

فناوری‌های نوظهور و ضرورت بازآرایی حکمرانی، ظرفیت نهادی و سواد سیاست‌گذاری



INAES



موسسه مطالعات آمریکای شمالی و اروپا



موسسه مطالعات آمریکای شمالی و اروپا

موسسه مطالعات آمریکای شمالی و اروپا

INAES

Institute for North American and European Studies

گزارش تحلیلی: فناوری‌های نوظهور و ضرورت بازآرایی حکمرانی، ظرفیت نهادی و سواد
سیاست‌گذاری

منبع:

The Stanford Emerging Technology Review 2026, Stanford University

ترجمه و تدوین: غزاله غفوری

تاریخ نشر: مردادماه ۱۴۰۵

فناوری‌های نوظهور و ضرورت باز آرایه حکمرانی، ظرفیت نهادی و سواد سیاست‌گذاری

فناوری‌های نوظهور هیچ‌گاه تا این اندازه در تعیین مسیر تحولات اقتصادی، امنیتی، اجتماعی، علمی و حکمرانی تاثیرگذار نبوده‌اند و در عین حال، هیچ‌گاه تا این اندازه برای فهم، ارزیابی و تصمیم‌سازی دشوار نبوده‌اند. پیشرفت‌های جهشی در حوزه‌هایی مانند ChatGPT، واکسن‌های mRNA کووید-۱۹، ماهواره‌های تجاری کوچک‌مقیاس، سامانه‌های هوشمند، زیست‌فناوری‌های نوین و محاسبات کوانتومی نشان می‌دهد که جهان در مقطعی سرنوشت‌ساز از تحول فناورانه قرار گرفته است؛ مقطعی که هم ظرفیت‌هایی عظیم برای رشد، رفاه، سلامت، بهره‌وری و توان ملی ایجاد می‌کند و هم چالش‌هایی بی‌سابقه در حوزه تنظیم‌گری، امنیت، اخلاق، زنجیره تأمین، رقابت راهبردی و مشروعیت تصمیمات عمومی به همراه دارد. در چنین شرایطی، سیاست‌گذاران و مدیران عمومی بیش از هر زمان دیگر به منابع تحلیلی دقیق، در دسترس، مستمر و قابل فهم نیاز دارند تا بتوانند از میان انبوه تحولات تخصصی، روندهای واقعاً مهم، پیامدهای نهادی و گزینه‌های سیاستی را تشخیص دهند.

«مرور فناوری‌های نوظهور استنفورد ۲۰۲۶» با هدف پاسخ‌گویی به همین نیاز طراحی شده است. این گزارش با اتکا به تخصص اعضای برجسته هیئت علمی دانشگاه استنفورد در حوزه‌های مختلف علم و مهندسی، ده حوزه کلیدی فناوری را بررسی می‌کند و می‌کوشد میان دانش فنی، فهم راهبردی و ملاحظات سیاستی پیوند برقرار سازد. اهمیت این گزارش صرفاً در آن نیست که مجموعه‌ای از فناوری‌های جدید را معرفی می‌کند، بلکه در آن است که فناوری را از سطح موضوعی صرفاً فنی فراتر می‌برد و آن را به مثابه موضوعی مرتبط با قدرت ملی، رقابت ژئوپلیتیکی، رشد اقتصادی، سلامت عمومی، پایداری زیست‌محیطی، جامعه مدنی و ظرفیت حکمرانی بازتعریف می‌کند. به همین دلیل، این چارچوب برای نهادهای عمومی و تصمیم‌گیران، فقط یک گزارش فناورانه نیست، بلکه ابزاری برای ترجمه تحولات علمی به زبان تصمیم‌سازی و اقدام نهادی محسوب می‌شود.

فناوری‌های قانونی در این چارچوب شامل **هوش مصنوعی، زیست‌فناوری و زیست‌شناسی سنتزی، رمزنگاری و امنیت رایانه‌ای، فناوری‌های انرژی، علم مواد، علوم اعصاب، فناوری‌های کوانتومی، رباتیک، نیمه‌رساناها و فضا** هستند. انتخاب این حوزه‌ها از یک سو بر پایه ظرفیت علمی و تخصصی استنفورد در این زمینه‌ها انجام شده و از سوی دیگر، با دسته‌بندی‌های سیاستی و راهبردی هم‌راستا است که از سوی نهادهای سیاست‌گذاری علم و فناوری در ایالات متحده و دیگر بازیگران مهم بین‌المللی شناسایی شده‌اند. با این حال، یکی از پیش‌فرض‌های مهم این گزارش آن است که چنین دسته‌بندی‌هایی ثابت و نهایی نیستند. فناوری همواره در حال تحول است، مرزهای میان حوزه‌ها نفوذپذیر و سیال‌اند، و ممکن است پژوهش‌ها و کاربردهای مشابه در گذر زمان در قالب‌های مفهومی متفاوتی دسته‌بندی شوند. از این رو، هر گونه نگاه سیاستی به فناوری‌های نوظهور باید پویا، بازنگرانه و آماده به‌روزرسانی مستمر باشد.

