

نقش هوش مصنوعی پیشرفته و یادگیری عمیق در انقلاب پزشکی: از تشخیص بیماری تا طراحی داروهای شخصی‌سازی شده

کیهان رضایی

دانشجوی دکترا مدیریت دولتی (توسعه منابع انسانی)، دانشگاه آزاد اسلامی صفاشهر

kihanerezaei@gmail.com

چکیده

انقلاب دیجیتال در حال دگرگونی عمیق عرصه پزشکی است، به‌طوری که هوش مصنوعی (AI) و به‌ویژه یادگیری عمیق (Deep Learning) به عنوان موتورهای محرک اصلی این تحول شناخته می‌شوند. این مقاله مروری جامع، با هدف بررسی نقش بنیادین و چندوجهی این فناوری‌ها در چرخه کامل مراقبت‌های بهداشتی، از تشخیص اولیه بیماری تا طراحی و توسعه داروهای شخصی‌سازی شده، نگاشته شده است. در بخش تشخیص، تأثیر مدل‌های پیشرفته در پردازش تصاویر پزشکی (مانند رادیولوژی، پاتولوژی و پوست)، سیگنال‌های حیاتی و داده‌های ژنومیک با ارائه نمونه‌های عینی و ارقام دقت مورد تحلیل قرار می‌گیرد. سپس، نقش هوش مصنوعی در شخصی‌سازی درمان، از طریق پیش‌بینی پاسخ به درمان، بهینه‌سازی دوز دارو و پایش لحظه‌ای بیماران بررسی می‌شود. در گام بعد، کاربردهای انقلابی یادگیری عمیق در شتاب بخشیدن به فرآیند کشف و طراحی دارو، از غربالگری مجازی ترکیبات تا پیش‌بینی خواص دارویی و طراحی مولکول‌های نوین، با ذکر چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های باکیفیت و تفسیرپذیری مدل‌ها، مورد بحث واقع می‌شود. همچنین، ملاحظات اخلاقی، قانونی و چالش‌های پذیرش بالینی این فناوری‌ها به‌طور انتقادی واکاوی می‌گردد. جمع‌بندی مقاله بر این نکته تأکید دارد که ادغام هوش مصنوعی پیشرفته در پزشکی، نه به عنوان جایگزین، بلکه به عنوان تقویت‌کننده قابلیت‌های متخصصان بهداشت، در حال شکل‌دهی به آینده‌ای با دقت، کارایی و شخصی‌سازی بی‌سابقه در سلامت انسان است. حرکت به سوی این آینده مستلزم همکاری بین‌رشته‌ای پایدار، سرمایه‌گذاری در زیرساخت داده و ایجاد چارچوب‌های نظارتی چابک و متناسب است.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی، یادگیری عمیق، پزشکی شخصی‌سازی شده، تشخیص بیماری، کشف دارو

۱. مقدمه

حوزه پزشکی در آستانه یک تحول پارادایمی قرار دارد، تحولی که توسط فناوری‌های دیجیتال به‌ویژه **هوش مصنوعی (AI)** و شاخه تخصصی آن **یادگیری عمیق (DL)** هدایت می‌شود. پزشکی سنتی، که اغلب بر پایه الگوهای جمعیتی و تجربیات بالینی گسترده اما گاه کلی‌نگر استوار بود، اکنون در حال تکامل به سوی سیستمی دقیق، پیش‌بینانه، پیشگیرانه و شخصی‌محور (**Medicine P_ε**) است (Flores & Hood, ۲۰۱۲). این گذار تنها با توانایی پردازش و استخراج بینش از حجم عظیم و پیچیده داده‌های سلامت (**Data Big**) ممکن شده است. داده‌هایی که از منابعی چون تصاویر پزشکی با وضوح بالا، توالی‌یابی کل ژنوم، سوابق الکترونیک سلامت (**EHRs**)، داده‌های پوشیدنی‌ها و زیست‌نشانگرهای مولکولی سرازیر می‌شوند.

