

کاربردهای هوش مصنوعی در تشخیص و درمان ناباروری: مرور روایی

دکتر ملیحه عافیت^۱، دینا آبادی باویل^{۲*}

۱. دانشیار گروه زنان و زایمان، مرکز تحقیقات حمایت از خانواده و جوانان جمعیت، دانشکده پزشکی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

۲. دانشجوی دکترای بهداشت باروری، مرکز تحقیقات مراقبت‌های پرستاری و مامایی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران.

۳. گروه پرستاری و مامایی، واحد علوم پزشکی مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۰

خلاصه

مقدمه: با رشد فناوری‌های نوین، استفاده از هوش مصنوعی (AI) در تشخیص و درمان ناباروری افزایش یافته است؛ اما شواهد موجود، پراکنده و ناهمگون هستند و اغلب مطالعات، مرور نظام‌مند جامعی ارائه نکرده‌اند. مطالعات قبلی نشان داده‌اند که مدل‌های AI در پیش‌بینی موفقیت IVF، ارزیابی جنین و تحلیل اسپرم، عملکرد بهتری از روش‌های سنتی دارند، با این حال نتایج یکپارچه نشده و نیاز به مرور منظم وجود دارد. هدف این مطالعه، مرور نظام‌مند کاربردهای AI در ناباروری و تحلیل دقت، مزایا و محدودیت‌های این فناوری است.

روش کار: در این مطالعه مرور روایی که مطابق PRISMA 2020 انجام گرفت، جستجو در پایگاه‌های PubMed، Scopus، Web of Science، Google Scholar و Cochrane طی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ انجام شد. از بین ۴۳۲۰ مقاله شناسایی شده، ۷۰ مطالعه پس از غربالگری و ارزیابی کیفیت با ابزار QUADAS-2 وارد تحلیل نهایی شدند. داده‌ها به صورت مرور روایی سنتز گردید.

یافته‌ها: مدل‌های هوش مصنوعی در حوزه‌های مختلف ناباروری، کارایی قابل توجهی نشان داده‌اند. در پیش‌بینی موفقیت لقاح آزمایشگاهی (IVF)، دقت مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین در مطالعات مختلف بین ۹۲-۷۵٪ گزارش شده است. همچنین در ارزیابی کیفیت جنین با استفاده از تصاویر تایم‌لپس، مدل‌های یادگیری عمیق در برخی موارد عملکردی بهتر از ارزیابی‌های انسانی نشان داده‌اند. در تحلیل اسپرم نیز الگوریتم‌های بینایی ماشین توانسته‌اند در تشخیص ناهنجاری‌های مورفولوژیک و شکست DNA دقت بیشتری نسبت به روش‌های دستی ارائه دهند. علاوه بر این، مدل‌های یادگیری ماشین در شخصی‌سازی پروتکل‌های درمانی، به‌ویژه در تعیین دوز گنادوتروپین و پیش‌بینی پاسخ تخمدانی، نتایج امیدوارکننده‌ای داشته‌اند. در زمینه تشخیص علل ناباروری زنان نیز دقت مدل‌های هوش مصنوعی در شناسایی اختلالاتی مانند سندرم تخمدان پلی‌کیستیک برخی ناهنجاری‌های هورمونی در محدوده ۸۸-۷۰٪ گزارش شده است.

نتیجه‌گیری: هوش مصنوعی می‌تواند دقت تشخیص، انتخاب جنین و مدیریت درمان‌های کمک‌باروری را به‌طور قابل توجهی بهبود دهد. با این حال، چالش‌هایی مانند سوگیری داده‌ها، نیاز به پایگاه‌های داده استاندارد و اعتبارسنجی بالینی گسترده همچنان باقی است. تحقیقات آینده باید بر بهبود شفافیت الگوریتم‌ها و توسعه مدل‌های قابل‌اعتمادتر تمرکز کند.

کلمات کلیدی: انتخاب جنین، ناباروری، هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، ART، IVF

* نویسنده مسئول مکاتبات: دینا آبادی باویل؛ مرکز تحقیقات مراقبت‌های پرستاری و مامایی، دانشگاه علوم پزشکی مشهد، مشهد، ایران. تلفن: ۳۳۲۸۰۲۶۰-

۰۵۱؛ پست الکترونیک: dinaabadi.bavil@gmail.com

مقدمه

ناباروری، یکی از چالش‌های فزاینده سلامت عمومی در جهان معاصر است که حدود ۱۵-۱۰٪ از زوجین را در سنین باروری تحت تأثیر قرار می‌دهد (۱). این وضعیت می‌تواند منجر به مشکلات روانی، اجتماعی و اقتصادی قابل توجهی برای زوجین شود و کیفیت زندگی آن‌ها را کاهش دهد (۱). در پاسخ به این بحران، فناوری‌های کمک‌باروری (ART)^۱ مانند لقاح آزمایشگاهی (IVF)^۲، تزریق داخل سیتوپلاسمی اسپرم (ICSI)^۳ و لقاح با گامت اهدایی توسعه یافته‌اند (۲). با این حال، نرخ موفقیت این روش‌ها هنوز نسبتاً پایین باقی‌مانده و به‌طور متوسط در حدود ۳۰٪ در هر چرخه IVF گزارش شده است. تقاضای جهانی برای فناوری‌های کمک باروری، میلیون‌ها نفر در سنین باروری را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین، پروسه درمانی IVF، طولانی بوده و از نظر مالی برای بیمار مشکل‌ساز خواهد بود؛ از این‌رو، نیاز به رویکردهای نوین برای بهبود تشخیص، پیش‌آگهی و درمان ناباروری به‌شدت احساس می‌شود. در سال‌های اخیر علوم داده‌کاوی و یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری قدرتمند در سیستم‌های تشخیص در کاربردهای مختلف پزشکی، مورد توجه قرار گرفته‌اند (۳-۵). در بررسی اثرگذاری عوامل مختلف بر کیفیت اسپرم مردان، داده‌کاوی وظیفه دسته‌بندی داده‌ها را انجام می‌دهد. به این منظور مجموعه داده‌هایی از افراد مختلف جمع‌آوری و در مورد هر فرد، عادات زندگی و وضعیت سلامتی او نیز مشخص می‌گردد (۶).

در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی (AI)^۴ و به‌ویژه زیرشاخه‌هایی مانند یادگیری ماشین (ML)^۵ و یادگیری عمیق (DL)^۶، توانسته‌اند با تحلیل حجم عظیمی از داده‌های بالینی و تصویری، الگوریتم‌هایی با دقت بالا برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی درمان ناباروری توسعه دهند (۷). کاربردهای AI در این حوزه شامل:

پیش‌بینی احتمال موفقیت IVF، انتخاب جنین و اسپرم بهینه، طبقه‌بندی کیفیت جنین، تحلیل تصاویر زمان‌گریز^۷ انکوباتورها، شناسایی عوامل خطر ناباروری و شخصی‌سازی درمان‌های دارویی است (۸). هوش مصنوعی با توانایی خود در تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های گسترده و کشف الگوهایی که به راحتی توسط انسان قابل تشخیص نیستند، فرصتی بی‌سابقه برای تقویت جنبه‌های مختلف IVF ارائه می‌کند. ادغام هوش مصنوعی در این زمینه فقط یک مفهوم آینده‌نگر نیست، بلکه واقعیتی است که چشم‌انداز درمان‌های باروری را تغییر می‌دهد (۹-۱۱).

مطالعات متعددی به بررسی بکارگیری هوش مصنوعی در تحلیل تصاویر جنینی پرداخته‌اند که با دقت بالاتری نسبت به ارزیابی انسانی، کیفیت جنین را پیش‌بینی کرده‌اند. همچنین، الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانسته‌اند بر اساس اطلاعات بالینی مانند سن، شاخص توده بدنی^۸، آنتی‌مولرین هورمون^۹، تعداد فولیکول‌ها و پارامترهای اسپرم، مدل‌هایی برای پیش‌بینی پاسخ به درمان یا احتمال بارداری ایجاد کنند (۱۲). این روند، نویدبخش تغییرات انقلابی در شیوه مدیریت ناباروری است. مطالعات گذشته دقت الگوریتم‌های یادگیری عمیق در انتخاب جنین را بیشتر از ارزیابی انسانی نشان داده‌اند. پژوهش‌هایی در سال‌های اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های ML می‌توانند با استفاده از داده‌های بالینی، شانس IVF را با دقت ۷۵٪-۹۰٪ پیش‌بینی کنند. مطالعاتی وجود دارد که ثابت می‌کند تحلیل خودکار اسپرم با AI در تشخیص شکست DNA دقیق‌تر از روش‌های دستی است. با وجود مطالعات متعدد، شواهد موجود پراکنده، نامنسجم و از نظر روش‌شناسی بسیار متنوع هستند و مرور نظام‌مند جامعی که کل حوزه را پوشش دهد، محدود است. بسیاری از مطالعات فقط یک بخش از فرآیند باروری (مثلاً فقط جنین یا فقط اسپرم) را بررسی کرده‌اند و امکان انجام مرور سیستماتیک و متاآنالیز وجود ندارد.