این گزارش عمدتاً بر پایه فناوری سازمان یافته است و هر حوزه را به نحوی بررسی می‌کند که در هر فصل، نمایی کلی از ماهیت آن فناوری، تحولات کلیدی، روندهای شتاب‌دهنده، افق‌های پیش رو و ملاحظات سیاستی اصلی را ارائه می‌دهد. با وجود این، یکی از مهم‌ترین نکات تحلیلی گزارش آن است که *فناوری‌های نوظهور را نمی‌توان صرفاً به صورت منفک و بخشی فهم کرد*. ویژگی تعیین‌کننده لحظه کنونی، همگرایی فناورانه است. فناوری‌های مختلف به‌طور فزاینده‌ای با یکدیگر تلاقی می‌کنند، بر یکدیگر اثر می‌گذارند و در قالب اکوسیستم‌های پیچیده و چندلایه توسعه می‌یابند. این همگرایی نه تنها در سطح علم و صنعت، بلکه در سطح سیاست‌گذاری نیز پیامدهای جدی دارد؛ زیرا نظام‌های تصمیم‌گیری مبتنی بر تفکیک‌های سخت‌گیرانه بخشی، دیگر برای فهم و مدیریت چنین محیطی کفایت نمی‌کنند. از این منظر، یکی از پیام‌های بنیادین گزارش آن است که *حکمرانی*

فناوری باید از منطق بخشی، جزیره‌ای و صرفاً واکنشی فاصله بگیرد و به سمت منطق میان‌بخشی، اکوسیستمی و آینده‌نگر حرکت کند.

گزارش همچنین بر سه **تنش محوری** تأکید دارد که در سراسر فهم و حکمرانی فناوری‌های نوظهور حضور دارند. **نخست**، تنش میان به‌هنگام‌بودن و فراتاریخی‌بودن است. سیاست‌گذار باید در عین توجه به تحولات اخیر، سرفصل‌های خبری و گشایش‌های تازه، از افتادن در دام روزمرگی و هیجان‌زدگی فناورانه پرهیز کند و هم‌زمان به بنیان‌های پایدار هر حوزه، سازوکارهای درونی آن، و محدودیت‌های ساختاری آن نیز توجه داشته باشد. **دوم**، تنش میان عمق فنی و گستره پوشش است. هیچ گزارش فراگیری نمی‌تواند وارد همه جزئیات فنی شود، اما در عین حال نباید آن‌قدر سطحی باشد که به تصمیم‌سازی واقعی کمکی نکند. **سوم**، تنش میان ابعاد فنی و غیرفنی نوآوری است. نوآوری موفق فقط حاصل کشف علمی نیست؛ بلکه به امکان‌سنجی مهندسی، مقیاس‌پذیری صنعتی، تأمین مالی، زنجیره تأمین، پذیرش اجتماعی، محیط حقوقی، الگوهای مصرف، استانداردها و جهت‌گیری‌های سیاسی نیز وابسته است. به بیان دیگر، **سیاست‌گذاری فناوری زمانی مؤثر خواهد بود که نوآوری را نه به‌صورت یک فرایند صرفاً آزمایشگاهی، بلکه به‌عنوان یک فرایند اجتماعی، اقتصادی، نهادی و سیاسی درک کند.**

