



باسمه تعالی

کلان روندهای علم و فناوری از ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۵

معرفی گزارش

تهیه کننده: مرکز آینده پژوهی

منبع اصلی: سازمان پیمان آتلانتیک شمالی (ناتو)

تاریخ انتشار: اردیبهشت ماه ۱۴۰۴

روندهای نوظهور علمی و فناوری، نه تنها ساختارهای اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی را دگرگون می سازند بلکه تصمیم گیری های سیاسی، راهبردهای دفاعی و سبک زندگی مردم را نیز تحت تأثیر قرار می دهند. گزاره برگ حاضر، خلاصه سند «روندهای علم و فناوری از ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۵» بوده که در سال ۲۰۲۵ منتشر شده است.

۱ کلان روند اول: تشدید رقابت برای برتری فناوریانه

در سال های اخیر، سرعت بی سابقه نوآوری علمی و فناوریانه به وضوح قابل مشاهده بوده که نه تنها حوزه هایی مانند هوش مصنوعی، زیست فناوری و علوم شناختی^۲ را متحول کرده، بلکه جایگاه انسان در این روند را نیز بازتعریف کرده است. در این فضای نوین، انسان دیگر صرفاً کاربر یا ناظر فناوری نیست بلکه به **کانون** و **محور تحولات** فناوریانه تبدیل شده است. افزایش توان محاسباتی، رشد بی سابقه داده ها و پیشرفت الگوریتم ها، موجب شده هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، به ابزارهایی حیاتی در کشف دانش جدید و توسعه فناوری های نوین تبدیل شوند. دیگر مرز مشخصی میان علم و فناوری وجود ندارد. هوش مصنوعی در حال تسهیل کشف دارو، مدل سازی پدیده های طبیعی، طراحی مواد جدید و حتی پیشنهاد نظریه های علمی نوین است. این هم گرایی علم و فناوری، زمینه ساز شکل گیری نوعی «ابرشتاب دهنده نوآوری»^۳ شده است که با سرعتی فزاینده دانش را به کاربرد تبدیل می کند. در این میان، رابطه فناوری با جامعه نیز پیچیده تر شده است. فناوری ها دیگر صرفاً ابزارهایی در اختیار انسان نیستند بلکه بر شیوه تفکر، روابط اجتماعی، سیاست گذاری و اخلاق تأثیر می گذارند. از این رو، نیاز به رویکردهای چندرشته ای و بین رشته ای برای تحلیل، طراحی و مدیریت فناوری ها بیش از هر زمان دیگری احساس می شود. علوم انسانی و اجتماعی باید در کنار علوم فنی و تجربی قرار گیرند تا بتوان ابعاد مختلف تحولات فناوریانه را درک و هدایت کرد. کلان روند اول نشان می دهد که جهان در حال ورود به عصری است که در آن نوآوری علمی و فناوریانه نه تنها شتاب گرفته بلکه با **دغدغه های انسانی، اخلاقی و اجتماعی** گره خورده است. کشورهایی که بتوانند این رویکرد انسان محور را در سیاست گذاری، آموزش و زیرساخت های نوآوری خود نهادینه کنند، در آینده علمی و فناوریانه جهان نقش آفرینی اثرگذارتری خواهند داشت.

1. Science and Technology Macro Trends 2025–2045

2. Cognitive Science

۳. ابرشتاب دهنده نوآوری (Mega Innovation Accelerator): به برنامه ها، مراکز یا پروژه های بسیار بزرگ و متمرکز گفته می شود که هدفشان شتاب دهی گسترده به نوآوری های فناوریانه در مقیاس ملی یا بین المللی است.