¹ Assisted Reproductive Technology

² In Vitro Fertilization

³ Intra Cytoplasmic Sperm Injection

⁴ Artificial intelligence

⁵ Machine learning

⁶ Deep learning

⁷ time-lapse

⁸ Body mass index

⁹ AntiMüllerian Hormone

سردبیر، چکیده کنفرانس‌ها، مطالعات غیرمرتبط با ناباروری، مقالات فاقد داده عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی و انجام مطالعات بر روی حیوانات بود. به‌منظور انتخاب مقالات، ابتدا تمام نتایج وارد نرم‌افزار EndNote شدند، سپس با حذف موارد تکراری، عناوین و چکیده‌ها بررسی شدند. در نهایت، مقالات واجد شرایط به‌صورت تمام‌متن مرور شدند. فرآیند انتخاب بر اساس نمودار جریان PRISMA گزارش شد.

کیفیت مطالعات وارد شده با استفاده از ابزار QUADAS-2 توسط دو پژوهشگر مستقل ارزیابی شدند. برای هر مقاله اطلاعات شامل: نام نویسنده و سال انتشار، نوع مطالعه (Retrospective, In silico, Prospective)، نوع مدل هوش مصنوعی، کاربرد مدل (تشخیص، پیش‌بینی، درمان، انتخاب جنین، آنالیز اسپرم) و جمعیت مورد مطالعه استخراج گردید.

جستجوی دستی نیز با بررسی منابع تمامی مقالات مرتبط با موضوع انجام شد. بر اساس جستجوی اولیه در پایگاه داده‌های موردنظر، ۴۳۲۰ مقاله مرتبط احتمالی شناسایی و به نرم‌افزار اندنوت انتقال داده شدند. ۴۱۵۰ مطالعه که در پایگاه‌های مختلف تکرار شده بودند، حذف شدند. در مرحله بعد از ۲۱۰ مقاله باقی‌مانده، ۱۸۰ مقاله پس از انجام غربالگری مورد بررسی قرار گرفتند. ۱۱۰ مطالعه از طریق مطالعه عنوان و چکیده بر اساس معیارهای ورود و خروج حذف شدند؛ به این ترتیب ۷۰ مقاله که تا ۲۰۲۵ منتشر شده بودند، وارد بررسی نهایی گردید. در مطالعه حاضر علاوه بر پایگاه‌های مذکور، منابع مطالعات وارد شده و همچنین لیست منابع مطالعات سیستماتیک مرتبط با موضوع پژوهش نیز بررسی گردید.

نتایج جستجو در نرم‌افزار Endnote20 وارد و پس از حذف موارد تکراری، بررسی شدند. پس از بررسی متن کامل مقالات، اطلاعات دقیق در مورد ویژگی‌های مطالعه (نویسنده اول، کشور، طراحی مطالعه، نحوه نمونه‌گیری پیامدهای اندازه‌گیری شده)، ویژگی‌های نمونه (تعداد نمونه‌ها و سن) و نتایج داده‌های مرتبط با

با این‌حال، استفاده گسترده از هوش مصنوعی در پزشکی تولیدمثل با چالش‌هایی از جمله عدم شفافیت الگوریتم‌ها (black box models)، نگرانی‌های اخلاقی در خصوص حفظ حریم خصوصی و نیاز به اعتبارسنجی بین‌المللی الگوریتم‌ها مواجه است، بنابراین لازم است مزایا و محدودیت‌های این فناوری نوظهور به طور نظام‌مند مورد بررسی قرار گیرد تا بتوان از آن به صورت ایمن و مؤثر در مدیریت ناباروری بهره برد. بنابراین، سؤال اصلی این پژوهش آن است که هوش مصنوعی در کدام بخش‌های تشخیص و درمان ناباروری به‌کار رفته و عملکرد، دقت، مزایا و محدودیت‌های آن در مطالعات اخیر چگونه گزارش شده است. هدف از این مرور روایی، جمع‌بندی و تحلیل منسجم شواهد موجود درباره کاربردهای AI در IVF، انتخاب جنین، تحلیل اسپرم و تشخیص اختلالات ناباروری است.

روش کار

در این مطالعه مرور روایی^۱ که مراحل آن مطابق با دستورالعمل PRISMA 2020 انجام شد، پایگاه‌های اطلاعاتی PubMed، Scopus، Web of Science، Google Scholar و Cochrane مورد جستجو قرار گرفتند.

جستجو با استفاده از ترکیب واژگان MeSH و کلیدواژه‌های آزاد انجام شد. نمونه‌ای از ترکیب کلیدواژه‌ها به‌صورت زیر بود: ("Artificial Intelligence" OR "Machine Learning" OR "Deep Learning" OR "Neural Networks") و ("Infertility" OR "Assisted Reproductive Technology" OR "IVF" OR "ICSI" OR "Sperm analysis" OR "Embryo selection"). جستجو بین سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۵ میلادی انجام شد و مقالات فارسی و انگلیسی زبان بررسی شدند.

معیارهای ورود به مطالعه شامل: مطالعات اصیل، مطالعات تجربی که در آن‌ها از مدل‌های هوش مصنوعی در حوزه ناباروری استفاده شده بود و معیارهای خروج از مطالعه شامل: مطالعات نامه به

¹ narrative review

اهداف توسط دو محقق به طور مستقل استخراج شدند و موارد عدم توافق، توسط نویسنده سوم بررسی و برطرف گردید. ارزیابی کیفیت به طور مستقل توسط دو محقق انجام شد. هرگونه اختلاف نظر بین محققان از طریق بحث در هر مرحله حل شد و در نهایت در صورت عدم توافق، با نویسنده سوم مطرح و حل می شد.

به منظور ارزیابی کیفیت مطالعات وارد شده، از ابزار اصلاح شده برای ارزیابی کیفیت مطالعات دقت تشخیصی (QUADAS-2)¹ استفاده شد که برای مرورهای مربوط به دقت تشخیصی طراحی شده است. با توجه به تنوع مدل ها، نوع داده ها و عدم همگنی کافی، متاآنالیز انجام نشد و داده ها به صورت مرور روایی² گزارش شدند.

فرآیند غربالگری در دو مرحله و توسط دو پژوهشگر مستقل انجام شد. اختلاف نظر بین ارزیابان توسط پژوهشگر سوم حل شد. فرآیند غربالگری مطابق با استاندارد PRISMA 2020 ثبت و در قالب نمودار جریان ارائه گردید.

یافته ها

در میان ۷۰ مطالعه وارد شده، ۲۸ مطالعه به طور اختصاصی بر پیش بینی موفقیت IVF تمرکز داشتند، ۱۷ مطالعه به تحلیل تصاویر تایم لپس و رتبه بندی کیفیت جنین پرداختند، ۱۲ مطالعه مربوط به ارزیابی اسپرم و تشخیص ناهنجاری های آن بود و ۸ مطالعه پیش بینی پاسخ تخمدان و شخصی سازی پروتکل های تحریک تخمدانی را بررسی کردند. همچنین ۵ مطالعه به کاربرد هوش مصنوعی در تشخیص اختلالات شایع ناباروری زنان مانند PCOS پرداخته بودند. در مجموع، اغلب مطالعات، دقت بالاتر مدل های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق نسبت به روش های سنتی را گزارش کردند.

تحلیل مطالعات اخیر در زمینه به کارگیری هوش مصنوعی در تشخیص و درمان ناباروری نشان می دهد

که این فناوری در چندین حوزه کلیدی پزشکی تولیدمثل نقش برجسته ای یافته است:

۱. پیش بینی موفقیت درمان های کمک باروری (ART)

مطالعات متعددی نشان داده اند که مدل های یادگیری ماشین می توانند با استفاده از داده های بالینی بیماران، مانند سن، شاخص توده بدنی (BMI)، سطح هورمون ضد مولرین (AMH)، تعداد فولیکول های آنترال و کیفیت اسپرم، نرخ موفقیت لقاح آزمایشگاهی را پیش بینی کنند. به عنوان مثال، مطالعه خسروی و همکاران (۲۰۱۹) از شبکه عصبی کانولوشنی برای پیش بینی موفقیت IVF استفاده کرد و به دقتی بالغ بر ۸۵٪ دست یافت (۱). نتایج مطالعه شفقی و همکار (۲۰۲۵) نشان می دهد که هوش مصنوعی (AI) نقش فزاینده و تحول آفرینی در حوزه تشخیص و درمان ناباروری ایفا می کند. استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین و شبکه های عصبی در تحلیل داده های پیچیده همچون پارامترهای اسپرم، تصاویر سونوگرافی، نتایج آزمایشگاهی و مشخصات ژنتیکی، به شناسایی الگوهای منجر شده که فراتر از توانایی تحلیل سنتی انسان است. این مسئله باعث بهبود دقت تشخیص، افزایش نرخ موفقیت لقاح مصنوعی (IVF)، کاهش خطاهای انسانی و در نهایت، ارائه درمان های شخصی سازی شده تر شده است (۱۳).