در حوزه **هوش مصنوعی**، تأکید بر این است که این فناوری دیگر صرفاً یک ابزار تخصصی نیست، بلکه در حال تبدیل شدن به یک فناوری زیربنایی و فراگیر است که می‌تواند در اغلب بخش‌های اقتصادی، اداری، علمی و اجتماعی نقش‌آفرین باشد؛ فناوری‌ای که همانند برق و اینترنت می‌تواند تقریباً همه حوزه‌های اقتصادی، اجتماعی و حکمرانی را متأثر سازد. پیشرفت در مدل‌های زبانی بزرگ، مدل‌های چندوجهی، سامانه‌های تولید محتوا و کاربردهای روزافزون هوش مصنوعی در علم، تولید، خدمات، امنیت و ارتباطات، نشان‌دهنده ظرفیت شتاب‌دهنده این فناوری است. در عین حال، گزارش به‌درستی هشدار می‌دهد که حتی پیشرفته‌ترین مدل‌های هوش مصنوعی همچنان با خطاهای ساختاری، آسیب‌پذیری‌های امنیتی، رفتارهای غیرقابل‌پیش‌بینی و امکان بهره‌برداری مخرب روبه‌رو هستند. از این رو، حکمرانی این حوزه صرفاً به توسعه ابزارها محدود نمی‌شود، بلکه مستلزم سرمایه‌گذاری در زیرساخت محاسباتی، استانداردهای تعامل‌پذیری، رژیم‌های مسئولیت‌پذیری، امنیت سایبری، و مشارکت فعال در شکل‌دهی به قواعد و ترتیبات بین‌المللی است. در سطح کلان، رقابت کشورها برای اثرگذاری بر استانداردها و قواعد جهانی هوش مصنوعی، این حوزه را به یکی از مهم‌ترین اهرم‌های قدرت ژئوپلیتیکی بدل کرده است.

در حوزه **زیست‌فناوری و زیست‌شناسی سنتزی**، گزارش نشان می‌دهد که این قلمرو به‌سرعت در حال تبدیل شدن به یکی از مهم‌ترین عرصه‌های نوآوری تحول‌آفرین است. زیست‌فناوری، به‌معنای استفاده از فرایندهای سلولی و زیست‌مولکولی برای تولید محصول و خدمت، و زیست‌شناسی سنتزی، به‌معنای به‌کارگیری ابزارهای مهندسی برای اصلاح یا خلق کارکردهای زیستی جدید، افق‌هایی را گشوده‌اند که تا چندی پیش در حد فرضیه به نظر می‌رسیدند. واکسن‌های mRNA تنها یک نمونه شاخص از این ظرفیت‌اند. اهمیت راهبردی این حوزه در آن است که می‌تواند به یک فناوری عام‌منظور بدل شود؛ یعنی به جای اتکا به زنجیره‌های تولید سنتی، امکان تولید طیف گسترده‌ای از محصولات را از طریق فرایندهای زیستی فراهم سازد. با وجود این، گزارش هشدار می‌دهد که اتکای بیش از حد به سرمایه‌گذاری خصوصی، ضعف در سازوکارهای مقیاس‌پذیری، و رقابت فشرده میان قدرت‌های بزرگ، به‌ویژه ایالات متحده و چین، می‌تواند آینده این حوزه را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهد. در چنین زمینه‌ای، حاکمیت زیست‌فناورانه، ظرفیت تولید داخلی، چارچوب‌های ایمنی و اخلاق، و آمادگی برای مواجهه با غافل‌گیری زیست‌فناورانه، به اولویت‌های جدی سیاستی تبدیل می‌شوند.

در حوزه **رمزنگاری و امنیت رایانه‌ای**، گزارش بر اهمیت زیرساختی این فناوری برای حیات دیجیتال معاصر تأکید دارد. رمزنگاری امروز فقط ابزار نهان‌نگاری یا محافظت از پیام‌ها نیست، بلکه بنیان امنیت ارتباطات، تجارت الکترونیک، بانکداری دیجیتال، سامانه‌های هویتی، ثبت سوابق و اعتماد در محیط‌های شبکه‌ای است. در عین حال، گزارش تصریح می‌کند که رمزنگاری به‌تنهایی برای تضمین امنیت سایبری کافی نیست و باید در کنار مجموعه‌ای گسترده‌تر از ابزارها، رویه‌ها و معماری‌های

امنیتی عمل کند. پیوند رمزنگاری با بلاک چین و کاربردهای آن در حوزه رمزارزها، مدیریت هویت، ثبت منشأ اطلاعات و زنجیره تأمین، این فناوری را از سطحی صرفاً فنی به قلمرویی با پیامدهای مالی، اقتصادی، حقوقی و حتی ژئوپلیتیکی ارتقا داده است. از این رو، تصمیم‌گیری در این زمینه دیگر تنها مسئله متخصصان امنیت اطلاعات نیست، بلکه با موضوعاتی چون تاب‌آوری مالی، اعتماد عمومی، تنظیم‌گری دارایی‌های دیجیتال، و انتخاب میان الگوهای دولتی و خصوصی پول و پرداخت نیز در ارتباط قرار می‌گیرد.

