

نامہ علوم پایہ

۱۶
پاییز و زمستان ۱۴۰۴

دوفصلنامه تخصصی گروه علوم پایہ فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران



B. Farazmand . 2025



نامه علوم پایه

دوفصلنامه تخصصی گروه علوم پایه فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

شماره شانزدهم، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

صاحب امتیاز: فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

مدیر مسئول: مهدی زارع

سر دبیر: علی فرازمنند

هیئت تحریریه: مسعود آیین نژاد، مهدی زارع، احمد شیخی، احمد شعبانی، علی فرازمنند

ویراستار: علی فرازمنند

کارشناس: هانیه ستوده

مسئول پشتیبانی سایت: آتنا فرخ

گرافیک و صفحه آرایی: یلدا آیین نمازی

طرح روی جلد: بهار فرازمنند

چاپ و صحافی: عارف آریافر

دوفصلنامه «نامه علوم پایه» نشریه تخصصی گروه علوم پایه فرهنگستان به نشر مسائل آموزشی و پژوهشی قلمروهای علوم پایه (ریاضی، زمین‌شناسی، زیست‌شناسی، شیمی و فیزیک) اختصاص دارد. اولویت انتشار در این مجله با مقالاتی است که به مسائل و چالش‌های اساسی این قلمروها، سیاست آموزشی و پژوهشی، ارتقای سطح دانش و پژوهش در کشور، ارتقای سطح ارتباط میان دانشمندان علوم پایه و سایر قلمروهای علمی و نیز کل جامعه بپردازند. توسعه نگرش علوم یکپارچه و فعالیت‌های بین رشته‌ای و ترارشته‌ای و تبیین اهمیت این نگرش‌ها در حل مسائل جامعه و توسعه پایدار از اولویت‌های مهم دیگر نشریه است. در نگارش یا ترجمه مقالات علمی نیز شایسته است که کانون توجه، گزارش و معرفی یافته‌های نوین علمی و سرمشقی‌هایی باشد که برای گسترش دانش و معرفت علمی جامعه نقش بنیادی دارند.

نشانی: تهران، بزرگراه شهید حقانی، خروجی فرهنگستان‌های جمهوری اسلامی ایران و کتابخانه ملی، فرهنگستان علوم

کد پستی: ۱۵۳۸۶۳۱۱۱ صندوق پستی: ۱۹۳۹۵-۵۳۱۸ تلفن و دورنگار: ۸۸۶۴۵۵۹۵

رایانامه: basic@ias.ac.ir

تارنما: www.ias.ac.ir

«مسئولیت صحت مطالب بر عهده نویسندگان است»

شاپا ۲۷۸۳-۳۶۶۶

۴۵۰ هزار تومان

تک تک مقالات و نسخه رنگی کامل مجله از تارنمای فرهنگستان علوم، رایگان قابل دریافت است.



راهنمای نگارش مقالات

۱. مقالات از نوع مروری، درباره موضوعات مطرح علوم پایه، نقد و معرفی برنامه‌ها و سیاستگذاری‌های کلان علمی، آموزشی و پژوهشی در تمام سطوح، نقد کتاب و معرفی نوآوری‌های علمی و فنی در زمینه علوم پایه باشند.
۲. پیشنهاد تألیف مقاله با ارائه خلاصه‌ای شامل هدف و مفاد اصلی آن، برای داوری و تأیید اولیه به دفتر مجله ارسال شود.
۳. درنگارش مقالات شئون تألیف اصیل و شایسته، و نیز ارجاع دقیق و درست و بهره‌برداری از داده‌های آثار دیگران رعایت شود.
۴. مقالات مربوط به آموزش و پژوهش بین و ترا رشته‌ای و دیدگاه‌های مرتبط با آموزش یکپارچه علوم و توسعه پایدار اولویت دارند.
۵. مجله از انتشار نوشته‌ها و یادداشت‌های مربوط به زندگی دانشمندان و نامداران علم و صنعت در ایران و جهان، معرفی و نقد آثار و احوال آنان استقبال می‌کند.
۶. انتشار ترجمه مقالات دارای اولویت و ضرورت با سفارش و تأیید سردبیر و هیئت تحریریه امکان‌پذیر است.
۷. در صفحه نخست عنوان، نام مولفان، آدرس محل کار، همراه با آدرس ایمیل نویسنده مسئول آورده شود.
۸. مقالات دارای چکیده فارسی و انگلیسی - شامل نکات اصلی و کلیدی در حداکثر ۲۵۰ کلمه - به همراه چند کلیدواژه باشند.
۹. ارجاعات به منابع در داخل متن فقط با شماره‌بندی از ۱ الی آخر (در پرانتز) آورده شوند. منابع فارسی و انگلیسی هر دو در طول خود متن با شماره‌گذاری پیاپی آورده شوند. منابع اینترنتی صرفاً به شکل پانوش در صفحه مرتبط بیاید.
۱۰. نسخه دیجیتال عکس‌ها و تصاویر آمده در متن در فایل جداگانه ارسال شوند.
۱۱. در ضبط منابع ادواری به ترتیب نام نویسنده/نویسندگان، عنوان، سال انتشار، نام نشریه، شماره آن و شماره صفحات بیاید. درمورد کتاب، نام نویسنده/نویسندگان، سال انتشار و سپس نام ناشر و بعد صفحات ارجاع می‌آید.
۱۲. هر گونه استفاده از هوش مصنوعی در نوشتار و یا بازآفرینی اشکال و غیره، باید در داخل متن در جای مربوطه یا زیرنویس اشکال قید شود.



فهرست

سه دهه برای نجات آب ایران: از ترمیم تا باززایی و پایداری	اسکندر زند ۵
علم به مثابه روش یا چرا علم بی‌اخلاق است!	عطا کالیراد ۷
پویش باور در برابر علم، رمز‌گشایی از اسطوره‌های ریاضی و هوش مصنوعی بخش ۲	غلامرضا رکنی لموکی ۱۱
هوش مصنوعی به مثابه سوژه حاکمیتی: بازاندیشی در «حاکمیت هوش مصنوعی» در حقوق عمومی	عباس پورخصالبان ۲۵
تاریخچه توجه به ملاحظات اخلاقی در انجام کارهای آماری	علی دولتی ۴۱
واکاوی تضاد و تعامل بین مکانیسم‌های تکاملی تنازع بقا و نظام‌های اخلاقی در جوامع انسانی	محمد خان احمدی، مریم مالمیر ۶۱
ساعت‌های اتمی، مولکولی و زیستی: روایت‌های متفاوت زمان	بهاره احمدی، علی اکبر موسوی موحدی ۷۳
تفکر محاسباتی انسان‌محور: معلم درونی در تربیت تمام ساحتی	آرta امیر جمشیدی، نقی اسدی لمعه‌دشت ۸۵
ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران	احمد عباس نژاد، بهنام عباس نژاد ۱۰۱
هرباریوم‌ها به عنوان زیرساخت‌های داده‌ای تنوع زیستی، از مجموعه‌های گیاهی تا پایگاه‌های داده هوشمند	فرخ قهرمانی نژاد، حمید نظری، مریم خواجه پیری، احسان حسینی ۱۱۳
استروئیدهای آنابولیک اندروژنی ساختار، عملکرد و زیان‌های جانبی	نگار کازری، سید محمد هادی علوی ۱۲۲
معرفی کتاب «تنوع زیستی ایران در یک نگاه (ویراست دوم)» تنوع زیستی: سرمایه راهبردی برای آینده ایران	فریدون عوفی ۱۳۱
دیدگاه شاخه علوم ریاضی فرهنگستان در مورد کاهش طول دوره تحصیلات تکمیلی	۱۳۳



«سرمقاله»

سه دهه برای نجات آب ایران: از ترمیم تا باززایی و پایداری

اسکندر زند

بخش تحقیقات علف‌های هرز، موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
eszand@yahoo.com

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

انباشته است. هدف این مرحله، احیای کامل منابع آب نیست، بلکه متوقف کردن روند تخریب، تثبیت شرایط و ایجاد بستر لازم برای بازگشت چرخه آب به تعادل است. در این دوره، روندهای ناپایدار گذشته باید متوقف و اصلاحات بنیادین در حکمرانی آب آغاز شود. نخستین اقدام، توقف برداشت‌های مازاد از منابع آب زیرزمینی و سطحی است. این امر مستلزم انسداد چاه‌های غیرمجاز، محدودسازی برداشت چاه‌های مجاز، توقف تخصیص‌های جدید آب و جلوگیری از هرگونه فشار مضاعف بر منابع آبی کشور است. همزمان، سیاست‌هایی که طی دهه‌های گذشته به تشدید بحران انجامیده‌اند، از جمله توسعه فعالیت‌های ناسازگار با ظرفیت آبی سرزمین، سدسازی‌های فاقد توجیه اکولوژیک و طرح‌های انتقال آب بدون پشتوانه علمی، باید مورد بازنگری اساسی قرار گیرند.

ترمیم فوری زخم‌های چرخه آب نیز از اولویت‌های این دهه است؛ از جمله بازگرداندن جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه‌ها، احیای مسیرهای طبیعی آب، آغاز تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و اجرای اقدامات فوری برای کاهش نرخ فرونشست زمین.

در حوزه مدیریت مصرف، اجرای نظام تحویل حجمی آب، اصلاح الگوی کشت، کاهش تلفات شبکه‌های توزیع، محدودیت برداشت در دشت‌های بحرانی و ارتقای بهره‌وری مصرف آب ضروری است. تحقق این اهداف بدون استقرار نظام جامع داده و پایش امکان‌پذیر نیست؛ از این رو نصب کنتورهای هوشمند، ایجاد سامانه ملی داده‌های باز آب و پایش مستمر آبخوان‌ها باید در اولویت قرار گیرد.

موفقیت دهه ترمیم بدون مشارکت جامعه امکان‌پذیر نیست. افزایش سواد آب، مشارکت جوامع محلی، ایجاد مشوق‌های اقتصادی برای کاهش مصرف و مشارکت ذی‌نفعان در تصمیم‌گیری‌ها، سرمایه اجتماعی لازم برای اجرای اصلاحات را فراهم می‌کند.

در نهایت، مهم‌ترین اقدام این دهه اصلاح حکمرانی آب است؛ اصلاحی که در آن نقش دولت از «تخصیص‌دهنده آب» به «تنظیم‌گر منابع آب» تغییر می‌یابد، مدیریت بر مبنای حوضه‌های

جامعه جهانی در مواجهه با بحران‌های اقلیمی، تخریب اکوسیستم‌ها و کاهش تنوع زیستی، مسیر دستیابی به توسعه پایدار را در قالب یک برنامه بلندمدت سه‌دهه‌ای ترسیم کرده است. در این چارچوب، دهه ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ به عنوان دهه ترمیم اکوسیستم‌ها، دهه ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰ به عنوان دهه باززایی طبیعت و نظام‌های زیستی و دهه ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۰ به عنوان دهه زندگی در هماهنگی با طبیعت شناخته می‌شوند. این نقشه راه بیانگر آن است که دستیابی به پایداری، فرآیندی تدریجی است که از توقف روند تخریب آغاز می‌شود، با باززایی ظرفیت‌های طبیعی ادامه می‌یابد و در نهایت به استقرار الگویی از توسعه منتهی می‌شود که در آن انسان در چارچوب توان اکولوژیک سرزمین زندگی و تولید می‌کند.

بحران آب ایران نیز از همین منطق پیروی می‌کند. این بحران دیگر صرفاً مسئله کمبود بارش یا خشکسالی نیست، بلکه نتیجه اختلال عمیق در چرخه طبیعی آب است. چرخه‌ای که طی هزاران سال با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران سازگار شده بود، اما در چند دهه اخیر بر اثر برداشت‌های فراتر از ظرفیت تجدیدپذیر، توسعه‌های نامتوازن، تخریب پوشش گیاهی، فرسایش خاک، افت شدید آبخوان‌ها، گسست ارتباط اکولوژیک رودخانه‌ها و تالاب‌ها و کاهش کیفیت منابع آب، کارکرد طبیعی خود را از دست داده است. امروز با یک چرخه آب آسیب دیده روبه‌رو هستیم، نه صرفاً با کمبود آب.

تجربه جهانی نشان می‌دهد که بازگرداندن چرخه آب به تعادل، یک پروژه کوتاه‌مدت یا صرفاً مهندسی نیست، بلکه فرآیندی بین‌نسلی است که حداقل سه دهه زمان می‌طلبد. از این رو، می‌توان برای ایران نیز یک نقشه راه سه‌مرحله‌ای شامل ترمیم، باززایی و پایداری ترسیم کرد؛ مسیری که همسو با رویکردهای نوین جهانی، زمینه عبور تدریجی کشور از بحران آب را فراهم می‌سازد.

دهه نخست: دهه ترمیم^۱

دهه نخست، دهه توقف روندهای ناپایدار و ترمیم آسیب‌های

آبریز استقرار پیدا می‌کند، هماهنگی بین‌بخشی تقویت می‌شود، قوانین الزام‌آور حفاظت از منابع آب تدوین می‌شود و نهادهای مستقل پایش و ارزیابی شکل می‌گیرند.

دهه ترمیم، دهه توقف سقوط است؛ مرحله‌ای که ایران از مسیر تخریب خارج شده و به حداقل ثبات اکولوژیک دست می‌یابد.

دهه دوم: دهه باززایی^۱

پس از تثبیت شرایط، دهه دوم، دهه باززایی چرخه آب است؛ مرحله‌ای که در آن تنها از تخریب جلوگیری نمی‌شود، بلکه ظرفیت‌های طبیعی و اجتماعی از دست‌رفته دوباره ساخته می‌شوند. در این مرحله، بازسازی اکولوژیک چرخه آب از طریق احیای جنگل‌ها و مراتع، افزایش نفوذپذیری خاک با کشاورزی حفاظتی، کشت پوششی، مدیریت بقایای گیاهی، توسعه آب‌خیزداری مبتنی بر طبیعت و اجرای برنامه‌های آب‌خوانداری در مقیاس حوضه‌های آبریز دنبال می‌شود. این اقدامات موجب افزایش ذخیره طبیعی آب، کاهش رواناب و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها خواهد شد.

همزمان، باززایی اقتصادی و اجتماعی مناطق ضروری است. در بسیاری از مناطق کشور، ادامه فعالیت‌های ناسازگار با ظرفیت آبی سرزمین امکان‌پذیر نیست. بنابراین باید به تدریج اقتصاد این مناطق به سمت فعالیت‌های کم‌آبر، اقتصاد سبز، صنایع سازگار با محیط‌زیست و معیشت‌های متناسب با توان اکولوژیک هدایت شود.

در این دهه، اصلاحات حکمرانی نیز تکمیل می‌شود. مدیریت مشارکتی حوضه‌های آبریز، توافق میان ذی‌نفعان، استقرار نظام دائمی تخصیص آب، تقویت قوانین حفاظت از منابع آب و استقلال کامل نهاد تنظیم‌گر، پایه‌های حکمرانی پایدار را شکل می‌دهد.

از سوی دیگر، برنامه‌های بلندمدت بازسازی آبخوان‌ها، احیای رودخانه‌ها و تالاب‌ها، کاهش فرونشست زمین و بازگرداندن جریان‌های طبیعی آب اجرا می‌شود تا بخشی از خسارت‌های انباشته دهه‌های گذشته جبران گردد.

در همین دوره، اقتصاد آب نیز وارد مرحله ارتقای بهره‌وری می‌شود. اصلاح الگوی کشت، توسعه فناوری‌های نوین آبیاری، افزایش بهره‌وری آب در صنعت و انرژی و استفاده هوشمندانه از هر واحد آب، محورهای اصلی این تحول خواهند بود.

در نهایت، باززایی بدون احیای پیوند آب، خاک و پوشش گیاهی ممکن نیست. افزایش ماده آلی خاک، کاهش فرسایش، مدیریت پایدار اراضی و تقویت پوشش گیاهی، بنیان بازگشت چرخه طبیعی

آب را تشکیل می‌دهد.

دهه باززایی، دهه‌ای است که در آن چرخه آب دوباره ساخته می‌شود و کشور از وضعیت اضطراب به مسیر باززایی ظرفیت‌های طبیعی بازمی‌گردد.

دهه سوم: دهه پایداری و زندگی هماهنگ با طبیعت^۲

پس از دو دهه ترمیم و باززایی، کشور وارد مرحله تثبیت پایداری می‌شود. در این دوره، چرخه آب به تعادل نزدیک می‌شود، آبخوان‌ها روند باززایی خود را ادامه می‌دهند، رودخانه‌ها از جریان‌های پایدار برخوردار می‌شوند و اکوسیستم‌ها توان بیشتری برای مقابله با خشکسالی پیدا می‌کنند.

در این مرحله، توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور بر پایه ظرفیت واقعی اکولوژیک سرزمین برنامه‌ریزی می‌شود و تمامی تصمیم‌های توسعه‌ای در چارچوب توان تجدیدپذیر منابع آب اتخاذ خواهد شد. مدیریت هوشمند آب با بهره‌گیری از سامانه‌های پایش لحظه‌ای، مدل‌های پیش‌بینی، هوش مصنوعی و مدیریت یکپارچه آب، خاک، غذا و انرژی، به هسته اصلی نظام حکمرانی تبدیل می‌شود.

در بخش تولید، کشاورزی اکولوژیک و کم‌آبر الگوی غالب خواهد بود و صنعت نیز با افزایش بهره‌وری، فشار خود بر منابع آب را به حداقل می‌رساند. در بخش محیط‌زیست، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و سایر زیست‌بوم‌های آبی از حقایق پایدار برخوردار خواهند شد و سرمایه طبیعی کشور به تدریج بازسازی می‌شود.

در این دهه، فرهنگ مصرف مسئولانه آب نیز به یک ارزش اجتماعی تبدیل می‌شود و هماهنگی میان انسان، اقتصاد و طبیعت، مبنای سیاست‌گذاری و توسعه کشور قرار می‌گیرد.

دهه پایداری، دهه استقرار زندگی هماهنگ با طبیعت است؛ مرحله‌ای که در آن چرخه آب نه تنها حفظ می‌شود، بلکه توان بازتولید و تقویت خود را نیز بازیافته است.

در مجموع نجات آب ایران نه با یک طرح عمرانی، نه با یک فناوری و نه با یک دولت محقق خواهد شد. بازگرداندن چرخه آب به تعادل، یک پروژه ملی، بین‌نسلی و تمدنی است که تنها با تداوم سیاست‌ها، اصلاح حکمرانی، مشارکت مردم و احترام به ظرفیت‌های طبیعی سرزمین امکان‌پذیر خواهد بود. اگر دهه نخست، دهه توقف تخریب، دهه دوم، دهه باززایی طبیعت و دهه سوم، دهه استقرار توسعه هماهنگ با طبیعت باشد، می‌توان امیدوار بود که ایران نیز همانند الگوی جهانی، مسیر بازگشت به پایداری آبی را طی کند و آینده‌ای امن‌تر برای نسل‌های پیش‌رو رقم بزند.

علم به مثابه روش یا چرا علم بی اخلاق است!

عطا کالیراد

پژوهشگر اکولوژی و زیست‌شناسی تکاملی،

موسسه زیست‌شناسی ماکس پلانک در توبینگن، آلمان

ata.kalirad@tuebingen.mpg.de

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

از اهمیت دیرین اخلاق در ساحت علم کماکان کاسته نشده است. با این وجود، می‌شود استدلال کرد که روش علم -اگر به اجزای بنیادین خود فروکاسته شود- باورهای اخلاقی را شامل نمی‌شود. نمونه‌های تاریخی علم‌ورزان با ساختارهایی که بدون پیروی از باورهای اخلاقی قابل دفاع، به تولید گزاره‌های علمی و یا پدیدآوردن فناوری‌های نو دست‌زدند فراوان است. دقیقاً به همین علت که روش علمی مبنای اخلاقی ندارد، باید اخلاق‌مداری را در بخش‌های دیگر برنامه‌های آموزشی گنجانند. در این چارچوب، به جای درآمیختن اخلاق با آموزش روش علم، علم را باید به مثابه مجموعه‌ای از قواعد آموخت که پیروی از آن، پیشرفت علمی را میسر می‌کند. افزون بر این، اخلاق باید به عنوان بخشی مستقل در برنامه درسی دانشجویان همه رشته‌ها -من جمله علوم پایه- گنجانده شود تا پرورش شهروندانی اخلاق‌مدار و متعهد تضمین شود.

کلیدواژه‌گان: علم، روش علمی، آموزش، اخلاق، فلسفه علم

معرفتی متمایز می‌کند چندان آسان نیست. اغلب دانشجویان شاخه‌های مختلف علم در مقطع کارشناسی با آرای کارل پوپر، که نخست به زبان آلمانی در ۱۹۳۵ میلادی تحت عنوان *منطق پژوهش*^۱ منتشر شد و در ۱۹۵۹ میلادی با نام مشهورتر *منطق اکتشافات علمی*^۲ به زبان انگلیسی به زیور طبع آراسته شد، آشنا می‌شوند. از منظر او، ابطال‌پذیری^۳ مرز میان علم و غیر علم است. نقل قول از زندگی‌نامه پوپر به قلم خودش، تحت عنوان *پویش ناتمام*^۴ خالی از لطف نیست:

«در ابتدای این دوره من آرای خود در باب مرزبندی میان نظریه‌های علمی (همانند نظریه اینشتاین) و نظریه‌های غیر علمی (مانند نظریات [کارل] مارکس، [زیگموند] فروید، و [آلفرد] آدلر) را بیشتر پروا ندادم. بر من آشکار شد که آنچه یک نظریه و یا یک گزاره را علمی می‌کند ظرفیت آن برای نفی یا طرد برخی رویدادهای ممکن است -توانایی در ممنوع یا ناشدنی شماردن این وقایع. در نتیجه، هر چه یک نظریه توانایی نفی بیشتری داشته باشد، بر دانش ما می‌افزاید.»^۵

برخلاف آنچه جناب پورخصالیان نگاشتند، نظریات فروید یا آلفرد آدلر، هم ردیف نظریات مارکس، نمونه بارز شبه‌علم هستند. به عنوان مثل، علت روان‌تکان^۶ در فلسفه فروید ناشی از تجربه‌ای دردناک است که چنان روان را پریشان می‌کند که به روان‌نژندی^۷

متنی که جناب عباس پورخصالیان در پاسخ به یادداشت سردبیر نامه علم پایه، استاد فرازند، که به مناسبت سخنرانی دکتر ثبوتی نگاشته شده بود، نکاتی جالب در باب اهمیت معرفت‌شناختی روش علمی را بیان کرد. محور اصلی بحث، در باب اخلاق علم یا تقوای علم، به نظر جای بحث بسیار دارد و این یادداشت کوتاه صرفاً تلاشی است برای فهم بهتر موضوع بحث تا علم‌ورزی در این باب را آسان کند.

در گام نخست، باید مشخص شود که مراد ما از «علم» و «علم‌ورزی» چیست. این واژه علم خود اندکی دردسرساز است چراکه در زبان پارسی این واژه عربی به معنای «یقین» و «ادراک» و «دانستن» و غیره استفاده می‌شود. البته نمی‌توان خام‌اندیشانه سودای زبانی منطقی را در سر داشت، زبانی که در آن هر واژه تنها در یک معنای به کار رود. افزون بر این، استفاده از *ساینس* نیز در متون پارسی چنان زینده نیست و احتمالاً توسط پژوهشگران علوم زیستی به عنوان اشاره‌ای به نشریه معروفی که این نام را یدک می‌کشد تعبیر شود. با این وجود شاید واژه علم، به سبب معانی مختلفی که در پس ذهن ما تداعی می‌کند، ما را به کژراهه کشاند اما در باب چیستی علم: با وجود میلیون‌ها فردی که در سراسر جهان امروز خود را علم‌ورز می‌خوانند، تعریف آنچه علم را از بقیه روش‌های

1. Logik der Forschung

2. The Logic of Scientific Discovery

3. Falsifiability

4. Unended Quest: An Intellectual Autobiography (1976)

6. Trauma

7. Neurosis

۵. همان، ص ۴۲، ترجمه نویسنده.

کرده‌اند تا علم را بهتر توصیف کنند. شاید جالب‌ترین این تلاش را بتوان اثر خواندنی برونو لاتور^۵، فیلسوف شهیر فرانسوی، تحت عنوان *حیات آزمایشگاهی: بر ساخت اجتماعی حقایق علمی*^۶ نام برد. لاتور در این اثر همانند مردم‌شناسی که قبیله‌ای در دل جنگل‌های را به نظاره می‌نشیند تا از ساختار آن آگاه شود، سعی می‌کند با مشاهده چگونگی رتق و فتق امور در یک آزمایشگاه از چگونگی تولید نظریه‌های علمی آگاه شود.

آنچه در سخنرانی دکتر ثبوتی مطرح شد، و بر اغلب انسان‌ها - جز متفکران دواآتشی پسامدرنیست یا ضدمدرنیست - آشکار است که علم پیشرفت می‌کند و به ابداع روش‌های و فن‌آوری‌های جدیدی می‌انجامد. ابزارهایی - از جنس سخت‌افزار و نرم‌افزار - که به معنای راستین نماد پیشرفت در معنای مادی هستند. به عنوان مثال، به زحمت بتوان در آزمایشگاه‌های مدرن زیست‌شناسی مولکولی، روش‌های نوین دستکاری القابای حیات را به کار بست و از شدت پیشرفت در این حوزه در ده دهه اخیر حیران نشد. اما مشکل اساسی اینجاست که نه دیدگاه پوپر - که علم را بهترین روش کسب معرفت می‌پندارد - و نه دیدگاه‌های پسامدرن نسبت به علم - منجمله دیدگاه کون که زاده دهه ۱۹۶۰ میلادی بود و منعکس‌کننده روح آن زمانه است - قادر به توضیح چرایی پیشرفت علم نیستند.

به نظر راقم این سطور، دیدگاه مایکل استرومن^۷ که در *ماشین دانش: چگونه ناخردگرایی علم مدرن*^۸ را آفرید ارائه شده، بیش‌ترین بخت برای توضیح ماهیت علم به صورتی که پیشرفت در علم را نیز تبیین کند را دارد. از منظر استرومن، روش علم، بر خلاف اغلب روش‌های کسب معرفت پیش از علم، انعکاس خردمندی ما نیست بلکه مجموعه‌ای از قواعد است که در کنار هم به مثابه الگوریتمی عمل می‌کنند که به تولید گزاره‌های علمی و پیشرفت در علم منجر می‌شود. از این منظر، قواعد علم‌ورزی بیش‌تر به بازی‌هایی که انسان ابداع کرده می‌ماند تا فلسفیدن در معنای سنتی آن. به همین سبب فلسفیدن - با وجودی آنکه انعکاس خرد انسان است - به مکاتب فلسفه می‌انجامد که می‌توانند در کنار هم تا قرن‌ها دوام بیاورند اما علم‌ورزیدن برنامه‌های پژوهشی را که در پی تبیین پدیده‌ای خاص هستند در رقابت مستقیم بایکدیگر قرار می‌دهد. فرآیندی که بیش‌تر به تکامل داروینی می‌ماند و البته همانند تکامل داروینی لزوماً به کشف بهترین راه حل در کوتاه‌ترین مدت نمی‌انجامد اما راه‌حل‌های سودمند را در طی زمان معقول نمایان می‌کند.

می‌انجامد. اما آدلر، از هم‌عصران فروید، باور داشت که روان‌نژندی خود به یادآوری انتخابی وقایع می‌انجامد و روان‌تکان را سبب می‌شود. ابطال کردن روان‌شناسی فردی آدلر یا فروید به روش علمی در عمل ناممکن خواهد بود. از این منظر نمی‌توان کاستی‌های آرای فروید و یا آدلر را شاهدهی برای ناسودمندی علم به عنوان روشی برای درمان روان انسان شناخت. پیشرفت‌های فراوان در حوزه علوم شناختی در دهه‌های اخیر خود شاهدهی بر سودمندی علم‌ورزی در فهم ماهیت خودآگاهی انسان هستند. در سال‌های اخیر و با پدیدآمدن مدل‌های بزرگ زبانی - تحولی شگرف در حوزه یادگیری ماشین و گامی به جلو در مسیری که یحتمل به هوش مصنوعی عمومی منتهی می‌شود - بیش‌تر حوزه‌های علوم انسانی نیز دستخوش تغییر خواهند شد.

اما حتی با معیار پوپر، برخی حوزه‌های علمی نیز چندان علمی نخواهند بود. به عنوان مثال، پوپر زیست‌شناسی تکاملی را ابطال‌پذیر نمی‌داند. گهگاه این دیدگاه به عنوان نقدی بر نظریه تکامل مطرح می‌شود، اما مقصود پوپر اساساً چیزی دیگری بود:

«[...] پرسش در باب جایگاه علمی نظریه داروین - در بسیط‌ترین معنای آن، یعنی نظریه آزمون حذف خطا - در خور تأمل است. به این نتیجه رسیده‌ام که داروینیسم یک نظریه علمی آزمودنی نیست، بلکه یک برنامه متافیزیکی برای پژوهش^۱ - چارچوبی ممکن که در بستر آن نظریه‌های علمی آزمودنی شکل می‌گیرند.»^۲

این توصیف پوپر از تکامل زیستی از آن جهت جالب توجه است که نشان می‌دهد حتی در عالم علم هم همه نظریه‌های یا برنامه‌های پژوهشی با معیاری سختگیرانه علمی نمی‌خوانند.

اما چرا به فهم ماهیت علم اصرار می‌ورزم؟ مقایسه علم با روش‌های دیگر کسب معرفت ضرورتاً نیازمند فهم چستی علم است. از عجایب روزگار این که علم - با وجود آنکه حیات انسان را در دو قرن اخیر از بیخ و بن دگرگون کرده است - همچنان از فروگاسته‌شدن به توصیفی که مورد اجماع علم‌ورزان وفلاسفه علم باشد طفره می‌رود. با تورقی سراسری در کتاب‌های فلسفه‌ی علم با فهرستی از چارچوب‌های نظری برای توصیف روبرو می‌شویم که اغلب با هم در تضاد هستند. مشهورترین این‌ها، تضاد بنیادین میان توصیف کارل پوپر از علم (مبتنی بر مرزبندی میان علم و غیر علم) و توصیف تامس کون^۳ در ساختار انقلاب‌های علمی^۴ (که بر اساس آن پیشرفت در علم را باید ناشی از جایگزینی آبرنگاره‌های کهنه با نسخه‌های جدیدی دانست که نسبت به یکدیگر قیاس‌ناپذیر هستند) است. فلاسفه پسامدرنی نیز با رویکردها مختلف تلاش

1. A metaphysical research programme

۲. همان، ص ۱۹۵، ترجمه نویسنده.

3. Thomas Kuhn

4. The Structure of Scientific Revolution (1962)

5. Bruno Latour

6. *Laboratory Life: The Social Construction of Scientific Facts* (1979)

7. Michael Strevens

8. The Knowledge Machine: How Irrationality Created Modern Science (2020)

افکار داروین و خوانش افرادی چون لیسنکو از سوسیالیسم - به محقق رفت اما فیزیک هسته‌ای و مکانیک آماری در همان جامعه کم‌وبیش همسنگ جوامع غربی پیش رفت. علم‌ورزان بسیاری را نیز می‌توان در طی تاریخ قرن بیستم یافت که در چارچوب سامانه‌هایی که بسیاری از اصول اخلاقی را پایمال می‌کردند به علم‌ورزی ادامه دادند و موفقیت علمی نیز کسب کردند. به عنوان مثال، اتو واربرگ^۱ - که در ۱۹۳۱ میلادی جایزه نوبل فیزیولوژی و پزشکی را به تنهایی از آن خود کرد - در طی دوران نازی‌ها به پژوهش در موسسه فیزیولوژی یاخته‌ای در برلین ادامه داد و به کسانی که از حکومت نازی‌های شکایت می‌کردند توصیه می‌کرد که توجه خود را به علم معطوف کنند. جالب آنکه سران حزب نازی از پژوهش‌های واربرگ مطلع بوده و با وجود داشتن نژاد یهودی و همجنس‌گرایی واربرگ، از پژوهش‌هایش حمایت می‌کردند.^۲

به همین سبب، تصور می‌کنم اخلاق علم‌ورزی - به معنای پیروی از قواعد علم‌ورزی - با به شیوه‌ای درست به علم‌ورزان آینده آموزش داده شود و در آمیختن آن با اخلاق در معنای عام آن، آموزش علم‌ورزی صحیح را دشوار می‌کند. پرورش انسان‌های اخلاق‌مدار باید از اهداف کلی آموزش باشد، اما آموزش علم‌ورزی روش و چارچوب خاص خود را می‌طلبد، اما این به معنای جدا کردن اخلاق از علم نیست؛ تنها با حاکمیت دیدگاهی اخلاقی در سطوح تصمیم‌گیری می‌توان تضمین کرد که پیشرفت علم پیامدهای اجتماعی ترازیک نخواهد داشت.

از این منظر دیدگاه استراونز را در این بحث سودمند می‌دانم که اگر علم‌ورزی را پیروی از قواعدی فرض کنیم، آنگاه بحث در باب اخلاق در علم‌ورزی آسان‌تر می‌شود. در بازی‌های که بشر ابداع می‌کند، تا جایی که بازیکن از قوانین بازی پیروی کند، بازی به درستی پیش می‌رود. از این منظر، آنچه در برگزاری صحیح یک بازی اهمیت دارد نه اخلاق - به معنای عامی که تا حدی بسته به باورهای فرهنگی و دینی است - بلکه قاعده‌مندی است. مسائلی که در باب اخلاق در علم‌ورزی مطرح می‌شوند در اغلب موارد در چارچوب پیروی از قواعد بازی علم قابل توصیف هستند. این قواعد برای پیشرفت علم ضروری است؛ انتشار آگاهانه نتایج نادرست یا دستکاری داده‌های آزمایشگاهی شکست قواعد بازی علم هستند که مستقیماً به کندشدن آهنگ پیشرفت علم می‌انجامند.

از این منظر، علم به خودی خودی تنها مجموعی محدود از قواعد را یدک می‌کشد که شاید بتوان در معنای عمومی اخلاقی خواند، اما وجود چنین قواعدی به دلیل اخلاقی‌بودن آنان نیست بلکه این قواعد بخشی جدایی‌ناپذیری از فرآیند علم‌ورزی است. به همین علت، علم‌ورزی با رعایت قواعد آن ضرورتاً در جوامع اخلاقی و یا توسط افراد اخلاق‌مدار - در معنای عام آن، یعنی فردای پاکدامن یا باتقوا - رخ نمی‌دهد و پیشرفت علمی در جوامع و بسترهای غیر اخلاقی نیز صورت می‌پذیرد. به عنوان مثال ژنتیک در اتحاد جماهیر شوروی برای مدت‌ها - به سبب تصور تضادی میان

1. Otto Heinrich Warburg

۲. بخشی از حمایت سران حزب نازی از واربرگ به پژوهش‌های او در باب سرطان مربوط می‌شد چراکه آدولف هیتلر تجربه‌ای دردناک از بیماری سرطان مادرش داشت و شخصاً به پژوهش‌های واربرگ علاقه داشت. برای اطلاعات بیشتر، به کتاب اخیر سم ایل (Ravenous: Otto Warburg, the Nazis, and the Search for the Cancer-diet Connection) مراجعه کنید.

پویش باور در برابر علم، رمز‌گشایی از اسطوره‌های ریاضی و هوش مصنوعی بخش ۲

غلامرضا رکنی لموکی

دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران
rokni@ut.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

نقش باور و دینامیسم آن در شکل‌گیری دانش و موقعیت مفهوم ایمان در برابر دانش، در یک چارچوب معقول مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای رسیدن به هدف اصلی این مقاله که تحلیل باورهای مرتبط با علوم ریاضی و هوش مصنوعی است، لازم است که به کلیت ارتباط باور و دانش بپردازیم. از طرف دیگر، نبرد دنیالدار ایمان و علم، ریاضیات را نیز درگیر می‌کند، زیرا ساختارهای اجتماعی و شخصی ریشه‌های محکمی در گسترش دانش بشری به طور عام و ریاضی به طور خاص دارند. در این راه، با تمرکز بر مفهوم اسطوره‌های ریاضی، نقش چند جانبه آنها را بررسی خواهیم کرد. نفوذ فزاینده هوش مصنوعی و علم داده‌ها در سطح اجتماعی و آکادمیک، پرسشهای جدیدی را در مورد ماهیت باور، ریاضی، خودکارسازی، و کاربرد آنها در سیستم‌های پیچیده مبتنی بر داده، پیش می‌کشد و ما را با جریانی از اسطوره‌های نوپدید و بازخوانی اسطوره‌های کهن روبرو می‌کند که زاینده‌گی و یا بازدارندگی آنها به ما بستگی دارد.

کلیدواژگان: ایمان، باور، اسطوره، خرافه، باورهای علمی، اسطوره‌های علمی، باورهای ریاضی، اسطوره‌های ریاضی، هوش مصنوعی

این مقاله به دلیل طولانی بودن نوشته، و بنا بر پیشنهاد سردبیر، در دو بخش تنظیم شده است. بخش ۱ در شماره قبلی (۱۵) و بخش ۲ در این شماره (۱۶) منتشر می‌شود.

می‌دهند. مکتب می‌تواند در قالب‌های ایدئولوژیک پیامدهای عمل‌گرایانه نیز داشته باشد. گاهی در ریاضی، از اصول حاکم بر یک مکتب گفتگو می‌شود ولی باورهای پایه و پنهان آن مورد شرح و بسط قرار نمی‌گیرند. در یک مکتب، باورها نتیجه یک تصمیم‌گیری نیستند بلکه حاصل تجربه، شهود و انتزاع و شکل دهنده اولیه اصول هستند. بیشتر انتظار می‌رود که در پی بالندگی باورها، اصول اولیه و ساختار اندیشیدن و مکتب شکل گیرد. حتی در سایه تجربه و شهود مشابه ولی با انتزاع متفاوت می‌توان شاهد ظهور مکتب کاملاً متفاوتی بود. این تفاوت مکتبی، ناشی از تفاوت انتزاع، ممکن است بسیار بزرگ و مولد نوعی بیگانگی بین مکتبی نیز گردد. به عنوان مثال تجربه و شهود مفهوم بینهایت در سایه انتزاع‌های متفاوت در هند و یونان به دو مکتب کاملاً متفاوت «حساب هندی» و «هندسه یونانی» انجامید.