۲. ارزیابی کیفیت جنین با استفاده از تصاویر زمان گریز

یکی از مهم ترین دستاوردهای AI در پزشکی تولیدمثل، تحلیل تصاویر انکوباتورهای زمان گریز^۳ برای ارزیابی کیفی جنین هاست. ورمیلیا و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از مدل های یادگیری عمیق توانستند بر اساس الگوهای تقسیم سلولی، کیفیت جنین را طبقه بندی کنند و مدل آن ها، عملکردی بهتر از متخصصین انسانی داشت (۱۴). این ابزارها همچنین توانسته اند نرخ لانه گزینی و احتمال بارداری را با دقت بالاتری پیش بینی کنند. انتخاب مناسب ترین جنین برای انتقال به رحم، یکی از عوامل اصلی در بهبود نرخ لانه گزینی و

¹ a revised tool for the quality assessment of diagnostic accuracy studies

² Narrative Synthesis

³ Time-lapse

شناسایی کنند (۱۸). برخی ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی حتی قادر به پیش‌بینی پتانسیل لقاح اسپرم بر اساس داده‌های حرکتی و مورفولوژیک آن هستند. سامانه LensHooke X1 PRO، یک میکروسکوپ نوری مبتنی بر هوش مصنوعی است که توسط FDA تأیید شده و می‌تواند غلظت اسپرم، تحرک و pH را با دقتی برابر با روش‌های دستی اندازه‌گیری کند. این سیستم حتی می‌تواند شکست DNA اسپرم را در مدت ۴۰ دقیقه (نسبت به ۷۰ دقیقه در روش سنتی) اندازه‌گیری کند (۱۹، ۲۰).

۴. تشخیص علل ناباروری زنان

AI توانسته است در شناسایی اختلالات هورمونی، سندرم تخمدان پلی‌کیستیک (PCOS) و آندومتریوز نیز مفید باشد. مطالعه داس سانتوس و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که الگوریتم‌های درخت تصمیم و جنگل تصادفی می‌توانند داده‌های حاصل از آزمایشات هورمونی، سونوگرافی و سابقه پزشکی بیماران را تحلیل کرده و با دقت بیش از ۸۰٪ علل ناباروری را مشخص کنند (۱۷).

۵. پیش‌بینی پیامدهای بارداری پس از ART

هوش مصنوعی در پیش‌بینی عوارض بارداری مانند پره اکلامپسی، زایمان زودرس و حاملگی چندقلویی نیز وارد عمل شده است. مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین از طریق تحلیل داده‌های حاصل از چرخه IVF، مشخصه‌های رحمی و اطلاعات بالینی می‌توانند خطر این عوارض را پیش‌بینی کنند (۱۷) مدل‌های یادگیری ماشین مانند Random Forest، SVM^۵ و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) می‌توانند با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌ها مانند سن زن، شاخص توده بدنی (BMI)، سطح هورمون‌ها (AMH، FSH)، تعداد تخمک‌ها و کیفیت جنین، شانس موفقیت IVF را پیش‌بینی کنند. مطالعه مندی‌زابال رویز و همکاران (۲۰۲۴) نشان داد که استفاده از مدل ترکیبی^۶ با دقتی بیش از ۸۵٪ قادر است احتمال لانه‌گزینی موفق را پیش‌بینی کند (۲۱).

بارداری موفق است. در این زمینه، هوش مصنوعی نقش بسیار برجسته‌ای ایفا کرده است. سیستم‌های تصویربرداری تایم‌لپس^۱ که به‌صورت پیوسته از جنین در حال رشد عکس‌برداری می‌کنند، حجم عظیمی از داده‌ها را تولید می‌کنند. این داده‌ها توسط مدل‌های یادگیری عمیق تحلیل شده و الگوریتم‌هایی توسعه یافته‌اند که قادر به پیش‌بینی احتمال لانه‌گزینی و موفقیت حاملگی هستند.

برای مثال، مدل‌های CNN^۲ توانسته‌اند با تحلیل تصاویر تایم‌لپس، جنین‌هایی با بالاترین شانس موفقیت را با دقتی بیش از ۹۰٪ شناسایی کنند (۱۵). در برخی مراکز باروری، ابزارهای مبتنی بر AI مانند Life Whisperer یا iDAScore به‌کار گرفته می‌شوند که بر اساس ویژگی‌های تصویری، امتیاز کیفیت جنین را به‌صورت خودکار محاسبه می‌کنند و دقت آن‌ها حتی از قضاوت متخصصان جنین‌شناس نیز بیشتر گزارش شده است.

افزون بر این، ترکیب داده‌های تصویری با اطلاعات بالینی (مانند سن مادر، BMI، سابقه ناباروری و ...) در مدل‌های چندعاملی، می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تری از پتانسیل لانه‌گزینی و تولد زنده کمک کند (۱۶).

۳. انتخاب اسپرم بهینه و تشخیص ناهنجاری‌های آن

استفاده از الگوریتم‌های بینایی ماشین برای آنالیز حرکت و مورفولوژی اسپرم امکان‌پذیر شده است. فانتون و همکاران (۲۰۲۲) گزارش دادند که با استفاده از مدل SVM^۳ می‌توان نمونه‌های سالم اسپرم را با دقت قابل‌قبولی از نمونه‌های دارای آسیب DNA تمیز داد (۱۷). این موضوع می‌تواند در انتخاب اسپرم مناسب برای ICSI مؤثر باشد. در فرآیند ICSI، کیفیت اسپرم انتخاب شده تأثیر مستقیمی بر باروری دارد. مطالعات نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری عمیق^۴ می‌توانند با آنالیز تصاویر میکروسکوپی، اسپرم‌هایی با تحرک بالا، شکل نرمال و DNA سالم را

^۱ Time-lapse imaging

^۲ Convolutional Neural Network

^۳ Support Vector Machine

^۴ Deep Learning

^۵ Support Vector Machine

^۶ ensemble learning

۶. انتخاب اووسیت

ارزیابی کیفیت تخمک، یکی از چالش‌برانگیزترین مراحل در IVF است. روش‌های سنتی عمدتاً به قضاوت بصری درباره مورفولوژی زون پلوسیدا، سیتوپلاسم و گرانول‌ها متکی هستند. الگوریتم‌های بینایی ماشین می‌توانند با آنالیز دقیق تصاویر گرفته شده از اووسیت، الگوهایی فراتر از تشخیص انسانی را شناسایی کرده و پیش‌بینی کنند کدام اووسیت‌ها پتانسیل بیشتری برای باروری دارند (۲۲).

۷. شخصی‌سازی پروتکل درمانی

یکی دیگر از مزایای هوش مصنوعی، طراحی مسیر درمانی اختصاصی برای هر بیمار است. با استفاده از داده‌های قبلی بیماران مشابه، الگوریتم‌های AI می‌توانند تصمیم‌گیری درباره نوع تحریک تخمدانی، دوز داروها و زمان بهینه برای برداشت تخمک را بهینه‌سازی

کنند. این مسئله به‌ویژه در بیماران با پاسخ ضعیف یا مبتلا به شرایط خاص مانند PCOS اهمیت زیادی دارد.

برای نمونه، الگوریتم‌هایی توسعه یافته‌اند که دوز شروع گنادوتروپین‌ها را با دقت بالایی بر اساس ویژگی‌های فردی بیمار تنظیم می‌کنند. این روش، ریسک تحریک بیش از حد یا پاسخ ناکافی را کاهش داده و منجر به نتایج بالینی بهتر می‌شود (۲۳).

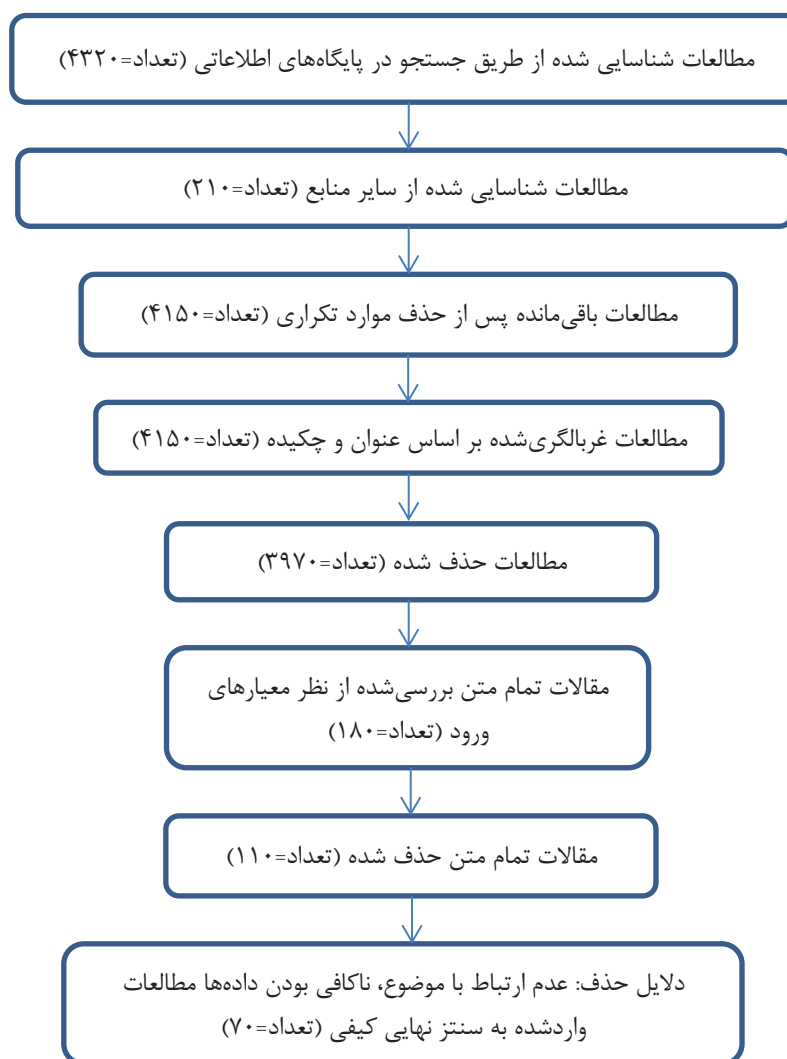
۸. الگوریتم‌های یادگیرنده از تجربه‌های گذشته