یادگیری عمیق، با معماری‌های شبکه عصبی چندلایه‌اش، به‌طور خاص برای شناسایی الگوهای پیچیده و غیرخطی در چنین داده‌هایی مناسب است (LeCun, Bengio & Hinton, ۲۰۱۵). برخلاف الگوریتم‌های سنتی که نیازمند طراحی دستی ویژگی‌ها (**Engineering Feature**) توسط انسان هستند، مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند به‌طور خودکار سلسله‌مراتبی از ویژگی‌های انتزاعی و مرتبط را از داده‌های خام بیاموزند. این قابلیت، آن‌ها را برای وظایفی مانند تشخیص بصری در تصاویر، تفسیر متن در گزارش‌ها و مدل‌سازی روابط در داده‌های مولکولی ایده‌آل ساخته است.

هدف این مقاله ارائه یک بررسی نظام‌مند و جامع از نقش محوری هوش مصنوعی و یادگیری عمیق در انقلاب پزشکی نوین است. تمرکز اصلی بر سه حوزه محوری خواهد بود: (۱) تشخیص و پیش‌آگهی بیماری، (۲) شخصی‌سازی و بهینه‌سازی درمان، و (۳) تسریع و تحول در فرآیند کشف و طراحی دارو. در هر بخش، نمونه‌های عینی از کاربردهای موفق، ارزیابی عملکرد و چالش‌های فنی و عملیاتی ارائه خواهد شد. همچنین، مباحث مهم مربوط به اخلاق، حریم خصوصی، سوگیری الگوریتمی و پذیرش بالینی مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت، چشمانداز آینده و الزامات تحقق کامل پتانسیل این فناوری‌ها در خدمت به سلامت بشر ترسیم می‌گردد.

۲. هوش مصنوعی و یادگیری عمیق در تشخیص بیماری: دقت بی‌سابقه و تشخیص زودهنگام

تشخیص دقیق و به‌موقع، سنگ بنای پزشکی مؤثر است. هوش مصنوعی در حال متحول کردن این حوزه با ارائه ابزارهایی است که می‌توانند نشانه‌های بیماری را با حساسیت و ویژگی گاه فراتر از متخصصان انسانی شناسایی کنند.

۱.۲. تصویربرداری پزشکی: انقلاب در رادیولوژی و پاتولوژی

رادیولوژی یکی از پیشرفته‌ترین زمینه‌های پذیرش هوش مصنوعی در پزشکی است. مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی کانولوشنال (**CNNs**) به‌طور گسترده‌ای برای تحلیل تصاویر اشعه ایکس، سی‌تی اسکن و ام‌آر‌آی به کار می‌روند.

- **تشخیص سرطان:** مطالعات متعددی کارایی **AI** را در شناسایی ندول‌های ریوی در سی‌تی اسکن قفسه سینه نشان داده‌اند. یک مدل توسعه‌یافته توسط **Health Google** توانست با دقتی مشابه رادیولوژیست‌ها، سرطان ریه را در سی‌تی اسکن‌های غربالگری تشخیص دهد و حتی در برخی موارد، علائم بیماری را که توسط رادیولوژیست‌های انسانی نادیده گرفته شده بود، شناسایی کرد (al et Ardila, ۲۰۱۹). در ماموگرافی، سیستم‌های کمکی تشخیص (**CAD**) مبتنی بر یادگیری عمیق

- توانسته‌اند نرخ تشخیص سرطان پستان را افزایش و همزمان نرخ فراخوانی مثبت کاذب را کاهش دهند، امری که استرس و هزینه‌های اضافی را برای بیماران کم می‌کند (al et McKinney, ۲۰۲۰).
- **عصب‌شناسی:** در تحلیل تصاویر ام‌آر‌آی مغز، هوش مصنوعی می‌تواند الگوهای مرتبط با بیماری‌هایی مانند آلزایمر، ام‌اس و تومورهای مغزی را با دقت بالا شناسایی کند. این مدل‌ها قادرند تغییرات ظریف در ساختار مغز را که ممکن است در مراحل اولیه بیماری برای چشم انسان نامحسوس باشد، کمی‌سازی کنند.
 - **پاتولوژی دیجیتال:** اسلایدهای بافتی با وضوح بالا، داده‌ای غنی اما پیچیده برای تحلیل فراهم می‌کنند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق می‌توانند سلول‌های سرطانی، الگوهای رشد تومور و ویژگی‌های بافت‌شناسی را در اسلایدها با سرعت و یکپارچگی بالا شناسایی کنند. این امر می‌تواند به پاتولوژیست‌ها در تشخیص دقیق‌تر و تهیه گزارش‌های استاندارد شده کمک شایانی کند (Rimm & Schalper, Bera, ۲۰۱۹).