کلان‌روند دوم: واگرایی فناوریانه و چندقطبی‌شدن نظم نوآوری جهانی

کشورها و بلوک‌های قدرت به دلایل اقتصادی، امنیتی و ژئوپلیتیکی به‌سوی مدل‌های مستقل و بومی توسعه فناوری حرکت می‌کنند. این فرایند **واگرایی فناوریانه**، موجب شکل‌گیری یک **نظم چندقطبی نوآوری** شده که در آن همکاری بین‌المللی کمرنگ‌تر و رقابت شدیدتر شده است. یکی از شاخص‌ترین مظاهر این روند، تلاش دولت‌ها برای کسب استقلال فناوریانه و خودکفایی راهبردی در حوزه‌هایی چون نیمه‌رساناها، پلتفرم‌های ابری، فناوری‌های انرژی و هوش مصنوعی است. این تحولات در مجموع به بازسازی ساختار زنجیره‌های تأمین جهانی و شکل‌گیری اکوسیستم‌های مستقل منجر شده‌اند. واگرایی فناوریانه، پیامدهای گسترده‌تری نیز دارد. یکی از این پیامدها، شکاف در استانداردهای جهانی فناوری و توسعه پلتفرم‌های موازی است. این روند، خطر شکل‌گیری یک فضای دیجیتال تکه‌تکه‌شده^۴ را در پی دارد؛ فضایی که در آن جهان دیگر بر سر فناوری‌های پایه توافق ندارد و کاربران و شرکت‌ها ناچار به فعالیت در چارچوب‌های جداگانه و ناسازگار می‌شوند. همزمان، تأثیر ژئوپلیتیکی بر علم و نوآوری نیز آشکارتر شده است. روندهایی مانند محدودسازی همکاری‌های علمی بین‌المللی، کنترل مهاجرت نخبگان و وضع مقررات سخت‌گیرانه برای انتقال داده‌ها و دانش، نشان‌دهنده سیاسی‌شدن علم و فناوری است. در چنین فضایی، دسترسی به اطلاعات علمی، منابع تحقیقاتی و نیروی انسانی متخصص، تابعی از روابط دیپلماتیک و ملاحظات امنیتی شده است. در دل این واگرایی جهانی، بازیگران جدیدی در حال ظهور هستند. کشورهایی مانند **هند، کره جنوبی، امارات متحده عربی و سنگاپور**، با سرمایه‌گذاری هدفمند و جذب شرکت‌های بین‌المللی، به قطب‌های منطقه‌ای نوآوری تبدیل شده‌اند. همچنین شرکت‌های بزرگ فناوریانه مانند **گوگل، هواوی، اپل و علی‌بابا** با در اختیار داشتن قدرت اقتصادی، اطلاعاتی و فناوری بی‌سابقه، در برخی حوزه‌ها نقش‌هایی فراتر از دولت‌ها ایفا می‌کنند.

کلان‌روند سوم: افزایش توجه به تاب‌آوری به‌عنوان پیش‌ران نوآوری

پایداری و تاب‌آوری، اکنون نه تنها به اولویت‌های سیاست‌گذاری جهانی تبدیل شده‌اند بلکه به پیش‌ران‌های اصلی در جهت‌دهی به نوآوری علمی و فناوریانه بدل شده‌اند. روندی که در آن، توسعه فناوری‌ها دیگر تنها به‌منظور افزایش بهره‌وری یا سود اقتصادی نیست بلکه برای حل مسائل وجودی بشر و تضمین آینده‌ای پایدار برای نسل‌های آینده تعریف می‌شود. در این زمینه، فناوری به‌عنوان ابزاری کلیدی برای پاسخ به بحران‌های محیطی و اجتماعی شناخته می‌شود. نوآوری‌هایی در حوزه انرژی‌های تجدیدپذیر، کشاورزی هوشمند^۵، فناوری‌های حذف کربن، بازیافت پیشرفته و معماری پایدار^۶، همگی نمونه‌هایی از تحولاتی هستند که مستقیماً در پاسخ به نیازهای زیست‌محیطی توسعه یافته‌اند. به‌عنوان مثال، پیشرفت در سلول‌های خورشیدی نسل جدید، باتری‌های با دوام بالا و شبکه‌های هوشمند انرژی، امکان‌گذار از اقتصاد فسیلی به اقتصاد سبز را فراهم کرده است. در همین حال، فناوری‌های داده‌محور و اینترنت اشیا در پایش دقیق منابع طبیعی، پیش‌بینی بلایای طبیعی و مدیریت مصرف انرژی نقش حیاتی ایفا می‌کنند. اما پایداری تنها به محیط‌زیست محدود نمی‌شود؛ ابعاد اقتصادی، اجتماعی و فناوریانه نیز دارد. از منظر اقتصادی، مدل‌های جدید کسب‌وکار مانند اقتصاد چرخشی^۷، اقتصاد مشارکتی و زنجیره‌های تأمین پایدار در حال گسترش‌اند. شرکت‌های بزرگ فناوریانه اکنون نه تنها به دنبال نوآوری محصول هستند بلکه رویکردهای نوینی برای کاهش ردپای