سیستم‌های هوشمند با یادگیری مستمر از هزاران چرخه IVF قبلی، می‌توانند در مواجهه با بیماران جدید، توصیه‌های مبتنی بر "شواهد یاد گرفته شده" ارائه دهند. این مدل‌ها بر اساس داده‌های تاریخی، مسیر درمانی را پیشنهاد می‌کنند که در بیماران مشابه، موفقیت بیشتری داشته است (۱۳).

جدول ۱- خلاصه مطالعات کاربرد هوش مصنوعی در ناباروری

یافته‌های کلیدی	هدف تحقیق	روش هوش مصنوعی	عنوان مقاله
افزایش دقت در انتخاب جنین و بهبود نرخ موفقیت IVF	بهبود IVF، پیش‌بینی نتایج درمان	یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی	کاربردهای فعلی هوش مصنوعی در فناوری‌های کمک‌باروری
تشخیص دقیق‌تر ناباروری و شناسایی عوامل مؤثر	تشخیص ناباروری زنان	الگوریتم‌های تحلیل داده	نقش هوش مصنوعی در تشخیص ناباروری زنان
افزایش دقت ارزیابی تخمک و انتخاب اسپرم مناسب	ارزیابی کیفیت تخمک و اسپرم	تحلیل تصویر، یادگیری عمیق	هوش مصنوعی در آزمایشگاه IVF
کاهش نرخ شکست ART و بهبود پیش‌بینی نتایج	بهبود نتایج ART	الگوریتم‌های پیش‌بینی	هوش مصنوعی در درمان ناباروری
اعتماد نسبی بیماران به تصمیمات مبتنی بر هوش مصنوعی	بررسی نگرش بیماران نسبت به هوش مصنوعی	مطالعه کیفی	ادراک بیماران از هوش مصنوعی در مراقبت‌های ناباروری
بهبود انتخاب اسپرم و افزایش شانس باروری	انتخاب اسپرم با کیفیت بالا	یادگیری ماشین	هوش مصنوعی برای انتخاب اسپرم
افزایش نرخ موفقیت و کاهش بار مالی و عاطفی ناباروری	بهبود فرآیندهای تولیدمثل انسانی	الگوریتم‌های ترکیبی	هوش مصنوعی در تولیدمثل انسانی
الگوریتم بهتر از متخصصان در انتخاب جنین با قابلیت بارداری بالاتر	پیش‌بینی نتایج بارداری	شبکه‌های عصبی عمیق	الگوریتم هوش مصنوعی برای انتخاب جنین‌های با قابلیت بارداری
بهبود شخصی‌سازی و افزایش نرخ موفقیت درمان	شخصی‌سازی مراقبت‌های باروری	یادگیری ماشین	نقش هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در فناوری‌های کمک‌باروری
بهبود کارایی و کاهش خطاهای انسانی در ART	بررسی تحول در ART	رباتیک و هوش مصنوعی	تأثیر رباتیک و هوش مصنوعی در فناوری‌های کمک‌باروری
تشخیص سریع‌تر و دقیق‌تر مشکلات تخمدان و رحم	تشخیص مشکلات باروری بر اساس سونوگرافی	شبکه‌های عصبی عمیق	هوش مصنوعی در ارزیابی تصاویر سونوگرافی رحم و تخمدان

افزایش موفقیت تحریک تخمدان و کاهش عوارض جانبی	بهبود زمان بندی و دوز داروها در تحریک تخمدان	یادگیری ماشین	پیش بینی پاسخ تخمدان با استفاده از الگوریتم های یادگیری ماشین
پیش بینی سریع تر و دقیق تر اختلالات هورمونی	پیش بینی اختلالات هورمونی مرتبط با ناباروری	الگوریتم های پیش بینی و تحلیل داده	تشخیص زودهنگام اختلالات هورمونی ناباروری با هوش مصنوعی
بهبود فرآیند درمان و افزایش نرخ موفقیت کلی درمان	بهینه سازی پروتکل های درمانی و پیگیری بیماران	مدل های هوشمند و سیستم های پشتیبان تصمیم	هوش مصنوعی در مدیریت درمان های ناباروری چندمرحله ای
مدل های دقیق تر روند باروری و پیش بینی بهتر نتایج درمان	بهبود تصمیم گیری های پزشکی در باروری	مدل سازی دینامیک، یادگیری ماشین	شبیه سازی و مدل سازی روندهای باروری با هوش مصنوعی



نمودار ۱- فلوچارت پریزما

جدول ۲- مطالعات شاخص به کار رفته در کاربرد هوش مصنوعی در ناباروری

نویسنده / سال / رفرنس	کشور	نوع مطالعه	نوع داده	مدل هوش مصنوعی	هدف مدل	یافته‌های اصلی
خسروی و همکاران (۲۰۱۹) (۱)	آمریکا	گذشته‌نگر	تصاویر تایم‌لپس	CNN	انتخاب بهترین جنین	افزایش دقت انتخاب جنین
کای و همکاران (۲۰۱۴) (۱۵)	چین	کوهورت	داده‌های بالینی	RF / SVM	پیش‌بینی بارداری	2019 پیش‌بینی موفقیت IVF
گلر و همکاران (۲۰۲۱) (۲۵)	هند	گذشته‌نگر	تصاویر	CNN	رتبه‌بندی جنین	تشخیص خودکار کیفیت جنین
اناتسو و همکاران (۲۰۲۲) (۳۷)	ژاپن	آینده‌نگر	تصاویر تایم‌لپس	DNN	بلوغ جنینی	پیش‌بینی بلوغ بلاستوسیست
داناردونو و همکاران (۲۰۲۲) (۳۳)	اندونزی	گذشته‌نگر	تصاویر	Ensemble NN	انتخاب جنین	طبقه‌بندی جنین با دقت بالا
فانتون و همکاران (۲۰۲۲) (۱۸)	آمریکا	گذشته‌نگر	داده هورمونی	ML	تحریک تخمدان	بهینه‌سازی زمان تریگر
اچ سو و همکاران (۲۰۲۳) (۱۹)	تایوان	تجربی	تصاویر / ویدئو	AI-Microscopy	ارزیابی اسپرم	آنالیز پیشرفته اسپرم
چانگ و همکاران (۲۰۲۲) (۳۹)	آمریکا	کوهورت	سونوگرافی	CNN	تشخیص کاهش ذخیره	برآورد ذخیره تخمدان
صارمی و همکاران (۲۰۲۳) (۳۱)	ایران	مروری	داده ترکیبی	ML	پیش‌بینی پاسخ درمان	شخصی‌سازی درمان ناباروری
مندیزابال و همکاران (۲۰۲۴) (۲۱)	مکزیک	مروری	چندمنبعی	ML / AI	تصمیم‌یار بالینی	جمع‌بندی کاربردهای AI در ART

جدول ۳- ارزیابی خطر سوگیری مطالعات وارد شده بر اساس ابزار QUADAS-2

نویسنده / سال / رفرنس	انتخاب بیماران	آزمون شاخص (مدل هوش مصنوعی)	آزمون مرجع	جریان و زمان‌بندی	جمع‌بندی خطر سوگیری
خسروی و همکاران (۲۰۱۹) (۱)	کم	کم	کم	کم	کم
کای و همکاران (۲۰۱۴) (۱۵)	کم	نامشخص	کم	کم	کم
گلر و همکاران (۲۰۲۱) (۲۵)	کم	کم	کم	نامشخص	کم
اناتسو و همکاران (۲۰۲۲) (۳۷)	کم	کم	کم	کم	کم
داناردونو و همکاران (۲۰۲۲) (۳۳)	نامشخص	کم	کم	کم	نامشخص
فانتون و همکاران (۲۰۲۲) (۱۸)	کم	کم	کم	کم	کم
اچ سو و همکاران (۲۰۲۳) (۱۹)	کم	کم	کم	کم	کم
چانگ و همکاران (۲۰۲۲) (۳۹)	کم	نامشخص	کم	کم	کم
صارمی و همکاران (۲۰۲۳) (۳۱)	نامشخص	نامشخص	کم	کم	نامشخص

