توجه اما غلبه‌پذیر هستند. پیشرفت‌های اخیر نشان‌دهنده دستیابی به نرخ‌های تبدیل الکتروشیمیایی نزدیک به بازدهی فرایند هابر-بوش (۶۰ تا ۷۵ درصد) است که از دوام‌پذیری^۲ فنی این حوزه حکایت دارد. با این حال، وابستگی به لیتیوم (به عنوان یک ماده معدنی حیاتی که انتظار می‌رود تقاضای آن تا سال ۲۰۳۰ بیش از دو برابر شود) محدودیتی در منابع ایجاد می‌کند که مستلزم توسعه راهبردی زنجیره تأمین است. همچنین ملاحظات زیست‌محیطی باید به موضوع سمی بودن آمونیاک و اثرات بالقوه انتشار ذرات معلق (PM2.5) پردازند.

1) Versatile

از منظر استراتژیک، چشم‌انداز ژئوپلیتیک تولید آمونیاک در برهه‌ای محوری قرار دارد. در حالی که چین در حال حاضر ۳۰ درصد از تولید جهانی را در اختیار دارد و هند و کشورهای خاورمیانه در آستانه گسترش ظرفیت‌های خود هستند، تثبیت سبز نیتروژن می‌تواند وابستگی‌های منطقه‌ای را بازآرایی کرده و مراکز جدیدی از نفوذ در حوزه‌های انرژی و کشاورزی خلق کند. طی دهه آینده، پیشتازی در این عرصه متعلق به کسانی خواهد بود که بتوانند سه توانمندی راهبردی را با هم تلفیق کنند:

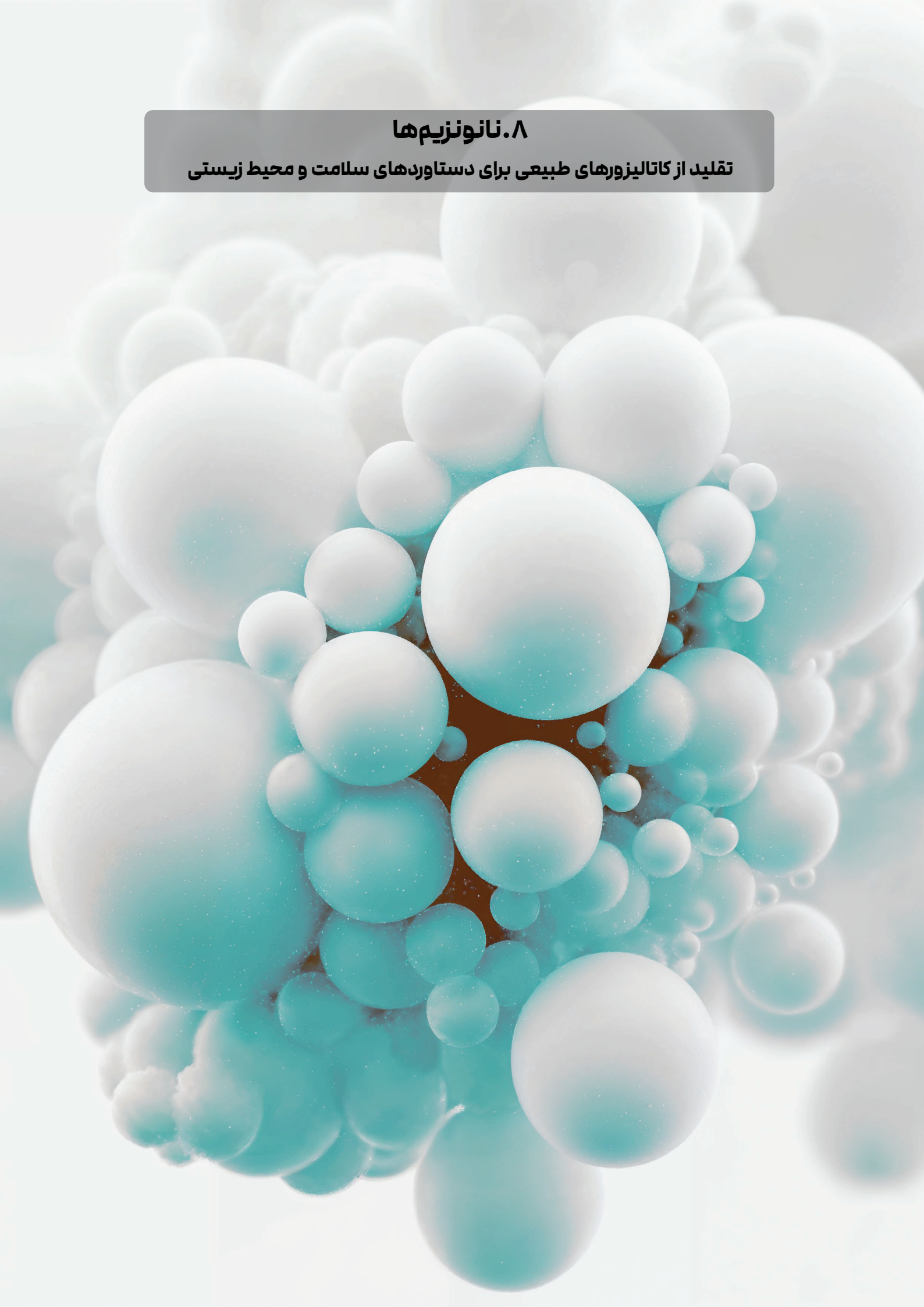
- ◀ تولید پیشرفته الکتروشیمیایی
- ◀ زیرساخت‌های انرژی تجدیدپذیر
- ◀ اکوسیستم‌های نوآوری کشاورزی

این فناوری نمایانگر یک همگرایی بالقوه است که در آن امنیت غذایی، نوآوری در انرژی و اقدامات اقلیمی در قالب یک پلتفرم تحول‌آفرین واحد به هم پیوند می‌خورند.

کلان‌روندهای مرتبط (بنیاد آینده‌نگری دبی): اکوسیستم‌های در حال تکامل و سلامت و تغذیه پیشرفته

۸. نانوزیمها

تقلید از کاتالیزورهای طبیعی برای دستاوردهای سلامت و محیط زیستی



۸-۱. مقدمه

خاویر گارسیا-مارتینز^۱، استاد و مدیر آزمایشگاه نانوتکنولوژی مولکولی، دانشگاه آلیکانته.
 اندرو مینارد^۲، استاد دانشکده آینده نوآوری در جامعه، دانشگاه ایالتی آریزونا.

نانوزیم‌ها، نانومواد تولید شده و سنتز شده در آزمایشگاه هستند که خواصی شبه‌آنزیمی از خود نشان می‌دهند. برخلاف آنزیم‌ها که توسط ارگانسیم‌های زنده تولید شده یا با هزینه و پیچیدگی قابل توجهی از نظر شیمیایی سنتز می‌شوند، نانوزیم‌ها پایداری بیشتر، هزینه‌های تولید پایین‌تر و فرایندهای سنتز ساده‌تری را ارائه می‌دهند. این نانومواد که از نانوذرات فلزات، اکسیدهای فلزی، کربن و سایر مواد تشکیل شده‌اند، همچون کاتالیزور عمل کرده و همان واکنش‌های شیمیایی تحت‌پشتیبانی آنزیم‌ها را تسهیل می‌کنند. ماهیت مقاوم^۳ این مواد به آن‌ها اجازه می‌دهد تا در محیط‌های بسیار متنوع‌تری عمل کنند؛ امری که کاربردهای بالقوه آن‌ها را در حوزه‌های زیست‌پزشکی، زیست‌محیطی و صنعتی بسط می‌دهد. همچنین با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته طراحی و تولید در مقیاس نانو، امکان مهندسی نانوزیم‌های چندعملکردی نیز فراهم شده است.

پیشرفت‌های پرشتاب در فناوری نانوزیم طی دو دهه اخیر، توجه قابل توجه شرکت‌های بزرگ داروسازی را به خود جلب کرده و به جهشی در سرمایه‌گذاری برای تحقیق و توسعه در این حوزه انجامیده است. این افزایش تأمین مالی، روند نوآوری را شتاب بخشیده و کاربردهای بالقوه نانوزیم‌ها را در شاخه‌های گوناگون پزشکی گسترش داده است. از این رو، در حال حاضر کارآزمایی‌های بالینی متعددی برای درمان‌های مبتنی بر نانوزیم در جریان است که به‌ویژه در حوزه‌های درمان سرطان و بیماری‌های تحلیل‌برنده عصبی^۴، نتایج نویدبخشی را به همراه داشته است.

در زمینه درمان سرطان، نانوزیم‌ها ظرفیت خود را برای دارورسانی هدفمند، ارتقای اثربخشی شیمی‌درمانی و کاهش هم‌زمان عوارض جانبی نشان داده‌اند. در مورد بیماری‌های تحلیل‌برنده عصبی نظیر آلزایمر و پارکینسون، توانمندی نانوزیم‌ها در تعدیل استرس اکسیداتیو^۵ و کاهش التهاب مغزی در دست بررسی است که به‌طور بالقوه می‌تواند روند پیشرفت بیماری را کند نماید. تطبیق‌پذیری^۶ نانوزیم‌ها همچنین دامنه تحقیقات را به سایر حوزه‌های پزشکی، از جمله بیماری‌های قلبی-عروقی، بیماری‌های عفونی و ترمیم زخم گشاده است.

1) Javier Garcia-Martinez

2) Andrew Maynard

3) Robust

4) Neurodegenerative

5) Oxidative

6) Versatility

چندین شرکت و استارت‌آپ در حال تلاش فعالانه برای تجاری‌سازی نانوزیم‌ها هستند. شرکت «لول ناین^۱» در حال توسعه نانوزیم‌هایی جهت استفاده در زیست‌تولید صنعتی^۲ است. «شرکت نانوزیم^۳» که شرکتی منشعب‌شده از دانشگاه فلوریداست، نانوماشین‌های مصنوعی برنامه‌ریزی‌شده‌ای را توسعه می‌دهد که منحصراً وارد سلول‌های بیمار هدف‌گذاری‌شده می‌شوند؛ هدف این کار، امکان‌پذیر ساختن درمان هدفمند بیماری با حداقل عوارض جانبی است. اگرچه این برنامه‌ها هنوز در مرحله توسعه قرار دارند، اما امید می‌رود در صورت عدم بروز چالش‌های پیش‌بینی‌نشده طی سال‌های آتی به کاربردهای تجاری بلوغ یابند.

دامنه تأثیر نانوزیم‌ها، بسیار فراتر از مراقبت‌های بهداشتی و تا کاربردهای زیست‌محیطی (از جمله تصفیه آب) امتداد می‌یابد؛ امری که به‌طور بالقوه راه‌حل‌هایی پایدار برای یکی از چالش‌های حیاتی جهان ارائه می‌دهد. در صنعت غذا، این فناوری می‌تواند ایمنی مواد غذایی را از طریق تشخیص سریع آلاینده‌ها در گوشت‌های بسته‌بندی‌شده موجود در قفسه و سایر اقلام مصرفی بهبود بخشد. در زمینه کاتالیزورهای صنعتی نیز، نانوزیم‌ها ممکن است جایگزین‌هایی کارآمدتر و سازگارتر با محیط‌زیست نسبت به کاتالیزورهای سنتی ارائه دهند که پتانسیل کاهش مصرف انرژی و پسماند مواد را در پی دارد.

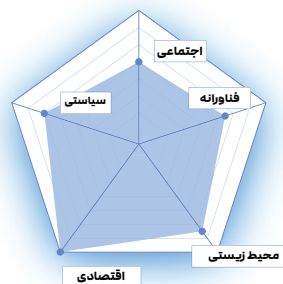
پیش‌بینی می‌شود، بازار جهانی نانوزیم‌ها که در سال ۲۰۲۴ بالغ بر ۵.۱۳ میلیارد دلار ارزش‌گذاری شده است، با «نرخ رشد مرکب سالانه» معادل ۲۷.۴ درصد، تا سال ۲۰۳۴ به ارزشی معادل ۵۷.۹۵ میلیارد دلار برسد. کاربردهای کلیدی این بازار شامل زیست‌حسگری^۴، پاک‌سازی محیط‌زیست^۵ و رسانش هدفمند دارو^۶ است. نانوزیم‌ها نویدبخش ایجاد انقلابی در حوزه تشخیص و درمان به‌ویژه در زمینه‌هایی نظیر تشخیص زودهنگام بیماری و رسانش دقیق دارو هستند. این همگرایی میان نانوفناوری و تقلید آنزیمی^۷، از ظرفیت پیشبرد نوآوری در چندین بخش برخوردار است که در نهایت به ارتقای کیفیت زندگی کمک خواهد کرد.

همانند تمامی فناوری‌های نوظهور، نانوزیم‌ها نیز با چالش‌های متعددی مواجه‌اند. موانع فنی این مسیر شامل بهبود گزینش‌پذیری^۸ و کارایی کاتالیزوری^۹ آن‌ها جهت رسیدن به سطح آنزیم‌های طبیعی یا پیشی گرفتن از آن‌هاست. ملاحظات اخلاقی نیز ناشی از کاربرد بالقوه آن‌ها در سیستم‌های بیولوژیک است که ارزیابی‌های ایمنی جامع و دقیقی را ایجاب می‌کند. در نهایت، چارچوب‌های رگولاتوری (نظارتی) برای محصولات مبتنی بر نانوزیم هنوز در حال تکامل است که این امر می‌تواند بر فرایند تجاری‌سازی و پذیرش گسترده آن‌ها تأثیرگذار باشد.