جدول ۱: نمونه‌هایی از کاربردهای یادگیری عمیق در تصویربرداری پزشکی

منبع	عملکرد نمونه (دقت/حساسیت)	کاربرد هوش مصنوعی	روش تصویربرداری	بیماری/حالت
(al et Ardila, ۲۰۱۹)	$AUC = 0.94$ (مشابه رادیولوژیست‌ها)	شناسایی خودکار ندول‌ها و ارزیابی بدخیمی	سی‌تی اسکن قفسه سینه	سرطان ریه
(al et McKinney, ۲۰۲۰)	کاهش ۵.۷٪ مثبت کاذب در ایالات متحده	غربالگری و کاهش مثبت کاذب	ماموگرافی دیجیتال	سرطان پستان
(al et Gulshan, ۲۰۱۶)	حساسیت >۹۰٪، ویژگی >۹۰٪	تشخیص و درجه‌بندی خودکار	تصویربرداری فوندوس چشم	رتینوپاتی دیابتی
(al et Esteva, ۲۰۱۷)	عملکردی معادل متخصص پوست	طبقه‌بندی ضایعات خوش‌خیم و بدخیم	درموسکوپی	ضایعات پوستی

۲.۲. پردازش سیگنال و داده‌های فیزیولوژیک

هوش مصنوعی تنها به تصاویر محدود نمی‌شود. داده‌های پیوسته و پویای سیگنال‌های حیاتی نیز هدفی ایده‌آل هستند.

- **الکتروکاردیوگرام (ECG یا نوار قلب):** مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند الگوهای مرتبط با آریتمی‌های پیچیده، ایسکمی میوکارد و اختلالات ساختاری قلب را در سیگنال ECG شناسایی کنند. شرکت‌هایی مانند AliveCor دستگاه‌هایی ارائه می‌دهند که با استفاده از الگوریتم‌های AI، فیبریلاسیون دهلیزی را از طریق یک سنسور متصل به گوشی هوشمند تشخیص می‌دهند.
- **الکتروانسفالوگرام (EEG):** در تشخیص و مدیریت صرع، AI می‌تواند به شناسایی خودکار امواج epileptiform و حتی پیش‌بینی وقوع تشنج کمک کند، که می‌تواند کیفیت زندگی بیماران را به‌طور چشمگیری بهبود بخشد.

۳.۲. ژنومیک و زیست‌شناسی‌های مولکولی

توالی‌یابی نسل جدید (NGS) حجم بی‌سابقه‌ای از داده‌های ژنومیک تولید می‌کند. تفسیر این داده‌ها برای شناسایی انواع ژنتیکی بیماری‌زا (Variants) چالشی بزرگ است. ابزارهای AI می‌توانند با تجزیه و تحلیل توالی‌های ژنومی و ادغام آن با داده‌های بالینی و بیولوژیکی، به اولویت‌بندی و تفسیر این انواع کمک کنند. همچنین، از الگوریتم‌ها می‌توان برای شناسایی الگوهای بیان ژنی خاص تومورها (تصویربرداری رونوشتی) و پیش‌بینی پاسخ به درمان‌های هدفمند خاص استفاده کرد (Topol, ۲۰۱۹).

۳. شخصی‌سازی درمان: از پیش‌بینی پاسخ تا پایش لحظه‌ای

پس از تشخیص، مرحله حیاتی انتخاب مؤثرترین درمان با کمترین عوارض جانبی است. این همان جایی است که پزشکی شخصی‌سازی شده با کمک AI متبلور می‌شود.