4. Splinternet

5. Smart Agriculture

6. Sustainable Architecture

۷. اقتصاد چرخشی (Circular Economy): یک مدل اقتصادی که در آن مواد و منابع تا حد امکان دوباره استفاده، بازیافت و به چرخه تولید برمی‌گردند و تولید پسماند و مصرف منابع جدید به حداقل می‌رسد.

کربنی، استفاده مجدد از منابع و ایجاد ارزش اجتماعی نیز اتخاذ می‌کنند. از منظر اجتماعی، تاب‌آوری جوامع در برابر بحران‌هایی چون پاندمی‌ها، مهاجرت‌های زیست‌محیطی و آشفته‌گی‌های اقتصادی، نیازمند فناوری‌هایی است که نه تنها سریع و دقیق بلکه انعطاف‌پذیر، قابل انطباق و در دسترس باشند. توسعه فناوری‌های سلامت دیجیتال، سامانه‌های هشدار سریع^۸، آموزش مجازی و زیرساخت‌های ارتباطی مقاوم، از جمله پاسخ‌های فناورانه به این نیازهاست. این فناوری‌ها، ظرفیت جوامع برای انطباق، واکنش و بازیابی در برابر شوک‌های مختلف را افزایش داده و به ایجاد جوامع مقاوم‌تر کمک می‌کنند.

کلان‌روند چهارم: بازآرایی نظام جهانی علم، فناوری و نوآوری

۴

در سال‌های اخیر، شاهد تحولی بنیادین در نظام جهانی علم، فناوری و نوآوری^۹ هستیم؛ تحولی که از یک سو به واسطه تغییرات ژئوپلیتیکی و اقتصادی در حال وقوع است و از سوی دیگر، با شتاب تحولات فناورانه و پیچیدگی مسائل جهانی پیوند خورده است. این کلان‌روند، بر بازآرایی نقش کنشگران، جغرافیای تولید دانش، مدل‌های حکمرانی و سازوکارهای تعامل بین‌المللی در حوزه علم، فناوری و نوآوری دلالت دارد. یکی از ویژگی‌های برجسته این روند، **تغییر توازن قدرت علمی و فناورانه در سطح جهانی** است. در حالی که کشورهای توسعه‌یافته غربی برای چند دهه بر حوزه‌های پیشرفته علمی و فناوری تسلط داشتند، اکنون قدرت‌های نوظهوری مانند **چین، هند، کره جنوبی، سنگاپور و برزیل** سهم قابل‌توجهی در تولید علم و نوآوری به دست آورده‌اند. در همین حال، نقش کنشگران غیردولتی در نظام نوآوری جهانی بیش از گذشته پررنگ شده است. شرکت‌های بزرگ فناوری، پلتفرم‌های دیجیتال، استارت‌آپ‌های خلاق و نهادهای مدنی بین‌المللی اکنون قدرت اثرگذاری بالایی در جهت‌دهی به روندهای نوآوری دارند. این تحولات، مرز میان حوزه عمومی و خصوصی را در حکمرانی علم و فناوری کمرنگ کرده و نیاز به مدل‌های حکمرانی نوین، منعطف و چندبازگویی را دوجندان کرده است. از دیگر ابعاد مهم این روند، افزایش نقش **دیپلماسی علمی و فناورانه** است. با افزایش چالش‌های فرامرزی مانند تغییرات اقلیم، پاندمی‌ها، امنیت غذایی و انرژی، همکاری‌های علمی بین‌المللی دیگر صرفاً یک انتخاب نیست بلکه یک ضرورت راهبردی برای همه کشورها محسوب می‌شود.