- 1) Level Nine
- 2) Industrial Biomanufacturing
- 3) Nanozyme, Inc
- 4) Biosensing
- 5) Environmental Remediation
- 6) Targeted Drug Delivery
- 7) Enzyme Mimicry
- 8) Selectivity
- 9) Catalytic Efficiency

ایجاد چارچوب‌های ارزیابی زیست‌سازگاری:

توسعه پروتکل‌های استاندارد برای ارزیابی ایمنی و رفتار زیستی نانوزیم‌ها در محیط‌های کاربردی مختلف، به منظور پاسخ به نگرانی‌های اخلاقی و ایمنی.



شکل ۱۰: نقشه آمادگی اکوسیستم نانوزیم‌ها

۲-۸. چشم انداز راهبردی: نانوزیم‌ها

توسط بنیاد آینده دبی

نانوزیم‌ها جایگزین‌هایی مهندسی شده برای آنزیم‌های طبیعی ارائه می‌دهند که از مزایای عملی متمایزی برخوردارند: آن‌ها می‌توانند در شرایط افراطی pH (پتانسیل هیدروژن)^۱ عمل کنند، در برابر دماهای بالا تاب بیآورند و پایداری خود را برای دوره‌های زمانی طولانی حفظ کنند؛ در حالی که هزینه تولید آن‌ها به مراتب کمتر است.

این مواد با قابلیت‌های اثبات شده‌ای نظیر تشخیص آنتی‌اکسیدان‌ها در غلظت‌های بخش در میلیارد^۲ و دستیابی به بازدهی کاتالیزوری تا ۲۱ برابر آنزیم‌های طبیعی، قادرند واکنش‌های شیمیایی را در محیط‌هایی امکان‌پذیر سازند که آنزیم‌های بیولوژیک در آن‌ها به سرعت تخریب می‌شوند. این ترکیب عملکرد و پایداری، افق‌های جدیدی را به روی کاربردهای علمی و صنعتی می‌گشاید؛ کاربردهایی که پیش از این به دلیل شکنندگی سیستم‌های آنزیمی طبیعی با محدودیت مواجه بودند.

کاربردهای حوزه سلامت و محیط‌زیست، پتانسیل تحول‌آفرین این فناوری را به خوبی نشان می‌دهند. ابزارهای تشخیصی یکپارچه شده با گوشی‌های هوشمند می‌توانند ظرفیت‌های پزشکی را در مناطق با منابع محدود گسترش داده و امکان استفاده از زیست‌حسگرهای حساس تر را برای تشخیص زودهنگام بیماری فراهم آورند. فناوری‌های مراقبت از زخم نیز درمان‌های هدفمندی را علیه باکتری‌های مقاوم به دارو ارائه می‌دهند که می‌توانند ۹۹.۹۹ درصد از عفونت‌های چالش‌برانگیز را بدون تحریک مکانیسم‌های مقاومت میکروبی از بین ببرند.

فراتر از کاربردهای مستقیم، تأثیرات ثانویه این فناوری در اکوسیستم پژوهش جهانی در حال نمایان شدن است. توسعه نانوزیم‌ها مستلزم یکپارچه‌سازی هوش مصنوعی^۳، طراحی محاسباتی^۴ و تخصص‌های دامنه-محور^۵ است؛ رویکردی که به طور بالقوه مرزهای سنتی میان‌رشته‌ای را از میان می‌برد.

1) pH (Potential of Hydrogen)

2) Parts Per Billion (ppb)

3) Integrating AI

4) Computational Design

5) Domain-Specific

شبکه‌های پژوهشی بین‌المللی ممکن است مدل‌های همکاری نوینی را توسعه دهند که از محدودیت‌های جغرافیایی و نهادی فراتر رفته و رویکردهای انطباق‌پذیرتری را برای مقابله با چالش‌های پیچیده جهانی خلق کنند.

این ظرفیت همکاری می‌تواند نحوه مواجهه کشورها با نوآوری‌های فناورانه را از بنیان دگرگون سازد. ممکن است پلتفرم‌های پژوهشی مشترکی ظهور کنند که با بهره‌گیری از استراتژی‌های یکپارچه و چندتخصصی، به حل و فصل مسائل حیاتی جهانی بپردازند. افزون بر این، ظرفیت این فناوری در کاهش استفاده از مواد شیمیایی مضر، نویدبخش پارادایم جدیدی از توسعه علمی دوست‌دار محیط‌زیست است؛ پارادایمی که در آن، پژوهش‌ها هم‌زمان پیشرفت قابلیت‌های فناورانه و پایداری محیط‌زیست را به پیش می‌رانند.

با این وجود، چالش‌های مهمی همچنان پابرجاست. دغدغه‌های مربوط به زیست‌سازگاری^۱ و نیاز به استانداردهای ایمنی مستحکم، موانع اجرایی جدی ایجاد می‌کنند. تدوین چارچوب‌های رگولاتوری جامع، نیازمند تلاش‌های هماهنگ جهانی و رویکردی سیستماتیک در پژوهش و پیاده‌سازی است. برای رسیدگی به این چالش‌ها، استانداردهای فعلی نانوفناوری در سازمان بین‌المللی استاندارد^۲، شالوده‌ای مستحکم برای این رویکرد مشارکتی فراهم می‌آورند.

توسعه نانوزیم‌ها نشان‌گر حرکت به سوی رویکردی دقیق‌تر در کاتالیز است؛ جایی که «اختصاصی بودن واکنش»، «پایداری در محیط‌های گوناگون» و «قابلیت بازیافت»، دیگر نیازمند مصالحه^۳ نیستند و به ویژگی‌های استاندارد تبدیل می‌شوند. کاربردهای اولیه در حوزه تشخیص، پاک‌سازی محیط‌زیست و درمان‌های هدفمند، احتمالاً به‌عنوان میدان آزمون برای این فناوری‌ها عمل کرده و معیارهای عملکردی و رویه‌های نظارتی پایه را تثبیت خواهند کرد.

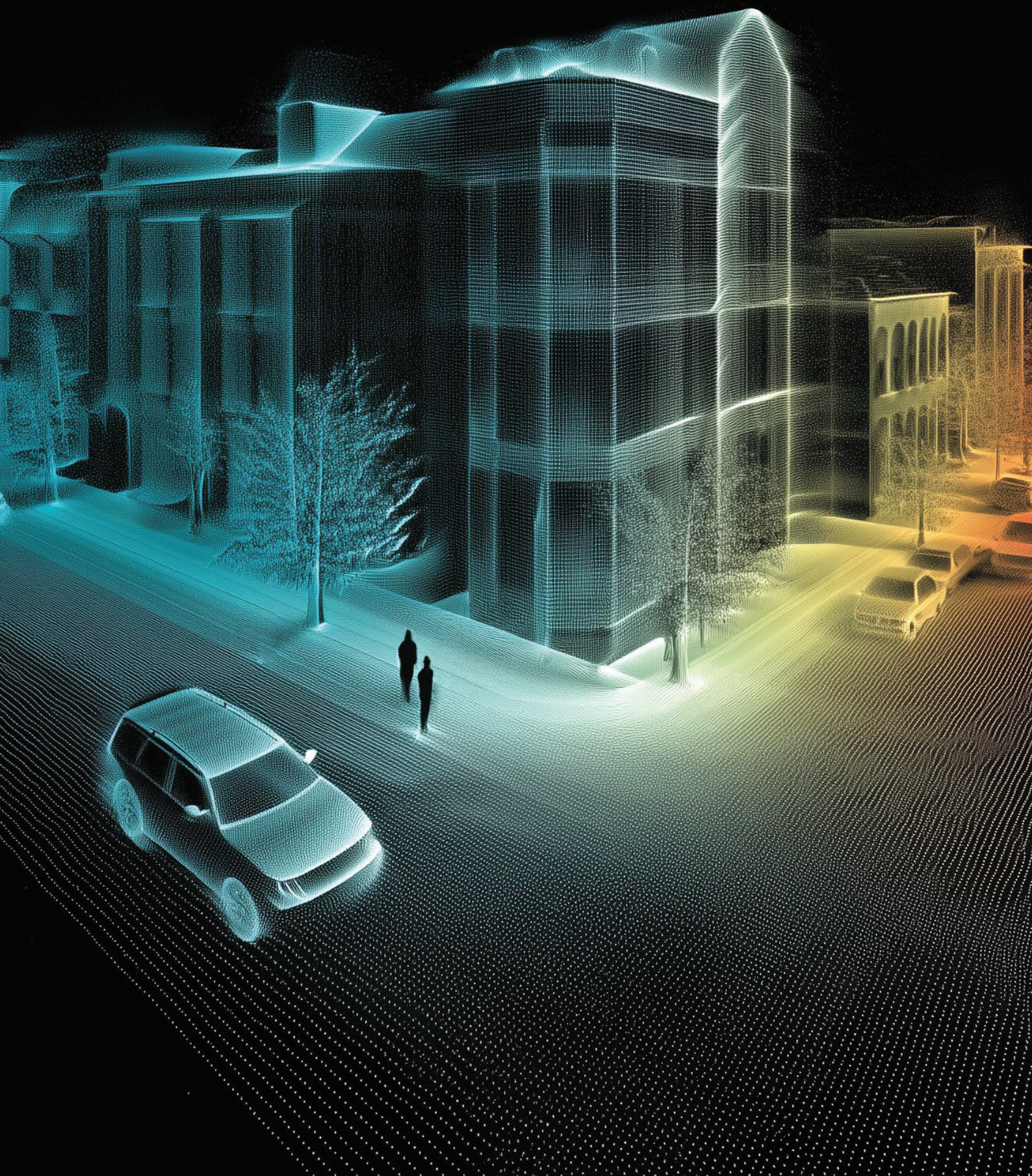
سازمان‌هایی که بهترین موقعیت را برای موفقیت دارند، طراحی‌های تخصصی نانوزیمی را توسعه خواهند داد که دقیقاً برای محیط‌های واکنشی مشخص چه در فرایندهای صنعتی، کاربردهای زیست‌پزشکی و یا زمینه‌های محیط‌زیستی بهینه شده‌اند. توسعه موفقیت‌آمیز نانوزیم، به جای رقابت همه‌جانبه با آنزیم‌های طبیعی، بر رفع محدودیت‌های خاص کاتالیزورهای بیولوژیک یعنی ناپایداری آن‌ها در شرایط سخت، هزینه‌های بالای تولید و محدودیت در قابلیت تنظیم^۴ تمرکز خواهد کرد. این رویکرد هدفمند، در عین عبور از چالش‌های زیست‌سازگاری و الزامات نظارتی که هم‌اکنون استقرار گسترده‌تر این فناوری را محدود می‌سازند، ارزشی کاملاً عملی و ملموس خلق خواهد کرد.

کلان‌روندهای مرتبط بنیاد آینده دبی: مواد و سلامت و تغذیه پیشرفته

- 1) Biocompatibility
- 2) International Organization for Standardization (ISO)
- 3) Compromise
- 4) Tunability

۹. حسگری اشتراکی

توانمندسازی سامانه‌های متصل برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شرایط محیطی



۹-۱. مقدمه

دانیل دوسنباخ^۱، مشاور علمی در نوآوری، دبیرخانه دولتی آموزش، تحقیق و نوآوری سوئیس
 کارن هالبرگ^۲، پژوهشگر ارشد، مرکز اتمی باریلوچه (CONICET)
 دیوید پارخ^۳، مدیرعامل، موسسه تحقیقاتی SRI International

دستگاه‌های حسگر (سنجش‌گر) اکنون در خانه‌ها، وسایل نقلیه و محیط‌های کاری افراد حضوری فراگیر^۴ دارند. این حسگرهای توزیع‌شده که پیش از این نیز به‌تنهایی کارآمد بودند، اکنون به‌طور فزاینده‌ای به یکدیگر متصل شده و با سیستم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی ادغام می‌شوند؛ امری که راه را برای پیشرفت‌های سریع در «حسگری اشتراکی»^۵ هموار می‌سازد؛ فناوری نوینی که می‌تواند با شناخت عمیق، قابلیت‌های حسگرهای منفرد را ارتقا بخشد.

فراتر از تحرک‌پذیری شهری خودمختار^۶، کاربردهای نویدبخش حسگری اشتراکی بسیار متنوع‌اند؛ از جمله «شبکه‌های سیار ادراکی»^۷ که ارتباطات و حسگری را بر روی یک شبکه واحد تلفیق می‌کنند. حسگری اشتراکی، شیوه عملیات شهرها و نحوه استفاده سازمان‌ها از اطلاعات برای تصمیم‌گیری را از بنیان دگرگون خواهد کرد. به‌عنوان نمونه در راستای بهبود تحرک‌پذیری (پویایی) شهری^۸، چراغ‌های راهنمایی متصل می‌توانند خود را به‌طور پویا بر اساس داده‌های دوربین‌های ترافیکی و حسگرهای محیطی تنظیم کنند تا ازدحام شهری و سطح انتشار آلاینده‌ها را مدیریت نمایند.

1) Daniel Dossenbach

2) Karen Hallberg

3) David Parekh

4) Ubiquitous

5) Collaborative Sensing

6) Autonomous Urban Mobility

تحرک‌پذیری شهری خودمختار (Autonomous Urban Mobility): به سیستم یکپارچه‌ای اشاره دارد که در آن وسایل نقلیه (خودروها، پهپادهای تحویل کالا، شاتل‌ها) با استفاده از هوش مصنوعی، اینترنت اشیا (IoT) و حسگرهای محیطی، افراد و کالاها را در سطح شهر بدون نیاز به راننده انسانی جابه‌جا می‌کنند.

7) Perceptive Mobile Networks (PMN)

شبکه‌های سیار ادراکی (Perceptive Mobile Networks یا PMN): نسل نوینی از شبکه‌های مخابراتی (به‌ویژه در چشم‌انداز شبکه 6G) هستند که در آن‌ها زیرساخت‌های ارتباطی، فراتر از انتقال صرف داده‌ها، قابلیت حسگری و درک محیط فیزیکی را نیز دارا می‌باشند. در این سیستم‌ها، سیگنال‌های رادیویی مورد استفاده برای ارتباطات، هم‌زمان کارکردی مشابه رادار پیدا کرده و شبکه را قادر می‌سازند تا اشیا، حرکات و ویژگی‌های محیط پیرامون را تشخیص دهد؛ مفهومی که در مهندسی مخابرات از آن تحت عنوان «ادغام حسگری و ارتباطات» (ISAC) یاد می‌شود.