در حوزه فناوری‌های انرژی، گزارش مسئله محوری را در قالب «سه‌گانه انرژی» صورت‌بندی می‌کند: ضرورت ایجاد توازن میان مقرون‌به‌صرفه‌بودن، قابلیت اتکا و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای. این سه‌گانه نشان می‌دهد که سیاست انرژی با تضادهای ساده‌سازی‌پذیر مواجه نیست. حتی زمانی که فناوری‌های پاک در دسترس و از نظر اقتصادی جذاب‌تر می‌شوند، گذار انرژی به دلیل دشواری تغییر زیرساخت‌های موجود، درهم‌تنیدگی منافع ذی‌نفعان، پیچیدگی شبکه‌ها و نیاز به تأمین مالی بلندمدت، فرایندی زمان‌بر و دشوار باقی می‌ماند. گزارش همچنین به تغییرات اولیوی در برخی کشورها اشاره می‌کند که در آن، امنیت انرژی و استقلال راهبردی در عمل بر کربن‌زدایی تقدم یافته است. این روند نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری انرژی تنها با معیارهای فنی یا اقلیمی قابل توضیح نیست، بلکه به شدت به رقابت ژئوپلیتیکی، سیاست صنعتی، زنجیره‌های تأمین، و ظرفیت دولت‌ها برای حفظ اجماع اجتماعی و مالی وابسته است. در این زمینه، فناوری‌هایی مانند شکافت هسته‌ای، همجوشی، زمین‌گرایی و باتری‌های پیشرفته، مرزهای جدیدی را گشوده‌اند، اما بهره‌برداری از آن‌ها مستلزم سرمایه‌گذاری پایدار و نگاه راهبردی است.

در حوزه علم مواد، گزارش این بخش را یک فناوری بنیادین و توانمندساز معرفی می‌کند که پیشرفت در بسیاری از حوزه‌های دیگر بدون آن ممکن نیست. از نیمه‌رساناها و سلول‌های خورشیدی گرفته تا ساخت افزایشی، بانداژهای هوشمند، مواد قابل بازیافت و اجزای پیشرفته برای رباتیک و فضا، همگی به تحولات علم مواد وابسته‌اند. اهمیت فزاینده این حوزه در آن است که هوش مصنوعی و محاسبات پیشرفته اکنون می‌توانند فرایند کشف مواد جدید و پیش‌بینی رفتار آن‌ها را تسریع کنند. در عین حال، یکی از گره‌های اساسی در این بخش، عبور از نوآوری آزمایشگاهی به تولید و اجرای واقعی است؛ امری که نیازمند ظرفیت محاسباتی بالا، الگوهای جدید تأمین مالی و پیوند مؤثرتر میان پژوهش، صنعت و سرمایه است.

در حوزه علوم اعصاب، گزارش به یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال کم‌فهم‌ترین قلمروهای دانش بشر می‌پردازد. مغز و دستگاه عصبی، با وجود نقش محوری در ادراک، رفتار، هویت، سلامت و کیفیت زندگی، هنوز از جهات بسیاری ناشناخته‌اند. با این حال، پیشرفت‌های هم‌زمان در ژنتیک انسانی، علوم اعصاب آزمایشی، نظریه‌پردازی محاسباتی و فناوری‌های نورومهندسی، افق‌های مهمی را برای درمان بیماری‌های نورودژنراتیو، فهم بهتر اعتیاد، سالمندی مغز، و توسعه رابط‌های مغز و ماشین گشوده‌اند. با این وجود، گزارش هشدار می‌دهد که فاصله میان انتظارات عمومی و سطح واقعی دانش علمی در این حوزه بسیار زیاد است و همین شکاف می‌تواند به گسترش ادعاهای اغراق‌آمیز، روایت‌های غیرواقعی و حتی تصمیم‌گیری‌های نادرست بینجامد. از این رو، حکمرانی علوم اعصاب باید هم‌زمان بر اخلاق پژوهش، حقوق آزمودنی‌های انسانی، معیارهای مسئولیت‌پذیری، و صیانت از سلامت ادراکی فضای عمومی متمرکز باشد.