کلان‌روند پنجم: تغییر نقش انسان در زیست‌بوم فناورانه آینده

۵

در چشم‌انداز آینده‌ای که به سرعت در حال شکل‌گیری است، نقش انسان در تعامل با فناوری‌ها به‌طور بنیادین در حال دگرگونی است. انسان دیگر صرفاً کاربر یا ناظر فناوری نیست بلکه در بسیاری موارد به بخشی از سیستم فناورانه تبدیل می‌شود یا در تعامل پیچیده‌ای با آن قرار می‌گیرد. این کلان‌روند، نشانه‌ای از گذار از **رابطه یک‌سویه انسان-فناوری** به سمت یک **زیست‌بوم تعاملی و هم‌زیست میان انسان، ماشین، داده و محیط** است. در این چشم‌انداز جدید، مرز میان انسان و فناوری به شدت کمرنگ شده است. نقش انسان در کار و تولید نیز به‌صورت بنیادین در حال تغییر است. با گسترش هوش مصنوعی، ربات‌های هوشمند و اتوماسیون پیشرفته، بسیاری از فعالیت‌های تکراری و حتی تحلیلی به ماشین‌ها واگذار شده و انسان در جایگاه طراحی، مدیریت، کنترل یا تعامل با این سیستم‌ها قرار گرفته است. در این مسیر، مهارت‌هایی چون تفکر انتقادی، خلاقیت، توانایی تعامل با فناوری و هوش اجتماعی، بیش از مهارت‌های سنتی فنی اهمیت یافته‌اند. مفاهیمی چون

۸. سامانه‌های هشدار سریع (Early Warning Systems): سامانه‌هایی که با پایش و تحلیل مداوم داده‌ها، خطرات احتمالی را قبل از وقوع شناسایی و هشدار می‌دهند.

همکاری انسان و ماشین و «سیستم انسان در حلقه»^{۱۰} در طراحی سیستم‌ها و فرایندها به هنجار جدیدی تبدیل شده‌اند. همچنین معنای انسان‌بودن و مرزهای زیستی و اخلاقی آن در پرتو پیشرفت‌های فناوری، در حال بازتعریف است. از سوی دیگر، حضور فزاینده فناوری در زندگی روزمره، الگوهای رفتار انسانی، روابط اجتماعی و حتی هویت فردی را دستخوش تغییر کرده است. توسعه نظام‌های اخلاقی برای هوش مصنوعی، طراحی سامانه‌های توضیح‌پذیر^{۱۱} و رعایت اصول شفافیت و مسئولیت‌پذیری در سیستم‌های خودکار، همگی از الزامات تضمین نقش فعال و آگاهانه انسان در دنیای دیجیتال هستند.