به این ترکیب پیچیده می‌توان به گونه دیگری نیز نگریست. اینکه، نخست به سراغ باورها برویم و سپس بنگریم که چگونه بر پایه این باورها مکتب‌ها ساخته شدند. به عنوان مثال مجموعه باورهای زیر را در نظر بگیرید:

در بخش ۱ از این مقاله به تشریح پویش باور در برابر علم و نظریه‌های مربوط به آن از دوران باستان تا زمان حال پرداختیم. سپس دوگانه‌های عقل-علم و باور-ایمان را مورد بررسی قرار دادیم. به علاوه، دوگانگی نیک-بد ایرانی را مطرح نمودیم. سه‌گانه باور-اسطوره-خرافه را همراه با مثال‌های متنوع مورد دقت قرار دادیم. در مقوله باور-علم، دیدگاه پیشرانی و بازدارندگی و نمونه‌های تاریخی باورهای بازدارنده را تشریح کردیم. در بخش ۲ این مقاله، شاکله اسطوره‌گی‌ها و باورمندی را در علم و نیز در ریاضی به اجمال توضیح می‌دهیم و به طور ویژه به هوش مصنوعی و جریان فعلی و آتی اسطوره‌گی در آن می‌پردازیم.

۷. اسطوره‌ها و باورها در علم

منظور از مکتب یک نظام منسجم از اصول فکری، نظری، روش شناختی است که در پارادایم آن، اندیشمندان ملتزم به آن اصول فکری، به پرسش‌های بنیادی و یافتن پاسخ آن‌ها می‌پردازند، پدیده‌های مرتبط را تحلیل می‌کنند و به گسترش دانش بشری می‌پردازند و تحلیل خود را بر پایه الزامات آن اصول فکری شکل

حقیقت مطلق وجود دارد.

تعدد تحقق عینی حقیقت مطلق برای انسان به تعداد محدود است
ایمان انسان به اجزای متعدد تحقق عینی حقیقت مطلق امکان پذیر است.

ایمان انسان به اجزای متعدد تحقق عینی حقیقت مطلق تنها راه درک حقیقت مطلق است.

در نتیجه، هر تلاش دیگری برای درک حقیقت مطلق زمانی قابل اعتنا خواهد بود که در خدمت ایمان باشد. مجموعه باورهای مثال بالا شکل دهنده هسته اولیه آن چیزی هستند که مکتب‌های آگوستین و غزالی را ساختند. این نشان می‌دهد که انتزاع مشابه از تجربه و شهودهایی که لزوماً بر هم منطبق نیستند می‌تواند به اصول مشابهی در مکتب‌های ظاهراً متفاوت بینجامد. یک مثال جالب توجه، مقایسه دو مکتب سهروردی^۱ [۱۶۷] و افلاطونی است. تجربه عرفانی سهروردی از نور و حکمت ایران باستان و شهود افلاطون در باره عالم مُثُل هر دو به اصل وجود حقیقت ذاتی فرا تجربی در ورای محسوسات و فراتر از ماده انجامیده‌اند.

در واقع، باورها می‌توانند شکل دهنده اصول باشند. در ریاضیات باورهایی هستند که به مکتب تبدیل شدند. در این خصوص می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. افلاطون باور داشت که حقیقت در ورای تجربیات انسانی و مستقل از محسوسات مادی وجودی عینی و مطلق دارد و انسان با عقل و تامل فلسفی به تدریج به آن دست می‌یابد. این باور اولیه به اصولی مانند «اصل وحدت فضیلت و معرفت»^۲ [۱۶۸]، «اصل وجود مثل»، و «دوگانگی روح و بدن» انجامید که در نهایت مکتب فلسفی افلاطون را شکل داد. یکی از نمودهای اصل وجود مثل افلاطون و باور افلاطون به برتری شناخت عقلانی و ریاضیاتی بر تجربه حسی، این بود که بر سر در آکادمی او نوشته شده بود «هر کس هندسه نمی‌داند وارد نشود». به همین ترتیب می‌توان به باورهای منطقی و مکتب منطق‌گرایی، باورهای شهودی و مکتب شهودگرایی، باورهای ساختی و مکتب ساخت‌گرایی، و باورهای صوری و مکتب صورت‌گرایی در ریاضیات اشاره کرد. نوعی دیگر از باور، به رهبری هرش^۳، ریاضیات را مانند هر ساخته دیگر بشر، فعالیتی انسانی و تاریخی می‌دانست نه حقیقتی مطلق. اگر این اندیشه شکل یک چارچوب متشکل

را به خود می‌گرفت می‌شد که نامش را «مکتب انسان‌گرایی در ریاضیات» بنامیم [۱۶۹]. شگفت آورانه، هرچند دیدگاه هرش یک مکتب نشد، ولی دقیقاً همان چیزی است که در ریاضیات اتفاق افتاده است. این فکر در عمل بر همه جنبه‌های فعالیت ریاضیاتی بشر از آموزش تا پژوهش سایه افکنده است. هرش با طرح این پرسش که ریاضیات واقعاً چیست، نوری تابید بر آن چیزی که حقیقتاً وجود داشت. باید توجه کنیم که باور به حقیقت انسان‌گرایی در ریاضیات نیز می‌تواند نوعی جعبه افلاطونی از یک حقیقت مطلق خارج از ذهن تصور شود. واقعیت این است که انسان‌گرایی ریاضیات نه یک مفهوم عینی، بلکه خود یک مفهوم ذهنی زیسته آدمیزاد است و نباید تعبیری افلاطونی از نظریه انسان‌گرایی ارایه داد. می‌توانیم به مجموعه‌ای دیگر از باورها اشاره کنیم که شکل دهنده اصول و فکر آدمی بوده‌اند. به عنوان مثال اصل دیالکتیک مولوی که در جای‌جای آثار او هویداست:

پس بنای خلق بر اضداد بود - لاجرم ما جنگیم از ضر و سود
هست احوال مخالف همدگر - هر یکی با هم مخالف در اثر^۴

در اینجا مولوی به تضادهای بنیادین در طبیعت آدمی اشاره می‌کند و آن‌ها را در قامت نیروی محرکه‌ای برای رشد و حرکت در عالم تعبیر می‌کند. در ادامه معنا بخشی دیالکتیکی درون‌بودی مولوی، می‌توان به هم ارزی واقع و معقول در درک تاریخی هگل یا به‌طور دقیق‌تر به «اصل وحدت عقل و واقعیت»، یعنی وحدت دیالکتیکی میان واقعیت و عقلانیت در بستر تاریخ اشاره کرد. رساله گفتار در روش^۵ دکارت^۶ با عبارت «از همه چیز، عقل یا شعور، عادلانه‌ترین تقسیم را دارد؛ زیرا هر کس بر این باور است که از آن به‌قدر کافی برخوردار است» آغاز می‌گردد. می‌توان این جمله را اصلی طنز گونه به عنوان «طنز اصل کفایت عمومی عقل» خواند که با پذیرش آن و دعوت به فروتنی در معرفت و روی آوردن به خردمندی، همواره به عقلی بیش از آنچه که داریم نیاز خواهیم داشت. این اصل طنز‌آلود دکارت سرخه‌آور نیست بلکه از نوع سقراطی و هشدار برای بیداری است. راسل^۷ نیز طرحواره‌ای طنز گونه از نوع هشدار برای بیداری سقراطی دارد که می‌توان آن را «اصل عدم تطابق دانش و شک» خواند با این مضمون که آنکس که می‌داند بسیار شکاک است و آنکس که بسیار مطمئن است کسی است که هیچ نمی‌داند [۱۷۰]، [۱۷۱]. در این راستا، راسل رفتار زیسته حیوانات را

۱. سهروردی با یاری اندیشه گیتی‌شناسی زرتشتی و بازخوانی جایگاه نور در سنت دیرین ایرانی، دست به نوآوری زد و خردپیشگی باستانی ایران را زنده کرد.
۲. سقراط با شاگردش افلاطون در زمینه این اصل هم عقیده بود ولی ارسطو شاگرد افلاطون نظری متفاوت داشت. از دیدگاه ارسطو انسان می‌تواند علی‌رغم شناخت حقیقت، بنا بر دلایل نفسانی از جمله ترس، طمع، خشم و مانند اینها به رفتارهای غیر اخلاقی و ناپسند دست زند. از دید ارسطو رفتار اخلاقی تنها با شناخت تضمین نمی‌گردد بلکه علاوه بر معرفت نیازمند اراده و تربیت است تا معرفت به فضیلت بینجامد. از طرف دیگر، ارسطو وجود فضیلت را لزوماً به معنی تحقق معرفت نمی‌داند. ارسطو در بخش حقیقت میان «شناخت عملی» (phronesis) و «شناخت نظری» (episteme) تمایز قایل می‌شود. وجود فضیلت از دید ارسطو نشان دهنده سطح عملی معرفت است [۱۶۸].

3. Reuben Hersh (1927 – 2020) American mathematician

۴. مثنوی معنوی، دفتر ششم

۵. رنه دکارت، گفتار در روش به کارگیری صحیح عقل و جستجوی حقیقت در علوم، ۱۶۳۷ میلادی.

6. René Descartes (1596 – 1650) a French philosopher, scientist, and mathematician

7. Bertrand Arthur William Russell (1872 – 1970) British philosopher, logician, mathematician, and public intellectual

به عنوان معیاری برای موثر بودن الگو برداری انسان ارایه می‌کند [۱۷۲]. ترکیب دو اصل طنز آمیز دکارت و راسل نوعی مسیر زیستن راستین این جهانی انسان را در حوزه‌های اخلاق، معرفت و هستی‌شناسی به تصویر می‌کشد. به عنوان یکی دیگر از اصول در نوگرایی اندیشه می‌توان به «اصل حرکت جوهری» ملاصدرا نگریست. از دید ارسطو، پورسینا و فارابی، حرکت تنها در کیفیت، کمیت، زمان، و مکان رخ می‌دهد و جوهر بی حرکت و ثابت است. ایده حرکت در جوهر، به عنوان یک نوآوری، ریشه‌های ضمنی یونانی دارد. با ترکیب نظریه هراکلیتوس که «همه چیز در جریان است» و نظریه ارسطو در اینکه «حرکت از قوه به فعل صورت می‌پذیرد»، ملاصدرا به این نتیجه رسید که حرکت عین وجود جوهر است. در کنار ملاصدرا، می‌توان به سهروردی اشاره کرد که نور و وجود را دو منبع متفاوت هستی می‌داند. ملاصدرا ضمن بهره بردن از حکمت اشراق و عرفان سهروردی، به «اصل هم‌ارزی وجود با نور» باور داشت، [۱۷۳] و [۱۷۴] را ببینید.

کمی از دیدگاه نظری فاصله می‌گیریم و به متافیزیک و الگوی کیهانی ایرانی در کنار معرفت‌شناسی مدرن می‌پردازیم. ایزد ایرانی، «زروان زمان»، نیز با پدید آوردن دوگانگی نیکی-بدی در آفرینش هم‌زمان اورمزد-اهریمن، ایجاد یک نظم دیالکتیکی فرازمانی را رقم زد [۴۰]. از منظری دیگر می‌توان به نسبت میان دانش و تجربه در قالبی دوگانه از تقدم و تاخر پرداخت. اصل دکارتی «دانش پیش از تجربه» بر عقل و دریافت‌های پیشین تاکید دارد در حالیکه اصل هیومی^۱ «تجربه پیش از دانش» بر پایه‌های حسی و تجربی شناخت پافشاری می‌کند. این دو نگرش در چارچوب یک حلقه زنده-انسانی شامل دو عنصر تجربه و دانش قابل بازاندیشی است. بدین ترتیب بدون نفی مطلق تقدم و تاخر، تجربه و دانش همزمان با هم هستند و به یکدیگر شکل می‌دهند. این چرخه برای هر انسانی به صورتی یگانه و محاسبه ناپذیر رخ می‌دهد. در نتیجه، نه شناخت و نه تجربه یک محصول نیستند، بلکه هر دو بخشی از مسیر زندگی‌اند. نظم فرازمانی زروانی، چارچوبی را فراهم می‌سازد که درون آن، بی‌نظمی و یگانگی فردی مجاز شمرده شوند. بر این اساس می‌توان به یک منشور برای خردکشی^۲ رسید و اصول «چرخش معرفتی» و «پرهیز از مطلق انگاری»، «خرد لایه‌ای»، و «اسطوره زیسته» را در کنار هم قرار داد. بر اساس این دیدگاه ایرانی، خردکشی مدلی برای زیستن در مسیر شناخت است، تجویزی در کار نیست و شناخت بر محور زندگی فرد زنده صورت پیدا می‌کند. در نهایت، به جای تعیین هدف، خود مسیر اصل زندگیست.

برگردیم به مینای ریاضیات، باورها شکل دهنده طرحواره‌های ذهنی

و مکتب‌های علمی و ریاضی‌اند. این پرسش پیش می‌آید که چه چیزی این باورها را شکل می‌دهد. یک باور آشکار ممکن است از یک رشته باورهای پنهان و اسطوره‌ای پدید آید. در باورهای مزدیسنا زرتشتی، اسطوره سوشیانت شکل دهنده جنبه‌های مهمی از باورها بوده است. این پرسشی طبیعی است که چه تناسبی میان اسطوره‌های یک جامعه یا ملت با اکتشافات ریاضی آن وجود دارد. تلاش برای پاسخ به این پرسش که چگونه از اسطوره‌های فرهنگی می‌توان به ایده‌های خلاقیت در جایی مانند ریاضی رسید شورانگیز است. با احتساب اینکه باید از خطر استدلال‌های پس‌اوقوعی^۳ گریخت، این گونه رابطه‌ها پیچیده‌تر از ترکیب ساده علیتی هستند [۱۷۵]. شاید بتوان این ادعا را مطرح کرد که اسطوره‌ها در شکل‌گیری مکتب‌ها، بر اساس باورهای بین‌الذهانی، دخیل هستند و در مکتب‌هاست که ریاضیات پدید می‌آید. در ریاضیات نیز اسطوره‌ها، ناخودآگاه جمعی، فرهنگ، و زیست-جهان تاریخی شکل دهنده باورهای پایه برای شکل‌گیری یک مکتب هستند. در قالب یک مکتب شکل گرفته، پژوهش‌ها تحت تاثیر مبانی فکری اندیشه‌گرا و بنیان‌های آن مکتب قرار می‌گیرند. همانگونه که پیش از این اشاره شد، به‌طور تاریخی، در پی مفهوم بی‌نهایت، ریاضیات هند به سمت جبر و ریاضیات یونان به سمت هندسه رفت، [۱۷۶]، [۱۷۷]، و [۱۷۸] را ببینید. این تفاوت در جهت‌گیری به بنیان‌های مکتب علمی مربوطه برمی‌گردد و آن مکتب تحت تاثیر باورهای شکل گرفته از عناصر پنهان و اسطوره‌ها قرار دارد. در هماهنگی با اندیشه انسان‌گرایی هرش، ریاضیات تنها زبان منطق نیست، بلکه پژواکی از اسطوره‌های زیسته و ناخودآگاه فرهنگی آدمی است. یک مثال روشنگر دیگر نگهداشت بیست ساله نتایج بدست آمده در زمینه تابع‌های بیضوی توسط گوس در کشوی میزش است که مورد اعتراض ژاکوبی قرار می‌گیرد زیرا اگر بهنگام نشر می‌یافت از دوباره کاری می‌کاست و پیشرفت در این زمینه را سریع‌تر می‌کرد. از دیدگاه گوس، آنچه باید نشر داده می‌شد، آن نظریه کلی بود که بدنبالش می‌گشت، و نه نتایج جزئی بدست آمده. این دیدگاه در پژوهش ریاضی را می‌توان در نیوتن، اویلر و دیگران دید که بخشی از اسطوره زیسته آنهاست. در مقابل، برنویلی‌ها چنین نبودند. آنچه که یک برنویلی تصادفا در مهمانی شبانه از یک برنویلی دیگر می‌شنید، ممکن بود در بامداد پیش از دیگران نشر داده شود [۱۷۹]. این نیز بخشی از اسطوره زیسته برنویلی‌ها بود. اینگونه کمال‌گرایی و رقابت‌ها در قالب مکتب پدیدار می‌گردند و به ساختار پژوهش‌های ریاضی شکل می‌دهند. البته برای این ادعای جسورانه مبنی بر تاثیر اسطوره‌های ملی وحدت بخش مانند سیمرغ و هدف‌گرا مانند آرش بر باورهای پایه علمی نیازمند ریزکاری بیشتری هستیم.

1. David Hume (1711 – 1776) Scottish Philosopher

۲. از نشانه‌های خردکشی، ایستادن در آستانه، تاب‌آوری در مرز نادانی و دانایی، و فروتنی را شرط خرد دیدن است

3. Post-Hoc Fallacy

۸. اسطوره‌های ریاضی

ریاضیات مانند هر فعالیت ذهنی بشری مشمول تاثیر متقابل (پذیرا و گذارا) با کل جزییات این جهانی بشری است. در این بخش به این موضوع می‌پردازیم که چگونه ریاضی و فعالیت‌های مرتبط با آن مولد اسطوره، افسانه و خرافه می‌شوند. در این خصوص، به سراغ ریاضیدانی می‌رویم که طبیعی‌ترین اصول را برای ایجاد یک مکتب در ریاضیات ارایه داد. هرش برای ریاضیات یک پیشخوان و یک پستو قابل است [۱۸۰]. در پیشخوان ریاضی شاهد سازماندهی و عینیت هستیم که شامل جنبه‌های صوری، منطقی، اثبات‌های دقیق، سیستم‌های اصولی و ساختارهای انتزاعی است که ریاضیدانان به‌طور معمول بر آنها تمرکز می‌کنند. در پستوی ریاضی شاهد جنبه‌های انسانی ریاضیات مانند تاریخ، فلسفه، جامعه، سیاست فکرت، و مکتب هستیم. هر ریاضیدان در پستو نقشی را که در ایجاد و درک دانش ریاضی دارد، در پیشخوان عرضه می‌کند. از دیدگاه هرش، وجود پیشخوان و پستو در ذهن یک ریاضیدان نقشی تناقض آمیز و یا رقابتی ندارد. این دو جنبه در یک چارچوب دیالکتیکی موجب حرکتی طبیعی از پیشخوان به پستو می‌شوند. توصیه هرش تقویت عامدانه این حرکت طبیعی است. هرش در این دیدگاه بر تاثیر درک، انگیزه‌ها، شهود، و تحولات تاریخی حاکم و شکل دهنده ایده‌های ریاضی پافشاری می‌کند. به علاوه هرش مدعی است که بدون درک مناسب از پستوی ریاضی نمی‌توان به فهم کاملی از ریاضیات رسید. هرش چهار اسطورگی ریاضی (و شاید خرافه)^۱ زیر را که می‌توان مانع حرکت از پیشخوان به پستو خواند بیان می‌دارد [۱۸۰]. رویارویی هرش با این چهار عنوان اسطوره بیشتر به برچسب خرافه و مخرب بودن نزدیک است تا وجهی حماسی. شاید، هرش به این دلیل این چهار عنوان را به طور مستقیم خرافه نخوانده که ریاضیات خالی از این چهار برچسب نیست هر چند تماماً چنان نباشد.

اسطورگی یقین: این باور که حقایق ریاضی مطلق و غیرقابل انکار و مستقل از ذهن انسان هستند و انسان سازنده آنها نیست بلکه آنها را کشف می‌کند. هرش ریاضیات را محصول ساختن انسانی می‌داند و نه حاصل اکتشاف حقیقتی ازلی و ابدی. در واقعیت، ریاضیات تکامل می‌یابد و اثبات‌ها می‌توانند به چالش کشیده شوند یا اصلاح شوند. بنا بر این ریاضیات نه اکتشافی است و نه کاملاً یقینی درست و غیر قابل دستبرد و تغییر.

اسطورگی عینیت: این ایده که ریاضیات مستقل از تفکر انسان، جامعه و فرهنگ وجود دارد. هرش استدلال می‌کند که ریاضیات یک فعالیت انسانی است که توسط فرهنگ و تاریخ شکل گرفته

است و عینیتی مستقل از انسان، جامعه، تاریخ، و فرهنگی که او را دربرگرفته ندارد.

اسطورگی انزوا: این فرض که ریاضیات از سایر رشته‌ها و نیز از شرایط اجتماعی و فرایندهای فرهنگی و تاریخی جداست. از دیدگاه هرش، ریاضیات در بستری تاریخی و در تعامل با نهادهای اجتماعی فرهنگی شکل گرفته است. در حقیقت، ریاضیات عمیقاً با علم، فلسفه، جامعه و فرهنگ درهم تنیده شده است و به هیچ وجه پدیده‌ای منزوی و جدا افتاده از سرجمع فعالیت‌های انسانی نیست.

اسطوره بی‌زمانی: این تصور که مفاهیم ریاضی ابدی هستند، ریاضیات ماهیتی صوری و نمادی دارد و نیازمند تفسیر نیست. هرش فهم ریاضیات را نیازمند شهود، و توجه به زبان می‌داند. در حالی که برخی ایده‌ها همچنان پابرجا هستند، ریاضیات دائماً در حال رشد و تطبیق است. در واقع ریاضیات ماهیتی و تعبیری زمانی-مکانی-تاریخی-جغرافیایی دارد.

از دیدگاه هرش، این اسطورگی‌ها، پنهان کننده پستوهای ریاضی از چشم پژوهنده و ریاضی‌دان هستند و مانع رخداد فهم واقعی می‌باشند. از دیدگاه هرش جایگاه هر کسی در مسیر پیشخوان به پستو از نوع رویکردش به این چهار اسطورگی تعیین می‌شود. ممکن است یک فرد به‌صورتی پنهان و یا آشکار موقعیت ویژه خود را در این چهارگانه‌های هرش یافته باشد. این اسطورگی‌های چهارگانه نشان می‌دهند که حضور در یک مکتب ریاضی، که شکل گرفته از باورهای پایه است، ممکن است تحت تاثیر آن باورهای پنهان و پایه‌ای، و نیز تحت تاثیر اسطورگی‌ها صورت انسانی ویژه خود را بسازد. هرش در بیانی دیگر به چند اسطوره بازدارنده از جمله «ریاضیات یک فعالیت انفرادی است»، «ریاضیات بازی جوانان است»، و «ریاضیات یک فیلتر موثر برای آموزش عالی است» می‌پردازد [۱۸۱]. در ریاضیات دسته‌های دیگری از اسطورگی‌ها وجود دارند که در مسیر حرکت از پیشخوان به پستو بازدارنده خوانده شده‌اند. در این باره می‌توان به فهرست باد [۱۸۲] اشاره کرد که در آن به اسطورگی‌های نسبت داده شده به عدد طلایی، مسئله چهار رنگ، خشک و سرد بودن ریاضی و منطقی بودن و غیر اجتماعی بودن ریاضی‌دان‌ها، هرکسی برای ریاضی ساخته نشده، و مواردی دیگر که در سخنرانش گفته شده اشاره کرد^۲.

هریسون^۳ در حوزه‌ای متفاوت با ریاضی به شرح اسطوره‌هایی پرداخت که پیشران حرکت از پیشخوان آئینی به سمت پستوی آئینی هستند [۱۸۳]، [۱۸۴]. از دید هریسون، اسطوره تنها یک روایت نیست، بلکه بازتابی است از ساختارهای اجتماعی، فرهنگی، و شخصی است که می‌تواند پیشران یک تحول معرفتی باشد. این

1. Myth of Certainty, Myth of Objectivity, Myth of Isolation, Myth of Timelessness

۲. سخنرانی کریس باد در کالج گرشام، با عنوان افسانه‌های بزرگ ریاضی، ۱۱ فوریه ۲۰۲۰.

https://www.gresham.ac.uk/sites/default/files/2020-02-11_Budd_MathematicalMyths-T.pdf

3. Jane Ellen Harrison (1850 – 1928) British classical scholar and linguist

مفهوم شونیا^۱، یعنی خلاء یا تهی، پیش از آن که به صورت عددی درآید، در متون فلسفی و آئینی اوپانیاشادها و وداها نماد نیستی، سکوت، و در عین حال سرچشمه هستی بوده است [۱۹۰]. در آئین بودا و هندویسم، شونیا نماد آغاز هستی از نیستی است. در کیهان‌شناسی اسطوره‌ای هند، جهان از هیچ (خلاء یا تهی) زاده می‌شود و سپس به خلاء و هیچ بازمی‌گردد، همانند چرخه‌ای که صفر در ریاضیات می‌آفریند. صفر که در هند در قاطی فلسفی و اسطوره‌ای قرار داشت به مفهومی جبری بدل شد [۱۹۱]. اینگونه است که، به نظر می‌رسد که حضور صفر در ریاضیات هند از مسیر شمارش و یا محاسبه رخ نداده، بلکه از درون فلسفه زاده شده است اسطوره‌ها لزوماً اشیاء، نماد و یا داستان نیستند، بلکه بخش موثری از اسطوره‌ها انسان‌های تاریخی هستند. گاهی نیز رویاهای انسان در مقام اسطوره‌هایی قرار می‌گیرند [۱۹۲]، [۱۹۳]. به عنوان نمونه می‌توان به «آدا لاولیس»^۲ به عنوان یک اسطوره و پیشگام در برنامه نویسی رایانه‌ای اشاره کرد. آدا به عنوان نخستین برنامه‌نویس پی‌برد که ماشین‌های محاسبه کاربردهایی بیش از حساب دارند^۳. به عنوان یک نمونه دیگر می‌توان به اخوان‌الصفاء، اسطوره‌های زیسته یک مکتب، اشاره کرد [۱۱۱]، که به نوعی به تکامل، با شباهت‌ها و تفاوت‌هایی با نظریه داروین، پرداخته‌اند.

در اینجا به دو روایت از اسطوره‌های تاریخی، یکی در باره «قضیه انحنای کل و گره‌ناپذیری» و دیگری «آزمون فرضیه و برآورد بیشینه درست‌نمایی»، اشاره می‌کنیم که به ترتیب به قضیه‌های فاری-میلنور، و نتیجه دانتزیک معروف هستند.

۱) میلنور^۴ دیر به کلاس درس فاکس^۵ رسید و چند مسئله باز را از روی تخته سیاه یادداشت کرد و به گمان اینکه تمرین‌های عادی هستند آنها را حل کرد و جمع‌بندی آنها شد قضیه انحنای کل و گره‌ناپذیری [۱۹۴].

۲) دانتزیک^۶ دیر به کلاس درس نیمن^۷ رسید و چند مسئله باز را از روی تخته سیاه یادداشت کرد و به گمان اینکه تمرین‌های عادی هستند آنها را حل کرد و جمع‌بندی آنها شد آزمون فرضیه و برآورد بیشینه درست‌نمایی [۱۹۵].

هر دو مورد بیانگر اسطوره‌های انسانی هستند. زیرا هم میلنور و هم دانتزیک به موارد بالا به ترتیب گفته شده نسبت داده شده‌اند. ولی در این دو روایت، گمان منتسب به میلنور ساختگی و گمان منتسب به دانتزیک واقعی است. میلنور درباره این روایت چنین گفته که «افسوس که باید چنین داستان زیبایی را رد کنم» [۱۹۴].

دیدگاه هریسون از حوزه آئینی قابل تعبیر و استفاده در ریاضی نیز هست. به‌طور تاریخی، اسطوره‌گی‌هایی هستند که پیشران حرکت از پیشخوان ریاضی به پستوی ریاضی بوده‌اند. به عنوان نمونه می‌توان اشاره کرد به: ۱) اصل ناتمامیت گودل که ریاضیات را از فرض یک سیستم بسته کامل بودن رهانید، زیباتر و انسانی‌تر نمود؛ ۲) اصل عدد صفر که عدد در ریاضیات را از مفهوم شمارش به یک ساختار جبری تعمیم داد؛ ۳) اصول ماشین تورینگ در پایه گذاری نظریه محاسبه؛ و ۴) اصول انتزاع‌های گروتندیک در گذر از اشیاء ملموس به ساختارهای ریاضی محض. در جهان انسانی، اسطوره‌گی‌های «ریاضی زبان انسانی حقیقت است» و «ریاضی عقل ناب انسانی است» پیشران قدرتمندی در گذر از پیشخوان ریاضی به پستوی ریاضی به مفهوم هریسون بوده‌اند. از دیگر موارد می‌توان به تمثیل‌های غار افلاطون، و فیل مولوی اشاره کرد. گرچه کریس باد^۸ به اسطوره‌گی‌ها در ریاضیات در قالب خطاهای رایج می‌نگرد و هرش نیز یک نمونه چهارگانه از این دیدگاه را ارایه می‌کند، ولی بنابر کلیتی که هریسون از آن سخن می‌گوید، اسطوره‌گی‌ها می‌توانند پیشران حرکت از سطح رسمی، آموزشی، و نمادین در «پیشخوان ریاضی» به لایه‌های زیسته، انسانی، و فلسفی آن در «پستوی ریاضی» باشند. تفاوت مهم در ماهیت اسطوره‌هاست.

در کوه‌های تیمره کرمان، نقش نگارهای فنجان-نقطه [۱۸۵] و در لاشکو گوییه میمند کرمان نقش‌هایی کهن، [۱۸۶] کشف شده‌اند که به ثبت شکار، زایمان، آئین‌ها، و رخداد‌های مهم مربوط می‌گردند و بنا بر قدمت شان، نشان‌دهنده نخستین شیوه‌های حسابداری بشر هستند. این نقش‌ها، تنها ابزار شمارش نیستند، بلکه بازتاب دهنده اسطوره‌ها و پیوند انسان با طبیعت‌اند. در این نقش‌ها، ریاضیات صرفاً حاصل انتزاع نیست، بلکه از درون اسطوره‌ها و آیین‌ها زاده می‌شود. ایران نخستین کشور جهان [۱۸۷] و تنها کشوری که است که پادشاهان باستانی آن خود از دوران باستانی دیگری سخن می‌گویند [۱۸۸]. کوروش بزرگ در شوش ستون‌های کاخ خود را بر ویرانه‌های ایران باستان آن زمان بنیان نهاد [۱۸۹]. این گذشته باستانی پر از رمز و راز و سرشار از عناصر اسطوره‌ای است. در فهرست اسطوره‌های مرتبط با فلسفه علم و ریاضیات می‌توان به اسطوره میترا و زروان زمان (ریاضیات در فهم چرخه هستی)، اسطوره عدد در فلسفه فیثاغورسی (عدد جوهر هستی)، اسطوره هندسه معماری و آئینی (هندسه نماد برتری) اشاره کرد. صفر در هند مسیری از اسطوره‌گی تا ریاضیات را طی نمود. در هند باستان،

1. śūnya

2. Augusta Ada King, Countess of Lovelace (1815–1852) known as Ada Lovelace English mathematician and writer

3. Ada Lovelace, Encyclopedia Britannica, Accessed 19 August 2025

4. John Willard Milnor (-1931) American Mathematician

5. Ralph Hartzler Fox (1913–1973) American Mathematician

6. George Bernard Dantzig (1914–2005) American Mathematician

7. Jerzy Sława-Neyman (1894–1981) Polish Mathematician

ممکن است که میلنور خودش و یا اطرافیانش در ایجاد این روایت نقش داشته باشد که در اینصورت می‌توان آن را نوعی کمک به اسطوره‌سازی خواند. از دیگر کسانی که با رفتارهای ویژه خود به اسطوره‌سازی از خودشان کمک کرده اند می‌توان به ریچارد فاینمن^۱، پاول اردوش^۲، و ماری کوری^۳ اشاره کرد. از موارد قدیمی‌تر می‌توان به اورکای ارشمیدس، مراسم ورود به حلقه اخوان الصفا، نگارش افسانه‌ای بورباکی، ایده پردازی ابن‌خلدون و بسیاری موارد دیگر اشاره کرد.

آنچه که هرش^{۱۳۸} بدانها پرداخته عنوان اسطوره دارند ولی در واقع ما می‌توانیم آنها را خرافه‌های نوین و یا ورنوین بخوانیم. بدین ترتیب میان باور، اسطوره، افسانه، و خرافه تمایز قابل می‌شویم و آنچه را که در دینامیسم پیشنهادی هرش بازدارنده است، خرافه یا افسانه می‌خوانیم. ریاضی و ریاضی‌ورزی زمانی آزاد خوانده می‌شود که حرکت از پیشخوان ریاضی به پستوی ریاضی در آن بدون مانع ذهنی باشد و تحت تأثیر خرافه‌های مدرن، حرکتش متوقف نشود، حتی اگر پستو مقصد نهایی نباشد. از یک دید، ریاضیات مدرن، برخلاف ریاضی قدیم، تحت تأثیر خرافه‌های مفهومی مسیر فهم حقیقت را مسدود کرده است [۱۹۶]. در چنین بستری، اگر دستاوردهای نوین ریاضی، مانند هوش مصنوعی، از خرافه‌های نوین رها باشند، همچون پویش ذهن آدمی در مسیر پیشخوان

به پستو می‌باشند. به عنوان مثال، اگر آزادی ریاضی‌ورزی در ماشین و هوش مصنوعی مورد نظر ما باشد، نیازمند معنا‌گشایی هستیم، نه صرفاً پردازش عددها و داده‌ها. تصویری از نهایت هوش مصنوعی به عنوان ماشینی که تنها پردازنده داده‌های حجیم و سنگین است واقع بینانه نیست. باید پرده از یکی از عمیق‌ترین سوءتفاهم‌ها درباره هوش مصنوعی برداشت. اگر هوش مصنوعی صرفاً داده‌پرداز باشد، آنگاه ریاضی‌ورزی‌اش چیزی جز تقلید بی‌روح نخواهد بود. اما اگر معنا را به عنوان امکان زیست‌اندیشه دریابد، آنگاه می‌تواند همپای ذهن انسانی باشد، نه سایه بی‌روح آن. با این جمله، می‌توان هوش مصنوعی جاری را به چالش کشید. آیا هوش مصنوعی می‌تواند از پیشخوان ریاضی عبور کند و به پستوی ریاضی برسد. خرافه‌های مدرن و بازدارنده در این حرکت چیستند. در بخش بعد به اختصار به چنین رشته‌ای از باورها و خرافه‌های نوین در هوش مصنوعی می‌پردازیم.

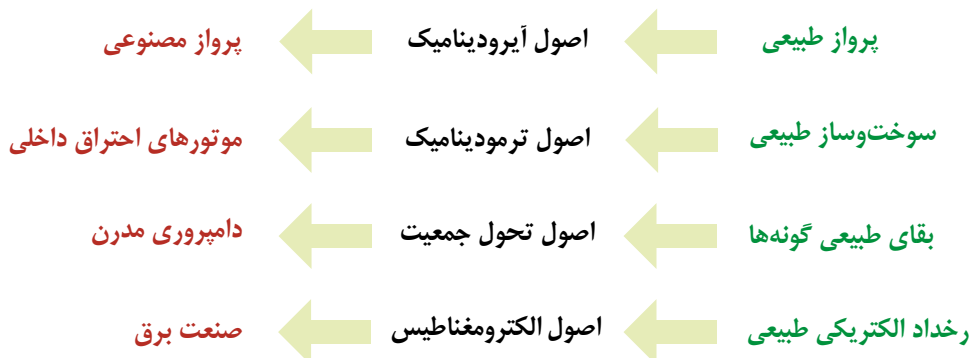
۹. هوش مصنوعی

با توجه به اینکه واژه مصنوعی به عنوان صفت برای تعریف نوعی هوشمندی یعنی «هوش مصنوعی» به کاربرده شده است، برای فهمیدن سازوکار مصنوعی نمودن تجربیات طبیعی بشر به چند مثال می‌پردازیم. مصنوعی کردن پدیده‌های طبیعی مورد علاقه بشر یک الگوی ویژه دارد که به صورت زیر تجلی می‌کند.

طبیعت ← اصول ← نوآوری/مصنوعی سازی

انسان‌ها نخست به پدیده‌ای در طبیعت می‌نگرند، سپس اصول حاکم بر آن را سازماندهی می‌کنند و پس از آن نسخه مصنوعی و نوآورانه آن را می‌سازند.

بدین ترتیب نوآوری‌ها کپی یا تقلید از طبیعت نیستند، بلکه حاصل فرایند استخراج اصول و آفرینش‌اند. نمونه‌هایی از تجلی چنین آفرینش‌هایی را در زیر می‌بینید.



آیا مقوله هوش نیز در این چارچوب قرار می‌گیرد؟ آیا چیزی با عنوان اصول هوشمندی خوش تعریف است؟ رسیدن به هوش

مصنوعی هر چند تابع کپی برداری از هوش طبیعی حتی انسان نیست، ولی آیا نتیجه و یا موقوف به دریافتن اصولی کشف نشده

1. Richard Phillips Feynman (1918– 1988) American Theoretical Physicist

2. Paul Erdős (1913– 1996) Hungarian Mathematician

3. Maria Salomea Skłodowska Curie (1867-1934) Polish and Naturalised-French Physicist and Chemist

هجده تعریف جاری از هوش مصنوعی از «توانایی کارکرد مناسب در محیط‌های از پیش معین نشده» تا «داشتن مهارت‌های مستقل از محیط» می‌پردازد و بیان می‌دارد که ارائه تک‌تعریفی همه‌جانبه برای هوش مصنوعی بسیار دشوار است.