در حوزه فناوری‌های کوانتومی، هرچند این فناوری هنوز در مراحل نسبتاً ابتدایی توسعه قرار دارد، اما ظرفیت آن برای دگرگون‌سازی محاسبات، ارتباطات و حسگری بسیار جدی است. بهره‌گیری از اصولی چون برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی، امکان‌هایی را فراهم می‌کند که سامانه‌های کلاسیک از تحقق آن‌ها ناتوان‌اند. در میان این امکان‌ها، محاسبات کوانتومی می‌تواند در میان‌مدت بر رمزنگاری کلید عمومی، طراحی مواد، شیمی و برخی مسائل پیچیده بهینه‌سازی اثر بگذارد. شبکه‌سازی کوانتومی نیز ظرفیت ایجاد ارتباطات امن‌تر و محاسبات مقیاس‌پذیرتر را دارد، در حالی که حسگرهای کوانتومی هم‌اکنون در عرصه‌هایی چون تصویربرداری پزشکی، ناوبری و آشکارسازی گرانشی اثرگذاری نشان داده‌اند. پیام سیاستی اصلی در این حوزه آن است که

پژوهش بنیادی تأمین‌شده از سوی دولت همچنان پایه اصلی جهش‌های فناورانه است و بدون سرمایه‌گذاری مستمر، رهبری در این قلمرو به‌سادگی از دست خواهد رفت.

در حوزه **رباتیک**، گزارش به ماهیت میان‌رشته‌ای و ترکیبی این فناوری اشاره می‌کند. رباتیک نه یک صنعت منفرد، بلکه نقطه تلاقی پیشرفت‌ها در هوش مصنوعی، حسگرها، پردازش داده، طراحی مکانیکی، مواد، کنترل و شبیه‌سازی است. کاربردهای کنونی ربات‌ها از خطوط تولید و لجستیک تا جراحی از راه دور، عملیات امداد، شناسایی نظامی، اکتشاف فضایی و وسایل نقلیه خودران گسترده شده است. در عین حال، آینده این حوزه به کیفیت داده‌های آموزشی، توان مدل‌ها در فهم و پیش‌بینی رفتار جهان فیزیکی، و ادغام مؤثر میان شبیه‌سازی و تجربه واقعی وابسته خواهد بود. ربات‌های انسان‌نما نیز با وجود افق‌های نویدبخش در صنعت و مراقبت سلامت، همچنان با موانعی چون هزینه، پیچیدگی فنی، ایمنی، مصرف انرژی و محدودیت داده‌های باکیفیت روبه‌رو هستند. از منظر راهبردی، پیشرفت در سامانه‌های خودمختار کم‌هزینه و مقاوم در برابر اختلالات ارتباطی، الگوهای عملیات و جنگاوری مدرن را نیز در حال دگرگونی قرار داده است.

در حوزه **نیمه‌رساناها**، گزارش بر این واقعیت تأکید دارد که چیپ‌ها زیرساخت پنهان اما حیاتی جهان معاصرند. از لوازم خانگی و خودروها گرفته تا تلفن‌های هوشمند، ابررایانه‌ها، جنگنده‌ها و سامانه‌های هوش مصنوعی، همگی به نیمه‌رساناها وابسته‌اند. این صنعت دو حلقه اصلی طراحی و ساخت را در بر می‌گیرد و هر دو به سطوحی بسیار بالا از دانش، مهارت، سرمایه، تجهیزات تخصصی و زنجیره تأمین وابسته‌اند. هزینه احداث و بهره‌برداری از کارخانه‌های پیشرفته تولید چیپ بسیار بالاست و همین امر این حوزه را به یکی از سرمایه‌برترین و راهبردی‌ترین بخش‌های فناوری بدل کرده است. گزارش نشان می‌دهد که افزایش تقاضا برای هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، همراه با پیشرفت در فناوری‌های حافظه و پیوندهای پرپهنای باند مانند لینک‌های فوتونیک، محرک اصلی نوآوری در ساخت چیپ‌ها شده است. در عین حال، تمرکز جغرافیایی ظرفیت تولید، به‌ویژه وابستگی شدید به تولیدکنندگان آسیای شرقی، نیمه‌رساناها را به یکی از نقاط اصلی آسیب‌پذیری راهبردی در سطح جهانی تبدیل کرده است. از این رو، سیاست صنعتی، تنوع‌بخشی زنجیره تأمین، سرمایه‌گذاری در ساخت داخلی و درک اثرات بلندمدت رقابت فناورانه، برای هر کشور اهمیت حیاتی دارد.