8) Urban Mobility

از دیگر نمونه‌های حسگری اشتراکی می‌توان به نقشه‌برداری خودکار در مقیاس کلان در معادن، تحلیل سیستم‌های طوفانی^۱، دسته‌های پهپادی^۲، پایش سلامت سازه‌ها بر بستر اینترنت اشیا، پایش محیط‌زیست و ارتقای دقت در کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی اشاره کرد.

حسگری اشتراکی، حسگرهای توزیع‌شده (اعم از پلتفرم‌های ماهواره‌ای، زیرآبی و زیرزمینی) را با اتصالاتی قابل اتکا و پردازش الگوریتمی در «لبه شبکه»^۳ پیوند می‌دهد تا حجم داده‌های ارسالی کاهش یابد. عامل‌های خودمختار^۴ نظیر ربات‌ها، پهپادها، خودروهای هوشمند و سیستم‌های فناوری اطلاعات که از قابلیت‌های استدلال معنایی و برنامه‌ریزی پویا برخوردارند، برای ناوبری در محیط‌های ناآشنا و اتخاذ تصمیمات جمعی تجهیز خواهند شد.

تحقیقات در زمینه‌های «هم‌جوشی حسگرها»^۵، حسگری اشتراکی و سیستم‌های خودمختار اشتراکی، غالباً با پیش‌رانی نیاز صنایع دفاعی به اتخاذ تصمیمات و اقدامات در لحظه پیش‌رفته است. اما امروزه مزایای غیرنظامی و تجاری این قابلیت‌های به‌هم‌پیوسته روزبه‌روز نمایان‌تر می‌شود. خودروی خودرانی را تصور کنید که نه تنها با اتکا به حسگرهای اختصاصی خود به‌درستی حرکت می‌کند، بلکه از طریق اتصال به حسگرهای یک چراغ راهنمایی در چند صد متر جلوتر، مطلع می‌شود که خودروی دیگری با سرعت غیرمجاز در مسیر برخورد با آن قرار دارد.

1) Storm Systems

سامانه‌های طوفانی (Storm Systems): به الگوهای آب‌وهوایی یکپارچه و در مقیاس وسیع (معمولاً همراه با مراکز کم‌فشار، بادهای شدید و بارش‌های مترکم) گفته می‌شود. در حوزه حسگری اشتراکی، تحلیل این سامانه‌ها به معنای بهره‌گیری از شبکه‌های به‌هم‌پیوسته حسگرها (شامل ماهواره‌های هواشناسی، رادارهای زمینی و حسگرهای اینترنت اشیا) به‌منظور پایش در لحظه (Real-time)، مدل‌سازی دینامیک جوی و پیش‌بینی دقیق مسیر حرکت طوفان برای مدیریت بحران است.

2) Drone Swarms

دسته‌های پهپادی (Drone Swarms): سیستمی یکپارچه متشکل از چندین پرنده هدایت‌پذیر از دور (پهپاد) است که با الهام از الگوهای رفتاری زیستی (نظیر دسته پرنده‌گان یا حشرات) و با بهره‌گیری از الگوریتم‌های «هوش ازدحامی» (Swarm Intelligence) عمل می‌کنند. در شبکه‌های مبتنی بر حسگری اشتراکی، این پهپادها بدون نیاز به یک مرکز فرماندهی متمرکز، از طریق ارتباطات ماشین‌به‌ماشین (M2M) و هوش مصنوعی با یکدیگر تبادل داده کرده و به‌صورت خودمختار تصمیم‌گیری جمعی می‌کنند تا مأموریت‌های پیچیده‌ای نظیر پایش مقیاس‌بزرگ، مدیریت بحران و نقشه‌برداری سه‌بعدی پویا را به‌طور هماهنگ به انجام رسانند.

3) Network's Edge

لبه شبکه (Network's Edge / Edge Computing): در معماری شبکه‌های ارتباطی و اینترنت اشیا (IoT)، «لبه شبکه» به نزدیک‌ترین مرز منطقی یا فیزیکی میان دستگاه‌های تولیدکننده داده (نظیر حسگرها و تجهیزات انتهایی) و هسته اصلی شبکه (اینترنت یا فضای ابری) گفته می‌شود. رویکرد «پردازش در لبه» (رایانش لبه‌ای) به معنای انتقال توان پردازشی، تحلیلی و ذخیره‌سازی داده‌ها به همین نقطه (نزدیک‌ترین محل به منبع تولید داده) است. این معماری از ارسال حجم عظیم داده‌های خام به سرورهای ابری متمرکز جلوگیری کرده و در نتیجه موجب کاهش چشمگیر پهنای باند مصرفی، به حداقل رسیدن تأخیر (Latency) و امکان‌پذیر شدن تصمیم‌گیری‌های در لحظه در سیستم‌های خودمختار می‌گردد.

4) Autonomous Agents

5) Sensor Fusion

تصمیم اخیر کمیسیون ارتباطات فدرال آمریکا^۱ مبنی بر تخصیص باند ۵.۹ گیگاهرتز به فناوری «ارتباط سلولی خودرو با همه چیز»^۲، گامی حیاتی در مسیر تحقق این پیشرفت‌ها محسوب می‌شود. این تصمیم فرصت‌های تازه‌ای خلق می‌کند تا بررسی شود حسگری اشتراکی چگونه قادر است هزینه‌های زیرساختی را کاهش داده، گره‌های ترافیکی و تصادفات را کم کند و از میزان انتشار کربن بکاهد. در همین راستا، کمیسیون اروپا و وزارت صنعت و فناوری اطلاعات چین نیز مقررات تسهیل‌گر مشابهی را به تصویب رسانده‌اند.

با این وجود، مسیر توسعه همچنان با چالش‌هایی روبه‌روست. بیشتر پلتفرم‌های میزبان حسگرها، با محدودیت‌های جدی در زمینه تأمین انرژی و اتصال پایدار مواجه‌اند. عبور از این محدودیت‌ها نیازمند راهکارهای نوین مهندسی است؛ از جمله:

- ◀ فشرده‌سازی روش‌های پردازش و طبقه‌بندی صحنه‌های سه‌بعدی^۳،
- ◀ ناوبری در غیاب GPS،
- ◀ ارتقای پردازش کم‌مصرف در لبه شبکه^۴.
- ◀ تکامل سیاست‌های حریم خصوصی و امنیت تبادل داده‌ها متناسب تحولات

کلید آزادسازی پتانسیل حسگری اشتراکی در مقیاس کلان و دستیابی به خودمختاری اشتراکی تمام‌عیار، توسعه الگوریتم‌های چندوجهی^۵ است؛ الگوریتم‌هایی که بتوانند انواع مختلفی از داده‌ها از رادارهای لیزری (LiDAR) گرفته تا دوربین‌های الکترواپتیکیال/مادون قرمز (EO/IR) و رادارها را پردازش کنند. بخش عمده‌ای از تمرکز کنونی این حوزه، بر ایجاد تعادل میان دستیابی به یک «تصویر عملیاتی مشترک» و «پردازش توزیع‌شده» استوار است؛ به نحوی که نیاز به پهنای باند و مصرف انرژی به حداقل ممکن برسد. در این میان، هوش مصنوعی مولد نیز می‌تواند نقش آفرین باشد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که «مدل‌های زبانی بزرگ»^۶ قادرند وظایف ساده در ناوبری اشتراکی را بسیار کارآمدتر از رویکردهای سنتی یادگیری تقویتی عمیق^۷ بهینه‌سازی کنند.

1) Federal Communications Commission (FCC)

2) Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X/V2X)

فناوری C-V2X (ارتباط سلولی خودرو با همه چیز): یک استاندارد پیشرفته مخابراتی است که به خودروها اجازه می‌دهد از طریق شبکه‌های موبایل (به‌ویژه 5G) با محیط پیرامون خود به‌طور پیوسته تبادل داده کنند. این «همه‌چیز» شامل چهار بخش اصلی است: ارتباط خودرو با خودروهای دیگر (برای جلوگیری از تصادف)، ارتباط با زیرساخت‌های شهری مثل چراغ‌های راهنمایی (برای دور زدن ترافیک)، ارتباط با عابران پیاده (از طریق گوشی موبایل آن‌ها) و ارتباط با شبکه‌های ابری (برای مسیریابی و دریافت خدمات هوشمند). این فناوری زیربنای اصلی تجاری‌سازی خودروهای کاملاً خودران محسوب می‌شود.

3) Compressing 3D Scene Classification Methods

حسگرهای پیشرفته (مثل رادارهای لیزری یا LiDAR در خودروهای خودران) حجم عظیمی از داده‌های سه‌بعدی تولید می‌کنند. پردازش این داده‌ها به‌طور سنتی نیازمند پردازنده‌های قوی، گران‌قیمت و پرمصرف است. با فشرده‌سازی این الگوریتم‌ها، می‌توان هوش مصنوعی را روی تراشه‌های بسیار کوچک‌تر و ارزان‌تر در همان لبه شبکه (درون خود حسگر) اجرا کرد. این کار نه تنها هزینه سخت‌افزار را به شدت کاهش می‌دهد، بلکه مصرف باتری را کم کرده و پردازش اطلاعات را برای تصمیم‌گیری در کسری از ثانیه (بدون نیاز به اینترنت پرسرعت) ممکن می‌سازد.

4) Low-Power Processing at the Network Edge

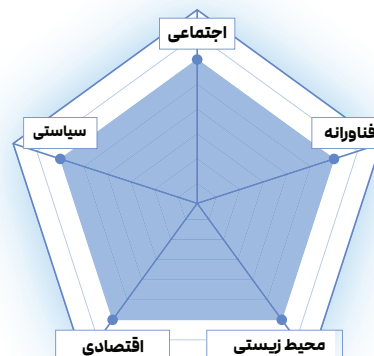
5) Multi-Modal Algorithms

6) Large Language Models (LLMs)

7) Deep Reinforcement Learning (DRL)

توسعه استانداردهای داده بین‌صنعتی
ایجاد استانداردهای مشترک داده میان صنایع مختلف برای تضمین قابلیت همکاری حسگرها در سیستم‌های متفاوت.

نوسازی زیرساخت‌های حیاتی
نوسازی زیرساخت‌های ارتباطی حیاتی برای پشتیبانی از نیازهای پهنای باند و تأخیر پایین حسگری اشتراکی در مقیاس شهری.



شکل ۱۱: نقشه آمادگی اکوسیستم حسگری اشتراکی

۲-۹ چشم‌انداز راهبردی: حسگری اشتراکی

توسط بنیاد آینده دبی

حسگری اشتراکی می‌تواند سیستم‌های شهری، تحرک‌پذیری و زیرساخت‌های اجتماعی را به شکل چشمگیری متحول کند. این رویکرد که با فناوری‌های ارتباط خودرو با همه‌چیز (V2X)، شبکه 5G، هوش مصنوعی و رایانش لبه‌ای^۱ توانمند می‌شود، قادر است محیط‌های شهری هوشمندی خلق کند که پویایی‌های پیچیده محیطی را با دقتی بسیار بیشتر از سیستم‌های امروزی درک کرده، به آن‌ها پاسخ داده و خود را با شرایط تطبیق دهند.

پتانسیل تأثیرگذاری این فناوری فراتر از مدیریت سنتی ترافیک است؛ به گونه‌ای که تاب‌آوری شهری، زنجیره‌های تأمین و ظرفیت‌های واکنش در شرایط اضطراری را نیز دگرگون می‌سازد. شهرها می‌توانند زیرساخت‌های انطباق‌پذیری توسعه دهند که در لحظه به تغییر شرایط واکنش نشان دهند؛ امری که تخصیص پویاتر منابع در زمان بحران، بهینه‌سازی مسیرهای تحویل برای اقلام حیاتی و اعزام هماهنگ ناوگان امدادی را امکان‌پذیر می‌سازد. با قرارگیری سیستم‌های تحرک هوشمند در هسته مرکزی این قابلیت‌ها، محیط‌های شهری می‌توانند از طریق سیستم‌های فناورانه یکپارچه و بدون وقفه، به شهروندان خدمت‌رسانی کنند.

از جمله فوری‌ترین و ملموس‌ترین نتایج و کاربردهای اولیه این فناوری، بهبود ایمنی است. در حوزه حمل‌ونقل، فناوری‌های V2X پتانسیل چشمگیری در پیشگیری از تصادفات نشان داده‌اند. سیستم‌های ترمز اضطراری خودکار^۲، زمانی که تنها روی «خودروهای در حال گردش» نصب شده بودند، کاهش ۵۹ درصدی تصادفات را به همراه داشتند؛ رقمی که با ادغام کامل این فناوری به ۷۷ درصد رسید.

1) Edge Computing

2) Automated Emergency Braking

تحقیقات مؤسسات بیمه‌ای نیز نشان می‌دهد که آمار تصادف خودروهای مجهز به قابلیت‌های حسگری هوشمند می‌تواند تا ۷۸ درصد کاهش یابد؛ موضوعی که نویدبخش تغییری بنیادین در ارزیابی ریسک و پویایی شهری است.