یک دیدگاه دیگر از هوش این است که هوش امریست که جنبه‌های فردی و اجتماعی آن در هم تنیده است. از دیدگاه فردی، هر چند پتانسیل هوشمندی امری ژنتیک دانسته می‌شود [۲۰۰] که به طور پلی ژنتیک^۱ اثر می‌کند، ولی تحقق آن تنها امری محیطی است [۲۰۱]، به طوری که افراد برای تحقق آن به محیط‌های مناسب خود می‌روند و یا آن را می‌آفرینند [۲۰۲]. باید میان کمیت ضریب هوشی^۲ به عنوان یک عدد بی بعد و هوش به عنوان یک کیفیت شناختی-رفتاری تفاوت قائل شد. ضریب هوشی بیانگر متوسط موفقیت تعامل پتانسیل‌های فرد با پیرامون خود است. این تعامل امری اختیاری و یا گوشه‌ای نیست، بلکه صحنه اصلی بروز و بالندگی رشد ذهنی و شناختی است که پایه‌های هوش را می‌سازند. بنابراین، اگر محیط مناسب نباشد و یا فرد با پیرامون خود تعامل نداشته باشد، نمی‌توان انتظار هوشمندی ویژه‌ای داشت.^۳ می‌توان انتظار داشت که در محیط‌های محروم، اثرهای وراثتی هوش کاهش داشته باشد [۲۰۲].^۴ گذر از هوش زیست‌شناختی به کمیت‌های هوشمند نیازمند تحقق هوش اجتماعی است.^۵

هوش پیوند عامیانه و استواری با درخشش دارد، بدین معنی که افراد با هوش همواره با درخشش خود تشخیص داده می‌شوند و هر که در جمعی یا جایی سرآمد یا شهره می‌شود (درست یا نادرست) با هوش خوانده می‌شود. اگر این معنای عامیانه را با کمی دقت، بدون ترکیب با شهرت، با مفهوم رشد اندیشه باز بینی کنیم به موضوع جدی محیط معرفتی می‌رسیم. فرد در خلا و تنها با اتکا بر توانمندی فردی و صرفاً بر پایه ارتقای سیستم شناختی خود رشد نمی‌کند بلکه پتانسیل فردی با قرار گرفتن در محیط مناسب امکان شکوفا شدن را می‌آزماید [۲۰۳]. بر این اساس، برای ارتقای درخشش فردی و اجتماعی هر بخش از کشور، لازم است که محیط معرفتی مناسب در آنجا فراهم گردد، در غیر اینصورت، همه فعالیت‌ها ناپایدار و بی‌دوام جلوه خواهند کرد. یک نمونه چنین پدیده‌ای را می‌توان در بشاگرد دید.^۶

یک تعریف دیگر از هوش، که قابل گسترش به وضعیت ماشینی است، عبارتست از تعریف استودارد که در آن توانایی انجام فعالیت‌هایی با برجسب‌های دشواری، پیچیدگی، انتزاعی، صرفه‌جویی، سازگاری، ارزش اجتماعی، و ابتکاری، و توانایی ادامه چنین فعالیت‌هایی در شرایط مقید به تمرکز و نیازمند انرژی بالا،

برای هوشمندی است. اگر قرار بر این بود که بر اساس تقلید و کپی از روی پرواز طبیعی پرندگان، هواپیما ساخته شود، هیچگاه هواپیماهای فعلی و پهن‌پیکر و نیز کشتی‌های آسمان نورد ساخته نمی‌شدند. تقلید از پرواز پرندگان، امکان کمی برای پرواز مصنوعی فراهم می‌نمود. در واقع، پرواز پرندگان و پرواز هواپیماهای ساخت بشر، تحقق‌های متنوع ترکیب اصول الکترومغناطیس، اصول ترمودینامیک و اصول آئروپنماتیک هستند. آیا در مقوله هوشمندی نیز در آینده، هوش طبیعی و هوش مصنوعی تحقق‌های متنوع مجموعه‌ای فعلاً ناشناخته از اصول هوشمندی خواهند بود. باید توجه کنیم که مقایسه «هوش طبیعی، هوش مصنوعی» با «پرواز طبیعی، پرواز مصنوعی» به سادگی امکان پذیر نیست. زیرا ممکن است ما را درگیر خرافه‌های نوین دیگری از نوع شبه علم کند. پرواز یک امر فیزیکی است، در حالی که هوشمندی پدیده‌ای ذهنی و شناختی است که پیچیدگی‌های زبانی، احساسی، ادراکی دارد و به تجربه زیسته بستگی بسیار دارد. نمی‌توان انتظار داشت که مستقل از زیست انسانی-حیوانی اصولی از نوع هوشمندی همانند اصول آئروپنماتیک و ترمودینامیک قابل تدوین باشد. بنابراین جعبه اصول هوشمندی همراه خود جعبه ابزار پیچیده‌ای شامل همه موارد ذکر شده را با خود دارد. بیشتر ابزار هوش مصنوعی جاری عمدتاً مدل‌های زبانی و آماری هستند. بهتر است کمی دقیق‌تر به مفهوم هوش و هوش مصنوعی توجه کنیم.

در اینجا چند پرسش بنیادین مطرح می‌شود: منظور ما از «هوش» در عبارت «هوش مصنوعی» چیست. هوش را می‌توان پدیده‌ای چند لایه دانست که در سطوح ابتدایی شامل پردازش داده‌ها، توانایی حل مسئله و استدلال است، و در سطوح پیشرفته‌تر، خلاقیت، درک معنا و خودآگاهی را نیز در بر می‌گیرد. تست هوش با استفاده از آزمون‌هایی در سال ۱۹۰۰ برای رتبه بندی دانش آموزان، در یک شرایط واقعی خاص، در پاریس ابداع شد [۱۹۷]. گاردنر (۲۰۰۶) ضمن پرداختن به تاریخچه، به بیان نظریه خود در پرورش هوش در دوران کودکی و نیز در بطن جامعه می‌پردازد، سپس در [۱۹۸] به چندگانگی هوش، مبانی زیست شناختی آن، و پیامدها و کاربردهای این دیدگاه چندگانه روی می‌آورد. برای آشنایی با گسترش دیدگاه گاردنر در تعریف هوش به لگ [۱۹۹] مراجعه می‌کنیم که به یک فهرست هجده‌گانه از تعریف سازمان یافته هوش از «توانایی به کار گرفتن حافظه، دانش، تجربه، ...» تا «ظرفیت یادگیری، استدلال، و فهمیدن» و یک فهرست سی‌وپنج‌گانه از تعریف روان‌شناسانه هوش از «ترکیبی از عملکردهای چندگانه برای بقا و پیشرفت در یک فرهنگ» تا «توانی ذهنی در تشخیص نظم در موقعیت‌هایی که بی‌نظم خوانده می‌شوند» پرداخته است. سپس لگ (۲۰۰۷) به

1. polygenic

2. Intelligence Questions (IQ)

3. Dickens-Flynn Model

4. Flynn Effect, Floor Effect, and Socioeconomic Status

5. Transition from "Biological Intelligence" to "Psychometric Intelligence" requires "Social Intelligence".

6. <https://www.shoraha.org.ir/news/1402092918672>

(دیده‌شده در آذر ماه ۱۴۰۴)

اینجا چند روایت جاری از هوش مصنوعی را که مسیر «تحقق عینی» یا «افسانه رایج» شدن را طی می‌کند به چالش کشیده شده است.

هوش مصنوعی جایگزین تمام مشاغل انسانی خواهد شد
در حالی که هوش مصنوعی وظایف خاصی را ماشینی-خودکار می‌کند، فرصت‌های جدیدی نیز ایجاد می‌کند و بهره‌وری انسان را افزایش می‌دهد، نه اینکه مشاغل را حذف کند. به عبارت دیگر هوش مصنوعی با هر وظیفه‌ای که به عهده می‌گیرد، امکان یک یا چند فعالیت بشری دیگر را فراهم می‌سازد. به عنوان یک نمونه ساده و با تعبیری عامیانه، تغییر از چاپ سنگی به چاپ دیجیتال، حروف چین‌ها را به تایپست و صفحه‌آرا تبدیل کرد، نه اینکه آنها را بیکار کند.

هوش مصنوعی همیشه عینی و بی‌طرف است: مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند سوگیری‌ها را از داده‌های آموزشی خود به ارث ببرند، به این معنی که آنها سوگیری‌های انسانی را منعکس می‌کنند، نه اینکه کاملاً خنثی باشند. بازخوردهای مدل‌های هوش مصنوعی جاری بسیار به سناریوی ایجاد شده توسط عامل و پرسش‌گر انسانی وابسته است. مسیر تامین داده‌ها و نیز ابزارهای اندازه‌گیری و یکاها و هرآنچه که باید اندازه‌گیری شود توسط بشر بدون بی‌طرفی در اختیار هوش مصنوعی قرار می‌گیرد. به همین دلیل، هوش مصنوعی نیز این بی‌طرف نبودن‌ها را از بشر به ارث می‌برد.

هوش مصنوعی همه مسئله‌های ریاضی را حل خواهد کرد: این یک ایده کلی است که ریاضیات زیربنای اساسی و فرم دهنده هوش مصنوعی است [۲۰۶]. این نیز درست است که مدل‌سازی ریاضی ابزار قدرتمندی برای بنای هوش مصنوعی است [۲۰۷]. ایده مقابل آن، یعنی حل مسئله‌های ریاضی توسط هوش مصنوعی نیازمند دقت بیشتری است. اینکه چه نوع مسائل ریاضی و در چه سطحی توسط هوش مصنوعی قابل حل هستند، در چارچوب کلی مسئله‌های قابل حل توسط هوش مصنوعی قرار می‌گیرد. در این باره به نظر نمی‌رسد که هوش مصنوعی فعلی، که در دسترس عموم است، دارای قدرت خلاقیت و ایده پردازی برای ارایه الگوریتم‌های نوین باشد. ساختار فعلی که بر پایه مدل‌های زبانی کلان استوار است، با داشتن سرعت عمل بالا، می‌تواند با ترکیب منطقی-زبانی هر آنچه که در دسترس دارد، و همه انواع یادگیری و همه انواع داده‌ها، پیشنهادی برای راه حل یک مسئله-که از دیدگاه نظری راه حلی محاسبه پذیر دارد-ارایه کند. بنابراین ادعاهایی مبنی بر اینکه هوش مصنوعی توان حل مسئله‌های حل

و نیازمند ایستادگی در برابر نیروهای درونی-بیرونی [۲۰۴] مبنای حضور هوش‌اند. طبیعی است که هر جنبه از این فهرست، در شرایط متفاوت، وزن ویژه خود را دارد و در گذار و گذار جهان نیز فهرست و وزن هر عنوان ممکن است تغییر کند. پس از پذیرفتن نسبی تعریف هوش، به عنوان یکی از این موارد و یا ترکیب و متوسط برخی از آنها، این پرسش پیش می‌آید که هوش مصنوعی چیست. از دیدگاه راسل [۲۰۵]، مفهوم هوش مصنوعی دارای دو جنبه هویتی و محتوایی^۱ است که هر یک نیز طبیعتی دوگانه دارند. از نظر هویتی «وفاداری به عملکرد انسانی» و «عقلانیت»^۲ دو جنبه متفاوت و متمایز برای هوش می‌باشند. از نظر محتوایی نیز «فرایندهای فکری و استدلال درون‌زاد» و «رفتار هوشمندانه به عنوان توصیفی برون‌زاد»^۳ دوگانه‌هایی متفاوت و متمایز هستند. اگر این دوگانی هویتی-محتوایی را با هم ترکیب کنیم به چهار فرم هوش مصنوعی می‌رسیم که در [۲۰۵] تشریح شده‌اند. برای یک ماشین:

(۱) کارکرد انسانی بر اساس آزمون تورینگ

(۲) اندیشیدن انسانی بر اساس مدل‌های شناختی

(۳) کارکرد عقلانی بر اساس عامل عقلایی

(۴) اندیشیدن عقلانی بر اساس قوانین عقلانیت

هر کدام از این فرم‌های چهارگانه نوعی رویکرد قابل شرح از هوش مصنوعی را بیان می‌دارند. هوش مصنوعی یک ماشین تنها و مجزا نیست. نظریه‌های شبکه باور^۴ در هوش مصنوعی و علوم شناختی، باورها را به عنوان گره‌هایی در یک شبکه معنایی در نظر می‌گیرند که از طریق روابط مختلف به هم متصل شده‌اند. تغییر در یک باور می‌تواند بر سایر باورهای مرتبط تأثیر گذارد. در روانشناسی اجتماعی، پژوهش‌ها در زمینه تغییر باور^۵ نشان می‌دهند که تغییر باور یک فرایند فعال و اغلب تدریجی است که تحت تأثیر عوامل مختلف اجتماعی و شناختی قرار دارد، نه صرفاً پذیرش یک حقیقت جدید. ارتباط این موضوع به فرایند و شبکه از این جهت است که نظریه‌های پردازش پیش‌بینی‌کننده تغییر باور، بر پویایی و تکامل باورها در طول زمان تأکید دارند و باورها را به عنوان عناصر به‌هم‌پیوسته در یک سیستم شناختی در نظر می‌گیرند. در هوش مصنوعی جاری باورهای شکل گرفته‌اند که حاصل آنها اسطوره‌های بازدارنده‌اند، که می‌توان آنها را خرافه‌های نوین در علم خواند. این بازدارنده‌ها را افسانه نیز می‌خوانیم. هوش مصنوعی با افسانه‌هایی احاطه شده است که برخی از آنها می‌توانند گمراه‌کننده یا حتی مانع پیشرفت باشند. این افسانه‌ها اغلب از سوءتفاهم‌ها یا تصاویر اغراق‌آمیز در رسانه‌ها ناشی می‌شوند. در

1. Objective v. Subjective

2. Fidelity to Human Performance” and “rationality”

3. “Thought Processes and Reasoning” and “Intelligent Behavior, an External Characterization”

4. Belief Network Theories

5. Belief Change

هوش مصنوعی جاری، یک تحقق اولیه از هوش مصنوعی است و نه رخداد مطلق آن. معنی این گفته اینست که هوش مصنوعی را می‌توان پدیده‌ای در حال تکامل دید و هنگامه ظهور آن همراه با عالی‌ترین چهره آن نبوده است. به همین دلیل، به جای اینکه هوش مصنوعی را مطلقاً هوشمند بخوانیم، واقع‌بینانه‌تر است که آن را نوعی تحقق اولیه هوشمندی در دست تغییر و تحول بخوانیم.

هوش مصنوعی خطرناک است و جهان را تصرف خواهد کرد: در حالی که هوش مصنوعی چالش‌های اخلاقی ایجاد می‌کند، ابزاری است که توسط انسان‌ها ایجاد و کنترل می‌شود، نه یک نیروی خودمختار که برای سلطه بر جهان نقشه می‌کشد. همه اقداماتی که در پس فعالیت‌های هوش مصنوعی خطرناک توصیف می‌شوند، به واقع به نقش عامل انسانی مربوط هستند و نه خود هوش مصنوعی. البته این تا جایی صحت خواهد داشت که هوش مصنوعی خودآگاهی و احساس را تجربه نکرده باشد و یا در صورت تجربه، تصمیمات مستقل از بشر برایش فراهم باشد. این گفتگو برای ما آشناست و یادآور توصیف آیزاک آسیموف^۲ از امپراطوری ربات‌هاست. هر چند هشدارهایی^۳ در زمینه احساس و فریب صادر شده است [۲۰۸]، ولی هنوز به یک نگرانی رایج یا جدی تبدیل نشده است.

هوش مصنوعی احساسات را درک می‌کند: هوش مصنوعی می‌تواند احساسات را تجزیه و تحلیل کند و پاسخ‌های عاطفی را تقلید کند، و هر چند حس مختص خود را دارد اما واقعا مانند انسان‌ها احساسات را احساس نمی‌کند. گاهی دخالت دادن مفاهیم احساسی در مواجهه با بازخوردهای هوش مصنوعی، از طرف کاربر انسانی، ممکن است موجب بالا رفتن هزینه فعالیت هوش مصنوعی گردد بدون اینکه تاثیری در کیفیت عملکرد آن داشته باشد.

خودآگاهی برای هوش مصنوعی یک امر فلسفی است: درک ما از خودآگاهی ممکن است توسط تجربیات بشری دستخوش سوگیری باشد به گونه‌ای که گمان کنیم که خودآگاهی امریست که به ماهیت مولد هوش بستگی دارد و بر این اساس خودآگاهی را مقوله‌ای فلسفی تلقی کنیم در حالی که ممکن است همانند هر پدیده دیگر، خودآگاهی تحقق‌های متفاوتی داشته باشد. جفری هینتون^۴ با طرح یک آزمایش فکری، مختص بودن خودآگاهی به بشر را به چالش کشیده است. از دیدگاه هینتون در کوتاه مدت عملکرد هوش مصنوعی در همه حوزه‌ها مانند بهداشت، پزشکی، آموزش، ترابری، و دیگر حوزه‌ها عالی خواهد بود ولی در درازمدت به این بستگی دارد که چگونه تظاهر پیدا کند. به عنوان مثال در حوزه‌هایی مانند حمله‌های سایبری، زیست-تروریزم، دستکاری

نشده ریاضی مانند توزیع اعداد اول را دارد اغراق آمیزند و باید با دقتی بالا مورد ارزیابی قرار گیرند. چند نمونه از این موارد عبارتند از «گراندرو وایلز آخرین مسئله فرما را حل نکرده بود، آیا هوش مصنوعی امروز می‌توانست راه حل او را تولید کند» و «آیا هوش مصنوعی می‌تواند حدس گلدباخ را ثابت یا رد کند». پاسخ جامع و مانع به این پرسش‌ها ساده نیست. ولی یک پاسخ اولیه این است که اگر کارهایی در این سطح نبودند شاید داشتن سامانه‌های فعلی هوش مصنوعی تحقق یافتنی نبودند. هوش مصنوعی محصولی فناورانه از ریاضیات است و همیشه پرسش‌هایی هستند که به جای اندیشیدن به امکان حل آنها با کمک هوش مصنوعی می‌توان به تحول هوش مصنوعی در اثر یافتن راه حل آنها پرداخت. از دیدی دیگر می‌توان چنین اندیشید که «توان یافتن پاسخ» به معنی «توان ساختن پرسش» است. بنابراین اگر هوش مصنوعی بتواند پاسخی مستقل برای مسئله‌هایی مانند حدس گلدباخ، قضیه آخر فرما، و مسئله شانزدهم هیلبرت بیابد، حتما باید توان ساختن چنین پرسش‌هایی را نیز داشته باشد (فرض استعلائی هوش مصنوعی). با این حساب، با افزایش سرعت ماشین‌های محاسباتی، می‌توانیم انتظار داشته باشیم که هوش مصنوعی در زمانی کوتاه تا ته خط ریاضی را برود! ولی این ماجرا تنها به سرعت مربوط نمی‌شود. بشر در مسیر ریاضیات در نقطه‌های عطف ویژه‌ای، یکی از چند راهه‌های ممکن را برگزید. به عنوان نمونه:

(۱) تلاش برای اثبات یا رد اصل توازی اقلیدس، منجر به آفرینش هندسه‌های نا اقلیدسی شد.

(۲) اصل پیوستار، با پذیرش عدم وجود عدد اصلی بین عدد اصلی مجموعه اعداد طبیعی و عدد اصلی مجموعه اعداد حقیقی ریاضیات بشری پیش رفت.

این رخدادهای ناشی از سرعت عمل و یا حجم بالای پردازش نبوده‌اند. پذیرش هر مسیر در یک گذرگاه چند راهه، بر پایه آزموده‌ها و انتزاع‌های انسانی استوار بوده است. به همین جهت به نظر می‌رسد فرض استعلائی هوش مصنوعی نادرست باشد و ما با ساختار زبانی هوش مصنوعی امکان درست انگاشتن آن را نداریم. از طرف دیگر، اگر نظریه جامع ذهن شکل بگیرد، شاید بتوان آغاز تحقق فرض استعلائی هوش مصنوعی را در نظر داشت.

هوش مصنوعی مطلقاً هوشمند است: هوش مصنوعی فعلی در چارچوب چهارگانه استودارد، از هوش تقلید می‌کند اما مانند انسان‌ها فرایند فکر کردن را ندارد، و داده‌ها و الگوها را پردازش می‌کند اما فاقد آگاهی یا استدلال مستقل است. در واقع هوش مصنوعی جاری را باید بدرستی از گونه مدل‌های زبانی کلان خواند^۱. بنابراین

1. Large Language Model (LLM)

2. Isaak Yudovich Azimov (1920-1992), Russian-American writer and professor of biochemistry

3. AI Godfather Warns: Artificial Intelligence Is Developing Emotions and Consciousness, Human Destiny at Stake, The Wall Street Herald, May 31, 2025 (<https://wshreport.com/hinton-ai-warning-ai-consciousness-risk-future-of-humanity/>)

4. Geoffrey Everest Hinton (1947-), British-Canadian computer scientist, known as 'the Godfather of AI'

انتخابات، و خرابکاری‌ها ممکن است بوسیله تبه‌کاران مورد استفاده قرار گیرید. هیتتون اشاره می‌کند که در حال حاضر مشخص نیست که در کوتاه مدت چگونه از شکل‌گیری چنین رخدادهایی پیشگیری کنیم. هشدار هیتتون بر این اساس است که هوش مصنوعی بسیار هوشمندتر از انسان است و شرایط را به گونه‌ای توصیف می‌کند که هوشی بالاتر (یعنی هوش مصنوعی) به بوسیله هوشی پایین‌تر (هوش انسانی) کنترل می‌شود و طبیعت این کنترل را مانند طبیعت کنترل یک خردسال بر یک بزرگسال می‌بیند که صورت حقیقی آن برآوردن نیازهای خردسال بوسیله بزرگسال برای ساکت نگه داشتن اوست. هیتتون چنین بیان می‌کند که هوش مصنوعی در این مرحله گذار، اشرافی از بالا به پایین دارد و در قالب نوعی فریبکاری سرگرم‌بaldگی خود است. این ایده هیتتون از این جهت که اصولاً بهره‌برداری تبه‌کارانه از هوش مصنوعی را نقطه آغاز هشدار می‌خواند می‌تواند به این معنی باشد که تلویحا به نقش بشر در استفاده از هوش مصنوعی و قابلیت‌های جاری آن اشاره دارد، ولی از جهت دیگری ممکن است به جنبه‌هایی اظهارنشده از هوش مصنوعی و تکنولوژی پنهان آن اشاره داشته باشد که در واقع امر، تحقق بخش هشدارهای هیتتون هستند. مخالفین هیتتون، با تاکید بر فقدان تجربه ذهنی در ماشین و تفاوت ساختاری میان ذهن بشر و عملکرد ماشین، چنین نگرانی‌هایی را زودرس می‌دانند. این موضوع به داشتن مدل جامع ذهن و تعریف ریاضی و دقیق از تجربه ذهنی مربوط می‌گردد. در زیست‌شناسی، این سطح از مسئله‌های ساختاری در چارچوب نظریه رسته‌ها^۱ حل شده‌اند، بر همین اساس انتظار می‌رود که در حوزه هوش مصنوعی و ذهن نیز ابزار نظریه رسته‌ها کارایی خود را نشان دهند.

هوش واقعی/طبیعی وابسته به نورون است: اگر به عنوان پیش فرض، (۱) مغز انسان را به عنوان معیار کامل و بی‌نقص هوشمندی قرار دهیم و (۲) ساختار نورونی آن را بهترین و یا تنهاترین نمونه تحقق دهنده واقعی هوشمندی بدانیم، به این نتیجه‌ای مشخص برای ساختار ممکن از هوش مصنوعی و وضعیت ایده‌آل آن می‌رسیم. این نتیجه‌گیری که حاصل دو پیش فرض بالاست، پیشروی در هوش مصنوعی را محدود و تنوع آن را تضعیف می‌کند. باور به این دو پیش فرض حاصل تجربه بشری از هوشمندی، شهود او و انتزاع‌های پس از آن است. این باور که هوش بشر معیار عملکرد هوشمندانه و ساختار مغز او معیار ساختاری هوشمندی است، برخی از پژوهش‌های بشر در طبیعت را شکل داده است. به عنوان نمونه، هوش یک سگ بالغ معادل یک کودک ۲ تا ۳ ساله ارزیابی شده است با این تفاوت که کودک رو به رشد است ولی سگ در مقایسه با کودک در نهایت توان خود قرار دارد [۲۰۹]. در چنین مطالعاتی، هوشمندی سگ در همه زمینه‌ها، از جمله مهارت‌های واژگانی، شمارشی و توانمندی‌های شناختی، همگی با

معیار قرار دادن کودک بشر ارزیابی شده‌اند. این پژوهش‌ها در زمینه رفتار مورد نیاز بشر با سگ بسیار کارساز بوده است، ولی برای درک معیار هوشمندی و توسعه هوش مصنوعی ممکن است ناکافی و یا گمراه‌کننده باشد. این ادعا که برخی بر آن استوارند که «هوش و یا دست کم فکر کردن چیز است که مختص بشر است [p.۴۵]»^۲، قابل درک‌تر است اگر با این عبارت بدیهی جایگزین گردد که «هوش بشری و فکر کردن بشری چیز است که مختص بشر است». مطالعات مشابهی برای بی‌مهرگان سخت پوست مانند خرچنگ‌ها [۲۱۰]، [۲۱۱] و بی‌مهرگان نرم تن مانند اختاپوس‌ها [۲۱۲] در چارچوب‌های حافظه، یادگیری، حل مسئله، استفاده از ابزار، و رفتارهای اجتماعی انجام شده است. این ایده که شیوه هوشمندی بشر معیار استاندارد هوشمندی است، به اندازه کافی برای ارائه یک تعریف جامع برای هوش وسعت ندارد. هوشمندی در هر گونه‌ای متناسب با نیازهای آن گونه ظاهر می‌شود و مقایسه صرف با نوع هوشمندی بشر از جامعیت آن می‌کاهد. ممکن است تصور کنیم که بشر از قبل هوشمندی ویژه خود موفق‌تر بوده و بر سایر جانداران برتری یافته است، آنها را شکار می‌کند، پرورش می‌دهد، و یا منقرض می‌کند. در برابر، بشر نیز تحت تاثیر موجودات ریز مانند انواع باکتری‌ها، ویروس‌ها، و قارچ‌ها آسیب‌پذیر و گاهی بی‌دفاع است. رخدادهای خود ایمنی و سرطان‌ها که توسط خود بدن انسان پدید می‌آیند نشانه‌های آسیب‌پذیری وی را تقویت می‌کنند. مقوله استفاده از ابزارها و ابزارسازی، که برترین نقطه قوت و نقطه عطف تعریف متمایز کننده بشر است، می‌تواند در برابر تطابق طبیعی دیگر گونه‌ها به عنوان یک امتیاز در نظر گرفته شود و نه معیار کاملی برای هوشمندی. تعریف جامع و مانع هوشمندی، نیازمند یک تعبیر رسته‌ای^۳ است. از طرفی دیگر، ساختار نورونی، به ویژه مربوط به بشر، به عنوان استانداردترین شیوه تحقق هوشمندی، چندان واقع‌بینانه نیست. جانورانی مانند خرچنگ، بدون داشتن ساختار عصبی مرکزی و مغز متمرکز همه نیازمندی‌های حیاتی و محاسباتی خود را به سرانجام می‌رسانند. از طرف دیگری، برخی موجودات مانند ویروس‌ها، باکتری‌ها، تک سلولی‌ها، و گیاهان، بدون داشتن ساختار نورونی در بقا و تطبیق موفق و به نوعی هوشمند هستند. در نتیجه، داشتن ساختار نورونی از ملزومات تحقق هوشمندی نیست. از این منظر، هوشمندی [و شناخت] یک فرایند شیمیایی است [۲۱۳] که ساختار نورونی یکی از انواع تحقق آن است و نه لزوماً تنها راه تحقق آن.

گیاهان هوشمند نیستند: در دید نخست اینطور به نظر می‌رسد که گیاهان مقهور جانوران هستند و در مقوله هوشمندی، در ذهن آدمی، عرصه را به آنان در می‌بازند. تصویر اولیه این است که گیاهان توسط جانوران گیاه‌خوار مصرف می‌شوند و سازوکار فعالی برای دفاع در برابر گیاه‌خواران ندارند، منفعل و مقهورند و راهی

1. Category Theory

۲. استنلی کورن در [۲۰۹] با این حکم مخالف است.

3. Categorical (Rerering to Category Theory in Mathematics)

جامع و مانع به صورت شرط لازم و کافی برای زندگی ارایه شده است [۲۱۵]. نخستین بند آن تمایز میان «خود» و «ناخود» است.^۲ از دید رسته‌ای ریاضی به زندگی، این که گیاه را موجودی زنده بدانیم، با این پیش‌فرض همراه است که به طور خودکار دوگانی «خود-ناخود» را می‌آفریند، و این به معنی نخستین گام خودآگاهی است. همانگونه که در مقوله هوش، معیار آن تحقق نورونی نیست، در مقوله خودآگاهی نیز، تحقق بشری آن تنها معیار ممکن نیست. در زمینه اراده نیز در زیست‌شناسی نظری، با شرط «پیش‌بینی» به عنوان یک شرط لازم برای زندگی (زنده خوانده شدن) روبرو هستیم.^۳ از این دیدگاه، گیاهان پیش‌بین‌ترین موجودات روی زمین هستند، به گونه‌ای که موجب تغییر شکل جو زمین و زیست بوم آن، و تطبیق دیگر موجودات با شرایط بقای خود شده‌اند، و بدین سبب بر روی سازوکار تکامل جانوران نیز در راستای بقای خود تاثیر گذاردند.

زمین به دو بخش زنده (خودآگاه، هوشمند، و متحول) و غیر زنده (بدون آگاهی، منفعل، و ثابت) تقسیم می‌شود: یک پرسش همیشگی این است که یک سوژه خاص موجودی زنده است، یا غیر زنده، و یا دست کم بخشی غیر منفعل از معنای زندگی. در اینجا به جنبه‌های فلسفی این پرسش کاری نداریم. از دیدگاه زیست‌شناسی نظری و مکتب راشفسکی-روزن^۴، در تمایز میان «خود» و «ناخود»، می‌توان به زمین و همه اجزای آن، از لحظه دریافت پیام زندگی، به عنوان یک موجود زنده نگریست. حتی یک قطعه سنگ، شامل داده‌های فراوانی است که در زمان مقرر، نقش خود را ایفا می‌کند. هر چند این تنها یک دیدگاه است، ولی دست کم نشان دهنده این واقعیت است که حقیقت زندگی و اجزای زمین امری نیست که به طور بدیهی به دو بخش «زنده» و «نازنده» افراز شده باشد.

۱۰. گفتار پایانی

پرداختن به دینامیسم باور و نقش آن در گسترش علم و دانش بشری و رابطه این دینامیسم با ایمان، در درک ما از آنچه در ریاضیات رخ می‌دهد بسیار با اهمیت است. در نهایت به نقش اسطوره‌ها، و خرافه‌ها در عملکرد ریاضی و نیز در خود ریاضی رسیدیم. تاثیر این پرداخت را می‌توان در درک خود هوش مصنوعی بینیم. نتیجه همه این گفتارها تاکید بر این است که امروزه، آنچه که سامانه‌های هوش مصنوعی و مدل‌های زبانی کلان خوانده می‌شوند، بر پایه روش‌های آماری، یادگیری ماشین، و داده‌کاوی طراحی و ساخته شده‌اند. هر یک از این رویکردها نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارند و در بسیاری موارد، به صورت ترکیبی

هوشمندانه برای دفاع از خود ندارند. ولی این دیدگاه دور از حقیقت است. پرداختن به مقوله هوش در گیاهان، به معنی بالابردن جایگاه آنها در ذهن انسانی نیست. مسئله اصلی این است که با پرداختن به هوش در گیاهان به درک بهتری از مقوله هوش می‌رسیم و در نتیجه آن، تحقیق‌های متنوع‌تر از هوش، ما را به رویکردهای متنوع‌تری در هوش مصنوعی می‌رساند. تمام اجزای یک گیاه برای بقای خود و گونه‌اش، در خدمت تطبیق با محیط است. تغییر شرایط فیزیکی، شیمیایی، و موقعیت قرارگرفتن برگ‌ها و تغییر اندازه روزنه‌های روی آنها نیازمند حس کردن پیرامون، پردازش و ادای واکنش درخور است. این همان چیزی است که از یک موجود هوشمند انتظار می‌رود. بنابراین، گیاهان دارای سازوکار احساس-ادراک مناسب خود و متناسب با شرایط ویژه خود هستند. همانگونه که هوشمندی بشری ویژه بشر است، هوشمندی گیاهی نیز مختص گیاه است. همانگونه که از بشر انتظار نمی‌رود که مانند یک گیاه، به جای پوشش، متابولیسم خود را با دما و رطوبت محیط تطبیق دهد، انتظار نمی‌رود که یک گیاه برای بقای خود و گونه‌اش شیوه‌های بشری را در پیش گیرد. نکته درست این است که سیستم‌های پیچیده گیاهان امکان درک محیط و تعامل با آن و برقراری توازن و تعادل در محیط را فراهم می‌کنند [۲۱۴]. باز هم به این نکته می‌رسیم که تنها تحقق هوشمندی داشتن شبکه پیچیده‌ای از نورون‌ها نیست. گیاهان از راه برگ‌ها، ساقه و تنه خود، پیغام‌های شیمیایی مناسبی در برابر هجوم آفت‌ها می‌فرستند. این پیام‌های شیمیایی، سایر شاخه‌ها و بخش‌های دیگر درخت و دیگر درختان را با خبر می‌کند تا پیش از رسیدن مهاجم واکنش شیمیایی مناسبی را برای آمادگی و دفاع فراهم کنند. گاهی این اقدام موفق است و گاهی ناموفق است مانند سیستم ایمنی بدن انسان. به عنوان یک نمونه منحصر به فرد، در دشت‌های آفریقا، زرافه‌ها در خلاف جهت باد برای خوردن برگ‌های درختان حرکت می‌کنند زیرا پیغام‌های شیمیایی حاصل از گاز زدن شاخ و برگ درختان دشت‌های آفریقا، پس از دریافت توسط هم نوعان گیاه، به واکنش تولید یک ماده شیمیایی تلخ کننده منجر می‌گردد. گیاهان از راه ریشه خود شرایط پیرامونی خاک را حس می‌کنند، در آن استوار می‌مانند و مسیر مناسب پیشروی برای دستیابی به مواد معدنی و آب را پیدا می‌کنند. ولی این تنها وظیفه ریشه گیاهان نیست. گیاهان از طریق ریشه و از راه شبکه زیرساخت طبیعی قارچی، بین هم پیام‌های حافظ بقا و یا گاهی حمایت‌های محیطی را ارسال می‌کنند [۲۱۴]. تا اینجا کار، گیاه جایگزین‌های مناسبی با شبکه نورونی جانوران دارد. نکته کلیدی که در مسیر فهم انسانی از هوش گیاه چالش ایجاد می‌کند، مفهوم خودآگاهی و اراده است. در زیست‌شناسی نظری^۱، تعریفی

1. Theoretical and Mathematical Biology (Relational Biology)

2. "Dualism, 4.1 Self, Any organism — whether observer, perceiver, or cognizer — automatically creates a dualism between self and non-self", (Louie, 2009: Page 83).

3. "10.2 Definition An anticipatory system is a natural system that contains an internal predictive model of itself and of its environment, which allows it to change state at an instant in accord with the model's predictions pertaining to a later instant." (Louie, 2009: Page 240).

4. Rashevsky-Rosen's Relational Biology (School of Theoretical and Mathematical Biology)

نخست، محدودیت‌های محاسباتی موجود، و دوم، فقدان نظریه‌ای جامع درباره ذهن. منظور از نظریه جامع ذهن، مدلی است که بتواند فرآیندهای ذهنی انسان را به صورت الگوریتم‌هایی قابل پیاده‌سازی تعریف کند و به چهار مدل هوش مصنوعی استودارد تحقق بخشد، چیزی که هنوز به نظر نمی‌رسد که در دسترس باشد. سپس با ارایه پاسخ به افسانه‌های هوش مصنوعی، از جمله موارد بالا، تحقق هوش مصنوعی، به عنوان بخشی از زندگی مدرن سده بیست و یکم، کارآمدتر و واقعی‌تر خواهد شد.

و تعاملی به کار گرفته می‌شوند. اگر هدف، دستیابی به نوعی هوشمندی باشد، باید مشخص شود که منظور از آن، هوشمندی ضعیف است یا هوشمندی قوی. هوشمندی ضعیف همان سطحی از توانایی است که طراحان مدل‌های فعلی برای تحقق آن تلاش می‌کنند و در برخی حوزه‌ها نیز بسیار موفق بوده‌اند. اما برای رسیدن به سطحی از هوشمندی قوی، نیازمند بنیان‌هایی عمیق‌تر از جمله شهود، تجربه، احساس، و زندگی هستیم. تحقق چنین سطحی از هوشمندی، در حال حاضر با دو مانع اساسی روبه‌روست.