کلان‌روند ششم: تنوع‌بخشی به مسیرهای نوآوری در مواجهه با پیچیدگی آینده

۶

پیچیدگی‌های فزاینده محیطی، فناوری، اجتماعی و اقتصادی ایجاب می‌کند که کشورها و سازمان‌ها از مدل‌های سنتی نوآوری عبور کرده و به سوی الگوهای متنوع، منعطف، تطبیقی و شبکه‌محور حرکت کنند. این دگرگونی اساسی به‌مثابه یک کلان‌روند بر ضرورت تنوع‌بخشی به مسیرهای نوآوری و طراحی سامانه‌هایی تأکید دارد که بتوانند در برابر تغییرات سریع و عدم قطعیت‌های گسترده تاب‌آوری داشته باشند. در مدل‌های سنتی، نوآوری معمولاً به صورت خطی و مبتنی بر تحقیق و توسعه سازمان‌یافته تعریف می‌شد اما در دهه‌های اخیر، ضرورت به‌کارگیری الگوهای جدیدی از نوآوری که دارای ویژگی‌هایی چون چندبخشی‌بودن، چندرشته‌ای‌بودن و چندمقیاسی‌بودن هستند، به شدت احساس می‌شود. یکی از مسیرهای نوظهور در این حوزه، نوآوری باز^{۱۲} است که بر هم‌افزایی ظرفیت‌ها، منابع، دانش و تجربیات بین کنشگران مختلف تأکید دارد. در این رویکرد، مرزهای سازمانی و بخشی کمرنگ شده و امکان تبادل ایده، سرمایه انسانی و داده میان دانشگاه‌ها، شرکت‌ها، دولت‌ها و حتی شهروندان فراهم می‌شود. مشارکت فعال شهروندان در فرایند نوآوری از طریق نوآوری جمعی^{۱۳}، علم مشارکتی و پلتفرم‌های دیجیتال مشارکتی، نمونه‌ای از این الگوی نوین است. علاوه بر این، نوآوری مسئولانه و مأموریت‌گرا^{۱۴} به‌عنوان یک جهت‌گیری راهبردی مورد توجه قرار گرفته است. در این الگو، نوآوری تنها در خدمت رشد اقتصادی یا ارتقای فناوری نیست بلکه به حل مسائل اجتماعی و زیست‌محیطی اولویت‌دار می‌پردازد. مأموریت‌هایی نظیر دستیابی به انرژی پاک، سلامت همگانی یا شهرهای پایدار، محور طراحی سیاست‌ها، سرمایه‌گذاری‌ها و مشارکت‌ها قرار می‌گیرند. این رویکرد نیازمند هم‌راستاسازی نهادهای مختلف و تعریف اهداف مشخص، قابل‌اندازه‌گیری و مشارکت‌پذیر است. از دیگر مسیرهای مهم، می‌توان به نوآوری سیستمی اشاره کرد که به جای تمرکز بر یک فناوری یا محصول خاص، به بازطراحی کل سیستم‌ها و زنجیره‌های ارزش می‌پردازد. مثلاً نوآوری در حوزه غذا تنها به فناوری کشاورزی محدود نمی‌شود بلکه شامل بازنگری در الگوهای تولید، توزیع، مصرف، زباله، و سبک زندگی نیز هست. چنین نگاهی مستلزم همکاری بین‌رشته‌ای، تحلیل سیستمی و مشارکت ذی‌نفعان متنوع است. این تحول در مسیرهای نوآوری در سطح سیاست‌گذاری نیز تغییراتی را به همراه داشته است. سیاست‌های نوآوری دیگر تنها محدود به حمایت از پژوهش و توسعه یا شرکت‌های فناور نیستند بلکه به‌سوی طراحی نهادهای، زیرساخت‌ها، ظرفیت‌سازی انسانی و تنظیم‌گری هوشمندانه برای حمایت از تنوع نوآوری حرکت کرده‌اند. سیاست‌گذاران باید اکوسیستم‌هایی پویا و یادگیرنده ایجاد کنند که در آن‌ها نوآوری بتواند در اشکال و سطوح مختلف شکل بگیرد و رشد کند.

۱۰. انسان در حلقه (Human-in-the-loop): سیستمی که در فرایند تصمیم‌گیری یا اجرای یک فناوری (مثل هوش مصنوعی یا سامانه‌های خودکار)، حضور و تأیید انسان را الزامی می‌کند. هدفش این است که کنترل نهایی و ارزیابی اخلاقی و امنیتی تصمیم‌ها به دست انسان باقی بماند.

11. explainable AI

12. Open Innovation

13. Crowdsourcing

14. Mission-Oriented Innovation