جدول ۴- مقایسه مدل‌های هوش مصنوعی به کار رفته در مطالعات ناباروری

مدل هوش مصنوعی	کاربرد اصلی	نوع داده ورودی	دقت / AUC گزارش شده	نقاط قوت	محدودیت‌ها
شبکه عصبی کانولوشنی (CNN)	انتخاب جنین، تایم‌لپس	تصاویر	۸۵-۹۰٪	تشخیص الگوهای پیچیده	نیاز به داده زیاد
شبکه عصبی عمیق (DNN)	بلوغ پلاستوسیت	تصاویر تایم‌لپس	۸۵-۹۲٪	دقت بالا	جعبه سیاه
جنگل تصادفی (RF)	پیش‌بینی IVF	داده بالینی	۷۵-۹۰٪	تفسیرپذیر	افت دقت در داده بزرگ
SVM	آنالیز اسپرم	داده حرکتی	۷۰-۸۵٪	مناسب داده کم	حساس به پارامتر
یادگیری ترکیبی	پیش‌بینی IVF	داده ترکیبی	۸۰-۹۰٪	افزایش دقت	پیچیدگی بالا
میکروسکوپی AI	تشخیص DFI	تصویر/ویدئو	بالا	سرعت و دقت بالا	هزینه زیاد
درخت تصمیم	تشخیص PCOS	آزمایشگاهی	۷۰-۸۸٪	قابل تفسیر	وابسته به داده

جدول ۵- دسته‌بندی کاربردهای هوش مصنوعی در تشخیص و درمان ناباروری

حوزه کاربرد	نوع داده	مدل‌های استفاده شده	خروجی یا عملکرد
ارزیابی جنین	تصاویر تایم‌لپس	DNN, CNN	رتبه‌بندی و پیش‌بینی لانه‌گزینی
انتخاب اسپرم	تصاویر میکروسکوپی	SVM, ML	تشخیص مورفولوژی و DFI
پیش‌بینی IVF	داده‌های بالینی	ANN, RF	پیش‌بینی تولد زنده
تحریک تخمدان	هورمونی و US	ANN, ML	تعیین دوز و تریگر
ناباروری زنان	آزمایش و US	DT, RF	تشخیص PCOS
عوارض بارداری	داده ART	ML	پیش‌بینی OHSS
PGT	داده ژنتیکی	AI ژنومیک	غربالگری ناهنجاری

بحث

یافته‌های این مرور نشان داد که هوش مصنوعی (AI) و به‌ویژه یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL) توانسته‌اند تحولی اساسی در حوزه تشخیص، پیش‌آگهی و درمان ناباروری ایجاد کنند. در بسیاری از فرآیندهای کمک‌باروری از جمله IVF، ICSI و انتخاب جنین، بهره‌گیری الگوریتم‌های هوش مصنوعی در بسیاری از کاربردها مانند انتخاب جنین و تحلیل تصاویر زمان‌گریز، توانسته‌اند دقت ارزیابی را بهبود دهند و تا حدی تغییرپذیری بین ارزیاب‌ها را کاهش دهند (۱).

یکی از مهم‌ترین حوزه‌های تأثیر هوش مصنوعی، پیش‌بینی موفقیت درمان‌های ناباروری است. مدل‌های مختلف مانند SVM، Random Forest و شبکه‌های عصبی مصنوعی با دقت بالایی قادرند موفقیت لقاح، کیفیت تخمک یا احتمال لانه‌گزینی جنین را پیش‌بینی کنند (۱، ۳). این موضوع به بهینه‌سازی فرآیند درمان، کاهش هزینه‌ها و افزایش رضایت‌مندی بیماران کمک شایانی می‌کند.

از سوی دیگر، استفاده از تصاویر انکوباتورهای زمان‌گریز^۱ و تحلیل خودکار آن‌ها به کمک مدل‌های بینایی ماشین، گامی بلند در تشخیص غیرتهاجمی کیفیت جنین بوده است. در چند مطالعه گزارش شده که عملکرد برخی مدل‌های یادگیری عمیق در رتبه‌بندی کیفیت جنین با متخصصان با تجربه قابل مقایسه بوده است (۲، ۴). این رویکرد می‌تواند احتمال انتخاب نادرست جنین را کاهش داده و نرخ بارداری را ارتقاء دهد.

همچنین، استفاده از AI در تحلیل مایع منی و تشخیص ناهنجاری‌های اسپرم، فناوری‌های مبتنی بر تصویر و یادگیری ماشین، قابلیت ارائه ارزیابی استانداردتر و سریع‌تر برای برخی شاخص‌های اسپرم مانند شکست DNA را نشان داده‌اند (۳، ۵). این امر در فرآیند انتخاب اسپرم برای ICSI و افزایش نرخ باروری اهمیت زیادی دارد. علاوه بر موارد فوق، هوش مصنوعی توانسته در تشخیص اختلالات شایع در ناباروری زنان از جمله سندرم تخمدان پلی‌کیستیک (PCOS)، اندومترئوز و اختلالات تخمک‌گذاری مؤثر باشد. مطالعات متعددی از به‌کارگیری مدل‌های درخت

¹ Time-lapse imaging

تصمیم، جنگل تصادفی و شبکه‌های عصبی برای تحلیل ترکیبی از داده‌های آزمایشگاهی، تصویربرداری و علائم بالینی حمایت کرده‌اند (۴، ۶).

از دیگر دستاوردهای چشم‌گیر هوش مصنوعی، پیش‌بینی پیامدهای بارداری پس از ART مانند پره اکلامپسی، زایمان زودرس یا سقط مکرر است. این پیش‌بینی‌ها با استفاده از داده‌های گسترده و مدل‌های ترکیبی به پزشکان اجازه می‌دهد تصمیم‌گیری‌های دقیق‌تری اتخاذ کنند (۵، ۶).

هوش مصنوعی این قابلیت را دارد که اطلاعات ژنتیکی پیچیده را سریع‌تر و دقیق‌تر از گذشته تجزیه و تحلیل کند. این پیشرفت به‌ویژه در آزمایش ژنتیکی پیش از لانه‌گزینی (PGT)^۱ مشهود است، روشی که برای شناسایی ناهنجاری‌های ژنتیکی در جنین‌ها قبل از کاشت استفاده می‌شود (۲۴). همچنین بینش‌هایی را در مورد سلامت ژنتیکی کلی جنین‌ها ارائه می‌دهد که یک عامل مهم در تعیین احتمال لانه‌گزینی و بارداری موفق است. با تجزیه و تحلیل نشانگرها و الگوهای ژنتیکی، هوش مصنوعی می‌تواند به انتخاب جنین‌هایی با بهترین شانس برای ایجاد یک بارداری سالم کمک کند و در نتیجه میزان موفقیت درمان‌های IVF را افزایش دهد (۲۵، ۲۶).

دقت ارائه شده توسط هوش مصنوعی در غربالگری و تجزیه و تحلیل ژنتیکی همچنین به این معنی است که والدین آینده‌نگر می‌توانند بهتر از سلامت فرزند آینده خود مطلع شوند. این امر به‌ویژه برای زوجینی که سابقه اختلالات ژنتیکی دارند مهم است، زیرا هوش مصنوعی می‌تواند درک واضح‌تری از خطرات و احتمال انتقال این بیماری‌ها به فرزندانشان ارائه دهد (۲۷، ۲۸). الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند شرایطی مانند دما، رطوبت و ترکیب گاز را در زمان واقعی تنظیم کنند تا محیط بهینه برای رشد جنین حفظ شود. این سطح از دقت در ایجاد و حفظ شرایط رشد ایده‌آل چیزی که دستیابی به آن به صورت دستی چالش‌برانگیز است (۲۹، ۳۰).

نتایج این مرور با بسیاری از مطالعات پیشین همسو است که دقت بالای مدل‌های یادگیری ماشین در انتخاب جنین، تحلیل اسپرم و پیش‌بینی پیامد IVF را گزارش کرده‌اند. برای مثال، مطالعات خسروی و همکاران (۲۰۱۹) و اناتسو و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد بهتر مدل‌های CNN در طبقه‌بندی جنین را تأیید کرده‌اند (۱، ۳۷). در حالی که برخی مطالعات مانند سوین و همکاران (۲۰۲۰) تأکید کردند که تفاوت بین عملکرد AI و متخصصان انسانی در همه مراکز معنی‌دار نیست و نیاز به داده‌های بزرگ‌تر و اعتبارسنجی خارجی وجود دارد (۱۴). به‌طور مشابه، مطالعاتی مانند لتری (۲۰۲۱)، استفاده بدون نظارت از AI را پرخطر دانسته و بر لزوم نقش مکمل AI در کنار متخصص تأکید کرده‌اند (۳۰). این اختلاف نتایج نشان می‌دهد که اگرچه شواهد اولیه امیدوارکننده است، کاربرد بالینی گسترده AI همچنان نیازمند استانداردسازی، پایگاه‌های داده چندمرکزی و ارزیابی‌های دقیق‌تر است.