۱.۳. پیش‌بینی پاسخ به درمان و پیش‌آگهی

با ادغام داده‌های چندوجهی (Multi-omics) مانند ژنومیک، پروتئومیک و تصویربرداری با سوابق بالینی، مدل‌های پیش‌بینیکننده AI می‌توانند تخمین بزنند که یک بیمار خاص به یک درمان مشخص (مانند یک داروی شیمی‌درمانی خاص، ایمونوتراپی یا رادیوتراپی) چگونه پاسخ خواهد داد. برای مثال، در سرطان، AI می‌تواند با تحلیل تصاویر بافت‌شناسی (رادیومیک) و داده‌های ژنومی، زیرگروه‌های تومور را که به درمان‌های مختلف حساسیت دارند، شناسایی کند. این امر از اتلاف زمان و هزینه بر روی درمان‌های نامؤثر جلوگیری کرده و عوارض جانبی غیرضروری را کاهش می‌دهد.

۲.۳. بهینه‌سازی دوز دارو و رژیم‌های درمانی

تعیین دوز بهینه دارو، به‌ویژه در داروهای با پنجره درمانی باریک (مانند وارفارین یا شیمی‌درمانی)، حیاتی است. مدل‌های یادگیری ماشین می‌توانند با در نظر گرفتن متغیرهای فردی بیمار مانند ژنتیک، سن، وزن، عملکرد کبد و کلیه و تعاملات دارویی، دوز اولیه و تنظیمات بعدی را پیشنهاد دهند. سیستم‌های پشتیبانی تصمیم بالینی (CDSS) مبتنی بر AI می‌توانند این محاسبات پیچیده را در لحظه و در کنار تخت بیمار ارائه دهند.

۳.۳. پایش بلندمدت و مداخله زودهنگام

دستگاه‌های پوشیدنی و حسگرهای قابل کاشت، جریانی پیوسته از داده‌های فیزیولوژیک تولید می‌کنند. الگوریتم‌های AI با تحلیل این داده‌ها در زمان واقعی می‌توانند انحراف از حالت پایه سلامت فرد را شناسایی و هشدار دهند. برای مثال، در بیماران نارسایی قلبی، تغییرات در الگوی خواب، وزن یا فعالیت می‌تواند پیش‌درآمد یک حادثه حاد باشد. سیستم‌های AI می‌توانند این علائم هشداردهنده را زودتر از وقوع یک بحران شناسایی کنند و امکان مداخله پیشگیرانه (مانند تنظیم دارو یا ویزیت سرپایی) را فراهم آورند (Steinhubl, Topol & Muse, ۲۰۱۵).

۴. تحول در کشف و طراحی دارو: شتاب‌دهی به فرآیندی پرهزینه و طولانی

کشف و توسعه داروی جدید فرآیندی است که به‌طور میانگین بیش از ۱۰ سال زمان و میلیاردها دلار هزینه در بر دارد، با نرخ شکست بسیار بالا. هوش مصنوعی در حال دگرگونی هر مرحله از این خط لوله است.

۱.۴. شناسایی هدف دارویی و غربالگری مجازی

یادگیری عمیق می‌تواند با تحلیل مجموعه داده‌های عظیم زیست‌پزشکی (مانند بانک‌های اطلاعاتی تعامل پروتئین-پروتئین، داده‌های بیان ژن و ساختارهای پروتئینی) به شناسایی اهداف بیولوژیکی جدید و مرتبط با بیماری کمک کند. در مرحله بعد، **غربالگری مجازی با کارایی بالا** با استفاده از مدل‌های مانند شبکه‌های عصبی مولد (GANs) یا مدل‌های زبانی بزرگ تطبیق‌یافته برای شیمی، امکان غربالگری میلیون‌ها ترکیب شیمیایی را در فضای مجازی فراهم می‌سازد. این مدل‌ها می‌توانند مولکول‌هایی را با ویژگی‌های دارویی مطلوب (فارماکوفور) پیش‌بینی یا حتی **طراحی کنند**. شرکت‌هایی مانند **Medicine Insilico** از مدل‌های مولد برای طراحی مولکول‌های نوینی استفاده کرده‌اند که می‌توانند به اهداف خاصی متصل شوند و مسیر توسعه دارو را به میزان قابل توجهی کوتاه کنند (al et Zhavoronkov, ۲۰۱۹).