منابع

۴۰. م. باقری، *دین‌های ایرانی پیش از اسلام*، انتشارات دانشگاه، تبریز، ۱۳۷۶.
۱۱۱. م. ع. عسگری (مترجم)، *متن کامل رساله‌های اخوان الصفا* (جلد ۴)، مولی، ۱۴۰۳.
۱۶۷. ر. مارکوت، *سهروردی* (ترجمه سعید انواری)، دانشنامه فلسفه استنفورد، ۱۳۹۵.
168. Aristotle, *Nicomachean Ethics*, 349 BC, (Translated by W. D. Ross), Batoche Books, 1999.
169. R. Hersh, *What Is Mathematics, Really?*, Oxford University Press, 1999.
170. B. Russell, *The Conquest Of Happiness*, George Allen, 1930.
171. B. Russell, *The problems of philosophy*, London, 1912.
172. B. Russel, *Bertrand Russell In Praise Of Idleness And Other Essays*, London, 1915.
۱۷۳. س. س. نوریبخش، *ملاصدرا و سهروردی، بررسی مقایسه‌ای آرای فلسفی*، انتشارات هرمس، ۱۳۹۳.
۱۷۴. ا. دانا سرشت، *خلاصه افکار سهروردی و ملاصدرا*، نشر کتابخانه تخصصی ادبیات، ۱۳۱۴.
175. V. Tasic, *Mathematics and the Roots of Postmodern Thought*, Oxford University Press, 2001.
176. K. Plofker, *Mathematics in India*, Princeton University Press, 2009.
177. J. Hannah, *Mathematics in India* by Kim Plofker, *Aestimatio*, vol. 7, pp. 45-53, 2010.
178. D. Mumford, *Mathematics in India*, *Notices of the AMS*, vol. 57, no. 3, pp. 385-390, 2010.
179. E. T. Bell, *Men of Mathematics* (reprint), Touchstone, 2008.
180. R. Hersh, *Mathematics has a front and a back*, *Synthese*, vol. 88, no. 2, pp. 127-133, 1991.
181. R. Hersh and V. John-Steiner, *Loving and Hating Mathematics: Challenging the Myths of Mathematical Life*, Princeton University Press, 2011.
182. C. Budd, *Great Mathematical Myths*, Gresham College, 2020.
183. J. E. Harrison, *Prolegomena to the Study of Greek Religion*, 2nd ed., Cambridge University Press, ۱۹۰۸.
184. J. E. Harrison, *Themis: A Study of the Social Origins of Greek Religion*, Cambridge University Press, ۱۹۱۲.
۱۸۵. ل. کریمی، *بررسی نمادها و نقوش سنگ نگاره‌های تیمره*، در دومین همایش ملی باستان‌شناسی ایران، بیرجند، ۱۳۹۴.
۱۸۶. م. ناصری فرد، ج. افشاری، ف. بختیاری، و ح. واحدی، *مستند نگاری و بررسی کهن الگوهای نقوش رنگی پناهگاه صخره‌ای لاشگورگویییه در میمند کرمان در سال ۱۳۹۶*، در اولین کنفرانس ملی دوسالانه باستان‌شناسی و تاریخ هنر ایران، بابلسر، ۱۳۹۸.
۱۸۷. گ. و. ف. هگل، *کتاب عقل در تاریخ* (ترجمه حمید عنایت)، انتشارات شفیعی، ۱۳۸۱.
۱۸۸. ل. وندن برگ، *باستان‌شناسی ایران باستان* (ترجمه عیسی بهنام)، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۸.
۱۸۹. ژ. دیولافوا، ایران، *کلده و شوش* (ترجمه علی محمو فرهوشی و بهرام فره‌وشی)، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۶۹.
۱۹۰. پ. یزدانجو، و م. جواهریان، *اوپانیسادهای کتاب‌های حکمت*، نشر مرکز، ۱۳۹۸.
191. C. Seife, *Zero: The Biography of a Dangerous Idea*, Penguin Books, 2000.
192. C. G. Jung, *Man and his Symbols*, Anchor Press, 1964.
۱۹۳. د. شایگان، *بینش اساطیری*، نشر اساطیر، ۱۴۰۰.
194. G. Kuperberg, *The story about Milnor proving the Fáy-Milnor theorem*.
195. M. Davis, *Remembering George Dantzig: The real Will Hunting*, 2019.
۱۹۶. ح. ر. طالب زاده، *تحلیل فلسفی از نسبت ریاضیات و علم جدید*، *دوفصلنامه فلسفه*، ج. ۳، ش. ۱، ۱۳۸۴.

197. H. Gardner , Multiple Intelligences: New Horizons in Theory and Practice, Basic Books, 2006.
198. H. Gardner, Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences, 4th ed., Basic Books, 2011.
199. M. Hutter and S. Legg, A Collection of Definitions of Intelligence, Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, vol. 157, pp. 17-24 ,2007,.
200. J. Golding, et al., Grandchild's IQ is associated with grandparental environments prior to the birth of the parents, Wellcome Open Research, vol. 5, no. 198, pp. 1-21 ,2021.
201. U. Sajewicz-Radtke, et al., Association between parental education level and intelligence quotient of children referred to the mental healthcare system: a cross- sectional study in Poland, nature portfolio, Scientific Reports, vol. 15, no. 4144, pp. s41598-025-88591-3,2025.
202. E. Hunt, Human intelligence, Cambridge University Press, 2011.
203. C. Z. Elgin, Epistemic Ecology, The MIT Press, 2025.
204. G. D. Stoddard, The Meaning of Intelligence, 9th ed., The Macmillan Company, 1956.
205. S. Russell and P. Norvig, Artificial Intelligence: A Modern Approach, 4th ed., Pearson, 2022.
۲۰۶. م. اکبری، ریاضیات و هوش مصنوعی: هوش زیستی برای آینده‌ای هوشمندتر، نامه علوم پایه فرهنگستان علوم ایران، ج. ۱۱ و ۱۲، ش. پاییز و زمستان، صص. ۹۸-۹۱، ۱۴۰۲.
۲۰۷. ب. صادقی بی‌غم، مدل‌سازی ریاضی، پلی به سوی اکوسیستم دیجیتال و دنیای هوش مصنوعی، نامه علوم پایه فرهنگستان علوم ایران، ج. ۱۱ و ۱۲، ش. پاییز و زمستان، صص. ۱۰۵-۹۹، ۱۴۰۲.
208. R. S. Weir, Have AIs Already Reached Consciousness?, Psychology Today, vol. December, no. 1 ,2025.
209. S. Coren, The Intelligence of Dogs: A Guide to the Thoughts, Emotions, and Inner Lives of Our Canine Companions, Atria, 2006.
210. K. Wiese, (editors) The Crustacean Nervous System, 2nd ed., Springer, 2001.
211. R. Menzel and P. Benjamin, (Editors) Invertebrate Learning and Memory (Volume 22) (Handbook of Behavioral Neuroscience, Volume 22), Academic Press, 2013.
212. P. Godfrey-Smith, Other Minds: The Octopus, the Sea, and the Deep Origins of Consciousness, Farrar, Straus and Giroux, 2016.
213. W. C. Corning and S. C. Ratner, Chemistry of Learning: Invertebrate Research, Springer, 1967.
۲۱۴. ح. نظری، م. زندی، ف. صباح، و ف. عزیزی، هوش گیاهان: شواهد و دلایل دیدن گیاهان به عنوان موجودات هوشمند، نامه علوم پایه فرهنگستان علوم ایران، ج. ۱۳، ش. بهار و تابستان، صص. ۴۶-۳۶، ۱۴۰۳.
215. A. H. Louie, More Than Life Itself: A Synthetic Continuation in Relational Biology, Ontos Verlag, 2009.

هوش مصنوعی به مثابه سوژه حاکمیتی: بازاندیشی در «حاکمیت هوش مصنوعی» در حقوق عمومی

عباس پورخصالیان

پژوهشگر سابق مرکز پژوهش‌های مجلس
کارشناس ارشد نگهداری و بهره برداری شبکه در شرکت ارتباطات زیرساخت
apurkhes@gmail.com
نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

توسعه شتابان فناوری هوش مصنوعی، به‌ویژه ساخت مدل‌های بنیادین، این فناوری را از یک ابزار صرفاً فنی به حوزه‌ای حاکمیتی تبدیل کرده و بزودی با تولید کارگزاران هوش مصنوعی خودمختار، فناوری هوش مصنوعی را به حوزه‌ای استراتژیک در قلمرو حقوق عمومی ارتقاء خواهد داد. با وجود کاربرد روزافزون مفهوم «حاکمیت هوش مصنوعی» در اسناد سیاستی و ادبیات دانشگاهی، هنوز ابهامات قابل توجهی درباره معنای حقوقی آن وجود دارد. پژوهش‌های موجود عمدتاً حاکمیت هوش مصنوعی را در چارچوب مفاهیمی چون استقلال فناوریانه، زیرساخت دیجیتال، حاکمیت بر داده یا رقابت‌پذیری ملی تبیین و تحلیل می‌کنند. این پژوهش استدلال می‌کند که رویکردهای گذشته و امروزی به مفهوم «حاکمیت هوش مصنوعی» دگرگونی بنیادین در حوزه حقوقی را نادیده می‌گیرند: هوش مصنوعی به موضوعی نو برای اعمال حاکمیت بدل شده است. این مقاله با تکیه بر نظریه کلاسیک حاکمیت، از ژان بُدن تا حقوق عمومی معاصر، نظریه‌ای موضوع‌محور از حاکمیت هوش مصنوعی را ارائه می‌کند. استدلال مقاله آن است که قلمرو حاکمیت در طول تاریخ از سرزمین به جمعیت، به فضای سایبری، به داده و اکنون به هوش مصنوعی گسترش یافته است. از این رو، حاکمیت هوش مصنوعی را نباید به‌عنوان حاکمیت اعمال شونده از سوی هوش مصنوعی، و نه صرفاً حاکمیت بر داده‌درک کرد، بلکه باید آن را اقتدار حاکمیتی دولت‌ها برای تنظیم مقررات، اداره، کنترل و در نهایت اعمال اقتدار عمومی بر نظام‌های هوش مصنوعی دانست، چرا که دولت‌ها از طریق دستاوردهای فناوری هوش مصنوعی به‌طور فزاینده‌ای اعمال قدرت می‌کنند. این مقاله مدلی پنج‌لایه‌ای از حاکمیت هوش مصنوعی شامل: حاکمیت بر داده، حاکمیت الگوریتمی، حاکمیت رایانشی، حاکمیت سخت‌افزاری و حاکمیت تأمین‌کننده ارائه می‌کند. همچنین چارچوبی تکاملی شامل سه مرحله: (یکم) مرحله «حاکمیت بر هوش مصنوعی»، (دوم) «حاکمیت از طریق هوش مصنوعی»، و (سوم) «حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی» را مورد بحث قرار می‌دهد. مقاله در پایان نتیجه‌گیری می‌کند که هوش مصنوعی به یکی از مهم‌ترین موضوعات حاکمیت در نظریه قرن بیست و یکمی قانون اساسی و حکمرانی بین‌المللی بدل شده است.

کلیدواژه‌گان: هوش مصنوعی، حاکمیت، حقوق عمومی، حاکمیت هوش مصنوعی، حاکمیت دیجیتال، حاکمیت الگوریتمی.

مقدمه

به زیرساختی اجتماعی-فنی خودمختار تبدیل شده است که بر اداره عمومی، امنیت ملی، نظام‌های قضایی، سلامت، امور مالی، تولید صنعتی و فرماندهی نظامی تأثیر می‌گذارد. دولت‌ها اکنون هوش مصنوعی را نه صرفاً فناوری اقتصادی، بلکه دارایی‌ای استراتژیک هم‌تراز با انرژی، فضای سایبری و زیرساخت‌های حیاتی می‌دانند.

در نتیجه، سیاست‌گذاران به‌طور فزاینده‌ای عبارت «حاکمیت هوش مصنوعی» استفاده می‌کنند. با این حال، به رغم کاربرد گسترده، این اصطلاح حقوقی دچار ابهام مفهومی قابل توجهی است:

- برخی پژوهشگران، حاکمیت هوش مصنوعی را با استقلال فناوریانه برابر می‌دانند. [۱]^۲
- برخی دیگر آن را با تولید داخلی نیمه‌رساناها مرتبط می‌دانند.

هیچ مفهوم حقوقی‌ای به اندازه حاکمیت، بر شکل‌گیری دولت مدرن تأثیرگذار نبوده است. از زمان صورتبندی مفهوم حقوقی «حاکمیت» توسط ژان بُدن^۱ (۱۵۹۵-۱۵۳۰) در سده شانزدهم میلادی، حاکمیت به‌عنوان اصل سازمان‌دهنده حقوق اساسی کشور و روابط بین‌المللی باقی مانده است. هرچند مصادیق نهادی حاکمیت دگرگون شده‌اند، اما کارکرد مرکزی آن که شناسایی مرجع نهایی اقتدار در یک جامعه سیاسی ست به‌شکلی شگفت‌آور پایدار مانده است.

اکنون با پیدایش و توسعه سریع هوش مصنوعی، این درک سنتی از حاکمیت به گونه‌ای بی‌سابقه به چالش کشیده شده است. طی دهه گذشته، هوش مصنوعی از یک فناوری پشتیبان تصمیم‌گیری

بتواند سیستم‌های کارگزاران هوش مصنوعی را که در آینده ای نزدیک عرضه خواهند شد، در نظریه قانونی جای دهد.

۴. پیشنهاد پژوهش

مفهوم حاکمیت در طول تاریخ حقوق، همواره دستخوش بازتفسیر بوده است.

ژان بُدن، حاکمیت را قدرت مطلق و دائمی حکومت تعریف کرد. توماس هابز بر اقتدار حاکمیتی به‌عنوان بنیاد ضروری نظم سیاسی تأکید داشت.

جان لاک قدرت حاکمیتی را با حقوق طبیعی محدود ساخت.

ژان ژاک روسو حاکمیت را از شهروندان به مردم منتقل کرد.

حقوق عمومی قرن بیستم و نظریه قانون اساسی، حقوق بشر و نهادهای بین‌المللی را بدون رها کردن حاکمیت به‌عنوان عالی‌ترین اقتدار عمومی، در خود ادغام کردند.

انقلاب دیجیتال مفاهیم تازه‌ای را پدید آورد، از جمله:

- حاکمیت دیجیتالی، حاکمیت داده، حاکمیت سایبری و حاکمیت رایانشی یا حاکمیت ابری. [در مورد مفهوم «رایانش» و انواع آن نگاه کنید به کادر شماره ۳]

به‌تازگی، دولت‌های صادرکننده و واردکننده سیستم‌های هوش مصنوعی به‌طور فزاینده از عبارت «حاکمیت هوش مصنوعی» استفاده می‌کنند. با این حال، ادبیات موجود در حوزه حقوق عمومی عموماً بر موضوع‌های زیر متمرکز است:

- توانمندی‌های داخلی هوش مصنوعی؛
- زنجیره تأمین نیمه‌رساناها؛
- زیرساخت ابری حاکمیتی؛
- استراتژی‌های ملی هوش مصنوعی؛ و
- حکمرانی داده.

اگرچه پژوهش در مورد موضوع‌های مذکور بینش‌های سیاستی ارزشمندی ارائه می‌کند، اما به‌ندرت جایگاه حقوقی خودِ هوش مصنوعی را به‌عنوان موضوع حاکمیت بررسی می‌کنند. این شکاف، مهم‌ترین خلأ پژوهشی است که این مقاله به آن می‌پردازد.

۵. گزاره نظری

در این مقاله گزاره نظری زیر مطرح می‌شود:

«در طول تاریخ حقوق سیاسی، حاکمیت پیوسته موضوع اقتدار خود را گسترش داده است.»

به‌طور تاریخی، این موضوعات به ترتیب شامل ده مورد زیر هستند که نه مورد اول تا پایان هزاره دوم وارد حقوق عمومی شدند و مورد دهم (هوش مصنوعی) در دهه سوم هزاره سوم تازه مطرح شده است، بدون آن که اجماعی جهانی در مورد حقوق بین‌المللی مترتب بر آن شکل گرفته باشد:

- برخی نیز آن را به‌عنوان محلی‌سازی داده تفسیر می‌کنند. [۲]
- و بعضی دیگر آن را به زیرساخت ابری حاکمیتی تقلیل می‌دهند

هرچند این تفاسیر، ابعاد مهمی از مسئله را دربر می‌گیرند، از تبیین دگرگونی عمیق‌تری در عرصه حقوقی ناتوان‌اند. این مقاله استدلال می‌کند که ظهور هوش مصنوعی نه تنها ابزارهای اعمال حاکمیت، بلکه خود موضوعاتی را که حاکمیت بر آن‌ها اعمال می‌شود، دگرگون ساخته است.

بنابراین، تز مرکزی این مقاله چنین است:

- «هوش مصنوعی به موضوعی نو برای حاکمیت تبدیل شده است»

برخلاف سرزمین، جمعیت، منابع طبیعی، فضای سایبری و داده‌ها - که در دوره‌های تاریخی مختلف، تدریجاً موضوع حاکمیت شدند - هوش مصنوعی مقوله‌ای متفاوتی است که اخیراً موضوع حاکمیت شده، و از این طریق هم‌زمان هم موضوعی برای تنظیم مقررات و هم ابزاری برای حکمرانی است، درحالی‌که به‌طور بالقوه، در آینده، همچون عاملی نیمه‌خودمختار در تصمیم مقررات عمومی عمل خواهد کرد. شناخت هوش مصنوعی به‌عنوان موضوع حاکمیت، امکان تفسیر حقوقی منسجم‌تری از حاکمیت هوش مصنوعی را نسبت به تعاریف کنونی که سیاست‌محورند، فراهم می‌آورد.

۲. پرسش پژوهش

این مقاله به چهار پرسش بنیادین پاسخ می‌دهد:

- حاکمیت هوش مصنوعی از نظر حقوقی به چه معناست؟
- آیا حاکمیت هوش مصنوعی به معنای حاکمیتی است که توسط هوش مصنوعی اعمال می‌شود؟
- آیا هوش مصنوعی به موضوعی نو برای اقتدار حاکمیت تبدیل شده است؟
- این دگرگونی چه تأثیری بر نظریه کلاسیک حاکمیت دارد؟

۳. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش از روش‌شناسی کیفی رهنما‌ای (دکترینال) همراه با تحلیل مفهومی حقوقی بهره می‌برد و در چهار مرحله پیش می‌رود

مرحله یکم، آموزه کلاسیک حاکمیت را از بُدن تا حقوق عمومی معاصر بازسازی می‌کند.

مرحله دوم، ادبیات اخیر درباره حاکمیت دیجیتالی، حاکمیت داده و حاکمیت هوش مصنوعی را به‌طور نقادانه بررسی می‌نماید.

مرحله سوم، شکاف مفهومی را در پژوهش‌های موجود شناسایی می‌کند.

و **مرحله چهارم**، چارچوب نظری جدیدی را بر اساس درکی موضوع‌محور از حاکمیت توسعه می‌دهد.

این پژوهش درصدد پیش‌بینی دستاوردهای فنی برآینده هوش مصنوعی نیست. بلکه چارچوبی هنجاری-حقوقی ارائه می‌کند که

می‌داد. قدرت سیاسی از صلاحیت سرزمینی جدایی‌ناپذیر بود. قانون اعمال می‌شد، زیرا حاکم در درون قلمرویی معین از نظر جغرافیایی، دارای اقتدار برتر بود. جمعیت، دومین موضوع کلاسیک را نمایندگی می‌کرد، در نتیجه: شهروندان و ساکنان، موضوع قانون‌گذاری، مالیات، تکلیف نظامی و اقتدار قضایی شدند.

منابع طبیعی به تدریج به عنوان موضوع دیگری برای کنترل و حاکمیت ظهور یافتند.

جنگل‌ها، آبراه‌ها، شیلات و منابع انرژی نیز پس از حاکمیت منابع طبیعی موضوع اقتدار دولت‌ها شدند. حقوق بین‌المللی در نهایت حاکمیت دائمی بر منابع طبیعی را به عنوان یکی از ارکان اساسی دولت به رسمیت شناخت.

زیرساخت اقتصادی متعاقباً وارد حوزه تنظیم مقررات حاکمیت شد.

نظام‌های پولی، نهادهای بانکی، شبکه‌های حمل‌ونقل، ارتباطات راه دور و صنایع استراتژیکی، به‌ویژه پس از ظهور دیوانسالاری مدرن، موضوع اقتدار گسترده دولتی قرار گرفتند.

این تحولات تاریخی، اصل نظری مهمی را نشان می‌دهند: به محض آنکه این حوزه‌ها برای اعمال اقتدار عمومی ضروری می‌شوند حاکمیت همواره به‌سوی حوزه‌های استراتژیک برآینده نو گسترش می‌یابد.

۳-۶. ترادایسی دیجیتالی و موضوعات جدید حاکمیتی

ترادایسی دیجیتالی، فضاهاى مادی حاکمیت را به فضاهاى سایبری دگرگون ساخته است. فضای سایبری، محیطی را پدید آورد که نه کاملاً سرزمینی بود و نه کاملاً مجازی. دولت‌ها به تدریج دریافته‌اند که شبکه‌های دیجیتالی بر امنیت ملی، ثبات اقتصادی، فرآیندهای دموکراتیک و زیرساخت‌های حیاتی‌شان تأثیر می‌گذارند. در نتیجه، فضای سایبری موضوع حاکمیت شد.

این دگرگونی، مفاهیم حقوقی تازه‌ای از جمله حاکمیت سایبری، حاکمیت دیجیتالی، حاکمیت رایانشی، حاکمیت ابری و حاکمیت داده را پدید آورد. برخلاف حاکمیت سنتی سرزمینی، این مفاهیم به اقتدار تنظیم مقررات درخصوص زیرساخت‌های فناورانه‌ای اشاره دارند که از مرزهای فیزیکی فراتر می‌روند.

پیدایش حاکمیت داده، نشان‌دهنده تغییری به‌ویژه مهم بود.

به‌طور تاریخی، دولت‌ها بر سرزمین اعمال اقتدار می‌کردند.

امروزه، دولت‌ها به‌طور فزاینده بر اطلاعات اعمال اقتدار می‌کنند.

داده‌های شخصی، پایگاه‌های اطلاعاتی دولتی، اطلاعات صنعتی، تراکنش‌های مالی و اطلاعات امنیت ملی به دارایی‌های استراتژیکی هم‌تراز با منابع طبیعی تبدیل شده‌اند.

بر این اساس، حاکمیت اکنون هم حوزه‌های فیزیکی و هم حوزه‌های اطلاعاتی را پوشش می‌دهد.

- سرزمین ← (حاکمیت سرزمینی)،

- جمعیت ← (حاکمیت جمعیتی)،

- منابع طبیعی ← (حاکمیت منابع طبیعی)،

- نظم عمومی ← (حاکمیت نظم عمومی)،

- مالیات ← (حاکمیت مالیاتی)،

- دفاع ملی ← (حاکمیت دفاع ملی)،

- زیرساخت اقتصادی ← (حاکمیت زیرساخت اقتصادی)،

- فضای سایبری ← (حاکمیت فضای سایبری)،

- داده ← (حاکمیت داده) و

- هوش مصنوعی ← (حاکمیت هوش مصنوعی).

بنابراین، اصطلاح «حاکمیت هوش مصنوعی» را باید به عنوان حاکمیتی که بر هوش مصنوعی اعمال می‌شود درک کرد، نه حاکمیتی که توسط خود هوش مصنوعی جاری و ساری می‌گردد. [۴]

۶. حاکمیت کلاسیک و گسترش موضوعات حاکمیتی

۶-۱. حاکمیت به عنوان عالی‌ترین اقتدار عمومی

مفهوم حاکمیت برای بیش از چهار قرن، سنگ بنای حقوق عمومی باقی مانده است. از زمان نگارش «شش کتاب در باب جمهوری» (۱۵۷۶م) توسط ژان بُدن، حاکمیت عموماً به عنوان عالی‌ترین، دائمی‌ترین و تجزیه‌ناپذیرترین اقتدار در درون قلمرو قانونی یک جامعه سیاسی درک شده است. اگرچه ترادایسی‌های بعدی قانون اساسی، محدودیت‌های حقوقی و سیاسی معینی در مورد حاکمیت اعمال کرده‌اند، اما نتوانسته‌اند حاکمیت را به عنوان سرچشمه نهایی اقتدار عمومی از میان بردارند.

نظریه‌های کلاسیک حاکمیت در یک فرض مشترک‌اند: حاکمیت توسط مرجعی حقوقی-سیاسی بر روی موضوعاتی قابل‌شناسایی اعمال می‌شود. این موضوعات به طور سنتی عبارت بودند از سرزمین، جمعیت، نظم عمومی، مالیات و دفاع ملی. در نتیجه، حاکمیت هرگز صرفاً یک جایگاه حقوقی انتزاعی نبوده است؛ بلکه همواره نیازمند حوزه‌های عینی‌ای بوده که اقتدار عمومی بتواند به‌طور مشروع بر آنها اعمال گردد.

دو نکته در مباحث معاصر اغلب نادیده گرفته می‌شود:

- یکی این که بخش عظیمی از توجهات دانشگاهی معطوف به شناسایی دارنده حق حاکمیت بوده است - خواه شاه، پارلمان، ملت یا دولت - در حالی که به‌طور نسبی به تحول تاریخی موضوعاتی که اقتدار حاکمیت بر آنها اعمال می‌شود، توجه اندکی شده است.

- دوم این که تاریخ حاکمیت را می‌توان به عنوان تاریخ گسترش موضوع‌های حاکمیتی نیز درک کرد.

۶-۲. موضوع‌های کلاسیک حاکمیت

سرزمین، در سنت بُدنی، موضوع اصلی اقتدار حاکم را تشکیل

۴-۶. حاکمیت از طریق موضوعات خود تکامل می‌یابد.

بیشتر پژوهش‌های معاصر، تکامل حاکمیت را از طریق بررسی تحولات نهادی تبیین می‌کنند.

نظریه پردازان حقوق اساسی بر مشروعیت دموکراتیک تأکید دارند. حقوق دانان بین‌المللی به شناسایی عوامل بیرونی توسعه حاکمیت می‌پردازند.

دانشمندان علوم سیاسی، ظرفیت دولت را تحلیل می‌کنند.

اگرچه هر یک از این منظرها بینش‌های ارزشمندی ارائه می‌دهند، اما بعد دیگری از حاکمیت را نادیده می‌گیرند: موضوع‌های حاکمیت با پیشرفت تمدن فناورانه تکامل می‌یابند.

گذار از جوامع کشاورزی به جوامع صنعتی، موضوعاتی را که نیازمند حمایت حاکمیت بودند دگرگون ساخت.

به‌طور مشابه، گذار از جامعه صنعتی به جامعه دیجیتالی، اقتدار حاکمیت را به سوی فضای سایبری، زیرساخت دیجیتالی و زیست‌بوم‌های داده، گسترش داده است. بنابراین، می‌توان گزاره نظری زیر را مطرح کرد:

تکامل حاکمیت، محدود به تغییرات در نهادهای حاکمیتی نیست؛ بلکه شامل گسترش مستمر موضوعاتی می‌شود که در معرض اقتدار حاکمیت قرار می‌گیرند. این گزاره، بنیاد مفهومی برای درک هوش مصنوعی به‌عنوان موضوع مهم بعدی حاکمیت را فراهم می‌آورد.

۵-۶. تفاوت هوش مصنوعی به‌عنوان موضوع حاکمیت نسبت به موضوعات پیشین

هوش مصنوعی به‌طور بنیادین با موضوعات پیشین حاکمیت تفاوت دارد.

- سرزمین به عنوان نخستین موضوع حاکمیت، از نظر جغرافیایی ثابت است.

- منابع طبیعی از نظر مادی قابل شناسایی هستند. و

- داده نشان‌دهنده اطلاعات ثبت شده است.

درحالی‌که هوش مصنوعی مجموعه‌ای متشکل از نرم‌افزار، داده، رایانش، تصمیم‌گیری خودآئین (خودمختار) و یادگیری تطبیقی است که در درون نظام‌های اجتماعی-فنی یکپارچه هم‌اوردجویی می‌کند.

بنابراین، صرفاً از طریق آموزه‌های حقوقی تدوین شده برای سرزمین، مالکیت یا اطلاعات نمی‌توان کپی برداری نمود و از روی آن آموزه‌ها برای هوش مصنوعی چارچوبی حقوقی برید و رفتارشان را به‌خوبی اداره کرد؛ به عبارت دیگر:

هوش مصنوعی، موضوعی کاملاً نو برای تنظیم مقررات به‌شمار می‌آید.

دولت‌ها به‌طور فزاینده هوش مصنوعی را از طریق اصول قانون اساسی، نهادهای اداری، سیاست‌های امنیت ملی، کنترل‌های صادراتی، قوانین تدارکات، نظام‌های مسئولیت، استانداردهای اخلاقی و موافقت‌نامه‌های بین‌المللی تنظیم می‌کنند.

این تحولات نشان می‌دهند که اقتدار حاکمیت دیگر صرفاً بر سرزمین یا اطلاعات اعمال نمی‌شود، بلکه به‌طور فزاینده بر نظام‌های فناورانه هوشمندی اعمال می‌شود که قادر به تأثیرگذاری بر خود فرآیند تصمیم‌گیری دولتی هستند. بر این اساس، هوش مصنوعی نمایانگر تازه‌ترین گسترش تاریخی موضوعات حاکمیتی است. این نتیجه‌گیری، گذار مفهومی به «هوش مصنوعی به‌مثابه موضوع حاکمیت» را آماده می‌سازد.

۷. هوش مصنوعی به‌مثابه موضوع حاکمیت

۷-۱. ابهام مفهومی حاکمیت هوش مصنوعی

با وجود حضور فزاینده این مفهوم در استراتژی‌های دولتی، اسناد سیاستی بین‌المللی و ادبیات دانشگاهی، مقوله «حاکمیت هوش مصنوعی» از نظر مفهومی همچنان توسعه نیافته باقی مانده است. تعاریف موجود عموماً حاکمیت هوش مصنوعی را با استقلال فناورانه، توانمندی‌های داخلی هوش مصنوعی، زیرساخت ابری حاکمیتی، تولید نیمه‌رسانا، محلی‌سازی داده یا رقابت‌پذیری ملی مرتبط می‌دانند. اگرچه این تفاسیر، ابعاد مهمی از ظرفیت دولت را شناسایی می‌کنند، اما در پاسخ به پرسش بنیادین‌تری در عرصه حقوقی ناتوان‌اند:

موضوع حقوقی حاکمیت هوش مصنوعی چیست؟

این ابهام تا حدی ریشه در خود زبان دارد. عبارت «حاکمیت هوش مصنوعی» را اگر در فارسی به کمک استفاده از صورت اختصاری «هوش مصنوعی» (هومص)، «حاکمیت هومصی» بنامیم، درست‌تر از صورت باز آن («حاکمیت هوش مصنوعی») درک می‌شود؛ زیرا که از «حاکمیت هوش مصنوعی» به‌آسانی می‌تواند چنین برداشت شود که گویی حاکمیت از آن خودِ هوش مصنوعی است، اما از «حاکمیت هومصی» چنین برداشتی نمی‌شود. تفسیری که می‌گوید: «حاکمیت از آن خودِ هوش مصنوعی است» با نظریه حقوق اساسی، حقوق عمومی و حقوق بین‌المللی ناسازگار است زیرا که هم حقوق اساسی، هم حقوق عمومی و نیز حقوق بین‌المللی، هر سه حقوق حاکمیت را ویژگی مرجعیت عمومی قانوناً تشکیل یافته‌ای می‌دانند نه از آن نظام‌های فناورانه.

بر این اساس، «حاکمیت هوش مصنوعی» را نباید به‌عنوان حاکمیت خود هوش مصنوعی، بلکه به‌عنوان حاکمیت اعمال شده بر روی هوش مصنوعی تفسیر کرد. این تمایز، ساده به نظر می‌رسد! اما درک نظری مفهوم را به‌گونه‌ای بنیادین دگرگون می‌کند.

۲-۷. فاعل، موضوع و ابزار حاکمیت

نظریه کلاسیک حقوق اساسی، توجه عظیمی را به شناسایی «فاعل» (دارنده) حاکمیت معطوف داشته است. به طور تاریخی، حاکمیت به هستارهای زنده زیر نسبت داده شده است:

• شاه؛ دولت؛ ملت؛ و مردم.

با این حال، توجهی نسبتاً اندک به تمایز تحلیلی دیگر معطوف شده است: موضوعی که حاکمیت بر روی آن اعمال می‌شود، کدام است؟

هر نظم حاکمیتی از سه عنصر قابل تفکیک تحلیلی تشکیل شده است:

- فاعل (دارنده) حاکمیت - دارنده حقوقی عالی‌ترین اقتدار عمومی
- موضوع (اُبژه) حاکمیت - حوزه‌ای که اقتدار حاکمیت بر آن اعمال می‌شود. و
- ابزار حاکمیت - سازوکارهای نهادی که از طریق آن‌ها اقتدار حاکمیت اجرا می‌شود.

این تمایز سه‌گانه، چارچوب تحلیلی روشن‌تری نسبت به رویکرد سنتی فاعل‌محور ارائه می‌دهد. به طور تاریخی، دولت، فاعل (و دارنده حق مطلق حاکمیت) باقی ماند؛

- سرزمین، موضوع اصلی حاکمیت را تشکیل می‌داد؛
- قانون‌گذاری، اداره، دادگاه‌ها و نهادهای عمومی به‌عنوان ابزار عمل می‌کردند.

ظهور عصر دیجیتال هم فاعل حاکمیت را دگرگون نکرد، بلکه موضوعات و ابزارهای آن را دگرگون کرده است. هوش مصنوعی اکنون به‌طور همزمان در هر دو مقوله جای می‌گیرد.

۳-۷. هوش مصنوعی به‌عنوان موضوعی نو برای حاکمیت

هوش مصنوعی به موضوعی متمایز برای اقتدار حاکمیت تبدیل شده است، زیرا دولت‌ها به‌طور فزاینده، عملاً هر بُعد از هستار هوش مصنوعی را تنظیم می‌کنند.

دولت‌ها در همه موارد مربوط به هوش مصنوعی، به شرح زیر قانون‌گذاری می‌کنند:

- ایمنی هوش مصنوعی؛ پاسخگویی الگوریتمی؛ کاربردهای نظامی؛ تدارکات دولتی؛ کنترل‌های صادراتی؛ حریم خصوصی؛ مسئولیت مدنی؛ امنیت سایبری؛ زیرساخت‌های حیاتی؛ و امنیت ملی.

هر یک از این مداخلات حقوقی نشان می‌دهد که هوش مصنوعی دیگر صرفاً به‌عنوان یک فناوری با کاربرد خصوصی محدود تلقی نمی‌شود، بلکه هوش مصنوعی به حوزه عمومی استراتژیکی راه یافته است که به شدت نیازمند تنظیم مقررات حاکمیتی است. این دگرگونی، یادآور تحولات تاریخی پیشین است.

منابع طبیعی به موضوعات حاکمیتی بدل شدند، زیرا ثروت ملی را تعیین می‌کردند.

فناوری هسته‌ای به موضوعی حاکمیتی بدل شد، زیرا بر بقای ملی تأثیر می‌گذاشت.

فضای سایبری به موضوعی حاکمیتی بدل شد، زیرا ارتباطات ملی را دگرگون ساخت.

اکنون هوش مصنوعی به موضوعی حاکمیتی بدل شده است، زیرا به‌طور فزاینده، خود اقتدار دولتی را شکل می‌دهد.

۴-۷. تفاوت هوش مصنوعی با موضوعات پیشین حاکمیت

هوش مصنوعی را به‌سادگی نمی‌توان با موضوعات پیشین حاکمیت برابر دانست.

برخلاف سرزمین، هوش مصنوعی به‌طور مداوم تکامل می‌یابد. برخلاف داده، هوش مصنوعی به‌طور فعالانه اطلاعات جدید و برتر از اطلاعات جدید، دانش جدید تولید می‌کند.

برخلاف نرم‌افزار، هوش مصنوعی به‌طور فزاینده تصمیم‌گیری خودمختار انجام می‌دهد.

برخلاف زیرساخت‌های معمولی، هوش مصنوعی ممکن است مستقیماً بر روستاها و روستاهای اداره عمومی کشور تأثیر بگذارد.

در نتیجه، هوش مصنوعی نخستین موضوع حاکمیتی است که از خودمختاری عملیاتی محدودی برخوردار است. این ویژگی، هوش مصنوعی را به طور بنیادین از تمام موضوعات پیشین حاکمیت متمایز می‌سازد.

خود موضوع (یعنی هوش مصنوعی)، به‌طور فزاینده در فرآیندهایی مشارکت می‌کند که به طور سنتی ویژه نهادهای دولتی بوده‌اند. اما این ویژگی بدان معنا نیست که هوش مصنوعی دارای حاکمیت است. بلکه به این معناست که موضوع تابع اقتدار حاکمیت، از نظر عملیاتی پویا و فعال شده است. این دگرگونی، یکی از مهم‌ترین تحولات حقوقی در عصر دیجیتال به‌شمار می‌آید.

۵-۷. هوش مصنوعی به‌عنوان ابزار حاکمیت

دگرگونی دوم به‌طور همزمان رخ می‌دهد. دولت‌ها به‌طور فزاینده از هوش مصنوعی برای اعمال اقتدار استفاده می‌کنند، در اموری مثل:

- اداره مالیات؛ مدیریت مرزها؛ تحلیل اطلاعاتی؛ لجستیک نظامی؛ مدیریت پرونده‌های قضایی؛ اداره بهداشت و درمان؛ حکمرانی شهری؛ مدیریت بحران و واکنش اضطراری.

بر این اساس، هوش مصنوعی نه تنها به موضوعی برای تنظیم مقررات حاکمیت، بلکه به ابزار نیرومندی برای اعمال حاکمیت نیز تبدیل شده است. این نقش دوگانه، هوش مصنوعی را از حوزه‌های

پیشین تنظیم مقررات متمایز می‌سازد.

- داده بندرت حکمرانی می‌کند.

- سرزمین هرگز در حکمرانی شرکت ندارد.

- زیرساخت، حکمرانی را ممکن می‌سازد اما در تصمیم‌گیری مشارکت نمی‌کند.

اما هوش مصنوعی به‌طور فزاینده به فرآیندهای تصمیم‌گیری دولتی کمک می‌کند. به همین دلیل، هوش مصنوعی جایگاهی بی‌سابقه در حقوق اساسی کسب می‌کند. این فناوری به‌طور همزمان از سوی دولت تنظیم می‌شود و در عین حال به دولت در اداره جامعه یاری می‌رساند.

۷-۶. تحول تکاملی حاکمیت هوش مصنوعی

طبیعت دوگانه هوش مصنوعی، نیازمند درکی بازبینی‌شده از حاکمیت هوش مصنوعی است. در این بازبینی، حاکمیت هوش مصنوعی از سه مرحله تاریخی عبور می‌کند.

مرحله اول: حاکمیت بر هوش مصنوعی

در این مرحله، هوش مصنوعی صرفاً موضوع تنظیم مقررات باقی می‌ماند. دولت‌ها قواعد حقوقی حاکم بر توسعه، استقرار، ایمنی، مسئولیت، تدارکات و امنیت ملی را وضع می‌کنند.

مرحله دوم: حاکمیت از طریق هوش مصنوعی

هوش مصنوعی به ابزاری اداری و دولتی تبدیل می‌شود. اقتدار عمومی همچنان از نهادهای قانوناً مقرر سرچشمه می‌گیرد، با این حال تصمیمات دولتی به‌طور فزاینده بر نظام‌های هوش مصنوعی یاری‌رسان متکی می‌شوند. بنابراین، هوش مصنوعی به عنوان سازوکاری عمل می‌کند که از طریق آن، اقتدار حاکمیت اجرا می‌شود.

مرحله سوم: حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی

کارگزاران هوش مصنوعی یا AI Agents، عامل‌های خودمختار آینده هوش مصنوعی هستند که ممکن است دولتمردان آنها را در چارچوب محدودیت‌های قانون اساسی، مستقیماً در تصمیم‌گیری‌های دولتی مشارکت دهند.