در حوزه **فضا**، گزارش بر دگرگونی بنیادینی تأکید می‌کند که با ظهور اقتصاد «فضای نو» در حال وقوع است. فضا دیگر قلمرو انحصاری دولت‌ها، ماهواره‌های جاسوسی و مأموریت‌های کلاسیک اکتشافی نیست، بلکه به محیطی با حضور پررنگ شرکت‌های خصوصی، ماهواره‌های کوچک مقیاس، خدمات تجاری، زیرساخت‌های ارتباطی و رقابت فزاینده اقتصادی و راهبردی تبدیل شده است. افزایش تعداد ماهواره‌های فعال از حدود هزار مورد در سال ۲۰۱۴ به حدود یازده‌هزار مورد در سال‌های اخیر، نشانه‌ای روشن از این تحول است؛ تحولی که احتمالاً در دهه آینده با چندین برابر شدن شمار ماهواره‌ها ادامه خواهد یافت. این وضعیت فرصت‌های مهمی در ارتباطات، پایش، لجستیک درون‌فضایی و ارائه خدمات جدید ایجاد می‌کند، اما هم‌زمان، چالش‌هایی جدی از جمله زباله‌های فضایی، تراکم مداری، خطرات برخورد، نیاز به مدیریت تردد و ضرورت تدوین رژیم‌های جدید همکاری و تنظیم‌گری بین‌المللی را به همراه دارد. فضا در این معنا، نه فقط یک حوزه فناورانه، بلکه یک «ثروت عمومی جهانی» است که نیازمند حکمرانی مسئولانه و چندسطحی است.

یکی از مهم‌ترین دستاوردهای تحلیلی این گزارش، برجسته‌سازی مضامین فرابخشی است؛ مضامینی که تقریباً در تمام حوزه‌های فناوری مورد بررسی حضور دارند و بدون فهم آن‌ها، تصمیم‌گیری بخشی و موردی به‌سادگی دچار خطا می‌شود. نخستین دسته، **حکمرانی و ژئوپلیتیک فناوری‌های نوظهور** است. در این چارچوب، فناوری به‌منزله بخشی از رقابت قدرت، نفوذ سیاسی، تاب‌آوری ملی و تنظیم مناسبات بین‌المللی فهم می‌شود. سرعت بیش از حد نوآوری می‌تواند به نادیده گرفتن منافع مشروع گروه‌هایی بینجامد که از تحولات سریع آسیب می‌بینند، در حالی که کندی بیش از حد نیز ممکن است مزیت‌های پیشگامی را از میان ببرد. در عین حال، حفظ انحصار ملی بر فناوری‌ها روزبه‌روز دشوارتر شده و دولت‌ها دیگر تنها بازیگران یا اصلی‌ترین

تأمین کنندگان مالی پژوهش و توسعه نیستند. این وضعیت، بازتعریف نقش دولت، دانشگاه، بخش خصوصی و نهادهای واسط را به ضرورتی جدی تبدیل کرده است.

دومین دسته از مضامین فرابخشی، به **مسیرهای نوآوری و الگوهای پیشرفت** مربوط است. گزارش تأکید می کند که پیشرفت فناوریانه اغلب غیرخطی، پرنوسان و پیش بینی ناپذیر است. برخی حوزه ها مانند نیمه رساناها روندی نسبتاً پیوسته داشته اند، اما بسیاری از فناوری ها از خلال چرخه های آزمون و خطا، بازخورد، شکست، بازترکیب و همگرایی پیش می روند. عوامل غیرفنی مانند صرفه اقتصادی، ظرفیت تولید، امکان سنجی مهندسی، پذیرش اجتماعی و چارچوب های تنظیم گری، نقش تعیین کننده ای در سرنوشت یک فناوری دارند. در این میان، «هیاوهی تبلیغاتی» می تواند ادراکات را مخدوش کند، انتظارات غیرواقعی بسازد و تخصیص منابع را از مسیرهای اثربخش منحرف سازد. همچنین «سوگیری به نفع فناوری های مرزی و پرسرودا» ممکن است باعث کم توجهی به ظرفیت های تأثیرگذار فناوری های تثبیت شده شود. این نکته برای سیاست گذاران بسیار مهم است، زیرا نشان می دهد تصمیم گیری خوب نه با دنباله روی از موج های خبری، بلکه با تمایزگذاری میان نوآوری های واقعی، تبلیغات فناوریانه و ظرفیت های قابل اجرا حاصل می شود.