این مزایای راهبردی به صنایع متعددی تسری خواهد یافت. برای مثال، بخش‌های حمل‌ونقل و لجستیک می‌توانند دستاوردهای قابل‌توجهی داشته باشند؛ چنان‌که حرکت کاروانی کامیون‌ها^۱ کاهش ۵ تا ۱۰ درصدی در مصرف سوخت را به اثبات رسانده است. زیرساخت‌های مخابراتی نیز ممکن است ارتقاهای بنیادینی را تجربه کنند؛ به طوری که بهبود دقت مکان‌یابی در شبکه 5G از بیش از ۱ متر به ۰.۱ متر (با ضریب اطمینان ۹۹.۹ درصدی)، می‌تواند سطوح بی‌سابقه‌ای از عملیات یکپارچه و هماهنگ ناوگان‌ها را امکان‌پذیر سازد.

با این وجود، پتانسیل تحول‌آفرین حسگری اشتراکی در مقیاس کلان، با چالش‌های پیچیده‌ای نیز روبه‌رو است. از آنجا که در حال حاضر تنها ۵۵ درصد از جمعیت جهان به شبکه 5G دسترسی دارند، توسعه زیرساخت‌های مخابراتی یک پیش‌نیاز حیاتی محسوب می‌شود. از دیگر موانع موجود می‌توان به تدوین استانداردهای مشترک داده، استقرار چارچوب‌های قدرتمند امنیت سایبری، خلق مدل‌های جامع برای مسئولیت حقوقی و جلب اعتماد عمومی به فناوری‌های اشتراکی اشاره کرد.

سازمان‌های دوراندیش و استراتژیک، حسگری اشتراکی را به‌عنوان پلتفرمی بالقوه برای بازطراحی سیستم‌های شهری می‌نگرند. موفقیت در این مسیر، در گرو همکاری واقعی میان دولت، بخش خصوصی و حوزه‌های فناوری است. چالش بنیادین، عبور از مفهوم صرف «اتصال فناورانه^۲» و حرکت به سوی خلق محیط‌های شهری انطباق‌پذیری است که قادر به آموختن، نشان دادن واکنش و تکامل هستند.

دهه پیش رو، پنجره‌ای حیاتی برای توسعه اکوسیستم‌های حسگری اشتراکی است. کشورها و سازمان‌هایی که در زمینه تثبیت استانداردهای یکپارچه داده، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های قدرتمند مخابراتی و طراحی شبکه‌های حسگری تعامل‌پذیر پیشگام شوند، آینده‌ای را شکل خواهند داد که در آن شهرها تاب‌آورتر، پاسخگوتر و انسان‌محورتر خواهند بود. با گذار حسگری اشتراکی از کاربردهای مجزا و منفرد به شبکه‌های به‌هم‌پیوسته، پتانسیل دگرگونی سیستم‌های شهری از صرف «بهبود کارایی» فراتر رفته و به بازطراحی بنیادین شیوه عملکرد، انطباق و تکامل شهرها خواهد انجامید.

کلان‌روندهای مرتبط با بنیاد آینده‌نگری دبی: از آسیب‌پذیری‌های فناورانه و واقعیت‌های دیجیتال

1) Truck Platooning

حرکت کاروانی هوشمند (Truck Platooning): یک فناوری نوین در لجستیک است که در آن، چند کامیون از طریق شبکه‌های بی‌سیم (V2V) و سیستم‌های رانندگی خودکار به یکدیگر متصل می‌شوند و به‌صورت یک «قطار جاده‌ای» با فاصله بسیار کم از یکدیگر حرکت می‌کنند. در این حالت، کامیون پیشرو هدایت مسیر را بر عهده دارد و کامیون‌های پشتی به‌طور خودکار هم‌گام با آن ترمز کرده یا سرعت می‌گیرند. این فاصله بسیار کم باعث کاهش شدید مقاومت هوا (آیرودینامیک بهتر) می‌شود که نتیجه مستقیم آن، صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف سوخت، کاهش استهلاک، پایین آمدن انتشار کربن و بهینه‌سازی ظرفیت جاده‌هاست.

2) Technological Connection

**۱۰. نمان گذاری مولد (واترماک گذاری)
تقویت اعتماد از طریق نشانه‌های نامرئی و تغییرناپذیر**



۱۰-۱. مقدمه

کاترین دانیل^۱، مدیر و استاد، دانشکده سایبرنتیک، دانشگاه ملی استرالیا
 اندرو مینارد^۲، استاد، دانشکده آینده نوآوری در جامعه، دانشگاه ایالتی آریزونا

فناوری‌های واترمارکینگ (نهان‌نگاری)^۳ در هوش مصنوعی مولد، نشانگرهای نامرئی را در محتوای تولیدشده توسط هوش مصنوعی از جمله متن، تصویر، صدا و ویدئو جاسازی می‌کنند تا اصالت محتوا را تأیید کرده و ردیابی منشأ آن را تسهیل کنند.

از آنجا که تمایز میان محتوای ساخته‌شده توسط هوش مصنوعی و محتوای خلق‌شده توسط انسان روزبه‌روز دشوارتر می‌شود، موجی از نوآوری‌ها در فناوری‌های واترمارکینگ شکل گرفته است؛ فناوری‌هایی که با هدف مقابله با اطلاعات غلط، حفاظت از مالکیت فکری، جلوگیری از تقلب علمی و تقویت اعتماد در فضای دیجیتال طراحی شده‌اند.

تکنیک‌های واترمارکینگ به گونه‌ای عمل می‌کنند که خروجی‌های هوش مصنوعی مولد را به‌طور نامحسوسی تغییر دهند، بدون آنکه تأثیر قابل‌توجهی بر کیفیت آن‌ها بگذارند. فناوری‌های واترمارک متن‌محور، مانند فناوری «SynthID»^۴ متعلق به شرکت گوگل دیپ‌ماینده^۵، از این واقعیت بهره می‌گیرند که در هر زبان هزاران واژه وجود دارد که می‌توانند به‌طور تصادفی با کلمات جایگزین جابه‌جا شوند. رویکرد آن‌ها به این صورت است که زیرمجموعه‌ای محدود و مشخص از این واژه‌ها را در سراسر متن تولیدشده توسط هوش مصنوعی جاسازی می‌کنند؛ این ترکیب برای خواننده کاملاً طبیعی به نظر می‌رسد، اما با انتخاب‌های واژگان تصادفی توسط یک نویسنده انسانی تفاوت دارد. این فرآیند در نهایت به خلق یک «اثرانگشت متنی»^۶ ویژه برای هوش مصنوعی می‌انجامد.

1) Katherine Daniell

2) Andrew Maynard

۳) واترمارکینگ در هوش مصنوعی (AI Watermarking): برخلاف واترمارک‌های سنتی (مثل لوگوهای نیمه‌شفاف روی عکس‌ها که با چشم دیده می‌شوند)، واترمارک هوش مصنوعی یک شناسه رمزنگاری شده و پنهان در ساختار داده (متن، پیکسل یا فرکانس صوتی) است. این فناوری به کسب‌وکارها و پلتفرم‌ها اجازه می‌دهد تا با اسکن کردن محتوا، به‌صورت خودکار تشخیص دهند که آیا یک اثر توسط ماشین تولید شده است یا انسان؛ ابزاری که برای رعایت کپی‌رایت و جلوگیری از جعل عمیق (Deepfake) در تجارت دیجیتال حیاتی است.

4) فناوری SynthID: یک ابزار پیشرو توسعه‌یافته توسط گوگل دیپ‌ماینده است که به‌طور خاص برای واترمارک کردن و شناسایی محتوای تولیدشده توسط هوش مصنوعی طراحی شده است. اهمیت تجاری این ابزار در آن است که حتی اگر محتوا (متن، عکس یا موسیقی) دستکاری، فشرده یا بازنویسی شود، باز هم مدل‌های تشخیصی می‌توانند اثرانگشت پنهان SynthID را در آن شناسایی کنند.

5) Google DeepMind

۶) اثرانگشت متنی (Textual Fingerprint): در پردازش زبان طبیعی (NLP)، به الگوی آماری و ریاضی خاصی گفته می‌شود که یک مدل هوش مصنوعی در توزیع و انتخاب کلمات به جا می‌گذارد. از آنجا که الگوریتم‌ها بر اساس احتمالات ریاضی کلمات را کنار هم می‌چینند، این الگوها توسط نرم‌افزارهای ردیاب، به عنوان امضای اختصاصی یا «اثرانگشت» آن مدل هوش مصنوعی شناسایی می‌شوند.

فناوری‌های واترمارک تصویر و ویدئو نیز شامل اعمال تغییرات غیرقابل رؤیت در سطح پیکسل است که می‌توانند در برابر ویرایش‌هایی نظیر تغییر اندازه^۱ و فشرده‌سازی پایدار^۲ بمانند؛ برای مثال، از طریق تغییر بسیار ظریف مقادیر در پیکسل‌های منفرد (به‌گونه‌ای که ماشین بتواند تغییرات را ببیند اما چشم انسان قادر به تشخیص آن نباشد) یا از طریق جاسازی الگوهای پنهان در خروجی تولیدشده که تنها توسط ماشین قابل استخراج است.

نهان‌نگاری (واترمارکینگ) محتوای هوش مصنوعی از سال ۲۰۲۲، هم‌زمان با محبوبیت گسترده مدل‌هایی نظیر ChatGPT و Stable Diffusion، شتاب چشمگیری گرفت. تا سال ۲۰۲۳، شرکت‌های بزرگ این حوزه از جمله OpenAI، گوگل و متا، تحت فشارهای نظارتی و قانونی به استفاده از این فناوری متعهد شدند. در سال ۲۰۲۴ یک نقطه عطف مهم به ثبت رسید؛ زمانی که گوگل دیپ‌ماینند فناوری Syn-thID را به صورت «متن‌باز» عرضه کرد و هم‌زمان، شرکت متا از سیستم اختصاصی خود برای نهان‌نگاری ویدیوهای هوش مصنوعی با نام ویدئوسیل (VideoSeal) پرده برداشت.

امروزه شرکت‌های پیشرو با سرعتی فزاینده در حال ادغام این فناوری در پلتفرم‌های خود هستند. برای نمونه، گوگل در حال پیاده‌سازی نهان‌نگاری در تصاویر، متن و ویدیوهای سراسر سرویس‌های خویش است و متا نیز واترمارک‌های نامرئی و برچسب‌های فراداده^۳ را روی محتوای تولیدی در فیس‌بوک، اینستاگرام و تردز (Threads) اعمال می‌کند. افزون بر این، غول‌های فناوری برای تضمین «شفافیت رسانه‌های مصنوعی»، همکاری‌های مشترکی را با سازمان‌هایی نظیر Partnership on AI آغاز کرده‌اند.

با وجود این پیشرفت‌ها، توسعه همه‌جانبه نهان‌نگاری همچنان با چالش‌هایی جدی روبه‌روست. تغییرات ساده در خروجی‌های هوش مصنوعی هنوز هم می‌تواند در روند تشخیص اختلال ایجاد کند. کاربران ممکن است از طریق برش تصاویر، دستکاری متن یا حتی به‌کارگیری ابزارهای هوش مصنوعی پاک‌کننده واترمارک، برای حذف یا جعل این نشانگرها تلاش کنند. از سوی دیگر، فقدان استانداردهای یکپارچه جهانی و پیاده‌سازی‌های ناهمگون در سطح صنعت، خطر تضعیف اثربخشی کل سیستم را به همراه دارد. دغدغه‌های اخلاقی را نیز نباید نادیده گرفت؛ مواردی مانند برچسب‌گذاری اشتباه محتوای واقعی به‌عنوان ساخته دست ماشین (مثبت کاذب^۴)، پیامدهای ناخواسته‌ای به دنبال خواهد داشت؛ به‌ویژه زمانی که پای اعتبار برندها و صداقت علمی در میان باشد.

1) Resizing

۲) **پایداری در برابر فشرده‌سازی (Survival against compression)**: یکی از بزرگترین چالش‌های فنی در انتقال داده‌های چندرسانه‌ای است. وقتی تصویری در شبکه‌های اجتماعی آپلود می‌شود، حجم آن به شدت فشرده (Compress) می‌شود که معمولاً باعث از بین رفتن داده‌های پنهان می‌گردد. فناوری‌های نوین نهان‌نگاری به گونه‌ای طراحی شده‌اند که حتی پس از افت کیفیت یا تغییر سایز تصویر توسط کاربر، نشانگر هویتی درون پیکسل‌ها دست‌نخورده باقی می‌ماند تا اصالت اثر در هر شرایطی قابل رهگیری باشد.

۳) **برچسب‌های فراداده (Metadata tags)**: اطلاعاتی نامرئی که به فایل‌های دیجیتال پیوست می‌شوند. از منظر تجاری، متادیتا در زنجیره تأمین دیجیتال نقشی حیاتی دارد؛ زیرا به پلتفرم‌های فروش، ناشران و سازمان‌های حقوقی اجازه می‌دهد تا بدون نیاز به اسکن بصری، هویت خالق اثر و وضعیت مالکیت فکری آن را به‌صورت خودکار و در کسری از ثانیه احراز کنند.

۴) **خطای مثبت کاذب (False Positives)**: در سیستم‌های تشخیص محتوا، این خطای زمانی رخ می‌دهد که نرم‌افزار، یک محتوای صددرصد انسانی را به‌اشتباه «تولیدشده توسط هوش مصنوعی» تشخیص دهد. از منظر ریسک کسب‌وکار، این خطا می‌تواند به بحران‌های روابط عمومی بزرگ، افتادن در دام شکایات حقوقی و تخریب شدید اعتبار برندها یا نویسندگان منجر شود.