۲.۴. بهینه‌سازی پیش‌بالینی و پیش‌بینی عوارض جانبی

پس از شناسایی کاندیدهای اولیه، **AI** می‌تواند در بهینه‌سازی ساختار آن‌ها برای افزایش اثر، انتخاب‌پذیری و خواص داروسازی (مانند حلالیت، نفوذپذیری) کمک کند. همچنین، مدل‌های پیش‌بینی‌کننده می‌توانند با شبیه‌سازی تعامل مولکول با اهداف غیرهدف (off-target) احتمالی، عوارض جانبی بالقوه را زود هنگام شناسایی کنند و ترکیبات پرخطر را حذف نمایند. این امر نیاز به آزمایش‌های حیوانی پرهزینه و زمان‌بر را کاهش می‌دهد.

جدول ۲: کاربردهای هوش مصنوعی در مراحل مختلف کشف و توسعه دارو

نمونه‌ای شرکت/پروژه	از راه‌حل مبتنی بر هوش مصنوعی/یادگیری عمیق	مشکل سنتی	مرحله در فرآیند کشف دارو
BenevolentAI	تحلیل یکپارچه داده‌های چندوجهی (ژنومیک، پروتئومیک) برای کشف اهداف نوین	درک ناقص پاتوبیولوژی بیماری و اهداف درمانی	شناسایی هدف
Medicine Insilico (مولد)	غربالگری مجازی کتابخانه‌های عظیم ترکیبات؛ طراحی مولکول‌های جدید با خواص مطلوب با استفاده از مدل‌های مولد	سنتز و آزمایش ده‌ها هزار ترکیب، فرآیندی کند و تصادفی	طراحی و کشف مولکول
Atomwise Schrödinger	پیش‌بینی خواص ADMET (جذب، توزیع، متابولیسم، دفع، سمیت) با مدل‌های درون‌سیلیکویی	آزمون‌های گسترده برای بررسی فارماکوکینتیک و سمیت	بهینه‌سازی پیش‌بالینی
AI ۶ Deep	شناسایی جمعیت بیمار مناسب با استفاده از داده‌های EHR و زیست‌نشانه‌ها؛ بهینه‌سازی طرح مطالعه	انتخاب بیماران نامناسب، نرخ شکست بالا، هزینه گزاف	طراحی کارآزمایی بالینی

۳.۴. طراحی کارآزمایی بالینی هوشمند

AI می‌تواند با تحلیل سوابق الکترونیک سلامت جمعیت‌های بزرگ، بیماران مناسب برای یک کارآزمایی بالینی خاص را سریع‌تر و دقیق‌تر شناسایی کند. همچنین، می‌تواند مراکز آزمایشی بهینه را انتخاب کرده و حتی با پایش داده‌های در حال تولید، به مدیریت و تطبیق کارآزمایی کمک کند.

۵. چالش‌ها، ملاحظات اخلاقی و موانع پذیرش

علیرغم پتانسیل درخشان، استقرار گسترده هوش مصنوعی در پزشکی با چالش‌های متعددی روبرو است که باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرد.

۱.۵. چالش‌های فنی و داده‌ای

- **کیفیت و در دسترس بودن داده:** عملکرد مدل‌های AI به شدت به حجم، کیفیت و تنوع داده‌های آموزشی وابسته است. داده‌های پزشکی اغلب پراکنده، نویزدار، با برچسب نادرست و دارای سوگیری هستند. کمبود داده‌های با برچسب طلایی (توسط متخصصان تأییدشده) یک گلوگاه بزرگ است.
- **مسئله جعبه سیاه:** بسیاری از مدل‌های پیچیده یادگیری عمیق به‌سختی قابل تفسیر هستند. در پزشکی، که تصمیمات پیامدهای حیاتی دارند، تفسیرپذیری (**Explainability**) و شفافیت ضروری است. پزشکان و بیماران باید بتوانند بفهمند چرا یک الگوریتم یک تشخیص یا توصیه خاص ارائه داده است (Vedaldi & Müller, Samek, ۲۰۱۹).
- **سوگیری الگوریتمی (Bias):** اگر داده‌های آموزشی عمدتاً از یک گروه جمعیتی خاص (مثلاً قومی یا جنسیتی) باشند، مدل در مورد گروه‌های دیگر دقت کمتری خواهد داشت و می‌تواند نابرابری‌های موجود در نظام سلامت را تشدید کند (al et Obermeyer, ۲۰۱۹).