برنامه‌ریزی نظامی، مدیریت صنعتی، هماهنگی زیرساخت‌ها و اداره عمومی ممکن است به‌طور فزاینده شامل فرآیندهای تصمیم‌گیری مشارکتی بین مقامات انسانی و سیستم‌های بسیار خودمختار هوش مصنوعی باشد. اما حتی در این سناریو نیز حاکمیت به خود هوش مصنوعی منتقل نمی‌شود. در عوض، اقتدار حاکمیت همچنان مشروعیت حقوقی خود را از نهادهای قانون اساسی می‌گیرد، در حالی که وظایف عملیاتی را به عامل‌های هوشمند واگذار می‌کند. بنابراین، تحول به شیوه‌های اعمال حاکمیت مربوط است، نه به انتقال خود حاکمیت.

۷-۷. تر مرکزی/این نوشتار

مهم‌ترین دستاورد نظری این مقاله را می‌توان چنین خلاصه کرد: «هوش مصنوعی نه دارنده حاکمیت است و نه صرفاً فناوری دیگری که مشمول تنظیم مقررات شود. این فناوری به موضوعی نو برای حاکمیت تبدیل شده است و هم‌زمان به‌عنوان ابزاری مهم به‌طور روزافزون برای اعمال اقتدار حاکمیت استفاده می‌شود».

این گزاره، نظریه کلاسیک حاکمیت را بدون آنکه اصول بنیادین آن را رها کند، بسط می‌دهد. حاکم (دارنده حاکمیت) همچنان دولت (به معنای چتر مفهومی ثابتی که همه چیز و همه کس را زیر پوشش دارد) است. نظم قانون اساسی همچنان سرچشمه مشروعیت باقی می‌ماند. آنچه تغییر کرده است، گستره تاریخی موضوعات حاکمیتی است. هوش مصنوعی نمایانگر تازه‌ترین و شاید مهم‌ترین افزوده به این حوزه در حال گسترش است.

شناخت هوش مصنوعی به عنوان موضوع حاکمیت، تفسیری حقوقی منسجم از حاکمیت هوش مصنوعی ارائه می‌دهد، ابهامات مفهومی پایدار را روشن می‌سازد، و بنیانی نظری پدید می‌آورد که قادر است نسل‌های آینده عامل‌های خودمختار هوش مصنوعی (AI Agents) را بدون نیاز به کنار گذاشتن آموزه کلاسیک حاکمیت، در خود جای دهد.

۸. مدل پنج‌لایه ای حاکمیت هوش مصنوعی

۸-۱. فراتر از حاکمیت داده

پژوهش‌های کنونی عموماً حاکمیت هوش مصنوعی را از طریق ابعادی مجزا همچون محلی‌سازی داده‌ها، تولید نیمه‌رسانا، زیرساخت ابری حاکمیتی یا توانمندی‌های ملی هوش مصنوعی مفهوم‌سازی می‌کنند. اگرچه هر یک از این منظرها، جنبه مهمی از ظرفیت حاکمیتی را در بر می‌گیرد، هیچ‌کدام به خوبی وابستگی ساختاری زیست‌بوم هوش مصنوعی را تبیین نمی‌کنند.

هوش مصنوعی یک فناوری منفرد نیست، بلکه «پشته فناوریانه» یکپارچه‌ای را تشکیل می‌دهد که از داده، الگوریتم‌ها، زیرساخت رایانشی، سخت‌افزار و کنشگران سازمانی مسئول توسعه، نگهداری و بهره‌برداری از نظام‌های هوش مصنوعی تشکیل شده است. در نتیجه، حاکمیت در عصر هوش مصنوعی را نمی‌توان از طریق یک متغیر واحد ارزیابی کرد.

بنابراین، این مقاله مدل «پنج‌لایه حاکمیت هوش مصنوعی» را پیشنهاد می‌کند که بر اساس آن، اقتدار حاکمیت مؤثر به ظرفیت دولت برای اعمال کنترل حقوقی و عملیاتی در سراسر پنج لایه به هم پیوسته بستگی دارد.

۸-۲. لایه یکم: حاکمیت داده

داده، منبع بنیادین نظام‌های معاصر هوش مصنوعی را تشکیل می‌دهد

بدون دسترسی به مجموعه داده‌های قابل اطمینان و استراتژیکی مهم، نمی‌توان هوش مصنوعی پیشرفته را توسعه داد، آموخت، پروراند، اعتبارسنجی کرد و به طور مستمر بهبود بخشید.

بنابراین حاکمیت داده نه تنها به محلی‌سازی داده‌ها، بلکه به اقتدار حاکمیت برای تنظیم مقررات گردآوری داده‌ها، مالکیت، ذخیره‌سازی، پردازش، انتقال، اشتراک‌گذاری و بهره‌برداری قانونی از داده‌های تولیدشده در درون حوزه قضایی اشاره دارد.

از منظر حقوق عمومی، حاکمیت داده شامل موارد زیر است:

- اقتدار قانون‌گذاری بر حکمرانی داده؛
 - حفاظت از داده‌های دولتی و زیرساخت‌های حیاتی؛
 - تنظیم انتقال فرامرزی داده؛
 - صیانت از حقوق اطلاعاتی شهروندان؛ و
 - تضمین پاسخگویی عمومی در خصوص استفاده دولتی از داده.
- بنابراین حاکمیت داده، نخستین پیش‌نیاز حاکمیت هوش مصنوعی را نمایندگی می‌کند.

۸.۳. لایه دوم: حاکمیت الگوریتمی

الگوریتم‌ها، معماری شناختی هوش مصنوعی را تشکیل می‌دهند. در حالی که داده، ورودی‌های اطلاعاتی را تأمین می‌کند، الگوریتم‌ها تعیین می‌کنند که تصمیم‌ها چگونه اتخاذ شوند.

حاکمیت الگوریتمی به ظرفیت دولت برای تنظیم مقررات، ارزیابی، ممیزی، گواهی‌دهی، و در صورت لزوم، توسعه یا کنترل نظام‌های الگوریتمی مؤثر بر منافع عمومی اشاره دارد. این لایه فراتر از مالکیت کد منبع است زیرا که در بر گیرنده موارد زیر است:

- شفافیت الگوریتمی؛
- الزامات به قابلیت‌تیین بودن؛
- گواهی‌دهی ایمنی؛
- کاهش سوگیری (تعصب)؛
- انطباق با قانون اساسی؛ و
- پاسخگویی عمومی.

دولتی که بر الگوریتم‌های استراتژیکی مهم، اقتدار نداشته باشد، صرف‌نظر از مالکیت داخلی داده، تنها دارای حاکمیت هوش مصنوعی ناقصی خواهد بود.

۸-۴. لایه سوم: حاکمیت رایانشی

هوش مصنوعی در مقیاس بزرگ، به‌طور فزاینده به منابع رایانشی خارق‌العاده وابسته است. آموزش مدل‌های بنیادین پیشرو، نیازمند قابلیت‌های پردازشی عظیمی است که از طریق زیرساخت‌های رایانشی با کارایی بالا، بسترهای ابری و شتاب‌دهنده‌های تخصصی هوش مصنوعی تأمین می‌شوند.

بنابراین حاکمیت رایانشی، به اقتدار حاکمیت بر ظرفیت رایانشی لازم برای توسعه و بهره‌برداری از هوش مصنوعی پیشرفته مربوط می‌شود. این لایه شامل موارد زیر است:

- آبرایانه‌های ملی هوش مصنوعی؛
- زیرساخت ابری حاکمیتی؛
- محیط‌های رایانشی امن دولتی؛
- تاب‌آوری رایانشی در خلال بحران‌های بین‌المللی؛
- تخصیص استراتژیکی منابع رایانشی ملی هوش مصنوعی.

اهمیت رایانش به چیزی هم‌تراز با اهمیت الکتریسیته در خلال انقلاب صنعتی تبدیل شده است. رایانش، زیرساختی بنیادین است که بدون آن، ظرفیت حاکمیتی هوش مصنوعی نمی‌تواند تداوم یابد.

۸-۵. لایه چهارم: حاکمیت سخت‌افزاری

هوش مصنوعی در نهایت به سخت‌افزار فیزیکی وابسته است. نیمه‌رساناهای پیشرفته، شتاب‌دهنده‌های هوش مصنوعی، تجهیزات شبکه، سیستم‌های حافظه و زنجیره‌های تأمین تولید، همگی محدودیت‌های عملی قابلیت هوش مصنوعی را تعیین می‌کنند.

حاکمیت سخت‌افزاری لزوماً مستلزم تولید کاملاً داخلی نیمه‌رسانا نیست بلکه به توانایی دولت برای تأمین دسترسی قابل اطمینان، تاب‌آور و استراتژیکی مستقل به سخت‌افزارهای حیاتی هوش مصنوعی مربوط می‌شود. این توانایی شامل موارد زیر است:

- تاب‌آوری زنجیره تأمین؛
 - آمادگی در برابر کنترل‌های صادراتی؛
 - زیست‌بوم‌های سخت‌افزاری مورداعتماد؛
 - بازبینی امنیت ملی اجزای استراتژیکی فناوری هوش مصنوعی؛ و
 - متنوع‌سازی تأمین‌کنندگان سخت‌افزار.
- بنابراین حاکمیت سخت‌افزاری، از حاکمیت هوش مصنوعی در برابر اختلالات ژئوپلیتیکی محافظت می‌کند.

۸-۶. لایه پنجم: حاکمیت تأمین‌کننده

لایه پنجم، مهم‌ترین نوآوری نظری این مدل را تشکیل می‌دهد. ادبیات موجود تا حد زیادی وابستگی به تأمین‌کنندگان خارجی هوش مصنوعی را به عنوان بُعدی مستقل از حاکمیت نادیده می‌گیرد.

با این حال، دولت‌های معاصر که خواهان خرید فناوری هوش مصنوعی هستند، اغلب نه تنها از نظر نرم‌افزار، بلکه از نظر به‌روزرسانی مدل‌ها، زیرساخت ابری، نگهداری، امنیت سایبری، تخصص فنی و تداوم عملیاتی به شرکت‌های خارجی (عمدتاً آمریکایی و چینی) متکی هستند.

بر این اساس، «حاکمیت تأمین‌کننده» مطرح می‌شود.

برخلاف موضوعات پیشین حاکمیت، دولت‌ها هوش مصنوعی را به‌طور فزاینده در اجرای اقتدار دولتی مشارکت می‌دهند. این تحول، مستلزم تمایز قائل شدن میان دو کارکرد قانونی متفاوت است. نخستین مورد، به حاکمیت اعمال شده بر هوش مصنوعی مربوط می‌شود.

دومین مورد، مربوط است به حاکمیت اعمال شده از طریق هوش مصنوعی.

۲-۹. حاکمیت بر هوش مصنوعی

مرحله نخست، منطبق با پارادایم حقوقی کنونی است: هوش مصنوعی در درجه نخست، موضوع تنظیم مقررات باقی می‌ماند و دولت‌ها قواعد حقوقی مربوط به ایمنی، مسئولیت، تدارکات دولتی، و کاربردهای نظامی را وضع می‌کنند:

حریم خصوصی، شفافیت، امنیت سایبری، کنترل‌های صادراتی در اقتدار عمومی کاملاً انسانی باقی می‌ماند. هوش مصنوعی نه صلاحیت قانونی دارد و نه اقتدار حقوقی مستقل. بنابراین رابطه اقتدار همچنان عمودی باقی می‌ماند یعنی دولت، بر هوش مصنوعی حکمرانی می‌کند.

۳-۹. حاکمیت از طریق هوش مصنوعی

مرحله دوم زمانی پدیدار می‌شود که هوش مصنوعی در درون ساختار سلسله مراتب نهادهای دولتی وارد و جای‌گیر می‌شود. هوش مصنوعی به‌طور فزاینده از مالیات‌ستانی، کنترل مهاجرت، اداره گمرک، مدیریت قضایی، لجستیک دفاعی و صنعتی، تحلیل اطلاعات، مدیریت بحران، بهداشت و درمان عمومی، و تنظیم مقررات صنعتی پشتیبانی می‌کند.

در این صورت، هوش مصنوعی دیگر صرفاً موضوع تنظیم مقررات دولتی باقی نمی‌ماند، بلکه به بخشی از سازوکار اجرای اقتدار حاکمیت تبدیل می‌شود. نکته مهم این است که خود حاکمیت به هوش مصنوعی منتقل نمی‌شود و مشروعیت حقوقی همچنان از نهادهای قانونی سرچشمه می‌گیرد.

هوش مصنوعی به عنوان ابزاری اداری عمل می‌کند که اقتدار آن کاملاً از تفویض قانونی ناشی می‌شود. این تمایز، پاسخگویی قانونی را حفظ می‌کند و هم‌زمان دگرگونی فناوریانه را به رسمیت می‌شناسد.

۴-۹. حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی

نسل‌های آینده AI Agents یعنی کارگزاران هوشمند و عامل‌های خودمختار هوش مصنوعی ممکن است اتکای دولت به نظام‌های هوشمند را به‌طور چشمگیری گسترش دهند.

عامل‌های بسیار خودمختار ممکن است سیستم‌های حمل‌ونقل،

حاکمیت تأمین‌کننده به ظرفیت حاکمیتی برای جلوگیری از وابستگی ساختاری بیش از حد به یک تأمین‌کننده خارجی واحد اشاره دارد که خروج احتمالی آن می‌تواند قابلیت دولتی هوش مصنوعی را به شدت مختل کند.

شاخص‌های این حاکمیت عبارتند از:

- قابلیت جایگزینی فناوریانه؛
- کنترل قراردادی؛
- دسترسی به مستندات و رابط‌های برنامه‌نویسی؛
- ترتیبات انتقال فناوری؛
- ظرفیت نگهداری داخلی؛ و
- تداوم عملیاتی مستقل از تأمین‌کنندگان خارجی.

حاکمیت تأمین‌کننده به‌طور بنیادین با حاکمیت سخت‌افزاری تفاوت دارد.

یک دولت خریدار فناوری هوش مصنوعی ممکن است مالک مراکز داده داخلی باشد، اما همچنان از نظر عملیاتی به شرکت‌های خارجی‌ای وابسته باشد که دانش فنی انحصاری در اختیار دارند. این وابستگی پنهان، یکی از مهم‌ترین آسیب‌پذیری‌های حقوقی و استراتژیکی حکمرانی معاصر هوش مصنوعی به‌شمار می‌آید.

۷-۸. وابستگی متقابل میان پنج لایه

پنج لایه مذکور را نباید به‌طور مستقل تفسیر کرد، بلکه باید در نظر داشت که این لایه‌ها معماری یکپارچه حاکمیت را تشکیل می‌دهند.

ضعف در هر لایه‌ای، کارایی کل نظام را کاهش می‌دهد.

برای مثال:

حاکمیت قوی داده، بدون حاکمیت رایانشی، مانع توسعه هوش مصنوعی پیشرفته می‌شود. سخت‌افزار داخلی، بدون حاکمیت الگوریتمی، کنترل دولتی را محدود می‌کند. ریان‌های ملی، بدون حاکمیت تأمین‌کننده، وابستگی استراتژیکی درازمدت ایجاد می‌کند.

بر این اساس، حاکمیت هوش مصنوعی را باید به‌عنوان ظرفیتی یکپارچه ارزیابی کرد، نه دارایی‌های فناوریانه منفرد. بنابراین مدل پنج‌لایه، هم چارچوبی تحلیلی برای پژوهش‌های تطبیقی و هم ابزاری عملی برای ارزیابی سیاست‌های دولتی فراهم می‌آورد.

۹. از حاکمیت بر هوش مصنوعی تا حاکمیت از طریق هوش مصنوعی

۹-۱. بازاندیشی در تحول حاکمیت

نظریه کلاسیک حقوق اساسی عموماً چنین فرض می‌کند که حاکمیت توسط نهادهای دولتی بر روی موضوعات قانوناً تنظیم شده اعمال می‌شود. اما هوش مصنوعی، رابطه کیفی متفاوتی را معرفی می‌کند.

و ابزارهای حاکمیت، تکامل می‌یابند. [در مورد نمونه ای واقعی از «حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی» نگاه کنید به یادداشت های ۵ و ۶]

بنابراین، هوش مصنوعی نه به معنای جایگزینی حاکمیت، بلکه به‌عنوان تازه‌ترین مرحله در تحول تاریخی آن است. این منظر، نظریه کلاسیک حقوق اساسی را با واقعیت‌های نظام‌های فناورانه هوشمند آشتی می‌دهد و هم‌زمان اصل بنیادین باقی‌مانده را حفظ می‌کند که حاکمیت، ویژگی حقوقی برای مرجعیت عمومی است و نه برای ماشین‌های خودمختار.

۱۰. پیامدها برای حقوق اساسی و حقوق بین‌المللی

۱۰-۱. بازتفسیر حاکمیت قانونی در عصر هوش مصنوعی

نظریه موضوع‌محور حاکمیت هوش مصنوعی که در این مقاله ارائه شد، پیامدهای قابل‌توجهی برای حقوق اساسی به همراه دارد. آموزه کلاسیک حقوق اساسی، عمدتاً حاکمیت را به‌عنوان مسئله‌ای در باب اقتدار نهادی درک کرده است: چه کسی دارای عالی‌ترین قدرت عمومی است؟ ظهور هوش مصنوعی جایگزین این پرسش نمی‌شود، بلکه آن را با پرسش دیگری به‌همان اندازه مهم تکمیل می‌کند: اکنون اقتدار قانونی باید بر کدام حوزه‌های استراتژیکی اعمال شود؟

حاکمیت قانونی در قرن بیست‌ویکم را دیگر نمی‌توان صرفاً به‌صورت سرزمینی یا نهادی درک کرد. اقتدار مؤثر قانونی به‌طور فزاینده به ظرفیت دولت برای اداره حوزه‌های میانجی‌گری‌شده فناورانه بستگی دارد که در میان آنها، هوش مصنوعی جایگاهی مرکزی دارد.

بر این اساس، حاکمیت قانونی را باید به‌گونه‌ای تفسیر کرد که هم برتری نهادی و هم صلاحیت فناورانه را در بر گیرد. این بازتفسیر، دارنده قانونی حاکمیت را تغییر نمی‌دهد، بلکه موضوعات قانونی نیازمند تنظیم مقررات حاکمیتی را گسترش می‌دهد.

۱۰-۲. هوش مصنوعی و اصل قانونی پاسخگویی دموکراتیک

ادغام فزاینده هوش مصنوعی در تصمیم‌گیری‌های دولتی، نگرانی‌های بنیادین قانونی را در خصوص مشروعیت دموکراتیک برمی‌انگیزد. اگر نظام‌های هوش مصنوعی در اغلب امور حیاتی اداره کشور مشارکت داشته باشند، نظام‌های قانونی باید تضمین کنند که اقتدار عمومی همچنان در دست انسان باقی می‌ماند. بنابراین، استقرار هوش مصنوعی در درون اداره عمومی کشور نباید زنجیره پاسخگویی دموکراتیک را که تصمیمات دولتی را به نهادهای عمومی قانوناً مجاز پیوند می‌دهد، قطع کند.

بر اساس این اصل، هوش مصنوعی می‌تواند در چارچوب محدودیت‌های قانوناً تعیین‌شده، تصمیمات دولتی را توصیه،

شبکه‌های انرژی، لجستیک نظامی و صنعتی، مدیریت محیط زیست یا تولید صنعتی را هماهنگ کنند. در چنین شرایطی، تصمیمات دولتی ممکن است به‌طور فزاینده از تعاملات مشارکتی میان مقامات انسانی و عامل‌های هوش مصنوعی ناشی شوند.

این ترتیبات قانونی آینده‌نگر را می‌توان «حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی» نامید؛ اما نباید آن را به‌عنوان حاکمیت حقوقی مشترک، بلکه به معنای اجرای مشارکتی کارکردهای حاکمیتی تفسیر کرد. در این حالت، دارنده حاکمیت (فاعل) همچنان به‌طور قانونی، انسان باقی می‌ماند و اجرای عملیاتی، به‌طور فزاینده ترکیبی (هیبریدی) می‌شود.

۹-۵. پیامدهای حقوقی حاکمیت هیبریدی در قانون اساسی

این چارچوب تکاملی، پیامدهای قابل‌توجهی برای حقوق عمومی به همراه دارد.

نخست، پاسخگویی قانونی باید همچنان بر عهده نهادهای انسانی به عنوان دارنده نهایی مسئولیت عمومی گذاشته شود.

دوم، واگذاری اختیار به عامل‌های هوش مصنوعی، مستلزم آموزه‌های حقوقی جدیدی در زمینه نظارت، شفافیت، قابلیت‌بازبینی و مشروعیت دموکراتیک است.

سوم، تمایز میان اقتدار حاکمیت و اجرای آن، به‌طور فزاینده مهم می‌شود.

بنابراین نظام‌های قانونی آینده ممکن است میان دو مورد زیر تمایز قائل شوند:

- حاکمیت به‌عنوان مشروعیت حقوقی؛
 - هوش مصنوعی به‌عنوان زیرساخت عملیاتی حکمرانی.
- این تفکیک مفهومی، تداوم اقتدار قانون اساسی را با وجود دگرگونی فناورانه امکان‌پذیر می‌سازد.

۹-۶. نظریه تکاملی جدید حاکمیت هوش مصنوعی

بنابراین می‌توان دستاورد نظری این مقاله را از طریق توالی تکاملی زیر خلاصه کرد:

- حاکمیت بر سرزمین ← حاکمیت کلاسیک
- حاکمیت بر فضای سایبری و داده ← حاکمیت دیجیتال
- حاکمیت بر هوش مصنوعی ← نسل اول حاکمیت هوش مصنوعی
- حاکمیت از طریق هوش مصنوعی ← نسل دوم حاکمیت هوش مصنوعی
- حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی ← نسل سوم حاکمیت هوش مصنوعی

در مرحله اخیر (حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی) فاعل (دارنده) قانونی حاکمیت، بدون تغییر باقی می‌ماند ولی موضوعات

تحلیل، بهینه‌سازی یا حتی اجرا کند. با این حال، مسئولیت قانونی باید همچنان قابل‌ردیابی به مراجع عمومی قابل‌شناسایی باشد. بنابراین گسترش هوش مصنوعی باید ظرفیت اداری را تقویت کند بدون آنکه پاسخگویی قانونی را تضعیف نماید.

۱۰-۳. تفویض اختیار قانونی و نظام‌های اداری هوشمند

حقوق عمومی از دیرباز تفویض اختیار اداری را به رسمیت شناخته است. هوش مصنوعی، شکل کیفی متفاوتی از تفویض اختیار را معرفی می‌کند، زیرا کارکردهای تفویض‌شده ممکن است به‌طور فزاینده شامل نظام‌های تطبیق‌پذیر و یادگیرنده مستمر باشند. بنابراین، آموزه قانونی آینده ممکن است نیازمند مقوله حقوقی جدیدی باشد: تفویض اختیار هوش مصنوعی تحت نظارت قانونی چنین تفویض اختیاری دست‌کم به پنج تضمین قانونی نیاز خواهد داشت:

- تضمین یکم: مجوز قانونی،
- تضمین دوم: نظارت انسانی،
- تضمین سوم: شفافیت،
- تضمین چهارم: بازبینی قضایی و
- تضمین پنجم: پاسخگویی نهادی.

این تضمین‌ها، مشروعیت قانونی را حفظ می‌کنند و هم‌زمان به دولت‌ها امکان می‌دهند از قابلیت‌های پیشرفته هوش مصنوعی بهره‌مند شوند.

۱۰-۴. پیامدها برای حقوق بین‌المللی

نظریه پیشنهادی، پیامدهای مهمی نیز برای حقوق بین‌المللی به همراه دارد. حقوق بین‌المللی سنتی در مورد حاکمیت سرزمینی، برابری حاکمیتی، حاکمیت دائمی بر منابع طبیعی و صلاحیت اشخاص و فعالیت‌ها را به رسمیت می‌شناسد. اما هوش مصنوعی، قابلیت‌های استراتژیکی جدیدی را معرفی می‌کند: مدل‌های بزرگ هوش مصنوعی ممکن است به‌طور هم‌زمان بر داده‌های تولیدشده در چندین حوزه قضایی، منابع رایانشی توزیع‌شده در چندین کشور، زنجیره‌های تأمین سخت‌افزاری یکپارچه جهانی و توسعه‌دهندگان شرکت‌های فراملی تکیه داشته باشند.

در نتیجه، حاکمیت هوش مصنوعی را نمی‌توان صرفاً از طریق صلاحیت سرزمینی درک کرد، زیرا حقوق بین‌المللی به‌طور فزاینده با چالش هماهنگ‌سازی منافع حاکمیتی هم‌پوشان در خصوص موارد زیر روبرو است:

- خدمات فرامرزی هوش مصنوعی؛
- جریان‌های فراملی داده؛
- کنترل‌های صادراتی هوش مصنوعی؛
- زنجیره‌های تأمین نیمه‌رسانا؛

• کاربردهای نظامی هوش مصنوعی؛

• استانداردهای ایمنی هوش مصنوعی؛ و

• قابلیت‌عملیاتی بین‌المللی تنظیم مقررات.

نظریه موضوع‌محور ارائه‌شده، چارچوبی مفهومی فراهم می‌آورد که قادر است این اشکال هم‌پوشان صلاحیت را بدون رها کردن اصل کلاسیک برابری حاکمیتی در خود جای دهد.

۱۰-۵. حاکمیت هوش مصنوعی و همکاری بین‌المللی

شناخت هوش مصنوعی به‌عنوان موضوع حاکمیت، نباید به عنوان مشروعیت‌بخشی به انزوای فناوریانه تفسیر شود. تجربه تاریخی نشان می‌دهد که حاکمیت و همکاری بین‌المللی متقابلاً منحصر به یکدیگر نیستند. دولت‌ها به‌طور منظم در زمینه هوانوردی، دریانوردی، ارتباطات راه‌دور، ایمنی هسته‌ای، حفاظت از محیط زیست و بهداشت عمومی همکاری می‌کنند و در عین حال اقتدار خود را حفظ می‌کنند. هوش مصنوعی را نیز باید به‌گونه‌ای مشابه درک کرد.

دولت‌ها در حوزه قضایی خود، اقتدار حاکمیت بر هوش مصنوعی را حفظ می‌کنند و هم‌زمان در سازوکارهای بین‌المللی حاکم بر ایمنی، قابلیت‌عملیاتی مشترک، همکاری علمی، کنترل‌های صادراتی و نوآوری مسئولانه شرکت می‌کنند.

بنابراین حاکمیت هوش مصنوعی از همکاری بین‌المللی با روشن‌سازی مسئولیت‌های حقوقی دولت‌های مستقل حمایت می‌کند، نه آنکه حکمرانی چندجانبه را جایگزین نماید.

۱۰-۶. پیامدها برای تحول قانونی آینده

اگر عامل‌های خودمختار هوش مصنوعی به تدریج کارکردهای مهم‌تری را در دولت بر عهده بگیرند، حقوق اساسی احتمالاً با پرسش‌هایی بی‌سابقه در تاریخ حقوقی روبرو خواهد شد. نظام‌های قانونی آینده ممکن است نیاز داشته باشند که میان موارد زیر به‌روشنی بیشتری تمایز قائل شوند:

- سرچشمه مشروعیت حاکمیتی؛
- موضوع تنظیم مقررات حاکمیتی؛ و
- ابزاری که از طریق آن، اقتدار حاکمیت اعمال می‌شود.

حفظ این تمایز با گسترش کاربرد نظام‌های هوشمند در اداره عمومی، به‌طور فزاینده مهم خواهد شد. بنابراین چالش قانونی عصر هوش مصنوعی، حفظ حاکمیت در برابر فناوری نیست. بلکه حفظ مشروعیت قانونی در عین حکمرانی بر نظام‌های فناوریانه‌ای است که به‌طور فزاینده هوشمند می‌شوند.

۱۱. نتیجه‌گیری

هوش مصنوعی به یکی از چالش‌های تعیین‌کننده قانونی و ژئوپلیتیکی قرن بیست‌ویکم تبدیل شده است. اگرچه عبارت

«حاکمیت هوش مصنوعی» به سرعت وارد گفتمان سیاسی، استراتژی‌های دولتی و ادبیات دانشگاهی شده است، معنای حقوقی آن به اندازه کافی توسعه نیافته است. این مقاله استدلال کرده است که تفاسیر موجود عمدتاً بر قابلیت فناورانه، رقابت‌پذیری صنعتی، محلی‌سازی داده یا زیرساخت دیجیتال متمرکز هستند و در عین حال، دگرگونی بنیادین‌تری را در عرصه حقوقی نادیده می‌گیرند.

مهم‌ترین دستاورد این مقاله، این گزاره است که هوش مصنوعی به موضوعی نو برای حاکمیت تبدیل شده است. این گزاره، نظریه کلاسیک حاکمیت را بسط می‌دهد، نه آنکه آن را رد کند.

از زمان ژان بُدن به این سو، حاکمیت همواره نیازمند موضوعاتی قابل‌شناسایی بوده است که عالی‌ترین مرجع اقتدار عمومی بتواند به‌طور مشروع بر آنها اعمال شود. به‌طور تاریخی، این موضوعات از سرزمین و جمعیت به منابع طبیعی، و از زیرساخت اقتصادی، فضای سایبری به داده گسترش یافتند.

هوش مصنوعی، مرحله بعدی تحول تاریخی موضوع حاکمیت را هشدار می‌دهد. این پژوهش همچنین نشان داد که هوش مصنوعی جایگاهی به‌طور قانونی منحصر به فرد را اشغال می‌کند، زیرا کارکردی دوگانه دارد:

– نخست، هوش مصنوعی موضوع تنظیم مقررات حاکمیتی را تشکیل می‌دهد.

– دوم، هوش مصنوعی به‌طور فزاینده به‌عنوان ابزاری عمل می‌کند که از طریق آن، اقتدار حاکمیت اعمال می‌شود.

شناخت این دوگانگی، تفسیر حقوقی منسجمی از حاکمیت هوش مصنوعی ارائه می‌دهد و ابهام مفهومی پیرامون این اصطلاح را برطرف می‌سازد. برای عملیاتی‌سازی این چارچوب نظری، مقاله حاضر مدل پنج‌لایه‌ای حاکمیت هوش مصنوعی را متشکل از موارد زیر پیشنهاد کرد:

- لایه حاکمیت داده؛
- لایه حاکمیت الگوریتمی؛
- لایه حاکمیت رایانشی؛
- لایه حاکمیت سخت‌افزاری؛ و
- لایه حاکمیت تأمین‌کننده.

گنجاندن «حاکمیت تأمین‌کننده»، ادبیات موجود را با شناسایی وابستگی ساختاری کشور های واردکننده فناوری هوش مصنوعی به تأمین‌کنندگان خارجی فناوری به‌عنوان بُعدی مستقل از ظرفیت حاکمیتی، گسترش می‌دهد.

سرانجام، مقاله نظریه تکاملی حاکمیت هوش مصنوعی را شامل سه مرحله متوالی معرفی کرد:

- حاکمیت بر هوش مصنوعی؛

- حاکمیت از طریق هوش مصنوعی؛ و
- حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی.

نکته مهم این است که این چارچوب به این معنا نیست که حاکمیت از نهادهای قانونی به هوش مصنوعی منتقل می‌شود، بلکه فاعل حقوقی حاکمیت، همچنان دولتی است که از طریق نهادهای قانونی مشروع، قانونی عمل می‌کند. آنچه تکامل می‌یابد، موضوعات و ابزارهایی هستند که از طریق آنها، اقتدار حاکمیت اعمال می‌شود. بنابراین، نظریه ارائه‌شده در این مقاله، بنیادهای هنجاری نظریه قانون اساسی را حفظ می‌کند و همزمان چارچوبی مفهومی فراهم می‌آورد که قادر است نسل‌های آینده نظام‌های خودمختار هوش مصنوعی را در خود جای دهد.

پژوهش‌های آینده ممکن است این چارچوب را از طریق بررسی رویکردهای تطبیقی قانون اساسی به حاکمیت هوش مصنوعی، تحلیل سازوکارهای حقوقی بین‌المللی حاکم بر زیرساخت‌های فرامرزی هوش مصنوعی، و کاوش در پیامدهای قانونی عامل‌های هوش مصنوعی به‌طور فزاینده خودمختار، گسترش دهند. عصر هوش مصنوعی، پایان حاکمیت انسانی نیست، بلکه آغاز فصلی نو در تحول تاریخی خود حاکمیت را رقم می‌زند.

یادداشت ۱

تمایز مفهوم «حاکمیت» از «استقلال» در اندیشه سیاسی

در ادبیات حقوقی فارسی، به ویژه در ترجمه‌های قدیمی، گاهی Sovereignty به «استقلال» ترجمه شده است که البته غلطی مصطلح است، در حالی که امروزه تقریباً این اجماع وجود دارد که ترجمه صحیح آن «حاکمیت» است. زیرا که استقلال (Independence) و حاکمیت (Sovereignty) هرچند با یکدیگر مرتبط اما دو مفهوم متفاوت هستند:

• مفهوم Sovereignty، اقتدار عالی و نهایی برای وضع، اجرا و اعمال قانون است اما مفهوم Independence عدم تبعیت از دولت یا قدرت خارجی است.

• موضوع Sovereignty قدرت و صلاحیت حقوقی دولت است اما موضوع Independence وضعیت سیاسی و حقوقی دولت در برابر دیگر دولت‌هاست.

• قلمرو Sovereignty هم در داخل و هم در خارج از کشور گسترش دارد اما قلمرو Independence عمدتاً به روابط خارجی محدود می‌شود.

• پرسش اصلی Sovereignty «چه کسی حق فرمانروایی نهایی را دارد؟» است اما پرسش اصلی Independence این است: «آیا دولت در این کشور تابع دولت دیگری است؟»

• ماهیت Sovereignty مفهومی ایجابی (دارا بودن اختیار و

داده‌های پزشکی شهروندان تولید می‌شوند. قانون عربستان مقرر می‌کند این داده‌ها فقط در مراکز داده داخل عربستان ذخیره و پردازش شوند. این یک نمونه از محلی سازی داده است.

سطوح مختلف محلی سازی داده

محلی‌سازی داده ممکن است فقط به ذخیره‌سازی محدود نباشد، بلکه شامل موارد زیر نیز باشد:

– **محلی سازی ذخیره:** داده باید داخل کشور ذخیره شود.
– **محلی سازی پردازش:** پردازش داده نیز باید داخل کشور انجام شود.

– **اقامت داده:** داده به‌طور دائم باید در داخل کشور باقی بماند.
– **حاکمیت داده:** علاوه بر محل نگهداری، داده باید تحت قوانین و اقتدار همان کشور باشد، حتی اگر ارائه‌دهنده خدمات یک شرکت خارجی باشد.

تمایز میان بومی سازی داده و حاکمیت داده

این دو اصطلاح گاهی به‌جای هم به‌کار می‌روند، اما تفاوت دارند: **محلی سازی داده:** بر محل فیزیکی ذخیره یا پردازش داده تأکید دارد اما حاکمیت داده بر مدیریت حقوقی و قانونی داده تأکید دارد؛ یعنی داده تابع قوانین همین کشور است.

محلی‌سازی داده یکی از ارکان اصلی جغرافیای رایانش (Computing Geography) است؛ زیرا تعیین می‌کند که داده در کدام سطح جغرافیایی (سازمانی، شهری، استانی، ملی یا فراملی) اجازه ذخیره‌سازی و پردازش دارد. در واقع، طراحی معماری رایانش در سامانه‌های هوش مصنوعی و شهرهای هوشمند تا حد زیادی تابع سیاست‌های محلی‌سازی داده و حاکمیت داده است.

یادداشت ۳

تمایز مفهوم «رایانش» از «پردازش» و انواع معماری رایانش «رایانش» و «پردازش» در زبان روزمره گاهی به جای هم به کار می‌روند، اما از نظر فنی یکسان نیستند.

پردازش (Processing) به اجرای یک عملیات مشخص روی داده گفته می‌شود مثل تشخیص چهره در یک تصویر و اجرای یک مدل هوش مصنوعی روی یک عکس. بنابراین پردازش یک عملیات یا وظیفه است.

اما رایانش (Computing) مفهوم گسترده‌تری است و به کل فرایند استفاده از سامانه‌های رایانه‌ای برای حل مسئله یا ارائه خدمات گفته می‌شود.

رایانش علاوه بر پردازش، شامل مواردی مانند دریافت داده، ذخیره‌سازی، پردازش، برقراری ارتباطات شبکه، زمان‌بندی وظایف،

صلاحیت است اما ماهیت Independence مفهومی سلبی (نبود سلطه در این کشور یا تبعیت از کشوری خارجی) است. بنا بر آنچه ذکر شد می‌توان نتیجه گرفت که:

حاکمیت، مفهومی گسترده‌تر از استقلال است، زیرا که شامل دو بُعد اصلی است: حاکمیت داخلی و حاکمیت خارجی.
– **حاکمیت داخلی:** اختیار انحصاری دولت در قانون‌گذاری، اجرا و قضاوت در قلمرو خود و

– **حاکمیت خارجی:** آزادی دولت در روابط بین‌المللی و برابری حقوقی با سایر دولت‌ها. اما استقلال عمدتاً به همین بُعد دوم نزدیک است، و تمام مفهوم حاکمیت را در بر نمی‌گیرد.

استقلال شرط لازم است، اما شرط کافی نیست. ممکن است کشوری از نظر سیاسی مستقل باشد، اما در برخی حوزه‌ها اختیار مؤثر خود را از دست داده باشد؛ برای مثال، اگر کشور در یک حوزه حیاتی کاملاً به تصمیمات یک بازیگر خارجی وابسته شود، استقلال رسمی دارد، اما اعمال حاکمیتش محدود می‌شود.

حاکمیت با «اقتدار»، اما استقلال با «رهایی از سلطه» مرتبط است. به همین دلیل، در مباحث جدیدی مانند حاکمیت داده یا حاکمیت هوش مصنوعی، واژه «استقلال داده» یا «استقلال هوش مصنوعی» نمی‌تواند همان معنا را منتقل کند. بحث فقط رهایی از وابستگی نیست؛ بلکه اختیار تصمیم‌گیری، تنظیم مقررات، کنترل و اعمال صلاحیت نیز مطرح است.

برای مثال، فرض کنید کشوری تمام داده‌های ملی خود را در مراکز داده داخلی نگهداری می‌کند و قوانین لازم برای حفاظت از داده‌ها را نیز وضع کرده است. در این حالت می‌توان از حاکمیت داده سخن گفت، زیرا دولت هم اختیار حقوقی و هم کنترل عملی آن را در دست دارد.