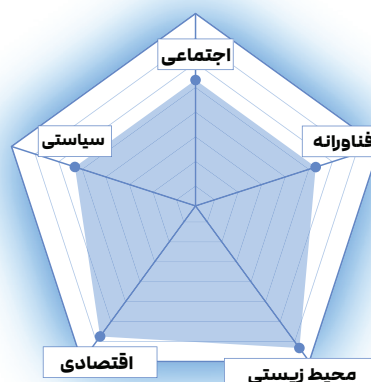
موفقیت این فناوری‌ها در گرو همگامی با چارچوب‌های حکمرانی و دستورالعمل‌های کاربری پیشرفته است. در همین راستا، چین استفاده از نهان‌نگاری را برای محتوای هوش مصنوعی الزامی کرده و مناطقی چون اتحادیه اروپا نیز در حال تدوین راهکارهایی برای مدیریت امنیت و اصالت محتوای دیجیتال هستند. هدایت مسیر توسعه استانداردهای فنی برای تأیید منشأ محتوا، اکنون بر عهده «ائتلاف اصالت و منشأ محتوا»^۱ قرار دارد؛ ائتلافی متشکل از تولیدکنندگان پیشرو رسانه که خلأ نهادهای قانون‌گذار را در این مسیر تکمیل می‌کند. تنوع رویکردهای فناورانه در نهان‌نگاری، این حوزه را به بستری پررونق و ثروت‌آفرین برای استارت‌آپ‌های سراسر جهان بدل ساخته است.

فناوری‌های نوظهور نهان‌نگاری، با ایجاد تعادل میان نوآوری و پاسخگویی، در حال تبدیل شدن به یکی از ارکان کلیدی «توسعه مسئولانه هوش مصنوعی»^۲ هستند. اگرچه هیچ روش واحدی کاملاً نفوذناپذیر نیست، اما پذیرش فراگیر در سطح صنعت و هم‌راستایی با قوانین نظارتی، موفقیت و کارایی بلندمدت این فناوری را تضمین خواهد کرد.

توسعه استانداردهای نهان‌نگاری مقاوم در برابر دستکاری سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نهان‌نگاری مقاوم در برابر دستکاری و ایجاد استانداردهای فراگیر صنعتی برای پیاده‌سازی یکپارچه آن‌ها.

ایجاد سیستم‌های اعتبارسنجی چندپلتفرمی

ساخت سیستم‌های اعتبارسنجی مستقل که بتوانند نهان‌نگاری‌ها را در پلتفرم‌ها و قالب‌های مختلف محتوا شناسایی و اصالت‌شان را تأیید کنند.



شکل ۱۲: نقشه آمادگی اکوسیستم نهان‌گذاری مولد (واترماک گذاری)

1) Coalition for Content Provenance and Authenticity (C2PA)

ائتلاف C2PA: یک کنسرسیوم استراتژیک متشکل از غول‌های فناوری و رسانه (مانند مایکروسافت، ادوبی و بی‌بی‌سی). ارزش اقتصادی این ائتلاف در «خودتنظیم‌گری بازار» است؛ به این معنا که بازیگران بزرگ صنعت پیش از آنکه دولت‌ها قوانین سخت‌گیرانه و بازدارنده‌ای وضع کنند، خودشان استانداردهای مشترکی را برای ایجاد اعتماد در تجارت دیجیتال تدوین می‌کنند.

2) Responsible AI Deployment

۲-۱۰. چشم‌انداز راهبردی: نهان‌نگاری مولد

بنیاد آینده دبی

طی یک دهه آینده، فناوری‌های نهان‌نگاری (واترمارکینگ) برای هوش مصنوعی مولد، از لایه‌های محافظتی فنی و اختیاری، به اجزای حیاتی در «زیرساخت اعتماد دیجیتال»^۱ تکامل خواهند یافت. با رواج روزافزون محتوای مصنوعی^۲، این واترمارک‌های جاسازی‌شده شالوده یک اکوسیستم اصالت‌سنجی جهانی را شکل می‌دهند؛ اکوسیستمی که امکان تفکیک دارایی‌های دیجیتال خلق‌شده توسط انسان از ماشین را فراهم می‌آورد.

در این میان، صنایع رسانه و خلاقیت تحول چشمگیری را تجربه خواهند کرد. همگرایی چارچوب‌های نظارتی در کالیفرنیا، چین و اتحادیه اروپا (با جریمه‌های سنگینی که تا ۳۸ میلیون دلار یا ۷ درصد از گردش مالی سالانه شرکت‌ها می‌رسد) نشان‌دهنده شکل‌گیری یک رویکرد و دغدغه جهانی نوظهور نسبت به سیستم‌های «منشأیابی محتوا»^۳ است. پلتفرم‌های بزرگ از هم‌اکنون جایگاه‌سازی خود را در این فضا آغاز کرده‌اند؛ سیستم اعتبارسنجی محتوای ادوبی^۴، استانداردهای برچسب‌گذاری هوش مصنوعی در تیک‌تاک و فناوری SynthID گوگل، نمایانگر تلاش‌های اولیه‌ای هستند که با هدف تثبیت پروتکل‌های تعیین‌کننده بازار انجام می‌پذیرند.

این روند، حامل پیامی بسیار فراتر از یک چالش صرف برای رعایت الزامات قانونی است. این رویداد، نشانه‌گر مراحل آغازین یک سیستم حکمرانی جامع برای محتوای دیجیتال است؛ سیستمی که مزیت‌های رقابتی متمایزی برای پذیرندگان اولیه^۵ خلق می‌کند و در عین حال، پتانسیل آن را دارد که تولیدکنندگان و پلتفرم‌های ناسازگار را به حاشیه براند.

1) Digital Trust Infrastructure

زیرساخت اعتماد دیجیتال (Digital Trust Infrastructure): از منظر استراتژیک، این مفهوم معادل نقش گواهینامه‌های امنیتی (SSL) در روزهای اولیه تجارت الکترونیک است. همان‌طور که بدون امنیت پرداخت، خرید اینترنتی شکل نمی‌گرفت، اقتصاد محتوامحور آینده نیز بدون یک بستر قابل اعتماد برای اصالت‌سنجی، به دلیل خطرات ناشی از کلاهبرداری و جعل، فاقد ارزش تجاری خواهد بود.

2) Synthetic Content

3) Content Provenance

منشأیابی محتوا (Content Provenance): معادل دیجیتال «رهگیری زنجیره تأمین» در صنایع فیزیکی است. برای یک فعال اقتصادی یا رسانه‌ای، این سیستم تضمین می‌کند که از لحظه خلق یک تصویر، متن یا ویدیو تا زمان انتشار، چه تغییری روی آن اعمال شده است. این ابزار برای حفاظت از مالکیت فکری، جلوگیری از سقوط سهام بر اثر اخبار جعلی و حفظ امنیت برندها اهمیت حیاتی دارد.

4) Adobe

5) Early Adopters

پذیرندگان اولیه (Early Adopters): در ادبیات مدیریت نوآوری، به کسب‌وکارها و پلتفرم‌هایی گفته می‌شود که پیش از اجباری شدن یک فناوری یا قانون، آن را پیاده‌سازی می‌کنند. مزیت رقابتی این گروه تنها فرار از جریمه‌های سنگین (نظیر جریمه ۷ درصدی از کل درآمد در اروپا) نیست؛ بلکه آن‌ها با ورود زودهنگام، استانداردهای فنی سازمان خود را به استانداردهای پیش‌فرض کل بازار تبدیل کرده و سایر رقبا را به پیروی وادار می‌کنند.

در نهایت، کشورها و سازمان‌هایی که در تدوین استانداردهای نهان‌نگاری پیشگام شوند، قواعد بازی در اقتصاد نوظهور رسانه‌های مصنوعی^۱ را دیکته خواهند کرد.

دامنه پیامدهای این فناوری فراتر از صنایع خلاق گسترده خواهد شد؛ تا جایی که پتانسیل بازطراحی بنیادین سیستم‌های حقوقی و مالی را نیز در بر می‌گیرد. در آینده‌ای نزدیک، دادگاه‌ها محتوای دارای نهان‌نگاری را به‌عنوان سندی معتبر در دعاوی مالکیت فکری و پرونده‌های هتک حیثیت خواهند پذیرفت. هم‌زمان، شرکت‌های بیمه نیز توسعه مدل‌های پوششی چندلایه را بر مبنای سطوح مختلف اصالت‌سنجی محتوا در دستور کار قرار می‌دهند. برای تولیدکنندگان محتوا، قابلیت اثبات اصالت آثارشان (خواه کاملاً انسانی و خواه با مشارکت هوش مصنوعی) مزیتی استراتژیک است؛ مزیتی که به آن‌ها اجازه می‌دهد در بازاری که روزبه‌روز از جایگزین‌های مصنوعی اشباع می‌شود، قیمت‌های پرمیوم^۲ و ارزش‌گذاری بالاتری را طلب کنند.

چالش‌های فنی همچنان چشمگیرند، اما چشم‌انداز روشنی برای رفع آن‌ها وجود دارد. در حال حاضر، اگرچه سیستم‌های نهان‌نگاری در حال پیاده‌سازی هستند، اما تکنیک‌های حذف این نشانگرها نیز به حیات خود ادامه می‌دهند. این تقابل، نشان‌دهنده شکاف عمیق میان توانمندی‌های فعلی و نیاز مبرم بازار به واترمارک‌های «ضد‌سنگاری» و «چندفرمتی» است؛ ابزارهایی که بتوانند محتوای تولیدشده توسط ماشین را با دقت صددرصدی شناسایی کنند. در این میان، ادغام این فناوری با شبکه‌های بلاک‌چین^۳ برای خلق واترمارک‌های قابل‌راستی‌آزمایی، افق نویدبخشی را ترسیم می‌کند؛ رویکردی که فارغ از هرگونه تغییر یا تکثیر، هویتی تغییرناپذیر برای محتوا رقم می‌زند.

1) Synthetic Media Economy

اقتصاد رسانه‌های مصنوعی (Synthetic Media Economy): بازار چند میلیارد دلاری آینده که در آن، بخش عمده‌ای از محتوای مصرفی جهان (از تبلیغات تجاری و فیلم‌ها گرفته تا مقالات و کدهای برنامه‌نویسی) توسط هوش مصنوعی تولید می‌شود. در این اقتصاد، محتوایی که برچسب «تأییدشده» (چه به‌عنوان اثر کاملاً انسانی و چه به‌عنوان خروجی مجاز ماشین) داشته باشد، با ارزش‌گذاری پرمیوم و قیمت بالاتری معامله خواهد شد.

۲) قیمت‌گذاری پرمیوم (Premium Pricing): قیمت‌گذاری خدمات یا محصولات با نرخ بالاتر از حد متوسط بازار به دلیل ارائه یک ارزش ویژه. ارزش اقتصادی: با رواج هوش مصنوعی مولد، هزینه تولید محتوای متوسط و معمولی به صفر متمایل می‌شود و بازار از محتوای انبوه و تکراری اشباع می‌گردد. در چنین بازاری، «اصالت انسانی» یا «نظارت تأییدشده تخصصی» به یک کمیابی ارزشمند تبدیل خواهد شد. تولیدکنندگان و آژانس‌هایی که بتوانند با سیستم‌های نهان‌نگاری ثابت کنند محتوای آن‌ها دست‌ساز یا دارای ارزش افزوده انسانی است، می‌توانند این کمیابی را به پول تبدیل کرده و حاشیه سود بسیار بالاتری را طلب کنند.

3) Blockchain

ادغام با بلاک‌چین (Blockchain Integration): ثبت ردپای دیجیتال (هش) محتوا در یک دفتر کل توزیع‌شده و غیرمتمرکز. این روش، محتوای دیجیتال را از یک «فایل قابل کپی» به یک «دارایی قابل ردیابی» تبدیل می‌کند. برای مدیران رسانه و بنگاه‌های اقتصادی، این امر به معنای داشتن زنجیره حفاظتی قطعی (Chain of Custody) است که در دادگاه‌ها به‌عنوان سند غیرقابل انکار مالکیت فکری (IP) شناخته شده و ریسک سرقت دارایی‌های دیجیتال برند را به حداقل می‌رساند.

سازمان‌های دوراندیش برای آمادگی راهبردی در این فضا، سرمایه‌گذاری بر «استانداردهای تعامل‌پذیر» را به توسعه سیستم‌های انحصاری ترجیح می‌دهند. شرکت‌هایی که به توسعه تکنیک‌های پیشرفته‌تر نهان‌نگاری می‌پردازند، (به‌ویژه روش‌های مقاوم در برابر حذف و سازگار با فرمت‌های نوظهور محتوا) جایگاه رهبری خود را در اکوسیستم در حال تکامل احراز هویت دیجیتال^۲ تثبیت خواهند کرد. در سطح کلان نیز، کشورها و سازمان‌های پیشگام در تدوین استانداردهای این حوزه، نقشی تعیین‌کننده در هدایت مسیر اقتصاد نوظهور رسانه‌های مصنوعی ایفا می‌کنند.

با نگاهی به آینده، نهان‌نگاری هوش مصنوعی مولد تنها یک ابزار ساده برای اصالت‌سنجی محتوا نیست؛ بلکه رویکردی بنیادین برای بازتعریف مفهوم «اعتماد» در یک چشم‌انداز دیجیتال سراسر مصنوعی به‌شمار می‌رود. پیشرفت پایدار در این مسیر، نیازمند هم‌افزایی راهبردی میان حوزه‌های فناوری، سیاست‌گذاری و صنایع خلاق است؛ هم‌افزایی برای خلق سیستم‌هایی که تعادلی هوشمندانه میان توسعه نوآوری و استقرار لایه‌های محافظتی کارآمد برقرار می‌سازند.

کلان‌روندهای مرتبط بنیاد آینده‌نگری دبی: آسیب‌پذیری‌های فناورانه و آینده بشریت

1) Interoperable Standards

استانداردهای تعامل‌پذیر (Interoperable Standards): در معماری فناوری اطلاعات، به استانداردهایی گفته می‌شود که به سیستم‌های نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مختلف اجازه می‌دهند بدون مانع با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. توسعه سیستم‌های انحصاری و بسته (Proprietary) هزینه‌های یکپارچه‌سازی را برای کسب‌وکارها به‌شدت افزایش می‌دهد. سازمان‌هایی که روی استانداردهای تعامل‌پذیر سرمایه‌گذاری می‌کنند، می‌توانند اطمینان یابند که محتوای تأییدشده آن‌ها در تمامی پلتفرم‌ها (از شبکه‌های اجتماعی گرفته تا نرم‌افزارهای سازمانی و خبرگزاری‌ها) بدون نیاز به پرداخت هزینه‌های لایسنس نرم‌افزارهای واسط، به‌صورت یکپارچه شناسایی و اصالت‌سنجی می‌شود.