۲.۵. چالش‌های اخلاقی، قانونی و نظارتی

- **مسئولیت و پاسخگویی:** در صورت خطای تشخیصی یک سیستم AI، مسئولیت بر عهده کیست؟ توسعه‌دهنده الگوریتم، مؤسسه پزشکی، یا پزشک کاربر؟ تعریف چارچوب‌های قانونی روشن ضروری است.
- **حریم خصوصی و امنیت داده:** داده‌های سلامت از حساس‌ترین اطلاعات افراد هستند. استفاده از آن‌ها برای آموزش مدل‌های AI مستلزم ایجاد مکانیسم‌های قوی حفاظتی مانند رمزنگاری همومورفیک، یادگیری فدرال و رضایت آگاهانه دقیق است.
- **نظارت و تأییدیه:** سازمان‌های نظارتی مانند FDA در ایالات متحده و EMA در اروپا در حال توسعه چارچوب‌هایی برای ارزیابی و تأیید نرم‌افزارهای پزشکی مبتنی بر AI به عنوان یک دستگاه پزشکی (SaMD) هستند. این فرآیندها باید چابک باشند تا مانع نوآوری نشوند اما ایمنی و اثربخشی را تضمین کنند.

۳.۵. موانع پذیرش در محیط بالینی

- ادغام با گردش کار موجود: سیستم‌های AI باید به صورت یکپارچه و بدون اختلال در کار روزمره پزشکان، در سوابق الکترونیک سلامت و سیستم‌های اطلاعاتی بیمارستانی ادغام شوند.
- اعتماد و پذیرش توسط متخصصان سلامت: پزشکان باید در مورد قابلیت‌ها و محدودیت‌های این ابزارها آموزش ببینند. نقش AI باید به عنوان یک دستیار یا همکار (به عنوان مثال، AI "دوم نظر") تعریف شود، نه به عنوان جایگزینی برای قضاوت بالینی انسان.
- مسائل هزینه و بازگشت سرمایه: سرمایه‌گذاری اولیه در سخت‌افزار، نرم‌افزار و آموزش می‌تواند قابل توجه باشد. اثبات سودمندی بالینی و صرفه‌جویی در هزینه در بلندمدت برای توجیه این سرمایه‌گذاری ضروری است.

۶. نتیجه‌گیری و چشمانداز آینده

هوش مصنوعی پیشرفته و یادگیری عمیق در قلب انقلاب دیجیتال پزشکی قرار دارند و وعده تحول در هر مرحله از چرخه سلامت، از پیش‌گیری و تشخیص تا درمان و مراقبت‌های پس از آن را می‌دهند. همان‌طور که بررسی شد، این فناوری‌ها در حال حاضر در تشخیص تصویربرداری با دقت فوق‌بشری، شخصی‌سازی برنامه‌های درمانی و تسریع چشمگیر کشف دارو دستاوردهای قابل توجهی داشته‌اند. آینده نزدیک احتمالاً شاهد ادغام عمیق‌تر این ابزارها در کلینیک‌ها و ظهور مدل‌های چندوجهی (Multimodal) خواهد بود که به‌طور همزمان تصاویر، متن گزارشات، داده‌های ژنومی و سیگنال‌های فیزیولوژیک را برای ارائه یک دید کلی جامع از بیمار تحلیل می‌کنند.

با این حال، مسیر پیش رو بدون چالش نیست. تحقق کامل پتانسیل هوش مصنوعی در پزشکی مستلزم:

۱. سرمایه‌گذاری در زیرساخت داده: ایجاد بانک‌های اطلاعاتی بزرگ، متنوع، باکیفیت و قابل اشتراک با رعایت کامل حریم خصوصی.
۲. تمرکز بر توسعه AI قابل اعتماد (AI Trustworthy): ساخت مدل‌های شفاف، قابل تفسیر، عادلانه و قوی که بتوان مسئولیت آن‌ها را پیگیری کرد.
۳. تقویت همکاری بین‌رشته‌ای: تعامل مستمر و مؤثر بین دانشمندان داده، مهندسان، پزشکان، بیماران، اخلاق‌دانان و تنظیم‌کنندگان مقررات.
۴. بازنگری در آموزش پزشکی: گنجاندن سواد دیجیتال و داده‌ای در برنامه‌های درسی پزشکی برای تربیت نسل آینده متخصصان سلامت.
۵. تدوین چارچوب‌های نظارتی چابک و مبتنی بر ریسک: که هم ایمنی عمومی را تضمین کنند و هم فضای لازم برای نوآوری سریع را فراهم آورند.