سومین دسته، **سرمایه انسانی و زیست بوم های دانش** است. گزارش به درستی یادآور می شود که سرمایه انسانی شالوده اصلی پیشرفت علمی و فناوریانه است و هیچ راهبرد بلندمدتی بدون سرمایه گذاری مستمر در آموزش، مهارت، پژوهش و تربیت نیروی انسانی متخصص موفق نخواهد شد. دانشگاه ها هم در انجام تحقیقات پرریسک و هم در تربیت نیروهای متخصص علوم، فناوری، مهندسی و ریاضیات نقشی محوری دارند. با این حال، کاهش سهم بودجه های عمومی پژوهش و توسعه، ابهام در سیاست ها، محدودیت همکاری های بین المللی و شکاف میان اثبات امکان علمی و توجیه اقتصادی، همچنان موانع بزرگی بر سر راه تبدیل دانش به محصول و قدرت ملی هستند. همان «دره مرگ» میان آزمایشگاه و بازار، یکی از نقاطی است که بسیاری از کشورها و نهادها در آن با اتلاف ظرفیت مواجه می شوند. بنابراین، الگوهای نوین تأمین مالی، نهادهای واسط، و سیاست های هوشمند برای عبور از این شکاف، اهمیت زیادی دارند.

چهارمین دسته، **زیرساخت برای نوآوری** است. نوآوری در مقیاس ملی و جهانی بدون استانداردها، زنجیره های تأمین، ظرفیت ساخت، امنیت سایبری، و قواعدی برای تعامل پذیری و اعتماد، امکان پذیر نیست. استانداردها در عین آنکه تجارت و تعامل را تسهیل و هزینه ها را کاهش می دهند، می توانند به ابزار کنترل بازار، نفوذ ژئوپلیتیکی یا حتی محدودسازی نوآوری تبدیل شوند. تولید داخلی و تاب آوری صنعتی نیز در جهانی که رقابت راهبردی و اختلال زنجیره های تأمین افزایش یافته، به مؤلفه ای حیاتی برای امنیت اقتصادی و فناوریانه بدل شده است. در این میان، امنیت سایبری به عنوان لایه ای اساسی از زیرساخت نوآوری، وظیفه حفاظت از داده ها، سامانه ها، مالکیت معنوی و یکپارچگی فرایندهای پژوهشی و صنعتی را بر عهده دارد، هرچند تقویت آن ممکن است در برخی موارد با فرهنگ باز محیط های علمی و پژوهشی در تنش قرار گیرد.

در جمع بندی تحلیلی، گزارش تصریح می کند که هر یک از این ده حوزه فناوری بر پنج حوزه اصلی سیاست عمومی تأثیر می گذارند: **رشد اقتصادی، امنیت ملی، پایداری محیطی و انرژی، سلامت و پزشکی، و جامعه مدنی**. این نکته بدان معناست که فناوری های نوظهور را نمی توان موضوعاتی حاشیه ای یا متعلق به حلقه ای محدود از متخصصان تلقی کرد. هر تحول عمده فناوریانه، به طور مستقیم یا غیرمستقیم بر توان تولید، اشتغال، زنجیره ارزش، امنیت زیرساختی، سلامت عمومی، کیفیت خدمات، فرهنگ نهادی، و رابطه دولت با جامعه اثر می گذارد. از همین رو، سیاست گذاری فناوری باید به بخشی از ظرفیت راهبردی دولت تبدیل شود، نه به امری صرفاً کارشناسی و منفصل از تصمیم سازی کلان.

از منظر سیاستی، مهم ترین چالش در این عرصه آن است که بسیاری از نهادهای عمومی هنوز با منطق های کند، بخشی و عمدتاً واکنشی عمل می کنند، در حالی که فناوری های نوظهور در محیطی با سرعت بالا، عدم قطعیت زیاد و آثار میان بخشی گسترش می یابند. این شکاف می تواند به از دست رفتن فرصت های ملی، اتلاف منابع، شکل گیری وابستگی های پرهزینه، و ناتوانی در

مدیریت ریسک‌ها منجر شود. مسئله اصلی فقط کمبود اطلاعات نیست، بلکه ضعف در ترجمه سیاستی دانش تخصصی است. حجم زیادی از اطلاعات فنی درباره فناوری‌ها وجود دارد، اما این اطلاعات اغلب به زبان اولویت‌گذاری، تصمیم‌سازی و اقدام اجرایی تبدیل نمی‌شوند. در نتیجه، مدیران و سیاست‌گذاران ممکن است یا در برابر پیچیدگی دچار تعلیق شوند، یا تحت تأثیر روایت‌های ساده‌سازی شده و گاه هیجانی قرار گیرند. بر همین اساس، یکی از نیازهای اصلی نهادهای عمومی، توسعه ظرفیت‌های واسط برای رصد، تحلیل، ترجمه و تبیین پیامدهای فناوری به زبان حکمرانی است.