2) Digital Authentication Ecosystem

نتیجه گیری: از سیگنال‌های ضعیف تا دگرگونی اجتماعی

طی بیش از یک دهه گذشته، گزارش «۱۰ فناوری نوظهور برتر» متعلق به مجمع جهانی اقتصاد، دریچه‌ای منحصر به فرد برای درک تحولات فناورانه بوده است؛ مرجعی که نشان می‌دهد چگونه فناوری‌های نوپا، از سیگنال‌هایی لرزان و اولیه، به راهکارهایی تحول‌آفرین بدل می‌شوند.

برای نمونه، فناوری CRISPR-Cas9 را در نظر بگیرید که نخستین بار در گزارش سال ۲۰۱۵، به عنوان یک تکنیک نویدبخش در ویرایش ژن مورد توجه قرار گرفت. آنچه در آن زمان تنها یک دستاورد تئوریک به نظر می‌رسید، اکنون حوزه‌های متعددی را دگرگون ساخته است؛ از فراهم‌سازی بستر توسعه دقیق واکسن‌ها در دوران همه‌گیری کووید-۱۹ گرفته تا تسهیل عمل پیشگامانه «پیوند اعضای حیوان به انسان»^۱ در سال ۲۰۲۴.

این مسیر تکاملی، بازتاب‌دهنده روش‌شناسی و هسته مرکزی این گزارش است: «شناسایی فناوری‌ها نه بر مبنای کاربردهای فوری و کوتاه‌مدت، بلکه بر اساس پتانسیل آن‌ها برای خلق تغییرات سیستمی^۲». باید توجه داشت که عمیق‌ترین و شگرف‌ترین نوآوری‌ها هرگز در انزوا پدیدار نمی‌شوند، بلکه محصول همگرایی‌های درهم‌تنیده^۳ و پیچیده‌اند؛ نقاط تلاقی شگفت‌انگیزی که در آن‌ها، زیست‌شناسی مصنوعی با هوش مصنوعی پیوند می‌خورد، علم مواد با سیستم‌های انرژی تلاقی می‌یابد و بیوتکنولوژی با فناوری‌های دیجیتال درمی‌آمیزد. بر این اساس، هر فناوری رصدشده در این گزارش، فراتر از یک راهکار مستقل فنی است؛ آن‌ها در واقع سیگنال‌هایی از تحولات کلان‌ترند که ظرفیت بازطراحی کلان‌سیستم‌ها را دارا هستند. تثبیت نیتروژن سبز، زنجیره‌های تأمین کشاورزی را از نو تعریف می‌کند؛ کامپوزیت‌های ساختاری باتری، درک ما را از عملکرد مواد دگرگون می‌سازند؛ و حسگری بیوشیمیایی خودمختار، پارادایم‌های کاملاً نوینی در پایش سلامت خلق می‌نماید.

1) Xenotransplantation

۲) تغییرات سیستمی (Systemic Change): در ادبیات مدیریت راهبردی، فناوری‌هایی که تغییر سیستمی ایجاد می‌کنند، تنها یک محصول یا فرآیند را بهبود نمی‌بخشند؛ بلکه منطق یک صنعت را به طور کامل دگرگون می‌کنند. سرمایه‌گذاری روی این فناوری‌ها، برای فعالان اقتصادی به معنای عبور از «بهبودسازی تاکتیکی» و ورود به عرصه «خلق بازارهای کاملاً جدید» و نابود کردن مدل‌های سنتی کسب‌وکار است.

۳) همگرایی درهم‌تنیده فناورانه (Intricate Convergences): یکی از مهم‌ترین استراتژی‌های خلق ثروت در اقتصاد مدرن. همگرایی زمانی رخ می‌دهد که دو یا چند فناوری مستقل (مانند هوش مصنوعی و بیوتکنولوژی) با یکدیگر ترکیب شده و قابلیت‌های بی‌سابقه‌ای خلق کنند. درک این همگرایی‌ها برای سرمایه‌گذاران ضروری است، زیرا پررونق‌ترین استارت‌آپ‌ها (تک‌شاخ‌ها) و سودآورترین بازارها در نقطه تلاقی همین صنایع متولد می‌شوند؛ جایی که مرزهای سنتی صنایع (Silos) فرو می‌ریزد.

این ارزیابی سالانه، الگوهای پایداری را در مسیر بلوغ فناوری‌ها آشکار می‌سازد. نوآوری‌های ساختارشکن، برای موفقیت به چیزی بیش از صرف «نبوغ فنی» نیاز دارند؛ آن‌ها نیازمند توسعه همه‌جانبه اکوسیستم^۱ هستند. تحقق این امر، در گرو نوابری و مدیریت تعاملات پیچیده میان پذیرش اجتماعی، توانمندی‌های فناورانه، پایداری زیست‌محیطی، توجیه‌پذیری اقتصادی^۲ و چارچوب‌های قانون‌گذاری است.

با نگاهی به گذشته، قدرت پیش‌بینی این گزارش بارها به اثبات رسیده است؛ از شناسایی فناوری کریسپر در سال ۲۰۱۵ و پیش‌بینی ظهور پلتفرم‌های واکسن mRNA در سال ۲۰۱۷ گرفته تا بررسی نقش هوش مصنوعی در کشف دارو در سال ۲۰۲۰ و اکنون، ارزیابی درمان‌های زیستی مهندسی‌شده. این موارد، صرفاً برش‌هایی مقطعی از وضعیت فناوری نیستند، بلکه ایستگاه‌های راهیابی در یک مسیر پیوسته از خلق نوآوری به‌شمار می‌روند.

در حالی که این گزارش به‌رصد مستمر فناوری‌های نوظهور ادامه می‌دهد، هدف بنیادین آن همواره ثابت است: «ارائه چشم‌اندازی آینده‌نگرانه که پتانسیل‌های علمی را به فاز پیاده‌سازی عملیاتی پیوند زند». نباید فراموش کرد که شگرف‌ترین نوآوری‌ها، به‌ندرت در نگاه نخست آشکارند؛ آن‌ها محصول مشاهده مستمر، همکاری‌های میان‌رشته‌ای و یک اراده بنیادین برای بازتعریف مرزهای ممکنات هستند. گسترش نوآوری: چگونه فناوری‌های نوظهور به بنیان‌های فردا تبدیل می‌شوند.



شکل ۱۳: مقیاس‌گذاری نوآوری: چگونه فناوری‌های نوظهور به زیربنای فردا تبدیل می‌شوند.

فناوری‌های معرفی شده در گزارش‌های «۱۰ فناوری نوظهور برتر»، نشان می‌دهند که چگونه فناوری‌های پیشگام بر پایه نوآوری‌های بنیادی بنا شده و باعث ایجاد تحول و بازطراحی کل زیست‌بوم‌های اجتماعی می‌شوند.

۱) توسعه همه‌جانبه اکوسیستم (Comprehensive Ecosystem Development): تاریخ فناوری پر از اختراعات درخشانی است که با وجود بی‌نقص بودن از نظر فنی، در بازار شکست خوردند؛ زیرا اکوسیستم آن‌ها (شامل قوانین، مدل‌های درآمدی، زیرساخت‌ها و پذیرش عمومی) آماده نبود. این مفهوم به سیاست‌گذاران و مدیران ارشد گوشزد می‌کند که تجاری‌سازی یک نوآوری ساختارشکن، نیازمند سرمایه‌گذاری هم‌زمان روی رفع موانع حقوقی، ایجاد استانداردهای جدید و شبکه‌سازی میان ذی‌نفعان مختلف است و نباید تنها به بلوغ فنی محصول اکتفا کرد.

۲) توجیه‌پذیری اقتصادی (Economic Viability): در فرآیند تبدیل یک نوآوری علمی به یک محصول تجاری، توجیه‌پذیری اقتصادی به معنای توانایی فناوری در ایجاد درآمد پایدار، کاهش مؤثر هزینه‌ها نسبت به روش‌های سنتی و بازگشت سرمایه (ROI) منطقی در مقیاس صنعتی است. بدون این مؤلفه، حتی شگفت‌انگیزترین دستاوردهای علمی نیز در حد پروژه‌های آزمایشگاهی باقی می‌مانند و هرگز جریان سرمایه را به سمت خود جذب نخواهند کرد.

منابع

1. Imperial College London. (n.d.). Structural batteries. <https://www.imperial.ac.uk/structural-power-composites/structural-batteries/>.
2. Hopkins, B. J., Long, J. W., Rolison, D. R., & Parker, J. F. (2020). High-performance structural batteries. *Joule*, 4(11), pp. 2240-2243. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.07.027>.
3. Physics World. (n.d.). Structural Battery is world's strongest, say researchers – physics world. <https://physicsworld.com/a/structural-battery-is-worlds-strongest-say-researchers/>.
4. Credence Research. (2024, 28 September). Structural Battery Market Size, growth and forecast 2032. <https://www.credenceresearch.com/report/structural-battery-market>.
5. Jin, T., Singer, G., Liang, K., & Yang, Y. (2023). Structural batteries: Advances, challenges and perspectives. *Materials Today*, 62, pp. 151-167. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.12.001>.
6. International Energy Agency (IEA). (2024). Global Critical Minerals Outlook 2024. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>.
7. Energy.gov. (n.d.). Materials technologies. <https://www.energy.gov/eere/vehicles/materials-technologies>.
8. Nie, B., Lim, J., Liu, T., Kovalenko, I., et al. (2023). Multifunctional composite designs for structural energy storage. *Battery Energy*, 2(6). <https://doi.org/10.1002/bte2.20230023>.
9. Karadotcheva, E., Nguyen, S.N., Greenhalgh, E.S., Shaffer, M.S., et al. (2021). Structural Power Performance Targets for future electric aircraft. *Energies*, 14(19), 6006. <https://doi.org/10.3390/en14196006>.
10. Fairs, M. (n.d.). Could carbon fibres soon become free of fossil fuels?. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/stories/2021/07/scientists-bio-based-carbon-fibres/>.
11. Ziemińska-Stolarska, A., Sobulska, M., Pietrzak, M., & Zbiciński, I. (2024). A review of end-of-life scenarios for fibre-reinforced polymer materials. *Energies*, 17(15), 3713. <https://doi.org/10.3390/en17153713>.
12. Ibid.
13. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
14. Loeb S. & Norman R.S. (1975). Osmotic power plants. *Science*, 189(4203), pp.654-5.
15. Aghapour Aktij S., Dadashi Firouzjaei M., Pilevar M., Asad A., et al. (2025). Enhancing sustainable energy production through co-polyamide membranes for improved pressure-retarded osmosis performance and environmental impact: synthesis and life cycle analysis. *Green Chemistry*, 27(3), pp. 586-606.
16. Ibid.
17. Paşaoğlu M.E., Koyuncu İ. (2021). Tubular PAN/CNC Thin Film Nanocomposite (TFN) Pressure Retarded Osmosis (PRO) Membrane: Fabrication and Preliminary Evaluation in Desalination Process. *Cellulose*, 28(13), pp. 8653-70.

18. Kim C., Lee J., Schmucker D., Fortner J.D. (2020). Highly Stable Superparamagnetic Iron Oxide Nanoparticles as Functional Draw Solute for Osmotically Driven Water Transport. *NPJ Clean Water*, 3(1).
19. Gül T.F., Akalın M., Dönmezler E.N., Bolat A., et al. (2024). Review on reverse electrodialysis process—a pioneering technology for energy generation by salinity gradient. *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 3.
20. SaltPower. (2025). What is SaltPower. <https://saltpower.net/what-is-saltpower/>.
21. Kurihara M., Hanakawa M. (2013). Mega-ton Water System: Japanese national research and development project on seawater desalination and wastewater reclamation. *Desalination*, 308, pp. 131-7.
22. Hitachi News Release. (2015). Hitachi and Toray to Test “Mega-ton Water System,” a Large-scale, High Efficiency Seawater Desalination System, in Saudi Arabia [Press release]. <https://www.hitachi.com/New/cnews/month/2015/05/150520a.html>.
23. Cagney, D., & Gruet, R. (2019). Powering Homes Today, Powering Nations Tomorrow. *Ocean Energy Europe*. <https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2019/04/ETIP-Ocean-Integrated-Strategy-2019-LR.pdf>.
24. International Energy Agency (IEA). (2025). Supply – Electricity 2025 – Analysis. <https://www.iea.org/reports/electricity-2025/supply>.
25. Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A.Z., Salman, H.M., & Jaszczur, M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, 20, 101621. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101621>.
26. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2020). Innovation outlook: Ocean energy technologies.
27. SCISPACE. (n.d.). Osmotic Power: Papers published on a yearly basis. <https://typeset.io/topics/osmotic-power-2esx4hak/2023>.
28. Sweetch Energy. (2023, 18 December). Sweetch Energy secures €25M to accelerate the global deployment of osmotic energy. https://cdn.prod.website-files.com/6527b5a78159fe64a0eb7cdf/658048131232d2d65a376e14_121823%20PR%20SWEETCH%20ENERGY.pdf.
29. Hedin, J.T.L., Meli, F., & Narasimhan, K. (2023, 6 April). Method of using nanofiltration and reverse osmosis to remove chemical contaminants. *Google Patents*. <https://patents.google.com/patent/US20230109082A1/en>.
30. Ferial-Díaz, J.J., Correa-Mahecha, F., López-Méndez, M.C., Rodríguez-Miranda, J.P., & Barrera-Rojas, J. (2021). Recent desalination technologies by hybridization and integration with reverse osmosis: A Review. *Water*, 13(10), 1369. <https://doi.org/10.3390/w13101369>.
31. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
32. Liou, J. (2023, 14 September). What are small modular reactors (SMRs)?. *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>.