در نهایت، هوش مصنوعی راه را برای شخصی‌سازی درمان ناباروری هموار کرده است. بر اساس ویژگی‌های فردی هر بیمار از جمله سابقه پزشکی، پاسخ تخمدانی و پارامترهای هورمونی، الگوریتم‌ها قادرند دوز دارو، نوع درمان و زمان مناسب برداشت تخمک را پیشنهاد دهند که گامی مهم در جهت پزشکی فردمحور^۲ محسوب می‌شود (۳۱).

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی نیز وجود دارد. از جمله می‌توان به عدم وجود پایگاه‌های داده جامع، نیاز به تأییدهای قانونی، مسائل اخلاقی در استفاده از AI در تصمیم‌گیری درمانی و شفاف نبودن فرآیندهای تصمیم‌گیری در مدل‌های یادگیری عمیق اشاره کرد. بنابراین، توسعه بیشتر این فناوری مستلزم همکاری بین‌المللی، رعایت اصول اخلاق پزشکی و توسعه الگوریتم‌های شفاف‌تر است.

در مجموع، هوش مصنوعی در حال دگرگون ساختن چشم‌انداز درمان ناباروری است. این فناوری به پزشکان کمک می‌کند تا با دقت بیشتر، تصمیمات درمانی اتخاذ

² Personalized Medicine

¹ Pre-implantation Genetic Test

کرده و احتمال موفقیت درمان را افزایش دهند. آینده درمان ناباروری با اتکای بیشتر بر داده‌ها و تصمیمات الگوریتمی پیش‌بینی می‌شود، مشروط بر آن‌که چالش‌های فعلی به‌درستی مدیریت شوند.

انتخاب جنین به کمک رایانه، نشان‌دهنده کاربرد پیشگامانه هوش مصنوعی (AI) در زمینه لقاح آزمایشگاهی (IVF) است که نشان‌دهنده تغییر قابل توجهی از روش‌های سنتی و ذهنی ارزیابی جنین به رویکردی عینی‌تر و مبتنی بر داده است. در قلب این نوآوری، استفاده از تکنیک‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل تصویر کامپیوتری و الگوریتم‌های یادگیری عمیق، به کار رفته است. به‌طور سنتی، جنین‌شناسان به تخصص و بررسی میکروسکوپی خود برای ارزیابی جنین‌ها بر اساس معیارهایی مانند تعداد سلول، ظاهر و سرعت رشد تکیه می‌کردند. اگرچه این روش با تنوع در ارزیابی‌ها بین ناظران مختلف مؤثر است، اما می‌تواند ذهنی باشد. انتخاب جنین به کمک کامپیوتر، این تنوع را به حداقل می‌رساند و یک رویکرد ثابت و تکرارپذیر برای ارزیابی جنین ارائه می‌دهد (۳۲-۳۴). هوش مصنوعی با شناسایی جنین‌هایی که بیشترین پتانسیل موفقیت را دارند، کارایی فرآیند IVF را افزایش و به‌طور بالقوه تعداد سیکل‌های مورد نیاز برای رسیدن به بارداری موفق را کاهش می‌دهد که علاوه بر مزایای روحی و جسمی برای بیماران، بلکه مزایای اقتصادی نیز دارد (۳۵-۳۷).

در اصل، ادغام هوش مصنوعی در غربالگری و تجزیه و تحلیل ژنتیکی در IVF، نشان‌دهنده یک گام مهم در فناوری تولیدمثل است. نه تنها کارایی و دقت آزمایشات ژنتیکی را افزایش می‌دهد، بلکه نقش مهمی در تضمین سلامت و رفاه نسل آینده ایفا می‌کند. همانطور که فناوری هوش مصنوعی به تکامل خود ادامه می‌دهد، انتظار می‌رود تأثیر آن بر غربالگری ژنتیکی در IVF افزایش یابد و این زمینه را متحول کند و به زوج‌های بی‌شماری که به دنبال ایجاد خانواده خود هستند، امیدوار باشد.

AI می‌تواند به بهینه‌سازی دوز و زمان مصرف داروها، کاهش احتمال تحریک بیش از حد یا کمتر تحریک

نمودن تخمدان کمک نموده و منجر به افزایش دسترسی به مراقبت و در نهایت ساده‌سازی فرآیند IVF شود (۳۸). هدف پزشکی شخصی‌سازی شده، سفارشی کردن مراقبت‌های بهداشتی با تطبیق درمان‌ها با ویژگی‌های فردی بیمار است. در زمینه ناباروری زنان، به ویژه در طی پروتکل‌های تحریک تخمدان در IVF، ادغام AI در افزایش شخصی‌سازی و نتایج درمان نویدبخش می‌باشد و با تجزیه و تحلیل داده‌های بیمار شامل سن بیمار، وزن، سطح هورمونی و ذخیره تخمدان می‌توان پروتکل‌های شخصی‌سازی شده جهت مدیریت بیماران طراحی کرد. چنین کاری منجر به کاهش حجم کاری کلینیک‌های نازایی می‌شود. از تکنیک‌های AI جهت انتخاب نوع پروتکل تحریک نیز استفاده شده است (۱۳).

در گذشته، شاخص‌هایی مانند سن، شاخص توده بدنی (BMI)، سطح FSH پایه، سطح آنتی‌مولرین هورمون (AMH) و شمارش فولیکول‌های آنترال (AFC) برای پیش‌بینی پاسخ تخمدان به کار گرفته می‌شدند (۳۹). اگرچه این متغیرها اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهند، اما پیش‌بینی آن‌ها همواره با دقت بالا همراه نیست و ممکن است در برخی بیماران عملکرد مناسبی نداشته باشد. هوش مصنوعی و به‌ویژه یادگیری ماشین (ML)، این امکان را فراهم کرده‌اند که با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته، الگوهای پنهان در داده‌های بالینی بیماران شناسایی شده و پیش‌بینی پاسخ تخمدان با دقت بیشتری انجام شود.

علاوه بر پیش‌بینی پاسخ تخمدان، الگوریتم‌های AI می‌توانند برای تعیین دوز اولیه مطلوب گنادوتروپین‌ها به کار روند. برای مثال، در مطالعه‌ای که از شبکه عصبی مصنوعی برای تنظیم دوز شروع FSH استفاده شد، نتایج نشان داد که این رویکرد می‌تواند در پیشگیری از سندرم تحریک بیش از حد تخمدان (OHSS) و افزایش تعداد اووسیت‌های بالغ بازایی شده مؤثر باشد (۳۹).

هوش مصنوعی همچنین می‌تواند به طراحی پروتکل‌های بهینه برای بیماران خاص مانند زنان مبتلا به سندرم تخمدان پلی‌کیستیک (PCOS) یا افراد با

ذخیره تخمدانی پایین کمک کند. در این موارد، با توجه به پیچیدگی وضعیت هورمونی و پاسخ متغیر، استفاده از مدل‌های ML می‌تواند نتایج بهتری نسبت به رویکردهای تجربی سنتی ارائه دهد.

در مجموع، ادغام AI در فرآیند انتخاب پروتکل‌های تحریک تخمدانی می‌تواند منجر به درمان‌های فردمحورتر، کاهش عوارض جانبی و بهبود پیامدهای بالینی IVF شود. با این حال، برای اطمینان از صحت و قابلیت کاربرد بالینی این الگوریتم‌ها، نیاز به انجام کارآزمایی‌های تصادفی‌سازی شده و مطالعات اعتبارسنجی خارجی در جمعیت‌های مختلف وجود دارد.

آموزش و آگاهی‌رسانی AI این توانایی را دارد که با آموزش و ساده‌سازی اصطلاحات پیچیده پزشکی به بیماران، این امکان را بدهد تا با تصمیم‌های آگاهانه پروتکل‌های درمانی را طی کنند. می‌تواند در کنار پزشکان به‌عنوان یک دستیار عالی به یاری بیماران بشتابد. اگرچه جایگزینی برای روان درمانی نیست، اما این پشتیبانی می‌تواند برای افرادی که نیاز به اطمینان فوری یا دلگرمی دارند، یک راه‌حل موقتی باشد. AI می‌تواند با پیشنهادات شخصی‌سازی شده به بیماران در مورد نکات تغذیه‌ای برای بهبود سلامت باروری یا تکنیک‌های آرام‌بخشی برای کاهش استرس اثربخشی درمان‌های پزشکی را افزایش دهد. تداوم مراقبت درمان‌های ناباروری اغلب شامل مراحل متعددی هستند. AI می‌تواند با توضیح پروتکل‌های درمانی، یادآوری در مورد داروها و پاسخ به سؤالات رایج، نظم بیشتری در روند درمان ایجاد کند. مانیتورینگ فولیکول با سونوگرافی زمان‌بر است. AI می‌تواند با نظارت خودکار فولیکولی، حتی در منزل به رفع این مشکلات کمک کند. هنگامی که چندین فولیکول در طول سیکل IVF رشد می‌کنند، یک محرک یا تریگر هورمونی جهت آماده‌سازی برای بازیابی تخمک به فرد تجویز می‌شود. تصمیم در مورد زمان تزریق جهت تریگر برای القای تخمک با معیارهای مختلف که می‌تواند به‌طور قابل توجهی بین تجربیات مختلف متفاوت باشد، بر اساس نظر پزشک است. به‌طور کلی، معیارهایی مانند اندازه

فولیکول‌ها و استرادیول مؤثر خواهد بود. با این حال، AI این پتانسیل را دارد که با ترکیب مطالعات بسیار بیشتر، برای زمان این تصمیم‌گیری کمک کند. سایر مدل‌های AI ارتباط مستقیم را بین اندازه فولیکول و بازده تخمک با استفاده از تفسیر خطی یافته‌اند. از سوی دیگر، هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در کاهش اضطراب بیماران ایفا کند. چت‌بات‌های سلامت، سیستم‌های پاسخگوی هوشمند و اپلیکیشن‌های مبتنی بر AI، امکان پشتیبانی روانی، پاسخ به سؤالات مکرر بیماران و افزایش حس مشارکت آنان در روند درمان را فراهم کرده‌اند.