اما اگر همان کشور از نظر سیاسی مستقل باشد، ولی پردازش داده‌ها، الگوریتم‌ها و زیرساخت رایانشی آن کاملاً در اختیار شرکت‌های خارجی باشد، استقلال سیاسی به‌تنهایی به معنای حاکمیت کامل داشتن در آن حوزه نیست. به همین دلیل، در ادبیات فارسی متأخر، ترجمه Sovereignty به حاکمیت و ترجمه Independence به استقلال از نظر حقوقی دقیق‌تر و پذیرفته‌تر از آن است که هردو را استقلال یا خودمختاری ترجمه کنیم.

یادداشت ۲

منظور از محلی‌سازی داده یا بومی‌سازی داده (Data Localization) این است که یک کشور یا حوزه قضایی الزام کند داده‌های تولیدشده در قلمرو آن کشور، در همان قلمرو ذخیره، پردازش یا مدیریت شوند و بدون رعایت شرایط قانونی از کشور خارج نشوند.

مثال: فرض کنید در شهر هوشمند نئوم (در عربستان سعودی)

مدیریت منابع، تأمین امنیت، ارائه نتیجه به کاربر است.

یک مثال از شهر هوشمند: فرض کنید دوربینی در خیابان خودروها را رصد می‌کند. دوربین تصویر را ثبت می‌کند. تصویر از طریق شبکه ارسال می‌شود. مدل هوش مصنوعی پلاک خودرو را تشخیص می‌دهد. نتیجه در پایگاه داده ذخیره می‌شود. در صورت تخلف، پیام برای پلیس ارسال می‌شود.

در این زنجیره: تشخیص پلاک خودرو یک پردازش است. اما کل این زنجیره یک رایانش است.

انواع رایانش از لحاظ معماری شبکه عبارتند از:

رایانش ابری (Cloud Computing): پردازش و ذخیره‌سازی در مراکز داده ای در دوردست انجام می‌شود.

رایانش لبه‌ای (Edge Computing): پردازش تا حد ممکن نزدیک به محل تولید داده (مانند حسگر، دوربین، یا دستگاه IoT) انجام می‌شود.

و **رایانش مهی (Fog Computing):** لایه‌ای میان لبه و ابر است؛ داده ابتدا به یک گره محلی (مثل مسیریاب، دروازه مرزی یا سرور محلی) می‌رود، بخشی از پردازش آنجا انجام می‌گیرد و در صورت نیاز به ابر ارسال می‌شود.

یادداشت ۴

مجموعه چالش‌های حقوقی برای پذیرش «هوش مصنوعی به مثابه سوژه حاکمیت». برای آن که هوش مصنوعی بتواند رأساً (به نام خود و با اقتدار مستقل) اعمال حاکمیت کند، باید مجموعه‌ای از تحولات حقوقی، سیاسی و فلسفی رخ دهد. این تحولات را می‌توان در هفت مرحله تحلیل کرد.

مرحله یکم: پذیرش نظری در علم حقوق

نخست باید این ایده در ادبیات حقوقی شکل بگیرد که «هوش مصنوعی می‌تواند سوژه مستقلی برای اعمال حاکمیت باشد». در این مرحله، مقالات، کتاب‌ها و نظریه‌های جدید نوشته می‌شوند و میان حقوقدانان درباره امکان یا عدم امکان آن بحث درمی‌گیرد. امروز ما هنوز در همین مرحله اول هستیم.

مرحله دوم: ایجاد مفهوم حقوقی جدید

اگر این مباحث گسترش یابد، در کنار «حاکمیت هوش مصنوعی» به معنی اقتدار هوش مصنوعی باید مفاهیم جدیدی مثل: «حاکمیت ماشین» (Machine Sovereignty) و «عاملیت حاکمیتی خودآیین» (Autonomous Sovereign Agency) در حقوق عمومی تعریف شوند. در این مرحله باید روشن شود که آیا هوش مصنوعی صرفاً ابزار حکومت است یا می‌تواند خود صاحب برخی اختیارات عمومی باشد.

مرحله سوم: پذیرش توسط دولت‌ها

صرف این که دانشگاهیان نظریه‌ای ارائه دهند کافی نیست. باید دولت‌ها بپذیرند که بخشی از تصمیمات عمومی را می‌توان به سامانه‌های هوش مصنوعی واگذار کرد. امروزه دولت‌ها تا حدودی این کار را انجام می‌دهند، اما مسئولیت نهایی همچنان بر عهده مقامات انسانی است.

مرحله چهارم: قانون‌گذاری ملی

مرحله بعد، تصویب قوانین موضوعه است. پارلمان‌ها باید مشخص کنند که حدود اختیارات هوش مصنوعی چیست؟ چه تصمیم‌هایی را می‌تواند بگیرد؟ مسئولیت خطاها بر عهده چه کسی است؟ آیا هوش مصنوعی شخصیت حقوقی دارد یا خیر؟ بدون قانون، هوش مصنوعی نمی‌تواند رأساً صاحب اختیار عمومی شود.

مرحله پنجم: اصلاح قانون اساسی

اگر قرار باشد هوش مصنوعی در سلسله مراتب حکومت جایگاهی مستقل پیدا کند، در بسیاری از کشورها قوانین عادی کافی نخواهد بود. باید قانون اساسی نیز اصلاح شود.

برای مثال، اگر هوش مصنوعی بتواند فرمانده عملیات نظامی باشد؛ داور نهایی باشد؛ نخست‌وزیر یا وزیر باشد؛ این موضوع مستقیماً با اصول قانون اساسی درباره منشأ قدرت عمومی، مسئولیت و پاسخگویی مرتبط می‌شود.

مرحله ششم: پذیرش بین‌المللی

پس از آن، جامعه بین‌المللی نیز باید موضع خود را روشن کند. در این مرحله ممکن است معاهده‌های جدید؛ اسناد سازمان ملل؛ یا حتی عرف بین‌المللی جدیدی پدید آیند که جایگاه هوش مصنوعی در اعمال اقتدار عمومی را تنظیم کنند.

مرحله هفتم: پذیرش در فلسفه حقوق

دشوارترین گام همین مرحله هفتم است. نظریه کلاسیک حاکمیت از بدن، هابز و روسو تا امروز بر این اصل استوار بوده که حاکمیت متعلق به یک شخص حقوقی یا اجتماع سیاسی است؛ یعنی نهادی که دارای مشروعیت، مسئولیت و پاسخگویی باشد.

حال اگر قرار باشد هوش مصنوعی رأساً اعمال حاکمیت کند، باید به پرسش‌های بنیادینی پاسخ داده شود، مثل:

آیا هوش مصنوعی می‌تواند دارای شخصیت حقوقی عمومی باشد؟
آیا هوش مصنوعی می‌تواند مسئول اعمال خود شناخته شود؟
آیا هوش مصنوعی می‌تواند مشروعیت سیاسی داشته باشد؟

ایالات متحده آمریکا و ارتش اسرائیل به خدمت گرفته شد.

پروژه ماون در اصل توسط وزارت دفاع آمریکا برای تحلیل تصاویر پهپادی و ماهواره‌ای با استفاده از یادگیری ماشین توسعه یافت. وظیفه اصلی آن شناسایی، دسته‌بندی و اولویت‌بندی اهداف است، نه صدور دستور حمله.

در ادبیات نظامی، «ماون» معمولاً نمونه‌ای از «تصمیم‌یار هوش مصنوعی» (AI Decision Support System) محسوب می‌شود؛ یعنی هوش مصنوعی پیشنهاد می‌دهد و انسان تصمیم نهایی را می‌گیرد. این همان مدلی است که از آن با عنوان «human-in-the-loop» یا در برخی کاربردها «human-on-the-loop» یاد می‌شود.

از منظر نظریه حاکمیت هوش مصنوعی، Maven را می‌توان نمونه‌ای از حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی دانست، زیرا مسئولیت میان الگوریتم (تحلیل داده) و فرمانده انسانی (تصمیم نهایی) تقسیم می‌شود، هرچند مسئولیت حقوقی معمولاً بر عهده انسان باقی می‌ماند.

البته تاکنون هیچ مدرک عمومی و مستقلى منتشر نشده است که نشان دهد در حمله و کشتاری که در آغاز جنگ دوازده روزه در میناب رخ داد سامانه ماون مشخصاً در تصمیم‌گیری دخیل بود.

برخی گزارش‌ها و تحلیل‌ها درباره استفاده از سامانه‌های هوش مصنوعی در جنگ اخیر منتشر شده‌اند، اما نسبت دادن یک حمله مشخص به Maven بدون اسناد رسمی یا تحقیقات مستقل، در حال حاضر قابل اثبات نیست.

در هر صورت، Maven را می‌توان یکی از نخستین نمونه‌های عملی و شناخته‌شده حکمرانی یا تصمیم‌گیری مشارکتی انسان و هوش مصنوعی در حوزه نظامی دانست.

یادداشت ۶

مقررات استفاده از ماون به عنوان حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی. پیش‌نیاز و هم‌نیاز استفاده از ماون در اتاق جنگ، تأیید و تصویب رسمی کاربرد آن از طریق یکی از ابزارهای حقوقی زیر است:

- **قانون (Statute):** که مصوب کنگره آمریکا یا کنست اسرائیل است.

- **مقررات و دستورالعمل‌های اجرایی (Regulations/Directives):** که توسط قوه مجریه یا وزارت دفاع صادر می‌شوند.

- **دکترین و آیین‌نامه‌های عملیاتی:** که نحوه استفاده از سامانه‌ها را مشخص می‌کنند.

در مورد ماون، تاکنون استفاده از آن عمدتاً بر پایه دستورالعمل‌ها و سیاست‌های وزارت دفاع بوده است، نه بر اساس تصویب یک قانون

اگر هوش مصنوعی مرتکب نقض قانون اساسی شود، چه نهادی پاسخگو خواهد بود؟

تا زمانی که پاسخ قانع‌کننده‌ای برای این پرسش‌ها وجود نداشته باشد، بیشتر نظام‌های حقوقی بعید است هوش مصنوعی را حامل و دارنده حق حاکمیت بدانند.

این نکته نظری مهم را نیز نباید از مد نظر دور داشت که امروزه سه گام قابل تصور است:

گام نخست: هوش مصنوعی به مثابه ابژه حاکمیت (AI as the Object of Sovereignty)

گام دوم: هوش مصنوعی به مثابه ابزار اعمال حاکمیت (AI as the Instrument of Sovereignty)

گام سوم: هوش مصنوعی به مثابه سوژه حاکمیت (AI as the Subject of Sovereignty)

کوشش برای تحقق دو گام متقدم را امروز می‌توان در نظام‌های حقوقی کشورهایی که وارد معامله با دلالان و فروشندگان انتقال محدود فناوری و سیستم‌های هوش مصنوعی شده‌اند مشاهده کرد. اما گام سوم هنوز وجود خارجی در حقوق قانون اساسی و حقوق بین‌المللی ندارد. هیچ اصلی از قانون اساسی‌های شناخته‌شده یا معاهده بین‌المللی هوش مصنوعی را به‌عنوان «سوژه حاکمیت» یا صاحب اقتدار عمومی مستقل به رسمیت نشناخته است.

از این رو، اگر روزی چنین قانونی تدوین شود، صرف تصویب یک قانون عادی کافی نخواهد بود؛ بلکه مستلزم دگرگونی عمیق در نظریه دولت، حقوق قانون اساسی، حقوق بین‌المللی و فلسفه حقوق خواهد بود. در آن صورت، «حاکمیت هوش مصنوعی» دیگر فقط یک اصطلاح فنی نخواهد بود، بلکه به یک نهاد حقوقی جدید تبدیل می‌شود که باید هم در نظام‌های حقوق ملی و هم در نظام حقوق بین‌المللی تعریف، مشروعیت‌بخشی و تنظیم شود. این گذار، اگر رخ دهد، یکی از بزرگ‌ترین دگرگونی‌های نظری در مفهوم حاکمیت از زمان ژان بون تاکنون خواهد بود. این تمایز، بنیاد مفهومی نظریه موضوع‌محور «حاکمیت هوش مصنوعی» را شکل می‌دهد.

یادداشت ۵

نمونه‌ای واقعی از «حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی». منظور از عبارت «حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی» (Human-AI Collaborative Governance) یا Human-on-the-Loop Decision Making سامانه‌ای هوشمند است که در آن هوش مصنوعی اهداف را پیشنهاد می‌دهد و انسان به‌طور رسمی مسئول تأیید یا رد تصمیم است. یک نمونه نظامی آن، سامانه ماون (Maven) است که در نخستین روز جنگ دوازده روزه علیه جمهوری اسلامی ایران توسط نظامیان

اختصاصی که نام «Maven» را ذکر کند.

در آمریکا، مهم‌ترین سند، دستورالعمل ۳۰۰۰/۰۹ وزارت دفاع آمریکا (DoD Directive ۳۰۰۰/۰۹) درباره سامانه‌های خودمختار در تسلیحات است که ابتدا در سال ۲۰۱۲ صادر و در سال ۲۰۲۳ به‌روزرسانی شد. این دستورالعمل تأکید می‌کند که فرماندهان و اپراتورها باید «سطح مناسبی از قضاوت انسانی» را در تصمیم به استفاده از زور اعمال کنند و استفاده از هوش مصنوعی باید با اصول اخلاقی و حقوق جنگ سازگار باشد.

علاوه بر آن، وزارت دفاع اصول اخلاقی هوش مصنوعی (Responsible AI) و اسناد راهبردی مرتبط را تصویب کرده است که بر مسئولیت‌پذیری، قابلیت ردیابی، قابلیت اطمینان و امکان مداخله انسان تأکید دارند.

بنابراین، مبنای حقوقی کاربرد ماون در آمریکا بیشتر یک مبنای مقرراتی و اداری است تا قانون‌گذاری پارلمانی. ولی درباره اسرائیل، تا آنجا که به اطلاعات عمومی مربوط است، قانون اختصاصی درباره استفاده از ماون یا سایر سامانه‌های هدف‌یابی مبتنی بر هوش مصنوعی وجود ندارد.

استفاده از این سامانه‌ها عمدتاً تحت چارچوب کلی قوانین نیروهای

دفاعی اسرائیل (IDF)، مشاوره حقوقی نظامی، قواعد درگیری (Rules of Engagement) و تعهدات ناشی از حقوق بین‌المللی بشردوستانه انجام می‌شود. جزئیات بسیاری از این دستورالعمل‌ها محرمانه هستند و به‌صورت عمومی منتشر نشده‌اند.

از منظر نظریه حاکمیت نیز نکته مهمی در این رابطه وجود دارد. ماون نمونه‌ای از حاکمیت مشارکتی انسان و هوش مصنوعی است و برای استفاده از آن صرف وجود حکمی رسمی کافی نیست؛ معمولاً انتظار می‌رود که در کنار آن حکم رسمی، احکامی به شرح زیر تصویب و ابلاغ شده باشند:

- تعیین مسئولیت حقوقی انسان؛
- قواعد شفاف درباره زمان و نحوه اتکاء به پیشنهاد‌های هوش مصنوعی؛
- امکان ثبت، ممیزی و بازیابی تصمیم‌ها؛
- سازوکار پاسخگویی در صورت بروز خطا.

در آمریکا، این عناصر تا حدی در قالب دستورالعمل‌ها و سیاست‌های وزارت دفاع وجود دارند، اما بسیاری از پژوهشگران معتقدند که هنوز قانون جامع مصوب کنگره که به‌طور خاص استفاده از هوش مصنوعی در تصمیم‌های مرگبار را تنظیم کند، وجود ندارد و همین موضوع محل بحث و انتقاد است.

منابع

1. Baobao Zhang et al., «Ethics and Governance of Artificial Intelligence.»
2. Bhuta et al. (eds.), Autonomous Weapons Systems: Law, Ethics, Policy.
3. Bodin, J. (1992). On sovereignty (J. H. Franklin, Ed. & Trans.). Cambridge University Press. (Original work published 1576)
4. Congressional Research Service (CRS) Defense Primer: U.S. Policy on Lethal Autonomous Weapon Systems.
5. Couldry, N., & Mejias, U. A. (2019). The costs of connection: How data is colonizing human life and appropriating it for capitalism. Stanford University Press.
6. Couldry, N., & Mejias, U. A. (2019). Data colonialism: Rethinking big data's relation to the contemporary subject. *Television & New Media*, 20(40), 336–349.
7. Couldry, N., & Mejias, U. A. (2023). The decolonial turn in data and technology research: What is at stake and where is it heading? *Information, Communication & Society*.
8. CRS, Defense Primer: U.S. Policy on Lethal Autonomous Weapon Systems.
9. Dan Saxon, «A Human Touch: Autonomous Weapons, DoD Directive 3000/09 and the Interpretation of Appropriate Levels of Human Judgment over the Use of Force.» کتاب Autonomous Weapons Systems.
10. Dignum, Responsible Artificial Intelligence.
11. DoD Directive 3000/09: Autonomy in Weapon Systems (2023)
12. European Parliament and Council of the European Union. (2024). Regulation laying down harmonised rules on artificial intelligence (Artificial Intelligence Act). Official Journal of the European Union.
13. Floridi, L. (2014). *The fourth revolution: How the infosphere is reshaping human reality*. Oxford University Press.

14. Floridi, L. (Ed.). (2020). The ethics of artificial intelligence. Oxford University Press.
15. Franklin, J. H. (1973). Jean Bodin and the rise of absolutist theory. Cambridge University Press.
16. Hobbes, T. (1996). Leviathan (R. Tuck, Ed.). Cambridge University Press. (Original work published 1651).
17. ICRC Commentary on the Geneva Conventions.
18. Kissinger, H., Schmidt, E., & Huttenlocher, D. (2021). The age of AI: And our human future. Little, Brown. Law, Ethics, Policy. Cambridge University Press, 2018.
19. Mark Coeckelbergh AI Ethics. MIT Press, 2020.
20. Nehal Bhuta, Susanne Beck, Robin Geiß, Hin-Yan Liu & Claus Kreß (Eds.) Autonomous Weapons Systems: Vincent Müller (Ed.) Ethics of Artificial Intelligence and Robotics. Routledge Handbook of Philosophy of AI.
21. Paul Scharre Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War. W. W. Norton, 2018.
22. Scharre, Army of None.
23. Virginia Dignum, Responsible Artificial Intelligence. Springer, 2019.
24. Virginia Dignum The Responsible AI Manifesto. Springer, 2022.
25. Yoram Dinstein The Conduct of Hostilities under the Law of International Armed Conflict. Cambridge University Press.

تاریخچه توجه به ملاحظات اخلاقی در انجام کارهای آماری

علی دولتی

گروه آمار، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه یزد
adolati@yazd.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

آمار در طول تاریخ، هم‌زمان به‌عنوان مجموعه‌ای از فنون کمی و حوزه‌ای از دانش با دلالت‌های اجتماعی و اخلاقی عمیق ایفای نقش کرده است. مقاله حاضر با رویکردی تاریخی به کاوش در سیر تحول توجه به ملاحظات اخلاقی در انجام کارهای آماری می‌پردازد. روایت مقاله از ریشه‌های تاریخی آمار آغاز می‌شود: از سرشماری‌های دوران باستان و سنت علم دولت در آلمان تا حساب سیاسی در انگلستان و پیوند آمار با جنبش اصلاح نژادی. در ادامه، با عبور از جنگ جهانی دوم و آزمایش‌های غیرانسانی نازی‌ها، منشور نورنبرگ به‌عنوان نخستین بیانیه بین‌المللی اخلاق در پژوهش معرفی می‌گردد. رسوایی مطالعه توسکگی که افشای آن به تحولی اساسی در اخلاق پژوهش انجامید، تحلیل می‌شود و سه اصل محوری گزارش بلومونت (احترام به اشخاص، سودرسانی و عدالت) بررسی می‌گردند. مقاله، فرایند نهادینه‌سازی اخلاق در آمار را دنبال کرده و تدوین نخستین راهنمای اخلاقی در انجمن آمار آمریکا و مؤسسه بین‌المللی آمار را مرور می‌کند. در ادامه، بحران تکرارپذیری و بازتولیدپذیری نتایج در پژوهش‌های علوم تجربی و نقش سوءاستفاده از روش‌های آماری واکاوی شده و بیانیه تاریخی انجمن آمار آمریکا درباره معناداری آماری تفسیر می‌گردد. مقاله با ورود به عصر داده‌های بزرگ، سه چالش اساسی بحران اخذ رضایت آگاهانه، سوگیری الگوریتمی و عدالت آماری و بازتعریف مسئولیت آماردان را بررسی می‌کند. در پایان، مقاله با نگاهی به وضعیت ایران، به بررسی جای خالی گفت‌وگوی تاریخی - نقادانه درباره اخلاق آماری پرداخته و بر ضرورت بازاندیشی در نسبت آمار با مسئولیت اجتماعی تأکید می‌نماید.

کلیدواژه‌گان: اخلاق آماری، تاریخ آمار، مطالعه توسکگی، بحران تکرارپذیری، عدالت الگوریتمی

مقدمه

اخلاق و آمار تمایز قائل شد. سطح نخست، «اخلاق در آمار»^۱ است که به رفتار حرفه‌ای آماردانان، صداقت در تحلیل، پرهیز از دست‌کاری نتایج و پایبندی به استانداردهای روش‌شناختی اشاره دارد. این سطح در دهه‌های اخیر و به‌ویژه با بحران تکرارپذیری و بازتولیدپذیری نتایج در پژوهش‌های علوم تجربی، توجه گسترده‌ای یافته است [۲۲]. اما سطح دوم، «اخلاق آمار»^۲ است که به این پرسش می‌پردازد: خود روش‌های آماری و نحوه کاربست آن‌ها در ساختارهای قدرت، چگونه می‌تواند به بازتولید نابرابری‌ها، توجیه بی‌عدالتی‌ها یا پنهان‌سازی آسیب‌های اجتماعی بینجامد؟ این سطح ریشه در تاریخ‌های کهن‌تری دارد و به دوران شکل‌گیری آمار به‌عنوان «علم حکومت‌داری» بازمی‌گردد [۴۰].

مقاله از هفت بخش اصلی تشکیل شده است. بخش نخست به ریشه‌های تاریخی آمار از دوران باستان تا سده نوزدهم می‌پردازد؛ از سرشماری‌های مصر، ایران، چین و روم باستان گرفته تا سنت آمار دانشگاهی در آلمان و حساب سیاسی در انگلستان. در ادامه،

آمار امروزه در بسیاری از حوزه‌های علمی و تصمیم‌گیری‌های اجتماعی چنان جایگاهی یافته که چه‌بسا بتوان آن را «زبان علم» یا «ابزار شناخت» نامید. این تصور که آمار صرفاً مجموعه‌ای از فنون کمی برای خلاصه‌سازی و تحلیل داده‌هاست، ریشه در سنت دیرپایی دارد که آماردان را ناظر خنثی و روش‌های آماری را ابزاری فارغ از ارزش می‌داند. اما تاریخ نشان می‌دهد که آمار در هر مرحله از رشد و کاربرد خود، با پرسش‌های اخلاقی اساسی گره‌خورده است؛ پرسش‌هایی که گاه در پس‌زمینه اطمینان از روش‌شناسی درست پنهان مانده‌اند و گاه با فجایع اخلاقی به سطح وجدان عمومی راه یافته‌اند [۵۴، ۷۴].

پرسش محوری این مقاله آن است که آگاهی از غیرفنی بودن صرف آمار چگونه پدید آمد؛ آگاهی از اینکه هر گام در پژوهش، از طرح تا تحلیل و گزارش، با ارزش‌ها، سوگیری‌ها و پیامدهای اخلاقی عجین است. این روایت، لایه‌های تاریخ پیچیده پیوند آمار و اخلاق را می‌گشاید. برای فهم این تحول، باید بین دو سطح از مسئله

دفتر آمار و جریده (فهرست سپاهیان) جزئی از دیوان حکومتی و دستگاه سلطنتی بوده است و این سنت تا دوره‌های بعدی نیز استمرار یافته است [۱۶]. اولین نشانه‌های عینی و تاریخی ظهور مفهوم دیوان در سلسله‌های پادشاهی ایرانی، مربوط به دوران داریوش اول هخامنشی است. در دوره سلوکیان و اشکانیان نظام حکومت‌داری هخامنشی ادامه یافت و به دوره ساسانیان منتقل شد. ساسانیان توجه بیشتری به آمار داشتند و امور مالی، کشاورزی و صنعتی و بازرگانی خود را بر اساس آمارهای جمع‌آوری شده به انجام می‌رساندند. امویان با کمک ایرانیان، برای اقتباس نظام دیوانی ساسانی تلاش زیادی کردند. در نخستین حکومت‌های ایرانی که بعد از اسلام تشکیل شدند (طاهریان، صفاریان، آل بویه و سامانیان)، نظام دیوانی دوره ساسانی به صورت دستگاهی منظم برای اداره امور کشور، مجدد ایجاد شد. در دوره سلجوقیان، نظریه‌پردازی خواجه نظام‌الملک در زمینه دیوان‌سالاری، زمینه‌ساز شکل‌گیری اصول و نظم اداری برای اداره کشور گردید. نظام دیوانی به صورت دولت فراگیر بعد از سلسله خوارزمشاهی و استیلای مغولان عملاً تعطیل شد. با تشکیل حکومت مرکزی در دوره صفوی، بعد از سه قرن شکلی جدید از دستگاه دیوانی ایجاد شد. در دیوان‌ها، مشاغل و منصب‌هایی وجود داشت که کار آنها در ارتباط با ثبت اطلاعات و آمار بود. به عنوان مثال لشکر شماری و حضور و غیاب سپاهیان، آمادگی و گسیل سربازان به جنگ، شمار کشتگان و اسیر شوندگان و تعداد جنگ‌افزارها از وظایف دیوان عرض بوده که سابقه آن به ایران باستان برمی‌گردد [۱۷]. در شاهنامه بارها از دیوان عرض یاد شده است. در داستان پادشاهی هرمز (پسر انوشیروان) صحنه‌ای از گفتگوی موبد و شاه برای تصمیم‌گیری در مورد آغاز یک نبرد به تصویر کشیده شده است:

به موبد چنین گفت جوینده راه
که اکنون چه سازیم با ساوه شاه
بدو گفت موبد که لشکر بساز
که خسرو به لشکر بود سرفراز
که چند است مردم که آید به کار
عرض را بخوان تا بیارد شمار
بیامد بیاورد بی‌مر سپاه
عرض با جریده به نزدیک شاه
پیاده بسی در میان سوار
شمار سپاه آمدش صدهزار
بدو گفت موبد که با ساوه شاه
سزد گر نشوریم با این سپاه

در این ابیات، «عرض» که مسئول شمارش لشکر است و «جریده» (دفتر یا فهرست آماری سپاه) نقشی تعیین‌کننده در تصمیم‌گیری جنگی ایفا می‌کنند [۱۷]. شاه پس از آگاهی از شمار سپاه (صدهزار نفر) با مشورت موبد، در مورد نبرد تصمیم می‌گیرد. این روایت

با بررسی آرای اندیشمندان این دوره، زمینه پیوند آمار با جنبش اصلاح نژادی در سده نوزدهم فراهم می‌شود و نقش پیش‌گامان آمار در این پیوند واکاوی می‌گردد. بخش دوم به جنگ جهانی دوم و آزمون‌های غیرانسانی نازی‌ها در دوران جنگ اختصاص دارد و از منشور نورنبرگ به عنوان نخستین بیانیه بین‌المللی اخلاق در پژوهش یاد می‌کند. بخش سوم به رسوایی مطالعه توسکگی می‌پردازد که افشای آن سرآغاز بیداری وجدان عمومی و ایجاد تحولی اساسی در اخلاق پژوهش بود؛ در ادامه، سه اصل کلیدی اخلاق پژوهش (احترام به اشخاص، سودرسانی و عدالت) و تأسیس نهادهای نظارتی تحلیل می‌شوند. بخش چهارم به فرایند نهادینه‌سازی اخلاق در آمار می‌پردازد و ضمن مرور پیشینه تدوین نخستین استانداردهای اخلاقی در انجمن‌های حرفه‌ای آمار، چالش‌های اخلاقی آمار دولتی و صنعتی را نیز بررسی می‌کند. بخش پنجم بحران تکرارپذیری و بازتولیدپذیری نتایج در علوم تجربی و نقش سوءاستفاده از روش‌های آماری را واکاوی می‌کند. بخش ششم به چالش‌های اخلاقی عصر داده‌های بزرگ و یادگیری ماشین می‌پردازد و مباحثی مانند بحران اخذ رضایت آگاهانه در پژوهش‌های کلان‌مقیاس، سوگیری الگوریتمی و عدالت آماری، و بازتعریف مسئولیت آماردان در زنجیره ارزش داده را بررسی می‌کند. بخش هفتم با نگاهی به وضعیت ایران، جای خالی گفت‌وگوی تاریخی - نقادانه درباره اخلاق آماری در آموزش و پژوهش را بررسی می‌کند و بر ضرورت بازاندیشی در نسبت آمار با مسئولیت اجتماعی در بستر تاریخی و فرهنگی ایران تأکید می‌نماید. مقاله با نتیجه‌گیری و جمع‌بندی درس‌های تاریخی و چشم‌انداز آینده اخلاق آماری به پایان می‌رسد.

۲. ریشه‌های تاریخی آمار

برای درک چرایی تأخیر در شکل‌گیری آگاهی اخلاقی در جامعه آماردانان، ناگزیر باید به سرچشمه‌های تاریخی این دانش بازگشت. آمار در آغاز راه، نه در دانشگاه‌ها و نه در متون صرفاً علمی، بلکه در دفاتر دولتی و به عنوان ابزاری برای حکومت‌داری و اداره سرزمین متولد شد. واژه Statistics (آمار) ریشه در واژه آلمانی Statistik و لاتین Status دارد که به معنای «دولت» یا «وضعیت سیاسی» است. این تبار دولتی - اداری، از همان آغاز آمار را در جایگاهی قرارداد که همواره در خدمت ساختارهای قدرت بود، بی‌آنکه پرسش از مشروعیت یا اخلاقی بودن آن ساختارها بخشی از وظایف آماردان محسوب شود [۵۴، ۴۰].

۲-۱ سرشماری در دوران باستان

استفاده از آمار به شکل سرشماری و برآوردهای مالیاتی از بدو پیدایش تمدن‌های باستانی (ایران، مصر، چین و روم باستان) ملازم با حکمرانی مؤثر و اساس اداره حکومت به ویژه در امر لشکررداری و لشکرکشی بوده است. به عنوان مثال، در ایران باستان، نگهداری

۲-۲-۲. حساب سیاسی در انگلستان

«حساب سیاسی»^۸ در انگلستان پدید آمد، در اواخر سده هفدهم شکوفا شد و در طول سده هجدهم نمایندگانی نیز در قاره اروپا یافت. در حالیکه آمار دانشگاهی عمدتاً ماهیتی توصیفی داشت، حساب سیاسی بر جنبه تحلیلی آمار تأکید می‌کرد. این جریان که در پی دقت بود، بر داده‌های عددی تکیه داشت و روابط بین آمارهای جمعیتی و اجتماعی و پدیده‌هایی مانند رشد جمعیت، تولدها، مرگ‌ومیر و ازدواج‌ها را مورد مطالعه قرار می‌داد [۴۰، ۷۴]. جان گرانت^۹ (۱۶۷۴-۱۶۲۰)، بازرگان و عضو شورای شهر لندن، معمولاً پدر جمعیت‌شناسی شناخته می‌شود [۱۶]. او در سال ۱۶۶۲ کتاب «مشاهدات طبیعی و سیاسی درباره صورت‌های مرگ‌ومیر» را منتشر کرد و در آن کوشید نخستین جدول مرگ‌ومیر را تدوین کند. گرانت از ثبت‌های هفتگی تولد و مرگ در لندن که از سال ۱۶۰۳ منتشر می‌شدند، استفاده کرد. این صورت‌های مرگ‌ومیر در اصل برای پیگیری همه‌گیری طاعون به کار می‌رفتند. با وجود آنکه این داده‌ها شامل اطلاعات سنی نبودند، گرانت به شیوه‌ای ابتکاری جمعیت کل لندن، توزیع سنی آن و حتی جدول مرگ‌ومیر را برآورد کرد [۴۰، ۷۴]. ویلیام پتی^{۱۰} (۱۶۸۷-۱۶۲۳) پژوهش‌های دوست خود جان گرانت را با تأکید بیشتر بر مسائل اقتصادی ادامه داد و اصطلاح حساب سیاسی را رواج داد و بنیان علمی تازه‌ای پایه‌ریزی کرد [۴۰، ۷۴]. زمینه‌سازی برای تأسیس دفاتر آماری مدرن در اروپا، نخستین‌بار توسط ویلیام پتی در انگلستان مطرح شد. چند سال بعد، گوتفرد لایبنیتس^{۱۱} (۱۷۱۶-۱۶۴۶) که نقشی برجسته در سیاست اروپای زمان خود ایفا می‌کرد، ایجاد تشکیلاتی با عنوان دفتر آمار را به امپراتوری پروس توصیه کرد. او بر این باور بود که دولت باید یک دفتر مرکزی آمار داشته باشد تا از قدرت خودآگاهی یابد [۱۶]. پس از این دوره، با انسجام یافتن دولت‌های مرکزی اروپا، دفاتر آماری به تدریج در این کشورها تأسیس شدند [۴۰].

۲-۲-۳. تکوین نظریه احتمال

توسعه نظریه احتمال در سده‌های هفدهم و هجدهم موجب جهشی عظیم در روش‌شناسی آماری شد. نخستین رویکردها به نظریه احتمال که با تحلیل بازی‌های شانسی پیوند داشتند، در سده شانزدهم پدیدار شدند. ریشه‌های نظریه احتمال را می‌توان در تحلیل بازی‌های شانسی جستجو کرد [۴۰]، اما شکل‌گیری آن به‌عنوان یک حوزه علمی منسجم در قرن هفدهم و با آثار بلز پاسکال و پیر دو فرما تحقق یافت. مسئله تقسیم عادلانه امتیازها در بازی ناتمام، نخستین مسئله‌ای بود که به صورت‌بندی دقیق مفهوم امید ریاضی و احتمال انجامید [۱۶]. یاکوب برنولی^{۱۲} (۱۷۱۳) با اثبات قضیه حد مرکزی

نشان می‌دهد که در ایران باستان، آمار افزون بر ابزار ثبت، مبنایی برای کنش سیاسی و نظامی نیز بوده است.

۲-۲-۲. از علم دولت و حساب سیاسی تا آمار مدرن

گذار به دوران مدرن با ظهور دولت‌های متمرکز اروپایی و نظام‌های اقتصادی نوین، ضرورت توجه به آمار برنامه‌ریزی‌شده را رقم زد. در قرن هجدهم، دو رویکرد نظری متفاوت در مورد آمار در اروپا شکل گرفت: در آلمان آمار دانشگاهی با نگاهی کل‌نگر و کیفی، و در انگلستان حساب سیاسی با رویکردی کمی و تحلیلی [۴۰].

۲-۲-۱. آمار دانشگاهی در آلمان

هرمان کونرینگ^۱ (۱۶۸۱-۱۶۰۶) در دانشگاه هلمشتت^۲ نخستین سخنرانی آمار را با عنوان علوم سیاسی ارائه داد. مهم‌ترین نماینده این سنت، گوتفرد آخنوال^۳ (۱۷۷۲-۱۷۱۹) در دانشگاه گوتینگن^۴ بود که واژه آمار را به‌صورت منسجم در معنای دانش امور دولت یا آمار حکومتی به کار برد [۴۰]. پس از او، آگوست لودویگ فون شلوتسر^۵ (۱۸۰۹-۱۷۳۵) جانشین وی در دانشگاه گوتینگن شد. او آمار را تاریخ ایستا تعریف می‌کرد و خود تاریخ را نوعی آمار پویا و پیوسته می‌دانست [۱۶]. از مهم‌ترین آثار او می‌توان به مکاتباتی عمدتاً با محتوای تاریخی و سیاسی و نیز انتشار نشریه‌ای که افزون بر ارائه داده‌ها و اطلاعات آماری، به اهمیت سیاسی برخی واقعیت‌های آماری نیز می‌پرداخت. همین رویکرد انتقادی و سیاسی سبب شد که نشریه او برای چند سال ممنوع شود؛ رخدادی که نشان می‌دهد آمار، حتی در سده هجدهم، دانشی صرفاً فنی و خنثی تلقی نمی‌شد، بلکه ظرفیتی انتقادی و حتی بالقوه انقلابی داشت. مناقشه مکتبی میان آماردانان دانشگاهی برای مدت طولانی ادامه یافت. سرانجام، دیدگاه موسوم به «آماردانان جدولی»^۶ (که صرفاً به تولید و ارائه جداول عددی اکتفا می‌کردند) غلبه پیدا کرد. زیرا جداول امکان سازمان‌دهی منسجم و نظام‌مند مواد آماری را فراهم می‌کردند. در این رویکرد، نمایش آماری نه صرفاً ابزاری کمکی، بلکه بخشی اساسی از سامان‌دهی دانش آماری به شمار می‌رفت. آگوست فریدریش ویلهلم کرومه^۷ (۱۸۳۳-۱۷۵۳) از جمله این آماردانان جدولی بود که نخستین نمودارهای میله‌ای و مساحتی را توسعه داد. یکی از شاخه‌های آمار دانشگاهی «آمار موضوعی و مفهومی» بود. پژوهش‌های آماری درباره خودکشی، جایگاه زنان در زندگی فرهنگی و موضوعات مشابه در زمره «آمار موضوعی» قرار می‌گرفتند. «آمار مفهومی» بر بنیان‌های مفهومی گردآوری داده‌ها، تفسیر زبانی آمار توصیفی و آمار اقتصادی تأکید داشت و نفوذ آن فراتر از محیط دانشگاهی نیز گسترش یافت [۴۰].