33. Energy.gov. (2022, 23 August). X-energy completes \$40 million project to further develop high-temperature gas reactor. <https://www.energy.gov/ne/articles/x-energy-completes-40-million-project-further-develop-high-temperature-gas-reactor#:~:text=X-energy%20received%20the%20Advanced,%20and%20TRISO-X%20particle%20fuel%20>.
34. Martucci, B. (2024, 13 May). Small modular reactor startups Oklo and Nano Nuclear Energy Make Us Stock Market debut. Utility Dive. <https://www.utilitydive.com/news/small-modular-reactor-startups-oklo-nano-nuclear-energy-haleu-fuel/715911/>.
35. World Nuclear Association. (2024, 3 May). Nuclear Power in South Korea. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea>.
36. World Nuclear Association. (2024, 5 September). Nuclear Power in the United Arab Emirates. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/united-arab-emirates>.
37. Westinghouse Nuclear. (n.d.). Westinghouse celebrates Milestone Achievement as AP1000® Technology powers plant vogtle unit 4 into Commercial Operation. <https://info.westinghousenuclear.com/news/westinghouse-celebrates-milestone-achievement-as-ap1000-technology-powers-plant-vogtle-unit-4-into-commercial-operation>.
38. Paul, S., Klimenka, M., Duarte, F., Crawford, C., et al. (2024). When Cities Go Nuclear: Exploring the applications of nuclear batteries toward Energy Transformation. *Urban Science*, 8(4), 226. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040226>.
39. Platonova, M. (2024, 14 February). Decarbonizing steel production with nuclear hydrogen. International Atomic Energy Agency (IAEA). <https://www.iaea.org/bulletin/decarbonizing-steel-production-with-nuclear-hydrogen>.
40. Apel, F., Hoyt, J., Marques, F., Reiter, S. & Schulze, P. (2023, 6 October). Cementing your lead: The cement industry in the net-zero transition. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/industries/engineering-construction-and-buildingmaterials/our-insights/cementing-your-lead-the-cement-industry-in-the-net-zero-transition>.
41. Fraser, P., Wanner, B., Everhart, K. & Herzog, A. (2022). Nuclear Power and Secure Energy Transitions: From today's challenges to tomorrow's clean energy systems. International Energy Agency (IEA).
42. Hanna, B.N., Abou-Jaoude, A., Guaita, N., Talbot, P. & Lohse, C. (2024). Navigating economies of scale and multiples for nuclear-powered data centers and other applications with high service availability needs. *Energies*, 17(20), 5073. <https://doi.org/10.3390/en17205073>.
43. Fisher, M. (2024, 13 December). Accelerating advanced nuclear deployment: Meeting the Supply Chain Challenge. International Atomic Energy Agency (IAEA). <https://www.iaea.org/newscenter/news/accelerating-advanced-nuclear-deployment-meeting-the-supply-chain-challenge>.
44. International Atomic Energy Agency (IAEA). (2024). Small Modular Reactors: Advances in SMR Developments 2024. <https://doi.org/10.61092/iaea.3o4h-svum>.
45. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
46. Cubillos-Ruiz, A., Guo, T., Sokolovska, A., Miller, P. F., et al. (2021). Engineering living therapeutics with synthetic biology. *Nature Reviews Drug Discovery*, 20, pp. 941-960. <https://doi.org/10.1038/s41573-021-00285-3>.

47. Khazem, A., Schmachtenberg, R., Weiland, A., Sankaran, S., & Weber, W. (2025). Engineered microbial living matter for diagnostics, prevention, and therapy. *Current Opinion in Biotechnology*, 92, 103269. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2025.103269>.
48. Chariot Biosciences. (n.d.). Innovative Therapeutics Pipeline. <https://www.chariot-bio.com/pipeline/>.
49. Aurealis Therapeutics. (2024, 25 November). Pipeline and science. <https://aurealisterapeutics.com/pipeline-and-science/#pipeline>.
50. NEC. (2024, 12 December). NEC Announces Interim Results from Phase 1 Clinical Trial of NECVAX-NEO1, an AI-Driven Personalized Oral Cancer Vaccine, at ESMO Immuno-Oncology Congress 2024 [Press release]. https://www.nec.com/en/press/202412/global_20241212_01.html.
51. Zalatan, J.G., Petrini, L., & Geiger, R. (2024). Engineering bacteria for cancer immunotherapy. *Current Opinion in Biotechnology*, 85, 103061. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2023.103061>.
52. Dey, S., & Sankaran, S. (2024). Engineered bacterial therapeutics with material solutions. *Trends in Biotechnology*, 42(12), pp. 1663-1676. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2024.06.011>.
53. Zou, Z.-P., Zhang, X.-P., Zhang, Q., Yin, B.-C., et al. (2024). Genetically engineered bacteria as inflammatory bowel disease therapeutics. *Engineering Microbiology*, 4(4), 100167. <https://doi.org/10.1016/j.engmic.2024.100167>.
54. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
55. Kalinderi, K., Papaliagkas, V., & Fidani, L. (2024). GLP-1 receptor agonists: A new treatment in parkinson's disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(7), 3812. <https://doi.org/10.3390/ijms25073812>.
56. Fessel, J. (2024). All GLP-1 agonists should, theoretically, cure alzheimer's dementia but dulaglutide might be more effective than the others. *Journal of Clinical Medicine*, 13(13), 3729. <https://doi.org/10.3390/jcm13133729>.
57. Monti, G., Gomes Moreira, D., Richner, M., Mutsaers, H.A.M. (2022). GLP-1 Receptor Agonists in Neurodegeneration: Neurovascular Unit in the Spotlight. *Cells*, 11(13):2023. doi: 10.3390/cells11132023.
58. Novo Nordisk. (2024). Semaglutide in early Alzheimer's: EVOKE and EVOKE+ clinical trials. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT04777396>.
59. BioSpace. (2024, 20 November). GLP-1 Receptor Agonist Market worth \$55.70 Billion by 2031, Coherent Market Insights [Press release]. <https://www.biospace.com/press-releases/glp-1-receptor-agonist-market-worth-55-70-billion-by-2031-coherent-market-insights>.
60. Kopp, K.O., Glotfelty, E.J., Li, Y., & Greig, N.H. (2022). Glucagon-like peptide-1 (GLP-1) receptor agonists and neuroinflammation: Implications for neurodegenerative disease treatment. *Pharmacological Research*, 186, 106550. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2022.106550>.
61. Pyka, P., Garbo, S., Fioravanti, R., Jacob, C., et al. (2024). Selenium-containing compounds: A new hope for innovative treatments in alzheimer's disease and parkinson's disease. *Drug Discovery Today*, 29(8), 104062. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2024.104062>.

62. Lobo, A. (2024, 17 September). In parkinson's disease, healthcare expenses among largest part of cost. Parkinson's News Today. <https://parkinsonsnewstoday.com/news/parkinsons-disease-health-care-expenses-largest-part-cost/>.
63. Mayo Foundation for Medical Education and Research. (2024, 8 November). Alzheimer's disease. <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/alzheimers-disease/symptoms-causes/syc-20350447>.
64. U.S. Food and Drug Administration (FDA). (2025, 5 March). FDA clarifies policies for compounders as national GLP-1 supply begins to stabilize [Press release]. <https://www.fda.gov/drugs/drug-safety-and-availability/fda-clarifies-policies-compounders-national-glp-1-supply-begins-stabilize>.
65. Don Tracy, A.E. (2024, 25 June). Novo Nordisk to invest \$4.1 billion in expanding manufacturing capabilities in the United States. PharmExec. <https://www.pharmexec.com/view/novo-nordisk-invest-4-1-billion-expanding-manufacturing-capabilities-united-states>.
66. Klein, H.E. (2024, 16 May). Most insured adults still have to pay at least part of the cost of GLP-1 drugs. AJMC. <https://www.ajmc.com/view/most-insured-adults-still-have-to-pay-at-least-part-of-the-cost-of-glp-1-drugs>.
67. National Conference of State Legislatures. (n.d.). Growth, volume, price: The skinny on GLP-1 medications - national conference of state legislatures. <https://www.ncsl.org/state-legislatures-news/details/growth-volume-price-the-skinny-on-glp-1-medications>.
68. Azam, S., Haque, Md. E., Balakrishnan, R., Kim, I.-S., & Choi, D.-K. (2021). The ageing brain: Molecular and cellular basis of neurodegeneration. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.683459>.
69. Meissner, W.G., Remy, P., Giordana, C., Maltête, et al. (2024). Trial of lixisenatide in early parkinson's disease. *New England Journal of Medicine*, 390(13), pp. 1176-1185. <https://doi.org/10.1056/nejmoa2312323>.
70. BioSpace. (2024, 9 December). Evidence mounts for potential of glp-1s in alzheimer's disease. <https://www.biospace.com/drug-development/evidence-mounts-for-potential-of-glp-1s-in-alzheimers-disease>.
71. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February) Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
72. Maity, D., Guha Ray, P., Buchmann, P., Mansouri, M., & Fussenegger, M. (2023). Blood-glucose-powered metabolic fuel cell for self-sufficient bioelectronics. *Advanced Materials*, 35(21). <https://doi.org/10.1002/adma.202300890>.
73. National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases (NIDDK). (2024, 28 December). Continuous glucose monitoring. <https://www.niddk.nih.gov/health-information/diabetes/overview/managing-diabetes/continuous-glucose-monitoring>.
74. Zargartalebi, H., Mirzaie, S., GhavamiNejad, A., Ahmed, S. U., et al. (2024). Active-reset protein sensors enable continuous in vivo monitoring of inflammation. *Science*, 386(6726), pp. 1146-1153. <https://doi.org/10.1126/science.adn2600>.
75. Florea, L., & Diamond, D. (2022). Sensors and "The internet of biochemical things". *Frontiers in Sensors*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsens.2022.1010212>.

76. Huang, C.-W., Lin, C., Nguyen, M.K., Hussain, A., et al. (2023). A review of Biosensor for environmental monitoring: Principle, application, and corresponding achievement of Sustainable Development Goals. *Bioengineered*, 14(1), pp. 58-80. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2095089>.
77. Albu, C., Chira, A., Radu, G.-L., & Eremia, S.A. (2025). Advances in cost-effective chemosensors for sustainable monitoring in food safety and processing. *Chemosensors*, 13(3), 113. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13030113>.
78. Institute of Medicine and National Research Council Committee to Ensure Safe Food from Production to Consumption. (1998). *The Changing Nature of Food Hazards: Cause for Increasing Concern in Ensuring Safe Food: From Production to Consumption*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK209107/>.
79. Lino, C., Barrias, S., Chaves, R., Adegá, F. et al. (2022). Biosensors as diagnostic tools in clinical applications. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Cancer*, 1877(3), 188726. <https://doi.org/10.1016/j.bbcan.2022.188726>.
80. Florea, L., & Diamond, D. (2022). Sensors and “The internet of biochemical things”. *Frontiers in Sensors*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsens.2022.1010212>.
81. Essington, E. A., Vezeau, G. E., Cetnar, D. P., Grandinette, E. (2024). An autonomous microbial sensor enables long-term detection of TNT explosive in natural soil. *Nature Communications*, 15, 10471. <https://doi.org/10.1101/2024.10.08.617249>.
82. Ibid.
83. Florea, L., & Diamond, D. (2022). Sensors and “The internet of biochemical things”. *Frontiers in Sensors*, 3. <https://doi.org/10.3389/fsens.2022.1010212>.
84. Ibid.
85. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
86. Krietsch Boerner, L. (2019, 15 November). Industrial Ammonia production emits more CO2 than any other chemical-making reaction. chemists want to change that. *Chemical & Engineering News*. <https://cen.acs.org/environment/green-chemistry/Industrial-ammonia-production-emits-CO2/97/i24>.
87. Lehigh University. (2018, 9 July). Electrochemically-produced ammonia could revolutionize food production. *Phys.org*. <https://phys.org/news/2018-07-electrochemically-produced-ammonia-revolutionize-food-production.html>.
88. Ahmed, M. I., Assafiri, A., Hibbert, D. B., & Zhao, C. (2023). Li-mediated electrochemical nitrogen fixation: Key advances and future perspectives. *Small*, 19(52). <https://doi.org/10.1002/sml.202305616>.
89. Koh, S., Choi, Y., Lee, I., Kim, G.-M. et al. (2022). Light-driven ammonia production by azotobacter vinelandii cultured in medium containing colloidal quantum dots. *Journal of the American Chemical Society*, 144(24), pp. 10798-10808. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c01886>.
90. Jiang, Y., Chen, C.-J., Li, K., Cui, L.-P., & Chen, J.-J. (2025). Polyoxometalates for the catalytic reduction of nitrogen oxide and its derivatives: From novel structures to functional applications. *Chemical Communications*, 61(26), pp. 4881-4896. <https://doi.org/10.1039/d5cc00632e>.