با وجود مزایای چشم‌گیر، موانع و چالش‌هایی نیز وجود دارد. از جمله این موارد می‌توان به نیاز به داده‌های بزرگ و باکیفیت، نگرانی‌های اخلاقی پیرامون حریم خصوصی بیماران و احتمال ایجاد سوگیری در مدل‌ها در صورت استفاده از داده‌های ناقص یا جانبدارانه اشاره کرد. همچنین، استفاده گسترده از هوش مصنوعی ممکن است منجر به کاهش ارتباط چهره‌به‌چهره بیمار و پزشک شود که خود پیامدهایی در فرآیند درمان خواهد داشت. در مجموع، اگرچه هنوز در مراحل ابتدایی هستیم، اما شواهد موجود نشان می‌دهد که ادغام هوش مصنوعی در درمان ناباروری می‌تواند به شکل چشم‌گیری، کارایی، دقت و اثربخشی این فرآیند را افزایش دهد. ضروری است که تحقیقات آینده در جهت توسعه الگوریتم‌های شفاف‌تر، کاهش سوگیری‌های احتمالی، حفظ اصول اخلاقی و افزایش همگرایی میان پزشکان و سیستم‌های هوشمند طراحی شود (۴۰).

از نقاط قوت این مرور نظام‌مند، انجام جستجوی گسترده و ساختاریافته در چندین پایگاه معتبر علمی، استفاده از دستورالعمل PRISMA 2020 و به‌کارگیری ابزار QUADAS-2 برای ارزیابی کیفیت مطالعات بود. همچنین تنوع مدل‌های هوش مصنوعی و پوشش کاربردهای مختلف AI در درمان، تشخیص، انتخاب جنین و پیش‌بینی پیامدهای ART، جامعیت تحلیل را افزایش داد. تمرکز مطالعه بر مقالات منتشر

شده طی یک دهه اخیر نیز امکان ارائه تصویری به‌روز از پیشرفت‌های AI در حوزه ناباروری را فراهم کرد.

با وجود نقاط قوت، مطالعه حاضر محدودیت‌هایی نیز داشت. نخست آنکه ناهمگونی قابل‌توجه در نوع داده‌ها، مدل‌های هوش مصنوعی و پیامدهای گزارش شده، امکان انجام متاآنالیز را محدود ساخت. همچنین بسیاری از مطالعات وارد شده فاقد اعتبارسنجی خارجی بوده و در جمعیت‌های کوچک یا تک‌مرکزی انجام شده‌اند که تعمیم‌پذیری نتایج را کاهش می‌دهد. کمبود مطالعات کارآزمایی بالینی و نبود پروتکل استاندارد برای گزارش‌دهی نتایج مدل‌های AI نیز از دیگر محدودیت‌هاست. علاوه بر این، داده‌های موجود بیشتر بر آزمایشگاه‌های IVF با فناوری پیشرفته متمرکز بودند و از کلینیک‌های با منابع محدود کمتر مطالعه‌ای موجود بود. نتایج از نظر مفهومی قابل تعمیم به ایران هستند، اما برای تعمیم کامل به‌علت تفاوت‌های جمعیتی و پروتکل‌های ART، انجام مطالعات بومی و اعتبارسنجی خارجی لازم است.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این مرور نشان داد که هوش مصنوعی در سال‌های اخیر به یکی از ابزارهای نویدبخش در حوزه تشخیص و درمان ناباروری تبدیل شده است. مدل‌های مختلف یادگیری ماشین و یادگیری عمیق توانسته‌اند در حوزه‌هایی مانند انتخاب جنین، تحلیل تصاویر زمان‌گریز، ارزیابی کیفیت اسپرم، پیش‌بینی پاسخ تخمدان و تخمین احتمال موفقیت IVF، عملکرد قابل‌قبولی ارائه دهند. با این حال، ناهمگونی مطالعات، محدود بودن حجم داده‌ها، فقدان اعتبارسنجی خارجی و چالش‌های اخلاقی و قانونی، استفاده گسترده و استاندارد این فناوری را محدود کرده است. به‌طور کلی، ادغام هوش مصنوعی با روش‌های موجود در ART

می‌تواند دقت تصمیم‌گیری، قابلیت پیش‌بینی و کارایی درمان را بهبود بخشد؛ اما برای بهره‌برداری ایمن و مؤثر از آن، انجام مطالعات بالینی چندمرکزی، توسعه استانداردهای گزارش‌دهی و طراحی الگوریتم‌های شفاف و قابل تفسیر ضروری است. آینده به‌کارگیری AI در ناباروری، به میزان توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران به این چالش‌ها و فراهم‌سازی زیرساخت‌های لازم برای کاربرد بالینی آن بستگی دارد.

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از تمام افرادی که به هر نحو در انجام این پژوهش همکاری و حمایت داشته‌اند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ‌گونه تضاد منافع در ارتباط با این مقاله وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی

در نگارش این مقاله تمامی اصول اخلاقی پژوهش از جمله امانت‌داری علمی، استناددهی صحیح به منابع و پرهیز از سرقت ادبی رعایت شده است.

حمایت مالی

این پژوهش حمایت مالی از هیچ سازمان یا نهاد خاصی دریافت نکرده است.

مشارکت نویسندگان

تمامی نویسندگان در طراحی مطالعه، جمع‌آوری منابع، نگارش و بازبینی نهایی مقاله مشارکت داشته و نسخه نهایی مقاله را تأیید کرده‌اند.

1. Khosravi P, Kazemi E, Zhan Q, Malmsten JE, Toschi M, Zisimopoulos P, et al. Deep learning enables robust assessment and selection of human blastocysts after in vitro fertilization. *NPJ digital medicine* 2019; 2(1):21.
2. Gottschalk MS, Eskild A, Hofvind S, Gran JM, Bjelland EK. Temporal trends in age at menarche and age at menopause: a population study of 312 656 women in Norway. *Human Reproduction* 2020; 35(2):464-71.
3. Biglarian A, HajiZadeh E, Kazemnejad A. Comparison of artificial neural network and Cox regression models in survival prediction of gastric cancer patients. *Koomesh* 2010; 11(3).
4. Montazeri M, Montazeri M. Machine learning models for predicting the diagnosis of liver disease. *Koomesh* 2014; 16(1):53-9.
5. JalaaleddinMousavirad S, Komleh HE. A new intelligent hepatitis diagnosis using principal component analysis and classifiers fusion. *Koomesh* 2015; 16(2):149-58.
6. Mousavirad SJ. Male Infertility Prediction from Environmental Factors and Lifestyle Using Artificial Intelligence Algorithms. *Hakim Journal* 2016; 19(2):72-80.
7. Graziani M, Andrearczyk V, Marchand-Maillet S, Müller H. Concept attribution: Explaining CNN decisions to physicians. *Computers in biology and medicine* 2020; 123:103865.
8. Yuan G, Lv B, Du X, Zhang H, Zhao M, Liu Y, et al. Prediction model for missed abortion of patients treated with IVF-ET based on XGBoost: a retrospective study. *PeerJ* 2023; 11:e14762.
9. Aziz A, Pane S, Iacovacci V, Koukourakis N, Czarske J, Menciassi A, et al. Medical imaging of microrobots: Toward in vivo applications. *ACS nano* 2020; 14(9):10865-93.
10. Babayev E. Man versus machine in in vitro fertilization—can artificial intelligence replace physicians?. *Fertility and Sterility* 2020; 114(5):963.
11. Babayev E, Feinberg EC. Embryo through the lens: from time-lapse cinematography to artificial intelligence. *Fertility and Sterility* 2020; 113(2):342-3.
12. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature medicine* 2019; 25(1):44-56.
13. Shafti V, Azarboo A. Personalized Medicine and Artificial Intelligence in Ovarian Stimulation Protocols for Female Infertility: A Review Article. *Sarem Journal of Medical research* 2025; 9(4):231-7.
14. Swain J, VerMilyea MT, Meseguer M, Ezcurra D. AI in the treatment of fertility: key considerations. *Journal of assisted reproduction and genetics* 2020; 37(11):2817-24.
15. Cai Q, Wan F, Appleby D, Hu L, Zhang H. Quality of embryos transferred and progesterone levels are the most important predictors of live birth after fresh embryo transfer: a retrospective cohort study. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics* 2014; 31(2):185-94.
16. Bulletti C, Franasiak JM, Busnelli A, Sciorio R, Berrettini M, Aghajanova L, et al. Artificial intelligence, clinical decision support algorithms, mathematical models, calculators applications in infertility: systematic review and Hands-On digital applications. *Mayo Clinic Proceedings: Digital Health* 2024; 2(4):518-32.
17. dos Santos MJ, Schaal FM, Goulart R. Propriedade intelectual e inteligência artificial. *Almedina Brasil*; 2024.
18. Fanton M, Nutting V, Solano F, Maeder-York P, Hariton E, Barash O, et al. An interpretable machine learning model for predicting the optimal day of trigger during ovarian stimulation. *Fertility and Sterility* 2022; 118(1):101-8.
19. Hsu CT, Lee CI, Huang CC, Wang TE, Chang HC, Chang LS, et al. Development and integration of LensHooke® R10 for automatic and standardized diagnosis for sperm DNA fragmentation. *Andrology* 2023; 11(7):1337-44.
20. Agarwal A, Henkel R, Huang CC, Lee MS. Automation of human semen analysis using a novel artificial intelligence optical microscopic technology. *Andrologia* 2019; 51(11):e13440.
21. Mendizabal-Ruiz G, Paredes O, Alvarez A, Acosta-Gómez F, Hernandez-Morales E, González-Sandoval J, et al. Artificial intelligence in human reproduction. *Archives of medical research* 2024; 55(8):103131.
22. Dhillon RK, McLernon DJ, Smith PP, Fishel S, Dowell K, Deeks JJ, et al. Predicting the chance of live birth for women undergoing IVF: a novel pretreatment counselling tool. *Human reproduction* 2016; 31(1):84-92.
23. Sellami A, Daoud S, Abdelkafi O, Amor MB, Moalla F, Rebai T. # 364: Precision Medicine and Artificial Intelligence in the Area of Infertility: Update Applications and Perspectives. *Fertility & Reproduction* 2023; 5(04):327-.
24. Fitz VW, Kanakasabapathy MK, Thirumalaraju P, Ramirez LB, Swain JE, Curchoe CL, et al. Should There Be An "Ai" In Team?: Embryologists Improve Selection Of High Implantation Potential Embryos With The Aid Of An Artificial Intelligence Algorithm. *Fertility and Sterility* 2020; 114(3):e537.
25. Geller J, Collazo I, Pai R, Hendon N, Lokeshwar SD, Arora H, et al. An artificial intelligence-based algorithm for predicting pregnancy success using static images captured by optical light microscopy during intracytoplasmic sperm injection. *Journal of human reproductive sciences* 2021; 14(3):288-92.