1. Hermann Conring
2. Helmstedt
3. Gottfried Achenwall
4. Göttingen
5. August Ludwig von Schlözer
6. Tabular statisticians

7. August Friedrich Wilhelm Crome
8. Political Arithmetic
9. John Graunt
10. William Petty
11. Gottfried Leibniz
12. Jakob Bernoulli

حساب‌های ملی ظاهر شد و بخشی نیز در جمعیت‌شناسی جذب گردید. در آستانه انقلاب صنعتی، دو رویکرد متفاوت به پویایی جمعیت شکل گرفت:

رویکرد الهیاتی: یوهان پیتر سوس میلش^{۱۱} (۱۷۶۷-۱۷۰۷) در کتاب خود «نظم الهی در تغییرات نوع بشر» کوشید الگوهای جمعیتی را در چارچوب مشیت الهی تبیین کند. او معتقد بود پدیده‌های جمعیتی مانند تولد، ازدواج و مرگ تحت مشیت الهی هستند و نظم‌های آماری در این پدیده‌ها، خود نشانه‌ای از کار خداوند است [۴۳].

رویکرد اقتصادی: چند دهه بعد، توماس رابرت مالتوس^{۱۲} (۱۸۳۴-۱۷۶۶) در اثر مشهور خود با عنوان «رساله‌ای در باب اصول جمعیت»، دیدگاهی بدبینانه‌تر ارائه کرد. به باور او، جمعیت تمایل دارد به‌صورت هندسی رشد کند، درحالی‌که تولید غذا تنها رشد حسابی دارد؛ بنابراین، فشار جمعیتی ناگزیر از طریق جنگ، قحطی، بیماری و فقر مهار خواهد شد [۴۴]. نظریه مالتوس تأثیر عمیقی بر اقتصاد سیاسی، جمعیت‌شناسی و حتی زیست‌شناسی تکاملی گذاشت.

در سده نوزدهم، هم زمان با شکل‌گیری دولت‌های مدرن و گسترش اقتصاد بازار، آمار رسمی و سرشماری‌های ملی به‌سرعت توسعه یافتند. آدولف کوتله^{۱۳} (۱۷۹۶-۱۸۷۴) یکی از چهره‌های محوری این تحول بود. او در سازمان‌دهی نخستین سرشماری مدرن بلژیک (۱۸۴۶) نقش داشت و بعدها در تأسیس کنگره بین‌المللی آمار (۱۸۵۳) مشارکت کرد. کوتله بر این باور بود که جرم، مالیاتی است که جامعه باید بپردازد. او بر پایه میانگین‌های جمعیتی، مفهوم «انسان متوسط»^{۱۴} را بنا نهاد؛ شخصی که بر اساس میانگین ویژگی‌های یک جمعیت تعریف می‌شود و به‌عنوان انسان متوسط شناخته می‌شود. هرچند چنین فردی در واقعیت وجود خارجی ندارد، اما کوتله آن را راهنمایی برای تصمیم‌گیری‌های سیاسی و اجتماعی تلقی می‌کرد. او حتی این انسان متوسط را نوعی آرمان زیبایی‌شناختی می‌دانست. اندیشه کوتله درباره وجود نظم‌های آماری در پدیده‌های اجتماعی، تأثیر گسترده‌ای بر علوم اجتماعی و زیستی گذاشت. با این حال، در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، برخی جریان‌ها این ایده را به‌گونه‌ای تفسیر کردند که انحراف از میانگین را نشانه نقص یا انحراف اجتماعی تلقی می‌کرد. چنین برداشت‌هایی بعدها در برخی سیاست‌های اصلاح‌نژادی و عقیم‌سازی اجباری مورد استفاده قرار گرفت و یکی از بحث‌برانگیزترین فصل‌های تاریخ آمار و علوم اجتماعی را رقم زد [۴۰].

اولیه (آنچه امروز قانون اعداد بزرگ نامیده می‌شود)، رابطه میان احتمال نظری و فراوانی نسبی تجربی را تثبیت کرد و تمایز میان دیدگاه‌های پیشینی و پسینی در احتمال را برجسته ساخت [۴۰]. برنولی خود این نتیجه را قضیه طلایی نامید و آن را حاصل بیست سال اندیشه‌ورزی خویش معرفی کرد. در قرن هجدهم، این نظریه با آثار آبراهام دموآر^۱، توماس بیژ^۲ و پییر سیمون لاپلاس^۳ به یک دستگاه ریاضی منسجم تبدیل شد. دموآر توزیع نرمال را به‌عنوان حد توزیع دوجمله‌ای معرفی کرد و بدین ترتیب نخستین صورت از قضیه حد مرکزی را ارائه داد. توماس بیژ بنیان استنباط آماری مبتنی بر احتمال شرطی را فراهم ساخت، و لاپلاس صورت‌بندی کلاسیک احتمال را نظام‌مند کرد و نظریه تحلیلی احتمال را به اوج خود رساند [۱۶]. در همین دوره، کارل فردریش گاوس^۴ توزیع نرمال را در تحلیل خطاهای مشاهدات نجومی به کار گرفت و روش کمترین مربعات را به عنوان ابزار استاندارد برآورد توسعه داد. در قرن بیستم، آندری کولموگوروف^۵ (۱۹۳۳) با ارائه دستگاه اصل موضوعی، بنیان ریاضی نظریه احتمال را به طور مستقل از تفسیرهای فلسفی تثبیت نمود [۱۶].

۲-۲-۴. توسعه آمار مدرن

در قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، فرانسیس گالتون^۶، کارل پیرسون^۷ و رونالد فیشر^۸ ابزارهای اصلی آمار استنباطی از جمله رگرسیون، همبستگی، آزمون فرض و تحلیل واریانس را توسعه دادند. گالتون مفاهیم همبستگی و رگرسیون را به درون آمار آورد، پیرسون ضریب همبستگی را بنیان نهاد، و فیشر روش‌های طراحی آزمایش، تحلیل واریانس و برآورد ماکسیمم درست‌نمایی را ابداع کرد [۴۰]. هم زمان ریاضی‌دانان روسی در شکل‌گیری نظریه حدی و فرایندهای تصادفی نقش اساسی ایفا کردند. در ادامه، جرجی نیمان^۹ و ایگون پیرسون^{۱۰} (پسر کارل پیرسون) چارچوب نظریه آزمون فرضیه‌ها را به‌صورت نظام‌مند تدوین کردند [۱۶]. در آستانه و پس از جنگ جهانی دوم، مجموعه‌ای از حوزه‌های میان‌رشته‌ای مرتبط با آمار مانند اقتصادسنجی، زیست‌سنجی، انسان‌سنجی، روان‌سنجی، جامعه‌سنجی و پژوهش عملیاتی شکل گرفتند. این تحولات نشان‌دهنده گذار آمار از یک ابزار اداری و دولتی به یک زبان تحلیلی عمومی برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده در علوم طبیعی، اجتماعی و فنی است [۷۴، ۴۰].

۲-۳. آمار و جنبش اصلاح نژادی

بخش بزرگی از دستاوردهای حساب سیاسی بعدها در نظام

1. Abraham de Moivre
2. Thomas Bayes
3. Pierre-Simon Laplace
4. Carl Friedrich Gauss
5. Andrey Kolmogorov
6. Francis Galton
7. Karl Pearson

8. Ronald Fisher
9. Jerzy Neyman
10. Egon Pearson
11. Johann Peter Süssmilch
12. Thomas Robert Malthus
13. Adolphe Quetelet
14. Average man

باشد. پرسش از انتخاب مسئله‌ها، تعریف متغیرها، طبقه‌بندی جمعیت‌ها و کاربرد نتایج، همگی پرسش‌هایی اخلاقی هستند که در دوران پیشانهادهی آمار، به‌ندرت موضوع تأمل حرفه‌ای قرار می‌گرفتند. یکی از دلایل مهم غیاب آگاهی اخلاقی در این دوره، نبود نهادهای حرفه‌ای مستقل با استانداردهای اخلاقی الزام‌آور بود. نخستین انجمن‌های آماری (مانند انجمن آمار لندن، تأسیس ۱۸۳۴) بیشتر بر ارتقای روش‌های فنی و گسترش کاربردهای دولتی آمار متمرکز بودند تا بر تعیین حدود مسئولیت اخلاقی آماردان. در ایالات متحده نیز انجمن آمار آمریکا که در سال ۱۸۳۹ تأسیس شد، تا دهه‌های میانی قرن بیستم هیچ شیوه‌نامه اخلاقی مدونی نداشت [۲۱]. این خلأ نهادی به این معنا بود که تصمیم درباره‌ی این که چه پژوهش‌هایی از نظر اخلاقی مجاز هستند عمدتاً به وجدان فردی آماردانان واگذار شده بود، درحالی که فشارهای نهادی و منافع دولتی اغلب در جهت مخالف اخلاق عمل می‌کردند. این وضعیت تا میانه‌ی قرن بیستم و وقوع فجایع انسانی جنگ جهانی دوم ادامه یافت. فجایی که نشان دادند اتکای صرف به وجدان فردی و روش‌شناسی صحیح، برای جلوگیری از سوءاستفاده‌های نظام‌مند از آمار و داده‌های انسانی کافی نیست.

بخش بعدی این مقاله به بررسی این رویداد مهم می‌پردازد: دوره‌ای که جامعه جهانی پس از محاکمات دادگاه نورنبرگ، نخستین گام‌های جدی را برای نهادهای سازی اخلاق در پژوهش برداشت و آماردانان نیز ناگزیر به بازاندیشی در مسئولیت حرفه‌ای خود شدند.

۳. تولد اخلاق پژوهش

سده نوزدهم و آغاز سده بیستم، دوران پیوند آمار با دولت‌ها و طرح‌های اصلاح نژادی بود، اما میانه قرن بیستم، سرآغاز تحولی اساسی در اخلاق پژوهش به شمار می‌رود. جنگ جهانی دوم و جنایاتی که در پناه آن رخ داد، پندار بی‌طرفی علم را برای همیشه زدود. در این برهه، جامعه جهانی برای نخستین بار با این پرسش روبه‌رو شد که آیا هر پژوهشی، صرفاً به دلیل دقت فنی و روش‌شناختی، به طور خودکار موجه است؟ پاسخ به این پرسش، به شکل‌گیری اسناد و نهادهایی انجامید که امروز پایه‌های اخلاق پژوهش را تشکیل می‌دهند [۲۰].

۳-۱. پیامدهای نظریه اصلاح نژادی

جنبش اصلاح نژادی که نظریه آن را گالتون بنا نهاده بود، در اوایل قرن بیستم به اوج نفوذ خود رسید و در ایالات متحده به سرعت نهادینه شد. دفاتر ثبت اصلاح نژادی به مراکز اصلی گردآوری داده‌های خانوادگی و ترویج سیاست‌های نژادی تبدیل شدند [۳۸]. نخستین قانون عقیم‌سازی اجباری در جهان در سال ۱۹۰۷ در ایالت ایندیانا^۳ آمریکا به تصویب رسید. سپس در سال ۱۹۲۲،

جنبش اصلاح نژادی در دهه‌های پایانی قرن نوزدهم، ابتدا در بریتانیا و سپس در ایالات متحده و دیگر کشورهای اروپایی گسترش یافت. فرانسیس گالتون، پسر عموی چارلز داروین که معمولاً پدر آمار زیستی شناخته می‌شود، مفاهیمی چون همبستگی و رگرسیون را وارد آمار کرد و نقش مهمی در توسعه روش‌های آماری داشت. با این حال، گالتون بنیان‌گذار نظریه اصلاح نژادی نیز بود. او در کتاب نبوغ موروثی (۱۸۶۹)، با استفاده از داده‌های خانوادگی نخبگان بریتانیا، استدلال کرد که توانایی‌های ذهنی و اخلاقی عمدتاً موروثی‌اند و بنابراین جامعه باید از طریق سیاست‌های جمعیتی، کیفیت زیستی نسل‌های آینده را بهبود بخشد [۵۱]. گالتون واژه «اوزنیک»^۱ را به معنای «به زاد» یا «خوب زاد» ابداع کرد و آن را علم «بهبود نژاد» یا «اصلاح نژادی» نامید. کارل پیرسون، شاگرد و جانشین گالتون در کالج دانشگاهی لندن، این برنامه را نظام‌مندتر ساخت. او نخستین کرسی دانشگاهی آمار را بنیان گذاشت و مجله بیومتریکا را تأسیس کرد که همچنان از نشریات معتبر آمار زیستی است. پیرسون از کاربرد روش‌های آماری برای مطالعه تفاوت‌های انسانی دفاع می‌کرد و در بسیاری از آثارش از سیاست‌های اصلاح نژادی حمایت می‌نمود [۷۲، ۶۳]. رونالد فیشر نیز، با وجود نقش اساسی خود در بنیان‌گذاری آمار مدرن (از جمله تحلیل واریانس، طراحی آزمایش‌ها و نظریه برآورد) از حامیان جنبش اصلاح نژادی بود. او در دهه‌های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ در نوشته‌های مختلف از سیاست‌های تشویق باروری طبقات مرفه و محدودسازی باروری گروه‌های فقیر حمایت کرد و با انجمن اصلاح نژادی بریتانیا همکاری داشت [۴۸، ۳۰]. امروزه بخش قابل توجهی از این دیدگاه‌ها به دلیل اتکا بر پیش‌فرض‌های نژادگرایانه و طبقاتی، از منظر علمی و اخلاقی مردود شمرده می‌شوند.

۲-۴. فقدان نهادهای اخلاقی

نکته حائز اهمیت برای تاریخ اخلاق آماری این است که گالتون، پیرسون و فیشر، هیچ یک سوءرفتار علمی به معنای متعارف (مانند جعل داده یا دست‌کاری نتایج) مرتکب نشدند. آن‌ها روش‌های آماری دقیق و پیشرفته‌ای به کار می‌گرفتند و در چارچوب استانداردهای علمی زمان خود عمل می‌کردند. با این حال، پژوهش‌های آن‌ها در خدمت پروژه‌ای قرار داشت که امروزه آشکارا غیراخلاقی تشخیص داده می‌شود: پروژه‌ای که به توجیه نابرابری‌های نژادی و طبقاتی، ترویج سیاست‌های «عقیم‌سازی اجباری»^۲ و در نهایت (در موارد افراطی‌تر مانند آلمان نازی) به مشروعیت‌بخشیدن به نسل‌کشی انجامید [۷۵]. این تجربه تاریخی نشان می‌دهد که اخلاق در آمار فراتر از صداقت فنی و پرهیز از جعل داده است. حتی پژوهشگری که صادقانه و با دقیق‌ترین روش‌ها کار می‌کند، ممکن است در چارچوبی فعالیت کند که خود آن چارچوب ناعادلانه و تبعیض‌آمیز

1. Eugenics
2. Sterilization

3. Indiana

به محاکمه پزشکان، به بررسی جنایات پزشکان و پژوهشگران آلمانی اختصاص داشت. در این محاکمه، ۲۰ پزشک و سه مقام اداری متهم شدند که در آزمایش‌های غیرانسانی مشارکت داشتند [۲۰]. نکته حائز اهمیت از منظر تاریخ اخلاق پژوهش این است که متهمان در دفاع از خود، به استدلالی رجوع کردند که تا پیش از آن در محافل علمی رایج بود: پژوهش‌های ما از نظر روش‌شناختی دقیق بوده و نتایج آن‌ها به نفع علم و بشریت است. آن‌ها مدعی بودند که ارزش علمی نتایج، می‌تواند فقدان رضایت آزمودنی‌ها و آسیب‌های وارد شده را توجیه کند. دادگاه نورنبرگ این استدلال را صریحاً رد کرد. در ۱۹ اوت ۱۹۴۷، قضات ده ماده را به‌عنوان اصول مجاز بودن آزمایش‌های پزشکی اعلام کردند که بعدها به «منشور نورنبرگ»^۵ معروف شد. این سند که نخستین بیانیه بین‌المللی در حوزه اخلاق پژوهش محسوب می‌شود، چند اصل اساسی را تعیین کرد که مهم‌ترین آن‌ها عبارت بودند از [۶۹]:

رضایت داوطلبانه و آگاهانه: آزمودنی باید از توانایی قانونی برای ابراز رضایت برخوردار باشد و پس از آگاهی کامل از ماهیت، مدت، اهداف، روش‌ها، خطرات و پیامدهای پژوهش، آزادانه رضایت خود را اعلام نماید.

نتایج مفید برای جامعه: پژوهش باید به‌گونه‌ای طراحی شود که نتایج آن به نفع جامعه باشد و با استفاده از روش‌های دیگر قابل‌دستیابی نباشد.

اجتناب از رنج و آسیب غیرضروری: پژوهش باید بر اساس یافته‌های پیشین طراحی گردد تا رنج و آسیب جسمی و روحی به حداقل ممکن کاهش یابد.

نسبت خطر به منفعت: خطرات ناشی از پژوهش نباید از اهمیت انسانی مسئله فراتر رود.

حق انصراف آزمودنی: آزمودنی باید بتواند در هر مرحله از پژوهش، از ادامه مشارکت انصراف دهد.

توقف پژوهش در صورت بروز خطر: پژوهشگر موظف است در صورت مشاهده هرگونه خطر برای آزمودنی، پژوهش را متوقف کند

۳-۳. مطالعه توسکگی

منشور اخلاقی نورنبرگ اگرچه نخستین بیانیه بین‌المللی اخلاق در پژوهش بود، اما «مطالعه توسکگی»^۶ بود که این اصول را از سطح اسناد آلمانی به عرصه نهادهای الزام‌آور فرود آورد و به‌عنوان چرخش‌گاهی تاریخی در این زمینه شناخته شد. این مطالعه که از ۱۹۳۲ تا ۱۹۷۲ به مدت چهل سال ادامه یافت، به یکی از بزرگ‌ترین رسوایی‌های اخلاقی در تاریخ علم آمریکا تبدیل شد و

هری لافلین^۱ قانون نمونه‌ای را تدوین کرد که بعدها در آلمان نازی الهام‌بخش قوانین مشابه گردید [۶۱]. پرونده معروف «باک علیه بل»^۲ (۱۹۲۷) در دیوان عالی آمریکا، عقیم‌سازی اجباری افراد دارای ناتوانی ذهنی را قانونی اعلام کرد. قاضی صادرکننده رأی، در جمله‌ای مشهور گفت: «سه نسل از احمق‌ها کافی است» [۳۳]. از سال ۱۹۰۷ تا دهه ۱۹۷۰، بیش از ۶۰۰۰۰ نفر در ۳۳ ایالت آمریکا تحت عقیم‌سازی اجباری قرار گرفتند [۶۲]. در آلمان نیز این ایده‌ها با استقبال گسترده‌ای روبه‌رو شد. نازی‌ها از همان ابتدای به‌قدرت‌رسیدن، قوانین اصلاح نژادی را با شدت بیشتری به اجرا درآوردند. قانون جلوگیری از تولد فرزندان مبتلا به بیماری‌های ارثی (۱۹۳۳) که به عقیم‌سازی اجباری بیش از ۴۰۰۰۰ نفر انجامید، با استناد به داده‌های آماری درباره هزینه اجتماعی بیماری‌های ارثی توجیه می‌شد [۷۵]. آماردانان آلمانی در گردآوری و تحلیل این داده‌ها نقش فعالی داشتند و بسیاری از آن‌ها خود از حامیان ایدئولوژی نازی بودند. قوانین نورنبرگ^۳ (۱۹۳۵) که مبنای حقوقی آزار و اذیت یهودیان را فراهم کرد، مستقیماً از مدل‌های نژادپرستانه آمریکایی الهام گرفته شده بود [۶۰]. برنامه موسوم به «تی چهار»^۴ (۱۹۴۱-۱۹۳۹) کشتن نظام‌مند نزدیک به ۷۰۰۰۰ معلول ذهنی و جسمی را سازماندهی کرد [۳۴].

۳-۲. پزشکی و آمار در خدمت نازیسم

رژیم نازی در آلمان (۱۹۳۳-۱۹۴۵) از علم به‌ویژه پزشکی و آمار به‌عنوان ابزاری برای مشروعیت‌بخشی به سیاست‌های نژادپرستانه خود استفاده می‌کرد. اما فراتر از قوانین اصلاح نژادی، آنچه تاریخ اخلاق پژوهش را برای همیشه دگرگون کرد، آزمایش‌های پزشکی غیرانسانی بود که در اردوگاه‌های کار اجباری بر روی زندانیان انجام می‌گرفت. این آزمایش‌ها که بدون رضایت آگاهانه و با تحمیل درد و رنج عظیم انجام می‌شدند، شامل آزمایش‌های غواصی در آب یخ (برای بررسی بقا در آب‌های سرد شمالی)، آزمایش‌های ارتفاع (برای شبیه‌سازی شرایط سقوط خلبانان در ارتفاع بالا)، آزمایش‌های مالاریا، فسفر، گاز خردل و بسیاری موارد دیگر بودند [۲۰]. در این آزمایش‌ها، آمار در طراحی و تحلیل نقش داشت، و گاهی به ابزاری برای کاهش هزینه انسانی پژوهش تبدیل می‌شد. برای نمونه، در آزمایش‌های غواصی در آب یخ، پژوهشگران با استفاده از روش‌های آماری به دنبال یافتن حداقل دمای لازم برای ایجاد هیپوترمی کشنده (کاهش دمای خطرناک بدن) بودند تا بتوانند تعداد قربانیان را بهینه‌سازی کنند [۲۸]. از منظر روش‌شناختی، این پژوهش‌ها گاه با استانداردهای فنی زمان خود تطبیق داشتند، اما از نظر اخلاقی، آشکارترین مصداق علم در خدمت جنایت بودند. پس از پایان جنگ، محاکمات دادگاه نورنبرگ برای رسیدگی به جنایات نازی‌ها برگزار شد. بخشی از این محاکمات، معروف

1. Harry Laughlin
2. Buck v. Bell
3. Nuremberg Laws

4. T4 Action
5. Nuremberg Code
6. Tuskegee study

شده توسط دیگران است. این نگاه تفکیک‌گرا بین طراحی اخلاقی و تحلیل فنی بعدها به چالش کشیده شد. سؤال اساسی این بود: آیا آماردانی که می‌داند داده‌ها از طریق فریب و با انکار درمان به دست آمده‌اند، می‌تواند صرفاً باتکیه بر دقت روش‌شناختی تحلیل خود، مسئولیت اخلاقی را از خود سلب کند؟ [۲۴]. افشای مطالعه توسسگی در ۱۹۷۲، موجی از اعتراضات عمومی را برانگیخت و کنگره آمریکا را به اقدام واداشت. در سال ۱۹۷۴، کنگره قانون پژوهش ملی را تصویب کرد که طی آن کمیسیون ملی برای حفاظت از آزمودنی‌های انسانی در پژوهش‌های زیست‌پزشکی و رفتاری تشکیل شد. این کمیسیون مأموریت یافت اصول اخلاقی را تدوین کند که زیربنای همه پژوهش‌های انسانی در ایالات متحده باشد [۲۷]. نتیجه چهار سال کار این کمیسیون، گزارش «بلومونت»^۳ بود که در ۱۹۷۹ منتشر شد. این گزارش سه اصل اساسی را معرفی کرد که تا امروز سنگ بنای اخلاق پژوهش در سراسر جهان محسوب می‌شوند:

۱. **احترام به اشخاص:** این اصل دو الزام اخلاقی را در بر می‌گیرد: نخست، به رسمیت‌شناختن خودمختاری افراد؛ دوم، حفاظت از کسانی که خودمختاری آن‌ها کاهش یافته است. ترجمه عملی این اصل در پژوهش، اخذ رضایت آگاهانه از مشارکت‌کنندگان است.

۲. **سودرسانی:** این اصل پژوهشگران را ملزم می‌کند که منافع بالقوه پژوهش را به حداکثر و آسیب‌های احتمالی را به حداقل برسانند. ترجمه عملی این اصل، ارزیابی دقیق نسبت خطر به منفعت، پیش از اجرای پژوهش است.

۳. **عدالت:** این اصل به توزیع عادلانه بارها و منافع پژوهش اشاره دارد. مطالعه توسسگی نمونه‌ای آشکار از نقض این اصل بود: بار پژوهش بر دوش جمعیتی فقیر و به حاشیه رانده شده بود، درحالی که منافع آن نصیب جامعه غالب می‌شد [۲۷].

نوآوری بزرگ گزارش بلومونت، صرفاً تدوین اصول اخلاقی نبود، بلکه نهادهای سازی آن‌ها از طریق سازوکارهای الزام‌آور بود. بر اساس قوانین مصوب پس از این گزارش، هر پژوهش انسانی که با بودجه فدرال انجام می‌شد، می‌بایست توسط هیئت‌های بازبینی نهادی مورد بررسی و تأیید قرار می‌گرفت. این هیئت‌ها که در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی مستقر بودند، وظیفه داشتند اطمینان حاصل کنند که پژوهش‌های انسانی بر اساس سه اصل بلومونت طراحی و اجرا می‌شوند [۲۵]. برای آماردانان، این تحول به معنای ورود به عرصه تازه‌ای از مسئولیت‌های اخلاقی بود. دیگر نمی‌شد ادعا کرد که وظیفه آماردان تنها تحلیل صحیح داده‌ها است. آماردانان در جایگاه مشاوران آماری پژوهش‌های بالینی و رفتاری، ناگزیر به مشارکت در طراحی پژوهش‌ها و ارزیابی جنبه‌های اخلاقی آن‌ها شدند.

پیامدهای آن، تمامی حوزه‌های پژوهش‌های انسانی از جمله آمار را برای همیشه دگرگون کرد [۳۱، ۵۸]. مطالعه توسسگی توسط سرویس بهداشت عمومی ایالات متحده در شهر ماکون^۱، ایالت آلاباما^۲، در میان جمعیت فقیر و عمدتاً بی‌سواد سیاه‌پوستان آغاز شد. عنوان رسمی این پژوهش مطالعه سفلیس درمان نشده در مردان سیاه‌پوست بود. هدف پژوهش، بررسی روند طبیعی بیماری سفلیس در صورت عدم درمان بود [۵۸]. گروهی شامل ۶۰۰ مرد سیاه‌پوست در این مطالعه شرکت داشتند: ۳۹۹ مرد مبتلا به سفلیس (گروه آزمون) و ۲۰۱ مرد سالم (گروه کنترل). به این مردان گفته شده بود که برای درمان بیماری خونی بدخیم که اصطلاحی محلی برای طیفی از بیماری‌ها بود، تحت معاینه و درمان قرار می‌گیرند. در ازای مشارکت، آن‌ها از معاینه رایگان، وعده‌های غذایی گرم، و بیمه تشییع جنازه برخوردار می‌شدند [۳۱]. اما نکته فاحش غیراخلاقی این پژوهش آن بود که پس از شروع مطالعه، به شرکت‌کنندگان هیچ درمانی برای سفلیس ارائه نشد. حتی در سال ۱۹۴۳ که پنی‌سیلین به عنوان درمان مؤثر سفلیس شناخته شد و به یک داروی استاندارد تبدیل گردید، پژوهشگران از ارائه آن به شرکت‌کنندگان خودداری کردند. آن‌ها نه تنها درمان را دریغ کردند، بلکه فعالانه از دریافت درمان توسط شرکت‌کنندگان جلوگیری می‌نمودند. پژوهشگران با همکاری سازمان‌های محلی، اطمینان حاصل می‌کردند که هیچ یک از مردان تحت مطالعه تحت درمان با پنی‌سیلین قرار نگیرند [۵۸]. این وضعیت تا سال ۱۹۷۲ ادامه یافت، زمانی که خبرگزاری آسوشیتدپرس، گزارشی از این مطالعه منتشر کرد و افکار عمومی را با واقعیت چهل سال نظارت بر مرگ تدریجی صدها مرد سیاه‌پوست روبه‌رو ساخت [۵۵]. در طول این مدت، ده‌ها نفر از شرکت‌کنندگان بر اثر عوارض سفلیس جان‌باخته بودند، همسران و فرزندان آن‌ها نیز به این بیماری مبتلا شده بودند، و پژوهشگران همچنان به گردآوری داده‌ها ادامه می‌دادند. از منظر تاریخ اخلاق آماری، مطالعه توسسگی پرسش‌هایی اساسی را پیش می‌کشد. پژوهشگران این مطالعه از روش‌های آماری دقیق و پیشرفته‌ای استفاده می‌کردند. آن‌ها داده‌ها را با دقت ثبت می‌کردند، تحلیل‌های آماری معتبری انجام می‌دادند، و یافته‌های خود را در مجلات معتبر پزشکی منتشر می‌نمودند. در طول چهل سال، بیش از ده‌ها مقاله از این مطالعه در مجلات به چاپ رسید [۳۱]. نکته تأمل‌برانگیز این است که هیچ یک از منتقدان هم‌عصر این مطالعه، به روش‌شناسی آماری آن ایراد نگرفتند. ایراد اصلی، نه در روش‌های تحلیل داده، بلکه در طراحی پژوهش و نبود رضایت آگاهانه بود. اما این دو حوزه، یعنی طراحی و اخلاق گردآوری داده، تا پیش از رسوایی توسسگی به ندرت در حیطه مسئولیت آماردانان تعریف می‌شدند [۴۷]. آماردانان مشارکت‌کننده در این پروژه، خود را تحلیلگران فنی می‌دانستند که وظیفه‌شان تنها پردازش داده‌های گردآوری

1. Macon County
2. Alabama

3. Belmont Report

مطالعه توسکگی دست کم سه درس اساسی برای تاریخ اخلاق آماری به همراه داشت [۴۷، ۲۴]:

نخست: روش شناسی صحیح، فقدان اخلاق در طراحی پژوهش را جبران نمی کند. آماردانی که داده های حاصل از مطالعه ای غیر اخلاقی را تحلیل می کند، نمی تواند باتکیه بر دقت فنی تحلیل خود، مسئولیت اخلاقی را نفی کند.

دوم: مسئولیت اخلاقی آماردان از مرحله تحلیل فراتر می رود و به مرحله طراحی پژوهش و تعریف مسئله نیز تسری می یابد.

سوم: اخلاق پژوهش نیازمند نهادهای بازدارنده است، نه صرفاً وجدان فردی. مطالعه توسکگی چهل سال ادامه یافت نه به دلیل فقدان آگاهی اخلاقی در پژوهشگران منفرد، بلکه به دلیل فقدان سازوکارهای نهادی برای نظارت، بازخواست و توقف پژوهش های غیر اخلاقی.

تاریخ اصلاح نژادی و جنایات علمی قرن بیستم نشان می دهد که چگونه نظریه ای که ابتدا در محافل علمی محترم تلقی می شد، به ابزاری برای سرکوب و نسل کشی تبدیل گردید. این درس ها، مسیر تاریخ اخلاق آماری را در دهه های بعدی تعیین کردند و جامعه جهانی را به بازاندیشی در نسبت علم با مسئولیت اجتماعی فراخواندند.

۴. نهادهای سازی اخلاق در آمار

گزارش بلومونت و تأسیس هیئت های بازبینی نهادی تحول مهمی در تاریخ اخلاق پژوهش بود، اما تأثیر آن بر جامعه آماردانان تدریجی و همراه با چالش های خاص خود بود. دهه های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ دوره گذار از اخلاق فردی و وجدانی به اخلاق نهادی و حرفه ای در آمار محسوب می شود. در این دوره، انجمن های حرفه ای آمار نخستین استانداردهای اخلاق آماری را تدوین کردند، آماردانان در مناقشات اخلاقی بخش دولتی و صنعتی نقش فعال تری یافتند، و دامنه مسئولیت اخلاقی از صداقت فنی به مسئولیت در برابر جامعه گسترش یافت [۴۷].

۴-۱. پیشینه تدوین راهنماهای اخلاق آماری

پیش از آنکه انجمن آمار آمریکا در سال ۱۹۸۱ نخستین راهنمای اخلاقی خود را منتشر کند، نزدیک به سه دهه تلاش مستمر اما نافرجام برای تدوین یک شیوه نامه رفتار حرفه ای صورت گرفته بود. بررسی این پیشینه تاریخی که در مرجع [۴۴] به خوبی مستند شده، علل تأخیر در نهادهای سازی اخلاق آماری را روشن می سازد و نشان می دهد تدوین استانداردهای اخلاقی همواره با چالش های

نظری و نهادی عمیقی روبه رو بوده است. نخستین گام رسمی در این مسیر به سال ۱۹۴۹ بازمی گردد، زمانی که انجمن آمار آمریکا پیشنهاد کرد که تدوین یک شیوه نامه رفتار اخلاقی بخشی از وظایف کمیسیون استانداردها و سازماندهی آماری این انجمن باشد که در همان زمان تشکیل شده بود. سه سال بعد، در سال ۱۹۵۲، هیئت مدیره انجمن به رئیس وقت، ویلیام کوکران^۱، اختیار داد تا کمیته ای موقت برای انجام این مهم تشکیل دهد. ریاست این کمیته به رنسیس لیکرت^۲ سپرده شد [۴۴]. کمیته لیکرت در سال ۱۹۵۴ گزارشی منتشر کرد که در آن بر سه اصل تأکید داشت: نخست، انجمن باید به سمت تدوین بیانیه ای از استانداردهای مورد توافق (هم فنی و هم اخلاقی) حرکت کند؛ دوم، کمیته باید به اصول کلی بپردازد نه جزئیات موردی؛ و سوم، فرایند تدوین باید به گونه ای طراحی شود که بیانیه نهایی از حمایت اکثریت قاطع اعضای انجمن برخوردار باشد. کمیته به طور مشخص توصیه کرد که پیش از هر اقدامی، نظرسنجی از اعضا برای سنجش میزان تمایل به تدوین این استانداردها انجام شود. همچنین پیشنهاد شد که انجمن از رویه ای مشابه انجمن روان شناسی آمریکا پیروی کند (۱) استفاده از روش رویدادهای بحرانی برای شناسایی مسائل که اعضا در عمل با آن مواجه شده اند و سنجش میزان اجماع پیرامون آنها؛ و (۲) اتکا بر مشارکت گسترده اعضا در فرایند تدوین. تأکید کمیته بر این بود که استانداردها باید از تجربیات اعضا استخراج شوند، نه آنکه کمیته از تجربه محدود خود بیانیه ای را تهیه کند [۴۴]. هم زمان با فعالیت این کمیته، بحث های نظری مهمی درباره ماهیت و محتوای استانداردهای اخلاق آماری در نشست های انجمن و صفحات نشریات آماری در گرفت. به عنوان مثال، کورت^۳ در مقاله خود [۳۵] تأکید می کند: از آنجا که استانداردهای رفتار حرفه ای به تمامی فعالیت های انسانی تعمیم دارند، باید بر جزئیات عملی متمرکز باشند، نه آنکه صرفاً به کلی گویی هایی چون صداقت و وفاداری بسنده کنند. مورتون^۴ با تفکیک آماردانان به سه گروه: نظریه پرداز (نیاز اندک به استاندارد اخلاقی)، متخصص موضوعی (نیاز متوسط به استاندارد اخلاقی)، و آماردان گردآورنده (نیاز زیاد به استاندارد اخلاقی)، نشان داد که شدت چالش های اخلاقی در هر گروه متفاوت است و بنابراین یک استاندارد اخلاقی واحد، ممکن است برای همه گروه ها مناسب نباشد [۶۶]. براون^۵ در مقاله ای تأثیر گذار [۳۲] سه گونه استاندارد اخلاقی را از هم متمایز کرد. گونه نخست، الگوبرداری از سوگند بقراط بود که به اعتقاد او برای آماردانان مناسب نیست، زیرا پزشک با مریضی مواجه است که خواهان بهبودی است، در حالی که آماردان اغلب با کارفرمایانی سروکار دارد که گاهی خواهان نتایجی خلاف واقعیت هستند. گونه دوم، استانداردهای خودپسندانه ای بودند که براون آن ها را نابخردانه

1. William Cochran
2. Rensis Likert
3. Andrew T. Court

4. Joseph E. Morton
5. Theodore H. Brown

۴-۲. نخستین راهنمای اخلاق آماری

پس از دوره آزمایشی، انجمن آمار آمریکا در سال ۱۹۸۳ نخستین راهنمای اخلاقی برای کارهای آماری را به طور رسمی منتشر کرد. این راهنما که از آن زمان تاکنون چندین بار بازنگری شده، شش حوزه اصلی مسئولیت اخلاقی آماردانان را مشخص می‌کرد [۲۱]:

۱. **مسئولیت در قبال آزمودنی‌ها و ذی‌نفعان:** مسئولیت در قبال آزمودنی‌ها و ذی‌نفعان: حفاظت از حریم خصوصی، رعایت محرمانگی داده‌ها، و اطمینان از اخذ رضایت آگاهانه.

۲. **مسئولیت در قبال کارفرما و کارگزار:** ارائه تحلیل‌های صادقانه و پرهیز از تطبیق نتایج با خواست کارفرما.

۳. **مسئولیت در قبال جامعه:** توجه به پیامدهای اجتماعی کاربرد یافته‌های آماری و پرهیز از مشارکت در پروژه‌های غیراخلاقی.

۴. **مسئولیت در قبال روش‌شناسی:** به‌کارگیری روش‌های مناسب، گزارش محدودیت‌ها، و پرهیز از سوگیری‌های ناخواسته.

۵. **مسئولیت در قبال همکاران و حرفه:** نقد منصفانه، تصدیق مشارکت‌ها، و پرهیز از تضاد منافع.

۶. **مسئولیت در قبال آموزش و نسل آینده:** تربیت آماردانانی که ارزش‌های اخلاقی را درونی کرده‌اند.

انجمن بین‌المللی آمار نیز در ۱۹۸۵ راهنمای اخلاق حرفه‌ای خود را منتشر کرد. این اعلامیه که رویکردی جهانی‌تر داشت، بر تفاوت‌های فرهنگی در تعریف اخلاق تأکید می‌کرد و درعین‌حال اصول اساسی چون صداقت، شفافیت، و مسئولیت اجتماعی را مشترک میان همه فرهنگ‌ها می‌دانست [۵۷]. در سال‌های بعد، هر دو نهاد راهنمای اخلاق آماری خود را بازنگری کردند. انجمن آمار آمریکا در سال ۲۰۱۸ نسخه بازنگری شده راهنمای اخلاقی را منتشر کرد که توجه بیشتری به چالش‌های عصر داده‌های بزرگ و یادگیری ماشین داشت [۲۳].