برای مواجهه مؤثر با این وضعیت، ایجاد یا تقویت واحدهای تخصصی پایش فناوری در درون نهادهای عمومی ضروری است؛ واحدهایی که وظیفه آن‌ها صرفاً گردآوری اخبار فناورانه نباشد، بلکه بتوانند روندهای کلیدی را تحلیل کنند، حوزه‌های اولویت‌دار را تشخیص دهند، نقاط آسیب‌پذیری و فرصت‌های راهبردی را استخراج کنند و به‌صورت منظم، گزارش‌های تصمیم‌یار تولید نمایند. در کنار آن، تدوین نقشه اولویت‌های فناوری متناسب با نیازهای ملی و نهادی نیز اهمیت بالایی دارد، زیرا همه فناوری‌های نوظهور برای همه کشورها و همه سازمان‌ها در یک سطح از اهمیت قرار ندارند. نبود اولویت‌گذاری می‌تواند به پراکندگی منابع، موازی‌کاری، و فرسایش ظرفیت سیاستی بینجامد. همچنین، سازوکارهای مؤثر هماهنگی میان‌بخشی باید تقویت شوند، چرا که بسیاری از مسائل فناورانه در مرز میان چند وزارتخانه، چند دستگاه و چند حوزه سیاستی شکل می‌گیرند و در غیاب هماهنگی، به‌سادگی از قلم می‌افتند یا به‌صورت ناقص مدیریت می‌شوند.

از سوی دیگر، راهبرد ارتباطی در حوزه فناوری‌های نوظهور نباید به حاشیه رانده شود. در این عرصه، ارتباطات صرفاً به معنای اطلاع‌رسانی نیست، بلکه بخشی از خود حکمرانی است. نهادهای عمومی باید بتوانند میان زبان تخصصی و زبان تصمیم‌سازی پل بزنند، برای مدیران ارشد ترجمه سیاستی فراهم کنند، برای کارشناسان میانی ابزارهای تحلیلی تولید کنند، و در صورت لزوم، برای جامعه و رسانه‌ها روایت‌های دقیق، متوازن و غیرهیجانی ارائه دهند. در غیر این صورت، فضای ادراکی پیرامون فناوری‌ها به‌راحتی در اختیار اغراق، بدفهمی، هراس‌افکنی یا خوش‌بینی‌های افراطی قرار می‌گیرد. توسعه سواد فناورانه در لایه‌های مختلف بوروکراسی، طراحی سازوکارهای یادگیری نهادی، و توجه به ابعاد اخلاقی، حقوقی و اجتماعی فناوری‌ها، از الزامات چنین راهبردی است.

در نهایت، فناوری‌های نوظهور باید هم‌زمان به‌عنوان موضوع علم، عرصه نوآوری، مسئله حکمرانی، میدان رقابت راهبردی و چالش ارتباطی فهم شوند. اهمیت گزارش‌های مرجعی مانند SETR در آن است که نشان می‌دهند آینده فناوری فقط در آزمایشگاه‌ها یا شرکت‌های بزرگ تعیین نمی‌شود، بلکه در تعامل میان دانش، سرمایه، دولت، قانون، جامعه، استانداردها، زیرساخت‌ها و الگوهای قدرت شکل می‌گیرد. از این رو، هر راهبرد ملی یا نهادی در قبال فناوری‌های نوظهور باید از منطق بخشی و واکنشی فاصله بگیرد و به سمت حکمرانی هوشمند، میان‌بخشی، آینده‌نگر و متکی بر ظرفیت‌سازی نهادی حرکت کند. تنها با چنین رویکردی می‌توان از فرصت‌های عظیم فناوری‌های نوظهور بهره گرفت، مخاطرات آن‌ها را به‌صورت مسئولانه مدیریت کرد، و توان سیاست‌گذاری را با سرعت و پیچیدگی جهان فناورانه امروز هماهنگ ساخت.