91. Ahmed, M. I., Assafiri, A., Hibbert, D. B., & Zhao, C. (2023). Li-mediated electrochemical nitrogen fixation: Key advances and future perspectives. *Small*, 19(52). <https://doi.org/10.1002/sml.202305616>.
92. Tonelli, D., Rosa, L., Gabrielli, P., Parente, A., & Contino, F. (2024). Cost-competitive decentralized ammonia fertilizer production can increase food security. *Nature Food*, 5(6), pp. 469-479. <https://doi.org/10.1038/s43016-024-00979-y>.
93. Gallucci, M. (2021). The ammonia solution: Ammonia engines and fuel cells in cargo ships could slash their carbon emissions. *IEEE Spectrum*, 58(3), pp. 44-50. <https://doi.org/10.1109/mspec.2021.9370109>.
94. Ibid.
95. Izelaar, B., Ramdin, M., Vlierboom, A., Perez-Fortes, M. et al. (2024). Techno-economic assessment of different smallscale electrochemical NH₃ production plants. *Energy & Environmental Science*, 17, 7983. <https://doi.org/10.1039/d4ee03299c>.
96. Blain, L. (2022, 30 November). World's largest green ammonia projects could clean up half the market. *New Atlas*. <https://newatlas.com/energy/largest-green-ammonia-projects/>.
97. World Economic Forum. (2023). Ammonia Industry. In *Net-Zero Industry Tracker 2023*. <https://www.weforum.org/publications/net-zero-industry-tracker-2023/ammonia-industry-eaee0d0381/>.
98. Lehigh University. (2018, July 9). Electrochemically-produced ammonia could revolutionize food production. *Phys.org*. <https://phys.org/news/2018-07-electrochemically-produced-ammonia-revolutionize-food-production.html>.
99. International Energy Agency (IEA). (2021). Executive summary. In *Ammonia Technology Roadmap*. <https://www.iea.org/reports/ammonia-technology-roadmap/executive-summary>.
100. Hussain, J., Mubarak, M., Boopathi, D., & Jayabal, R. (2025). A comprehensive review of production and utilisation of ammonia as potential fuel for compression ignition engines. *Next Sustainability*, 5, 100116. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100116>.
101. Adeniyi, A., Bello, I., Mukaila, T., Sarker, N., & Hamed, A. (2023). Trends in biological ammonia production. *Trends in Biological Ammonia Production*, 12(2), 41. <https://doi.org/10.20944/preprints202304.0543.v1>.
102. Ibid.
103. Spry, M., Westhead, O., Tort, R., Moss, B., et al. (2023). Water increases the faradaic selectivity of Li-mediated nitrogen reduction. *ACS Energy Letters*, 8(2), pp. 1230-1235. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.2c02792>.
104. Fu, X. (2023). Lithium-mediated nitrogen reduction for electrochemical ammonia synthesis: From batch to flow reactor. *Materials Today Catalysis*, 3, 100031. <https://doi.org/10.1016/j.mtcat.2023.100031>.
105. Zhou, Y., Fu, X., Chorkendorff, I., & Nørskov, J. K. (2024). Electrochemical Ammonia Synthesis: The energy efficiency challenge. *ACS Energy Letters*, 10(1), pp. 128-132. <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.4c02954>.
106. International Energy Agency (IEA). (n.d.). Critical Minerals. <https://www.iea.org/topics/critical-minerals>.

107. Masia, B., Yang, M., & Cozzani, V. (2024). Risk assessment of ammonia fueled ships: Consequences on human health of ammonia releases from damaged fuel storage tanks. *ACS Chemical Health & Safety*, 31(6), pp. 503-520. <https://doi.org/10.1021/acs.chas.4c00044>.
108. Wyer, K. E., Kelleghan, D. B., Blanes-Vidal, V., Schauburger, G., & Curran, T. P. (2022). Ammonia emissions from agriculture and their contribution to fine particulate matter: A review of implications for human health. *Journal of Environmental Management*, 323, 116285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116285>.
109. International Energy Agency (IEA). (n.d.) Ammonia Technology Roadmap: Towards more sustainable nitrogen fertilizer production. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/6ee41bb9-8e81-4b64-8701-2acc064ff6e4/AmmoniaTechnologyRoadmap.pdf>.
110. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
111. Sen, A., Oswalia, J., Yadav, S., Vachher, M., & Nigam, A. (2024). Recent trends in nanozyme research and their potential therapeutic applications. *Current Research in Biotechnology*, 7, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100205>.
112. Bilal, M., Khaliq, N., Ashraf, M., Hussain, N., (2023). Enzyme mimic nanomaterials as nanozymes with catalytic attributes. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 221, 112950. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112950>.
113. Sen, A., Oswalia, J., Yadav, S., Vachher, M., & Nigam, A. (2024). Recent trends in nanozyme research and their potential therapeutic applications. *Current Research in Biotechnology*, 7, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100205>.
114. Level Nine. (n.d.). Next-generation catalysts, inspired by nature. <https://www.levelninelabs.com/>.
115. Gust. (n.d.). Nanozyme, Inc. <https://gust.com/companies/nanozyme>.
116. Wang, T., Lai, L., Huang, Y., & Su, E. (2024). Nanozyme: An emerging tool for food packaging. *Food Control*, 155, 110104. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110104>.
117. Sen, A., Oswalia, J., Yadav, S., Vachher, M., & Nigam, A. (2024). Recent trends in nanozyme research and their potential therapeutic applications. *Current Research in Biotechnology*, 7, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2024.100205>.
118. Market Research Future. (n.d.). Nanozyme market size, share, outlook insights 2034. <https://www.marketresearchfuture.com/reports/nanozyme-market-30279>.
119. Cao, X., Liu, T., Wang, X., Yu, Y., et al. (2024). Recent advances in nanozyme-based sensing technology for antioxidant detection. *Sensors*, 24(20), 6616. <https://doi.org/10.3390/s24206616>.
120. Ibid.
121. Tagaras, N., Song, H., Sahar, S., Tong, W., et al. (2024). Safety landscape of therapeutic nanozymes and future research directions. *Advanced Science*, 11(46). <https://doi.org/10.1002/adv.202407816>.
122. Zhang, Y., Hu, X., Shang, J., Shao, W., et al. (2022). Emerging nanozyme-based multimodal synergistic therapies in combating bacterial infections. *Theranostics*, 12(13), pp. 5995-6020. <https://doi.org/10.7150/thno.73681>.

- 123.Cao, X., Liu, T., Wang, X., Yu, Y., et al. (2024). Recent advances in nanozyme-based sensing technology for antioxidant detection. *Sensors*, 24(20), 6616. <https://doi.org/10.3390/s24206616>.
- 124.Ibid.
- 125.Ibid.
- 126.Wang, P., Wang, T., Hong, J., Yan, X., & Liang, M. (2020). Nanozymes: A new disease imaging strategy. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00015>.
- 127.American National Standards Institute. (2021, 8 October). With standards, the potential of nanotechnology keeps growing. <https://www.ansi.org/standards-news/all-news/2021/10/10-8-21-with-standards-the-potential-for-nanotechnology-keeps-growing>.
- 128.Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
- 129.Ebadi, K., Chang, Y., Palieri, M., Stephens, A., et al. (2020). Lamp: Large-scale autonomous mapping and positioning for exploration of perceptually-degraded subterranean environments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 80-86. <https://doi.org/10.1109/icra40945.2020.9197082>.
- 130.Williams, L.C. (2024, 9 April). Drones, maps, and storm-tracking in the Pacific. *Defense One*.<https://www.defenseone.com/defense-systems/2024/04/drones-maps-and-storm-tracking-pacific/395574/?oref=d1-category-lander-river>.
- 131.Naratek. (2019, 22 November). Researchers develop robotic ants with Swarm Intelligence. <https://www.naratek.com/en/2019/researchers-develop-robotic-ants-swarm-intelligence>.
- 132.Yi, L., Deng, X., Yang, L. T., Wu, H., et al. (2021). Reinforcement-learning-enabled partial confident information coverage for IOT-based Bridge Structural Health Monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), pp. 3108-3119. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3028325>.
- 133.Delheimer, S. (n.d.). Using drones in agriculture and Natural Resources. National Institute of Food and Agriculture. <https://www.nifa.usda.gov/about-nifa/impacts/using-drones-agriculture-natural-resources>.
- 134.Federal Communications Commission. (2024, 21 November). FCC ADOPTS ‘C-V2X’ AUTO SAFETY SPECTRUM RULES. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-407683A1.pdf>.
- 135.Armeni, I., He, Z.-Y., Zamir, A., Gwak, J., (2019). 3D scene graph: A structure for unified semantics, 3D space, and camera. *IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. <https://doi.org/10.1109/iccv.2019.00576>.
- 136.Cadena, C. et al. (2016). Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age. *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 32, no. 6, pp. 1309-1332. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7747236>.
- 137.Feng, D., et al. (2021). Deep Multi-Modal Object Detection and Semantic Segmentation for Autonomous Driving: Datasets, Methods, and Challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 1341-1360. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9000872>.
- 138.Rajvanshi, A., et al. (2023). SayNav: Grounding Large Language Models for Dynamic Planning to Navigation in New Environments. Cornell University. <https://arxiv.org/abs/2309.04077>.

- 139.Pawar, V., Zade, N., Vora, D., Khairnar, V., et al. (2024). Intelligent Transportation System with 5G vehicle-to-everything (V2X): Architectures, vehicular use cases, emergency vehicles, current challenges, and Future Directions. *IEEE Access*, 12, 183937-183960. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3506815>.
- 140.Adnan Yusuf, S., Khan, A., & Souissi, R. (2024). Vehicle-to-everything (V2X) in the Autonomous Vehicles Domain – A Technical Review of Communication, sensor, and AI Technologies for Road User Safety. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 23, 100980. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100980>.
- 141.Stone, T. (2020, 19 November). White Paper: Australian research reveals V2x could reduce crashes by 78%. *Traffic Technology Today*. <https://www.traffictotechnologytoday.com/news/connected-vehicles-infrastructure/white-paper-australian-research-reveals-connected-talking-cars-could-save-lives.html>.
- 142.National Renewable Energy Laboratory (NREL). (n.d.). Connected and automated trucks: Transportation and Mobility Research. <https://www.nrel.gov/transportation/connected-automated-trucks.html>.
- 143.Adnan Yusuf, S., Khan, A., & Souissi, R. (2024). Vehicle-to-everything (V2X) in the Autonomous Vehicles Domain – A Technical Review of Communication, sensor, and AI Technologies for Road User Safety. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 23, 100980. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100980>.
- 144.Pawar, V., Zade, N., Vora, D., Khairnar, V., et al. (2024). Intelligent Transportation System with 5G vehicle-to-everything (V2X): Architectures, vehicular use cases, emergency vehicles, current challenges, and Future Directions. *IEEE Access*, 12, 183937-183960. <https://doi.org/10.1109/access.2024.3506815>.
- 145.Ericsson. (n.d.). 5G network coverage outlook. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/network-coverage>.
- 146.Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.
- 147.Zhao, X., Gunn, S., Christ, M., Fairoze, J., et al. (n.d.). SoK: Watermarking for AI-Generated Content. *arxiv*. <https://arxiv.org/html/2411.18479v2>.
- 148.Google DeepMind. (n.d.). SynthID. <https://deepmind.google/technologies/synthid/>.
- 149.Fernandez, P., Elshahar, H., Yalniz, I. Z., & Mourachko, A. (n.d.). Video Seal: Open and Efficient Video Watermarking. *arxiv*. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.09492>.
- 150.Bartz, D., & Hu, K. (2023, 21 July). OpenAI, Google, others pledge to watermark AI content for safety, White House says. *Reuters*. <https://www.reuters.com/technology/openai-google-others-pledge-watermark-ai-content-safety-white-house-2023-07-21/>.
- 151.Fernandez, P. et al. (2024, 11 December). Video Seal: Open and Efficient Video Watermarking. *Meta*. <https://ai.meta.com/research/publications/video-seal-open-and-efficient-video-watermarking/>.
- 152.Clegg, N. (2024, 6 February). Labeling AI-generated images on Facebook, Instagram and threads. *Meta*. <https://about.fb.com/news/2024/02/labeling-ai-generated-images-on-facebook-instagram-and-threads/>.

153. Partnership on AI. (2024, 19 November). Partnership on AI Unveils New Case Studies from Supporters of Synthetic Media Framework: Meta, Microsoft, Thorn, and Truepic. <https://partnershiponai.org/nov-2024-synthetic-media-case-studies-announcement/>.
154. Heitzenrater, C. (2024, 17 January). The case for and against AI Watermarking. Rand. <https://www.rand.org/pubs/commentary/2024/01/the-case-for-and-against-ai-watermarking.html>.
155. Cyberspace Administration of China. (2022). Provisions on the Management of Deep Synthesis of Internet Information Services. https://www.cac.gov.cn/2022-12/11/c_1672221949354811.htm.
156. European Parliament. (2023, 13 December). Generative AI and watermarking. [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2023\)757583](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2023)757583).
157. California Legislative Information. (2024). SB-942 California AI Transparency Act. (2023-2024). https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billNavClient.xhtml?bill_id=202320240SB942.
158. Wu, D. (2025, 14 March). China announces generative ai labeling to cull disinformation. Bloomberg. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2025-03-14/china-announces-generative-ai-labeling-to-cull-disinformation>.
159. EU Artificial Intelligence Act. (n.d.). The EU Artificial Intelligence Act. <https://artificialintelligenceact.eu/>.
160. EU Artificial Intelligence Act. (2025). Article 99: Penalties. <https://artificialintelligenceact.eu/article/99/>.
161. Adobe. Content Credentials overview. (2025, 22 January). <https://helpx.adobe.com/creative-cloud/help/content-credentials.html>.
162. DiBenedetto, C. (2024, 9 May). TikTok's ai-generated content is getting watermarked. Mashable. <https://mashable.com/article/tiktok-watermarking-ai-generated-content>.
163. Ai watermarking must be watertight to be effective. (2024). Nature, 634(8035), 753–753. <https://doi.org/10.1038/d41586-024-03418-x>
164. Evsutin, O., & Meshcheryakov, Y. (2020). The use of the blockchain technology and digital watermarking to provide data authenticity on a mining enterprise. Sensors, 20(12), 3443. <https://doi.org/10.3390/s20123443>.
165. Dubai Future Foundation (DFF). (2024, 11 February). Navigating 10 megatrends shaping our future in 2024. <https://www.dubaifuture.ae/navigating-10-megatrends-shaping-our-future-in-2024>.