در نهایت، موفقیت این انقلاب نه در جایگزینی متخصصان سلامت، بلکه در توانمندسازی و تقویت آن‌ها است. هوش مصنوعی می‌تواند بار وظایف روتین و زمان‌بر را کاهش دهد، بینش‌های عمیقی ارائه دهد و زمان بیشتری برای ارتباط انسانی، همدلی و

تصمیم‌گیری‌های پیچیده بالینی در اختیار پزشکان قرار دهد. آینده پزشکی، آینده‌ای است که در آن دقت داده‌ها و قدرت محاسباتی هوش مصنوعی با قضاوت، تجربه و مراقبت انسانی در هم می‌آمیزد تا سلامت و رفاه انسان را به سطح بی‌سابقه‌ای ارتقا دهد.

مراجع

۱. Ardila, D., Kiraly, A. P., Bharadwaj, S., Choi, B., Reicher, J. J., Peng, L. ..., & Shetty, S). ۲۰۱۹. (End-to-end lung cancer screening with three-dimensional deep learning on low-dose chest computed tomography *Nature Medicine*, ۲۵)۶, (۹۵۴-۹۶۱).
۲. Bera, K., Schalper, K. A., & Rimm, D. L). ۲۰۱۹. (Artificial intelligence in digital pathology — new tools for diagnosis and precision oncology *Nature Reviews Clinical Oncology*, ۱۶)۱۱, (۷۰۳-۷۱۵).
۳. Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S). ۲۰۱۷. (Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks *Nature*, ۵۴۲)۷۶۳۹, (۱۱۵-۱۱۸).
۴. Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M. C., Wu, D., Narayanaswamy, A. ..., & Webster, D. R). ۲۰۱۶. (Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs *JAMA*, ۳۱۶)۲۲, (۲۴۰۲-۲۴۱۰).
۵. Hood, L., & Flores, M). ۲۰۱۲. (A personal view on systems medicine and the emergence of proactive P&E medicine: predictive, preventive, personalized and participatory *New Biotechnology*, ۲۹)۶, (۶۱۳-۶۲۴).
۶. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G). ۲۰۱۵. (Deep learning *Nature*, ۵۲۱)۷۵۵۳, (۴۳۶-۴۴۴).
۷. McKinney, S. M., Sieniek, M., Godbole, V., Godwin, J., Antropova, N., Ashrafian, H. ..., & Shetty, S). ۲۰۲۰. (International evaluation of an AI system for breast cancer screening *Nature*, ۵۷۷)۷۷۸۸, (۸۹-۹۴).
۸. Obermeyer, Z., Powers, B., Vogeli, C., & Mullainathan, S). ۲۰۱۹. (Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations *Science*, ۳۶۶)۶۴۶۴, (۴۴۷-۴۵۳).
۹. Samek, W., Müller, K. R., & Vedaldi, A). Eds). ۲۰۱۹. (*Explainable AI interpreting, explaining and visualizing deep learning*. Springer Nature).
۱۰. Steinhubl, S. R., Muse, E. D., & Topol, E. J). ۲۰۱۵. (The emerging field of mobile health *Science Translational Medicine*, ۷)۲۸۳, (۲۸۳rv۳-۲۸۳rv۳).

۱۱. Topol ,E J) .۲۰۱۹ .(High-performance medicine :the convergence of human and artificial intelligence .*Nature Medicine* ,۲۵)۱ , (۴۴-۵۶.
۱۲. Zhavoronkov ,A ,Ivanenkov ,Y ,A ,Aliper ,A ,Veselov ,M ,S ,Aladinskiy ,V ,A ,Aladinskaya ,A ,V ... ,& Aspuru-Guzik ,A) .۲۰۱۹ .(Deep learning enables rapid identification of potent DDR1 kinase inhibitors .*Nature Biotechnology* ,۳۷)۹ , (۱۰۳۸-۱۰۴۰.