26. Giscard d'Estaing S, Labrune E, Forcellini M, Edel C, Salle B, Lornage J, et al. A machine learning system with reinforcement capacity for predicting the fate of an ART embryo. *Systems biology in reproductive medicine* 2021; 67(1):64-78.
27. Glatstein I, Chavez-Badiola A, Curchoe CL. New frontiers in embryo selection. *Journal of assisted reproduction and genetics* 2023; 40(2):223-34.
28. Go KJ, Hudson C. Deep technology for the optimization of cryostorage. *Journal of Assisted Reproduction and Genetics* 2023; 40(8):1829-34.
29. Hickman CF, Alshubbar H, Chambost J, Jacques C, Pena CA, Drakeley A, et al. Data sharing: using blockchain and decentralized data technologies to unlock the potential of artificial intelligence: what can assisted reproduction learn from other areas of medicine?. *Fertility and sterility* 2020; 114(5):927-33.
30. Letterie G. Three ways of knowing: the integration of clinical expertise, evidence-based medicine, and artificial intelligence in assisted reproductive technologies. *Journal of assisted reproduction and genetics* 2021; 38(7):1617-25.
31. Saremi A, Abbasi B, Karimi-MansoorAbad E, Ashourian Y. Impact of Artificial Intelligence on In Vitro Fertilization: Revolutionizing Reproductive Medicine. *Sarem Journal of Medical research* 2023; 8(3):213-23.
32. Curchoe CL, Tarafdar O, Aquilina MC, Seifer DB. SART CORS IVF registry: looking to the past to shape future perspectives. *Journal of assisted reproduction and genetics* 2022; 39(11):2607-16.
33. Danardono GB, Erwin A, Purnama J, Handayani N, Polim AA, Boediono A, et al. A homogeneous ensemble of robust pre-defined neural network enables automated annotation of human embryo morphokinetics. *Journal of Reproduction & Infertility* 2022; 23(4):250.
34. Danardono GB, Handayani N, Louis CM, Polim AA, Sirait B, Periastringrum G, et al. Embryo ploidy status classification through computer-assisted morphology assessment. *AJOG Global Reports* 2023; 3(3):100209.
35. Doody KJ. Infertility treatment now and in the future. *Obstetrics and gynecology clinics of North America* 2021; 48(4):801-12.
36. Duval A, Nogueira D, Dissler N, Maskani Filali M, Delestro Matos F, Chansel-Debordeaux L, et al. A hybrid artificial intelligence model leverages multi-centric clinical data to improve fetal heart rate pregnancy prediction across time-lapse systems. *Human Reproduction* 2023; 38(4):596-608.
37. Enatsu N, Miyatsuka I, An LM, Inubushi M, Enatsu K, Otsuki J, et al. A novel system based on artificial intelligence for predicting blastocyst viability and visualizing the explanation. *Reproductive medicine and biology* 2022; 21(1):e12443.
38. Hariton E, Pavlovic Z, Fanton M, Jiang VS. Applications of artificial intelligence in ovarian stimulation: a tool for improving efficiency and outcomes. *Fertility and sterility* 2023; 120(1):8-16.
39. Chung EH, Petishnok LC, Conyers JM, Schimer DA, Vitek WS, Harris AL, et al. Virtual compared with in-clinic transvaginal ultrasonography for ovarian reserve assessment. *Obstetrics & Gynecology* 2022; 139(4):561-70.
40. Olawade DB, Teke J, Adeleye KK, Weerasinghe K, Maidoki M, David-Olawade AC. Artificial intelligence in in-vitro fertilization (IVF): A new era of precision and personalization in fertility treatments. *Journal of gynecology obstetrics and human reproduction* 2025; 54(3):102903.

Applications of Artificial Intelligence in Diagnosis and Treatment of Infertility: A Narrative Review

Malihe Afiat¹, Dina Abadi Babil^{2,3*}

1. Associate Professor, Department of Obstetrics and Gynecology, Family and Youth of Population Support Research Center, Faculty of Medicine, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.
2. PhD Student in Reproductive Health, Nursing and Midwifery Care Research Center, Mashhad University of Medical Sciences, Mashhad, Iran.
3. Department of Nursing and Midwifery, Mashhad Branch, Islamic Azad University, Mashhad, Iran.

Abstract

Received: Dec 28, 2025 Accepted: March 30, 2026

Introduction: Along with the growth of modern technologies, the use of artificial intelligence (AI) in infertility diagnosis and treatment has expanded rapidly; however, the available evidence is scattered and heterogeneous, and most studies have not provided a comprehensive systematic review. Previous studies have shown that AI models have promising performance than traditional methods in predicting IVF success, assessing embryos, and analyzing sperm; however, results have been inconsistent, necessitating a systematic review. This study aims to systematically review the applications of AI in the field of infertility and to analyze the accuracy, benefits, and limitations of this technology.

Methods: In this narrative review which was conducted in accordance with PRISMA 2020 guidelines, a search was performed in PubMed, Scopus, Web of Science, Google Scholar, and Cochrane databases between 2015 and 2025. Out of 4,320 retrieved records, 70 studies met the inclusion criteria after screening and quality appraisal using the QUADAS-2 tool. The data were synthesized narratively.

Results: Artificial intelligence models have demonstrated considerable effectiveness in various areas of infertility. In predicting the success of in vitro fertilization (IVF), the accuracy of machine learning-based models has been reported to range between 75% and 92% in different studies. In addition, in the assessment of embryo quality using time-lapse imaging, deep learning models in some cases have shown better performance than human evaluation. In sperm analysis, computer vision algorithms have also demonstrated greater accuracy than manual methods in detecting morphological abnormalities and DNA fragmentation. Furthermore, machine learning models have shown promising results in personalizing treatment protocols, particularly in determining gonadotropin dosage and predicting ovarian response. In the diagnosis of causes of female infertility, the accuracy of artificial intelligence models in identifying conditions such as polycystic ovary syndrome (PCOS) and certain hormonal disorders has been reported to range between 70% and 88%.

Conclusion: AI can significantly enhance diagnostic accuracy, improve embryo selection, and enable personalized reproductive care. Nevertheless, challenges remain, including data bias, lack of standardized datasets, and limited external clinical validation. Future research should focus on improving algorithm transparency and developing more reliable models.

Keywords: Artificial Intelligence, Assisted Reproductive Technology, Embryo Selection, Infertility, IVF, Machine Learning

► Please cite this article as:

Afiat M, Abadi Babil D. Applications of Artificial Intelligence in Diagnosis and Treatment of Infertility: A Narrative Review. *Iran J Obstet Gynecol Infertil* 2026; 29(1):65-80. DOI: 10.22038/ijogi.2026.91746.6569