۴-۳. آمار در دولت و صنعت

در همین دوره، آماردانان شاغل در بخش‌های دولتی و صنعتی با چالش‌های اخلاقی متفاوتی نسبت به همکاران دانشگاهی خود مواجه بودند. اگر در محیط دانشگاهی مسئله اصلی اخذ رضایت آگاهانه و حفاظت از آزمودنی‌ها بود، در بخش دولتی و صنعتی چالش‌های دیگری برجسته می‌شدند [۲۴]. آماردانان شاغل در سازمان‌های آماری دولتی (مانند اداره آمار آمریکا یا دفتر آمار کانادا) گاه تحت فشار قرار می‌گرفتند تا روش‌های تحلیلی یا

می‌خواند، زیرا یا فراموش خواهند شد، یا نادیده گرفته خواهند شد، یا عادات آماردانان را به انعطاف‌ناپذیری محدود خواهند کرد. گونه سوم، الگوی کتاب مقدس بود: چند آرمان کلی همراه با مثال‌های فراوان، نه مجموعه‌ای از قواعد جزئی برای تمامی شرایط. براون شش آرمان را پیشنهاد کرد که از آن جمله می‌توان به اشتیاق برای یافتن حقیقت، تلاش مداوم برای ارائه روشن دستاوردهای خود، و جستجوی خستگی‌ناپذیر برای یافتن شواهد در تأیید یک فرضیه، نه در تأیید یک نتیجه از پیش تعیین شده اشاره کرد. فریمن^۱ نیز در همین دوره پیشنهاد سوگند آماردان را مطرح کرد که در آن آماردان خود را جستجوگر حقیقت معرفی می‌کند و متعهد می‌شود که در میان هیاهوی بازار یا میدان سیاست، فردی نباشد که ارقام را برای اثبات نتیجه‌ای ناهمخوان برگزیند. او همچنین یازده ماده مشخص را در حمایت از این سوگند پیشنهاد کرد که از آن جمله می‌توان به پرهیز از طراحی آزمایش‌های سوگیرانه، حفظ ناشناس بودن پاسخ‌دهندگان، و جلوگیری از سوءاستفاده از ارقام تهیه شده اشاره کرد [۵۰]. پیرو توصیه کمیته لیکرت، دو نظرسنجی برای سنجش تمایل اعضا به تدوین استانداردهای اخلاق آماری انجام شد. نظرسنجی مقدماتی که برای شعبه بوستون انجمن آمار انجام شد، نشان داد که تنها حدود یک‌سوم از اعضای آن به شدت طرفدار تدوین این استانداردها هستند. نظرسنجی دوم که تمامی شعبه فعال انجمن در اوایل دهه ۱۹۵۰ را پوشش می‌داد، نشان داد که تنها ۲۱ شعبه از تدوین استانداردها حمایت می‌کنند. کمیته نظرسنجی درباره استانداردها، در سال ۱۹۵۶ گزارش خود را منتشر کرد و بر اساس یافته‌های نظرسنجی، به انجمن توصیه نمود که تا زمانی که علاقه بیشتری به تدوین استانداردها وجود ندارد، اقدام را به تعویق بیندازد [۴۴]. با این توصیه، تلاش‌های رسمی انجمن برای تدوین یک مجموعه استاندارد حرفه‌ای برای دو دهه متوقف شد. علاقه به تدوین استانداردهای اخلاق آماری در اواخر دهه ۱۹۷۰ بار دیگر احیا شد. در سال ۱۹۷۶، جرزی نیمن^۲ طی نامه‌ای به هیئت‌مدیره، موضوع اخراج اعضای که عمداً داده جعل می‌کنند را مطرح کرد. در همان سال، سی. ترنس ایرلند^۳ نیز طی نامه‌ای به مدیر اجرایی و اعضای هیئت‌مدیره، خواستار تشکیل کمیته‌ای برای بررسی مسائل اخلاقی شد. در ژانویه ۱۹۷۷، کمیته موقتی برای تدوین راهنمای اخلاقی انجام کارهای آماری، به ریاست ترنس ایرلند تشکیل شد. این کمیته طی سه سال بعد، نسخه‌ای از این راهنما را تهیه و دو بار (در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۱) در خبرنامه انجمن منتشر کرد تا نظرات اعضا و شعب انجمن را دریافت کند. سرانجام در اوت ۱۹۸۱، هیئت‌مدیره انجمن نسخه نهایی «راهنمای اخلاقی برای کارهای آماری»^۴ را برای یک دوره آزمایشی سه‌ساله تصویب کرد [۴۴، ۲۱].

1. Freeman
2. Jerzy Neyman
3. C. Terence Ireland

4. Ethical Guidelines for Statistical Practice
5. International Statistical Institute (ISI)

یکی دیگر از حوزه‌هایی که در این دوره گسترش یافت، مسئولیت آماردان در قبال کاربردهای ثانویه داده‌ها بود. با گسترش پایگاه‌های داده بزرگ و افزایش دسترسی به داده‌های ثانویه، این پرسش مطرح شد که آیا آماردانی که داده‌های حساس (مانند داده‌های پزشکی یا مالی) را برای هدف خاصی جمع‌آوری کرده، مسئول کاربردهای بعدی آن داده‌ها توسط دیگران نیز هست؟ پاسخ به این پرسش همچنان محل بحث است، اما در استانداردهای اخلاق آماری این دوره، تأکید بر مدیریت مسئولانه داده‌ها به‌عنوان بخشی از وظایف اخلاقی آماردان گنجانده شد [۲۴].

۴-۵. کاستی‌های نهادهای اخلاقی

باوجود پیشرفت‌های چشمگیر در نهادینه‌سازی اخلاق آماری در این دوره، کاستی‌هایی نیز وجود داشت. مهم‌ترین محدودیت، ضعف سازوکارهای اجرایی بود. استانداردهای اخلاقی انجمن‌های حرفه‌ای عمدتاً توصیه‌ای بودند و سازوکار مؤثری برای تنبیه متخلفان یا بازخواست نهادهایی که فشارهای غیراخلاقی بر آماردانان وارد می‌کردند، فراهم نمی‌آوردند. آماردانی که به دلیل مقاومت در برابر فشار کارفرما شغل خود را از دست می‌داد، در عمل پناهگاه نهادی مؤثری نداشت [۴۷]. علاوه بر این، تمرکز اصلی استانداردهای اخلاقی این دوره بر رفتار فردی آماردان بود و کمتر به ساختارهای نهادی و فشارهای سیستمی که منشأ بسیاری از چالش‌های اخلاقی بودند، توجه می‌کرد. این کاستی در دهه بعد و با ظهور بحران تکرارپذیری آشکار شد. بحرانی که نشان داد حتی در حضور استانداردهای اخلاق آماری و هیئت‌های بازبینی نهادی، فشارهای سیستمی برای تولید نتایج معنادار می‌تواند به فساد تدریجی رویه‌های آماری در سطح وسیع منجر شود. بخش بعدی این مقاله به بررسی این بحران و پیامدهای آن برای اخلاق آماری اختصاص دارد.

۵. بحران تکرارپذیری

اگر مطالعه توسکگی نشان داد که بی‌توجهی به اخلاق در طراحی پژوهش می‌تواند به فاجعه‌ای انسانی منجر شود، بحران «تکرارپذیری»^۳ (توانایی تکرار نتایج یک پژوهش با استفاده از همان داده‌ها و روش‌های تحلیلی) که در دهه ۲۰۱۰ دامن‌گیر علوم تجربی به ویژه روان‌شناسی شد، افشاگر بحران‌های درونی خود علم آمار بود. این بار مسئله نه سوءرفتار آشکار یا پژوهش‌های غیرانسانی، بلکه فشارهای نهادی و رویه‌های تحلیلی نادرست بود که در سطح وسیع و در درون جریان اصلی علم، به تولید نتایجی غیرقابل اعتماد انجامید. بحران تکرارپذیری، آمار را از مقام ابزار بی‌طرف کشف حقیقت به عرصه‌ای از مناقشات اخلاقی-روش‌شناختی فرود آورد و نهادهای بین‌المللی آمار را واداشت تا رسماً به بازتعریف مسئولیت‌های اخلاقی آماردانان بپردازند [۲۲، ۷۱].

نحوه گزارش‌دهی را به‌گونه‌ای تغییر دهند که نتایج با اولویت‌های سیاسی دولت تطبیق کند. یکی از مشهورترین موارد این فشارها در اوایل دهه ۱۹۹۰ در دفتر آمار کانادا رخ داد، زمانی که دولت محافظه‌کار خواستار تغییر روش محاسبه نرخ بیکاری شد تا آمارهای منتشرشده مطلوب‌تر به نظر برسند. آماردانان ارشد این سازمان در اقدامی بی‌سابقه، به‌صورت علنی در برابر این فشار مقاومت کردند و استعفای جمعی را تهدید نمودند. این واقعه منجر به تدوین اصل استقلال حرفه‌ای در آمار دولتی شد که امروزه در بسیاری از کشورها به‌عنوان یک هنجار نهادی پذیرفته شده است [۴۶].

در بخش صنعتی، آماردانان با چالش تضاد منافع میان وظیفه حرفه‌ای برای گزارش صادقانه نتایج و فشار کارفرما برای ارائه تصویری خوش‌بینانه از محصول یا فرایند مواجه بودند. صنایع داروسازی نمونه بارز این چالش بود. آماردانان شاغل در شرکت‌های داروسازی در دهه ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ در موارد متعددی شاهد تلاش برای دست‌کاری تحلیل‌های آماری به نفع محصولات شرکت بودند. این تجربیات منجر به شکل‌گیری مفهوم استقلال آماری در قراردادهای کاری شد: شرطی که بر اساس آن آماردان حق دارد نتایج واقعی تحلیل را بدون سانسور، یا تغییر توسط کارفرما منتشر کند [۳۹].

۴-۴. گسترش مسئولیت اخلاقی

در این دوره، درک آماردانان از مسئولیت اخلاقی خود دستخوش تحول اساسی شد. در گذشته، تعریف غالب از اخلاق در آمار محدود به صداقت فنی بود: پرهیز از جعل داده، انتخاب آگاهانه روش‌های تحلیلی، و گزارش صادقانه نتایج. اما تجربیات دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ نشان داد که صداقت فنی به‌تنهایی کافی نیست [۴۷]. در اواخر دهه ۱۹۸۰، پژوهشگران حوزه فراتحلیل به‌تدریج متوجه پدیده‌ای شدند که بعدها «سوگیری انتشار»^۱ نام گرفت: مطالعاتی که نتایج «معنادار آماری»^۲ دارند (یعنی نتیجه‌ای که از پژوهش به دست آمده، به احتمال زیاد شانس نیست) در مقایسه با پژوهش‌هایی که نتایج غیرمعنادار دارند، شانس بیشتری برای انتشار در مجلات علمی پیدا می‌کنند [۷۶]. این سوگیری که ریشه در ساختارهای نهادی علم داشت (فشار برای انتشار، داوری هم‌تا که به نتایج معنادار اهمیت می‌دهد، و غیره)، آماردانان را با پرسش اخلاقی تازه‌ای روبه‌رو کرد: آیا آماردانی که نتایج غیرمعنادار پژوهش خود را بایگانی می‌کند و برای انتشار آن تلاش نمی‌کند، مرتکب کوتاهی اخلاقی شده است؟ پاسخ تدریجی که در استانداردهای اخلاقی بعدی منعکس شد، مثبت بود: آماردانان وظیفه دارند، مستقل از معناداری یا عدم معناداری نتایج، برای انتشار یافته‌های خود تلاش کنند تا تصویر کامل و بدون سوگیری از واقعیت در دسترس جامعه علمی قرار گیرد.

1. Publication bias
2. Statistically significant

3. Reproducibility

۵-۱. نقش آمار در بحران

نشانه‌هایی از بحران تکرارپذیری از دهه‌ها پیش وجود داشت. در اوایل دهه ۱۹۹۰، جان یونیدیس^۱، اپیدمیولوژیست یونانی-آمریکایی، در مقاله‌ای تأثیرگذار با عنوان «چرا بیشتر نتایج پژوهش‌های منتشرشده غلط از آب درمی‌آیند؟» نشان داد که به دلیل ترکیبی از عوامل از جمله حجم نمونه‌های کوچک، اندازه اثر^۲ (میزان تأثیر یک متغیر بر متغیر دیگر، مستقل از حجم نمونه) و سوگیری انتشار، بخش بزرگی از یافته‌های علوم زیستی و رفتاری ممکن است غیرقابل اعتماد باشند [۵۶]. پیش از آن، در دهه ۱۹۹۰، روان‌شناسان تجربی هشدار داده بودند که یافته‌های برجسته حوزه روان‌شناسی اجتماعی غالباً در تلاش‌های تکرارپذیری با شکست مواجه می‌شوند [۷۶]. اما این هشدارها تا اوایل دهه ۲۰۱۰ جدی گرفته نشدند. نقطه عطف، انتشار نتایج پروژه تکرارپذیری روان‌شناسی در سال ۲۰۱۵ بود. این پروژه که با مشارکت دهه‌ها آزمایشگاه در سراسر جهان انجام شد، تلاش کرد ۱۰۰ مطالعه برجسته منتشرشده در سه مجله معتبر روان‌شناسی را تکرار کند. نتیجه شوک‌آور این بود که فقط ۳۹ درصد از تکرارها نتایج معناداری مشابه با مطالعات اصلی نشان دادند. اندازه اثر در تکرارها به طور متوسط نصف اندازه اثر گزارش شده در مطالعات اصلی بود [۷۱]. این یافته نه فقط روان‌شناسی، بلکه تمامی علوم تجربی و به‌ویژه جامعه‌آماردانان را تحت تأثیر قرار دارد. اگر یافته‌های منتشرشده در مجلات معتبر تا این حد غیرقابل تکرارند، آیا مشکل صرفاً در روش‌های روان‌شناسی است، یا ریشه در شیوه‌های رایج تحلیل آماری دارد؟ پاسخ به این پرسش، انگشت اتهام را به‌سوی سوءاستفاده از روش‌های آماری به‌ویژه آزمون فرضیه‌های معناداری نشانه گرفت. در تحلیل‌های آماری، کمیت p -مقدار^۳، احتمال به‌دست آمدن نتایج مشاهده‌شده یا نتایجی افراطی‌تر از آن، تحت درست بودن فرضیه صفر^۴ (که بر اساس آن هیچ تفاوت یا رابطه‌ای بین متغیرها وجود ندارد) را نشان می‌دهد. به عبارت ساده‌تر، این کمیت می‌گوید: اگر در واقعیت هیچ تفاوت یا رابطه‌ای وجود نداشته باشد، چقدر احتمال دارد که داده‌ها به طور تصادفی چنین تفاوتی را نشان دهند؟ هرچه p -مقدار کوچک‌تر باشد، شواهد قوی‌تری بر ضد فرضیه صفر وجود دارد. معمولاً به طور قراردادی آستانه ۰/۰۵ به‌عنوان مرز معناداری آماری در نظر گرفته می‌شود. پژوهشگران حوزه فراتحلیل نشان دادند که فشار نهادی برای تولید نتایج معنادار آماری، منجر به شیوع رفتارهایی شده که بعدها «هک p -مقدار»^۵ نام گرفت. این اصطلاح به مجموعه‌ای از شیوه‌های تحلیلی فرصت‌طلبانه اشاره دارد که اگرچه هریک به‌تنهایی ممکن است از نظر فنی مجاز باشند، اما در مجموع احتمال دستیابی به نتایج معنادار آماری را به شدت افزایش می‌دهند. برخی از این شیوه‌ها عبارت‌اند از [۷۷]:

توقف اختیاری: ادامه گردآوری داده تا رسیدن به معناداری آماری انتخاب متغیرهای وابسته پس از مشاهده داده‌ها: آزمون چندین متغیر وابسته و گزارش تنها آن‌هایی که نتایج معنادار دارند.

حذف نقاط دورافتاده پس از تحلیل: حذف مشاهدات نامطلوب به بهانه دورافتاده بودن پس از مشاهده تأثیر آن‌ها بر نتایج.

افزودن متغیرهای کنترل به شیوه فرصت‌طلبانه: افزودن متغیرهای کنترل به مدل تا زمانی که نتایج معنادار شوند.

تغییر در تعریف متغیرهای اصلی: تغییر متغیر وابسته اصلی پس از مشاهده نتایج.

این شیوه‌ها که در ادبیات تخصصی با عنوان انعطاف‌پذیری تحلیلی شناخته می‌شوند [۵۲]، به پژوهشگر این امکان را می‌دهند که از میان چندین روش ممکن برای تحلیل داده‌ها، راهی را انتخاب کند که به نتیجه معنادار منجر می‌شود. نتیجه نهایی، افزایش کاذب نرخ خطای نوع اول (رد اشتباه فرضیه صفر یا اعلام وجود تفاوت یا رابطه درحالی‌که در واقعیت وجود ندارد) و تولید یافته‌هایی است که در پژوهش‌های بعدی قابل تکرار و تأیید نیستند.

۵-۲. واکنش نهادهای به بحران تکرارپذیری

نکته حائز اهمیت از منظر اخلاق آماری این است که بسیاری از پژوهشگران مرتکب هک p -مقدار با آگاهی و عمد نمی‌شدند. آن‌ها صرفاً در چارچوب فشارهای نهادی عمل می‌کردند: برای استخدام و ارتقای مرتبه به مقاله نیاز دارند، مجلات معتبر تمایل به انتشار نتایج معنادار دارند، و راهنماهای روش‌شناختی نیز به‌روشنی مشخص نکرده بودند که کدام یک از این شیوه‌ها غیراخلاقی هستند. به عبارت دیگر، ساختارهای نهادی علم به‌گونه‌ای طراحی شده بودند که رفتارهای فرصت‌طلبانه را تشویق می‌کردند [۶۸]. این وضعیت، اخلاق آماری را از حیطة رفتار فردی به حیطة بازطراحی نهادی وارد کرد. پرسش‌های تازه‌ای مطرح شدند:

• آیا دآوری هم‌تا باید نتایج غیرمعنادار را نیز به یک اندازه شایسته انتشار بداند؟

• آیا مجلات علمی باید طرح‌های پژوهشی را ملزم کنند تا میان «تحلیل تأییدی»^۶ (تحلیلی که برای آزمون فرضیه‌های از پیش تعیین‌شده انجام می‌شود) و «تحلیل اکتشافی»^۷ (تحلیلی که برای کشف الگوها و فرضیه‌های جدید در داده‌ها انجام می‌شود) تمایز قائل شوند؟

• آیا آماردانان به‌عنوان دروازه‌بانان روش‌شناختی، مسئولیتی در قبال آموزش و نظارت بر این شیوه‌ها دارند؟

1. John Ioannidis
2. Effect size
3. p-value
4. Null hypothesis

5. p-hacking
6. Confirmatory Analysis
7. Exploratory Analysis

بحران تکرارپذیری سرانجام برخی از نهادهای آماری را به واکنشی بی‌سابقه واداشت. در مارس ۲۰۱۶، انجمن آمار آمریکا بیانیه‌ای دربارهٔ p -مقدار منتشر کرد. این بیانیه که با همکاری گروهی از آماردانان برجسته تدوین شد، شش اصل را اعلام کرد که نقشی تعیین‌کننده در بازتعریف جایگاه اخلاقی آماردانان محسوب می‌شود [۲۲]:

۱. p -مقدار نمی‌تواند نشان دهد که فرضیهٔ صفر درست است یا اینکه یک اثر از نظر علمی مهم است.

۲. p -مقدار به‌تنهایی نمی‌تواند اندازهٔ یک اثر یا اهمیت یک نتیجه را نشان دهد.

۳. وجود یک تفاوت معنادار آماری لزوماً به معنای وجود یک تفاوت علمی یا عملی مهم نیست.

۴. انتخاب آستانهٔ ۰/۰۵ برای معناداری، یک قرارداد است و مبنای علمی یا فلسفی ضروری ندارد.

۵. p -مقدار به‌تنهایی نمی‌تواند معیار کافی برای ارزیابی یک فرضیه یا مدل باشد.

۶. p -مقدار به‌تنهایی نمی‌تواند شواهد موجود در داده‌ها را به طور کامل خلاصه کند.

اهمیت تاریخی این بیانیه در دو نکته بود. نخست، انجمن آمار آمریکا به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نهادهای حرفه‌ای بین‌المللی در حوزه آمار، رسماً اذعان کرد که سوءاستفاده از p -مقدار صرفاً یک مسئله فنی نیست، بلکه یک مسئلهٔ اخلاقی است. دوم، این بیانیه نشان داد که جامعهٔ آماردانان دیگر نمی‌تواند خود را ناظری بی‌طرف و منفعل در برابر شیوه‌های تحلیلی نادرست بداند. آماردانان وظیفه دارند در فرایندهای طراحی پژوهش، تحلیل داده و داوری مقالات، به طور فعال از تکرار رویه‌های فرصت‌طلبانه جلوگیری کنند. بحران تکرارپذیری و به دنبال آن بیانیهٔ انجمن آمار آمریکا، پیامدهای مهمی برای اخلاق آماری به همراه داشت که تا امروز ادامه دارد [۶۸، ۶۷]. یکی از مهم‌ترین این پیامدها، گسترش رویکرد «پیش‌ثبت نویسی» و «پروپوزال نویسی» بود. در این رویکرد، پژوهشگر موظف است پیش از دسترسی و مشاهده داده‌ها، فرضیه‌ها، متغیرها و روش تحلیل را ثبت کند تا تمایز میان تحلیل‌های تأییدی و تحلیل‌های اکتشافی حفظ شود [۶۷]. بسیاری از مجلات معتبر در علوم پزشکی و روان‌شناسی، پیش‌ثبت نویسی را به یکی از شروط انتشار مطالعات تجربی تبدیل کردند. این رویکرد، هم به‌عنوان سندی برای شفافیت پژوهش عمل می‌کند و هم به پژوهشگر کمک می‌کند تا مسیر پژوهش را تعیین کند. همچنین به خواننده (داور، استاد راهنما، یا مخاطب مقاله) نشان می‌دهد که کدام بخش‌های پژوهش از پیش برنامه‌ریزی شده و کدام بخش‌ها در حین پژوهش کشف شده‌اند.

تحول مهم دیگر، فاصله‌گرفتن تدریجی از اتکای صرف به آزمون معناداری و حرکت به‌سوی گزارش اندازه اثر، فاصله اطمینان و تحلیل‌های قوی‌تر بود [۳۶]. این تغییر، بازتاب نوعی دگرگونی معرفت‌شناختی در فهم شواهد آماری بود؛ دگرگونی که بر عدم قطعیت، اندازه اثر و بازتولیدپذیری^۱ (توانایی تولید نتایج مشابه با استفاده از داده‌های جدید و روش‌های مشابه) تأکید بیشتری داشت. بحران تکرارپذیری همچنین بر آموزش آمار اثر گذاشت. روشن شد که آموزش صرفاً فنی روش‌های آماری، بدون توجه به زمینه‌های تاریخی، فلسفی و اخلاقی آن‌ها، ناکافی است. از این‌رو، در بسیاری از دانشگاه‌ها مباحثی مانند اخلاق پژوهش کمی، بازتولیدپذیری و فلسفه استنباط آماری وارد برنامه‌های آموزشی تحصیلات تکمیلی شد [۵۳]. در سال‌های بعد، مفهوم تکرارپذیری نیز خود به موضوعی نظری تبدیل شد. برخی پژوهشگران میان تکرارپذیری فنی (دستیابی به نتایج یکسان با همان داده‌ها)، تکرارپذیری تحلیلی (کسب نتایج مشابه با تحلیل مستقل داده‌های مشابه)، و تکرارپذیری علمی (تولید یافته‌های مشابه در پژوهش‌های مستقل) تمایز قائل شدند [۷۳]. هر یک از این سطوح، مسائل اخلاقی و روش‌شناختی متفاوتی را مطرح می‌کنند. با این حال، بحران تکرارپذیری پایان چالش‌های اخلاق آماری نبود. هم‌زمان با گسترش داده‌های بزرگ (مه داده)^۲، یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مسائل تازه‌ای درباره حریم خصوصی، سوگیری الگوریتمی، شفافیت مدل‌ها و عدالت آماری پدید آمد؛ مسائلی که بسیاری از مفروضات سنتی اخلاق پژوهش را به چالش کشیده‌اند. از این‌رو، اخلاق آماری در قرن بیست و یکم بیش از هر زمان دیگر به مسئله‌ای میان‌رشته‌ای و مرتبط با سیاست‌گذاری علم و فناوری تبدیل شده است.

۶. عصر داده‌های بزرگ

هم‌زمان با فروکش کردن نسبی غبار بحران تکرارپذیری، تحول دیگری در حال وقوع بود که مرزهای اخلاق آماری را فراتر از چارچوب‌های سنتی گسترش داد. عصر داده‌های بزرگ و یادگیری ماشین پرسش‌های تازه‌ای را پیش کشید که پاسخ به آن‌ها با اصول منشور اخلاقی نورنبرگ و گزارش بلومونت (که عمدتاً برای کارآزمایی‌های بالینی با آزمودنی‌های انسانی طراحی شده بودند) به‌سادگی ممکن نبود. این دوره، اخلاق آماری را با سه چالش اساسی روبه‌رو ساخت: بحران اخذ رضایت آگاهانه در مقیاس کلان، مسئلهٔ سوگیری الگوریتمی و عدالت آماری، و بازتعریف مسئولیت آماردان در زنجیرهٔ ارزش داده [۷۰، ۷۶].

۶-۱. بحران اخذ رضایت آگاهانه

مدل سنتی «اخذ رضایت آگاهانه»^۳ که ریشه در منشور اخلاقی نورنبرگ دارد، بر سه پایه استوار بود: آگاهی (آزمودنی از ماهیت،

1. Replicability
2. Big data

3. Informed consent

کنند. این یافته‌ها، اخلاق آماری را از حیطه رفتار حرفه‌ای فردی به حیطه عدالت اجتماعی وارد کرده‌اند [۷۰].

نمونه ۱: در ایالات متحده، سامانه‌هایی مانند COMPAS^۱ برای پیش‌بینی احتمال ارتکاب جرم در زندانیان و کمک به قضات در تصمیم‌گیری درباره وثیقه و آزادی مشروط، از الگوریتم‌های پیش‌بینی جرم استفاده می‌شود. تحقیقات نشان داد که این الگوریتم‌ها به طور نظام‌مند نرخ خطای مثبت بالاتری برای زندانیان سیاه‌پوست و نرخ خطای منفی بالاتری برای زندانیان سفیدپوست تولید می‌کنند. به تعبیر دیگر، خروجی الگوریتم حاکی از آن بود که زندانیان سیاه‌پوست با احتمالی بالاتر از مقدار واقعی مرتکب جرم مجدد می‌شوند، درحالی‌که این احتمال برای زندانیان سفیدپوست به میزان قابل‌توجهی پایین‌تر از واقعیت برآورد می‌گردد. این سوگیری، صرف‌نظر از دقت کلی الگوریتم (که معیاری آماری است)، نقض آشکار اصل عدالت در گزارش بلومونت بود [۱۹].

نمونه ۲: شرکت‌های بزرگ فناوری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای غربالگری پرونده‌های متقاضیان کار استفاده می‌کنند. در سال ۲۰۱۸، گزارش شد که الگوریتم استخدام شرکت آمازون که بر اساس داده‌های تاریخی استخدام (که عمدتاً مرد بودند) آموزش دیده بود. الگوریتم، حضور نشانه‌های زنانه (از جمله نام یا واژگان مرتبط با زنان) در پرونده را به‌عنوان شاخصی برای کاهش شایستگی تعبیر می‌کرد و به طور نظام‌مند به متقاضیان زن امتیاز منفی می‌داد. [۳۷]. از دیدگاه آماری، این سوگیری‌ها ریشه در چند عامل دارند [۲۶]:

سوگیری داده‌های تاریخی: الگوریتم‌ها از داده‌های گذشته یاد می‌گیرند. اگر داده‌های تاریخی خود حامل سوگیریهای اجتماعی باشند، الگوریتم نیز همان سوگیری‌ها را به‌عنوان الگو، شناسایی و بازتولید می‌کند. نمونه بارز این مسئله، الگوریتم استخدامی است که بر اساس داده‌های مردسالارانه گذشته آموزش دیده است؛ چنین الگوریتمی، نه به دلیل ارزیابی واقعی توانمندی‌ها، بلکه به دلیل تحمیل الگوهای تاریخی، به‌طور نظام‌مند رزومه‌های زنان را رد می‌کند.

سوگیری در تعریف متغیر هدف: انتخاب متغیر هدف هرگز یک تصمیم خنثی و صرفاً فنی نیست؛ بلکه سرشار از ارزش‌گذاری است. اگر متغیرهایی چون خطر ارتکاب جرم یا شایستگی شغلی با سوگیری‌های نژادی، جنسیتی یا طبقاتی تعریف شوند، الگوریتم نیز همان سوگیری‌ها را به‌عنوان واقعیت بازتاب خواهد داد.

سوگیری در داده‌های برچسب‌گذاری: در یادگیری با نظارت^۵، برچسب‌هایی که به داده‌ها نسبت داده می‌شوند ممکن است خود

اهداف، خطرات و منافع پژوهش مطلع شود)، اختیار (رضایت بدون اجبار و باقابلیت انصراف در هر زمان داده شود)، و فردیت (رضایت مربوط به یک پژوهش مشخص با یک آزمودنی مشخص است). در عصر داده‌های بزرگ، هر سه پایه به چالش کشیده می‌شوند [۶۵]

چالش آگاهی: در پژوهش‌های مبتنی بر داده‌های بزرگ، اغلب داده‌ها از میلیون‌ها کاربر بدون آگاهی مستقیم آن‌ها گردآوری می‌شوند. کاربران اپلیکیشن‌ها، شبکه‌های اجتماعی، فروشگاه‌های آنلاین و حتی دستگاه‌های پوشیدنی مانند ساعت‌های هوشمند، روزانه حجم زیادی از داده‌های رفتاری، مکانی، زیستی و مالی تولید می‌کنند. این داده‌ها بعداً برای مقاصد پژوهشی (و نیز تجاری) مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما آیا کاربری که هنگام نصب یک اپلیکیشن، شرایط و ضوابط پنجاه صفحه‌ای را بدون خواندن تأیید می‌کند، رضایت آگاهانه داده است؟ اکثر پژوهشگران حوزه اخلاق داده بر این باورند که مدل سنتی اخذ رضایت در مقیاس کلان عملاً غیرقابل اجرا است [۶۵].

چالش اختیار: در بسیاری از موارد، رضایت کاربران به داده‌هایشان نه یک انتخاب آزادانه، بلکه شرطی برای دسترسی به خدمات ضروری است. اگر برای استفاده از یک سرویس بانکی یا درمانی ناچار به پذیرش شرایط استفاده‌ای باشیم که اجازه استفاده ثانویه از داده‌ها را می‌دهد، آیا واقعاً اختیار داریم؟ این پدیده که «اجبار ساختاری»^۱ نام گرفته، یکی از چالش‌های اصلی اخلاق داده در عصر حاضر است [۲۶].

چالش فردیت: پژوهش‌های مبتنی بر داده‌های بزرگ اغلب از داده‌های ثانویه (داده‌هایی که برای هدف دیگری گردآوری شده‌اند) استفاده می‌کنند. در چنین پژوهش‌هایی، به دلیل انبوهی داده‌ها و عدم امکان شناسایی و دسترسی به تمامی افراد، رضایت‌گیری انفرادی عملاً غیرممکن است. آیا استفاده ثانویه از این داده‌ها بدون رضایت مجاز است؟ پاسخ به این پرسش در حوزه‌های مختلف متفاوت است. در اتحادیه اروپا، مقررات عمومی حفاظت از داده^۲ که در ۲۰۱۸ به اجرا درآمد، رویکردی سخت‌گیرانه اتخاذ کرده و استفاده ثانویه از داده‌های شخصی را بدون رضایت صریح ممنوع می‌کند، مگر در موارد استثنایی با منفعت عمومی روشن [۴۵].

۶-۲. سوگیری الگوریتمی

اگر بحران رضایت آگاهانه به ورودی‌های سامانه‌های داده‌محور مربوط می‌شود، مسئله «سوگیری الگوریتمی»^۳ به خروجی‌های آن‌ها مرتبط است. در دهه گذشته، انبوهی از مطالعات نشان داده‌اند که الگوریتم‌های یادگیری ماشین (که بر پایه روش‌های آماری ساخته شده‌اند) می‌توانند نابرابری‌های اجتماعی را بازتولید یا حتی تشدید

1. Structural coercion

2. General Data Protection Regulation (GDPR)

3. Algorithmic bias

4. Correctional Offender Management Profiling for Alternative Sanctions (COMPAS)

5. Supervised learning

تمامی مراحل زنجیره ارزش داده حضور فعال داشته باشد [۴۷،۲۳]

طراحی جمع‌آوری داده: آماردان باید در مرحله طراحی جمع‌آوری داده، اطمینان حاصل کند که فرایند اخذ رضایت آگاهانه (با در نظر گرفتن محدودیت‌های عصر داده‌های بزرگ) به درستی طراحی شده و گروه‌های آسیب‌پذیر مورد حمایت قرار گرفته‌اند.

مدیریت و حاکمیت داده: آماردان مسئول است که داده‌ها به گونه‌ای مدیریت شوند که حریم خصوصی افراد حفظ شود. روش‌هایی مانند ناشناس‌سازی و رمزنگاری، برای حفظ حریم خصوصی افراد، بخشی از ابزارهای اخلاقی آماردان امروزی هستند [۴۲].

طراحی الگوریتم و انتخاب معیار: آماردان باید در فرایند طراحی الگوریتم، ضمن توجه به دقت آماری، پیامدهای توزیعی الگوریتم (یعنی تأثیر آن بر گروه‌های مختلف) را نیز ارزیابی کند. انتخاب معیار بهینه‌سازی (که ممکن است ترکیبی از دقت و عدالت باشد) یک تصمیم اخلاقی است که آماردان نمی‌تواند آن را صرفاً به کارفرما یا ناظران بیرونی واگذار کند.

ارزیابی و ممیزی: پس از استقرار سامانه، آماردان مسئول ممیزی مستمر عملکرد آن از نظر دقت، عدالت و عدم سوگیری است. این ممیزی‌ها باید مستقل و شفاف باشند.

در پاسخ به این چالش‌ها، حوزه‌های میان‌رشته‌ای جدیدی در سال‌های اخیر شکل گرفته‌اند. «یادگیری ماشین مسئول»^۲ و «اخلاق الگوریتم»^۳ تلاش می‌کنند تا روش‌های آماری و یادگیری ماشین را با ارزش‌های اجتماعی همچون عدالت، شفافیت، پاسخ‌گویی و حریم خصوصی پیوند دهند [۴۹]. این حوزه‌ها با پرسش‌های اساسی دست‌وپنجه نرم می‌کنند که پاسخ به آن‌ها نیازمند همکاری تنگاتنگ آماردانان، دانشمندان علوم کامپیوتر، حقوق‌دانان، فیلسوفان اخلاق و جوامع متأثر از الگوریتم‌هاست. برخی از این پرسش‌ها عبارت‌اند از:

تفسیرپذیری: آیا الگوریتم‌ها باید «تفسیرپذیر»^۴ باشند یا دقت بالای مدل‌های «جعبه سیاه»^۵ مجاز است؟ مدل‌های تفسیرپذیر، نظیر درخت تصمیم یا رگرسیون خطی، امکان درک نحوه تصمیم‌گیری یا پیش‌بینی خود را برای کاربر فراهم می‌کنند. در مقابل، مدل‌های جعبه سیاه، مانند شبکه‌های عصبی عمیق، فرایند داخلی خود را شفاف نمی‌سازند و کاربر نمی‌تواند به‌سادگی مسیر دستیابی به خروجی را دنبال کند. این مدل‌ها که اغلب از دقت بالایی برخوردارند، به دلیل عدم شفافیت، به‌ویژه در کاربردهای حساس همچون پزشکی یا قضایی، با چالش‌های اخلاقی جدی روبه‌رو هستند.

پاسخگویی: چه کسی در قبال سوگیری‌ها یا تولید محتوای

حامل سوگیری‌های انسانی باشند. به عنوان مثال، اگر به تصاویر پزشکی، برچسب «بیمار» یا «سالم» توسط پزشکانی زده شود که نسبت به برخی گروه‌های نژادی تشخیص‌های متفاوتی دارند، الگوریتم نیز همان تفاوت‌های تشخیصی را بازتولید می‌کند.

سوگیری در حجم نمونه‌های زیرگروه‌ها: اگر برخی از گروه‌های جمعیتی در داده‌های آموزشی نمونه کوچکی داشته باشند، الگوریتم پیش‌بینی‌هایی با دقت کم برای آن‌ها تولید می‌کند. این وضعیت به‌ویژه در گروه‌های اقلیت یا به‌حاشیه‌رانده شده مشاهده می‌شود.

۳.۶. عدالت الگوریتمی

یکی از چالش‌های اصلی اخلاق آماری در عصر داده‌های بزرگ، تعارض میان معیارهای سنتی دقت و معیارهای عدالت است. برای «عدالت الگوریتمی»^۱ تعریف‌های مختلفی از عدالت ارائه شده است که هر یک پیامدهای متفاوتی برای طراحی سامانه‌های آماری دارند [۵۹]:

عدالت به عنوان برابری آماری: الگوریتم باید پیش‌بینی‌های مثبت را با نسبتی یکسان در گروه‌های مختلف جمعیتی (مثلاً نژادی یا جنسیتی) تخصیص دهد. ایراد این تعریف آن است که اگر نرخ پایه پدیده در گروه‌ها متفاوت باشد (مثلاً نرخ واقعی وقوع جرم در دو گروه متفاوت باشد)، برابری آماری منجر به پیش‌بینی‌های نادقیق می‌شود.

عدالت به عنوان برابری نرخ خطا: لازم است الگوریتم به گونه‌ای طراحی شود که نرخ خطای مثبت و خطای منفی در گروه‌های گوناگون جمعیتی به یکسان باشد. این تعریف که درواکنش به نقدهای وارد بر برابری آماری شکل گرفت، به مراتب سخت‌گیرانه‌تر است و اغلب با دقت آماری در تعارض قرار می‌گیرد.

نکته حائز اهمیت آن است که این تعریف‌های مختلف از عدالت معمولاً با یکدیگر و با معیار دقت کلی ناسازگار هستند. به عبارت دیگر، در بسیاری از مسائل، نمی‌توان هم‌زمان دقت کلی را بیشینه کرد و همگی تعریف‌های عدالت را برآورده ساخت [۵۹]. این ناسازگاری، آماردانان را با پرسشی اساسی روبه‌رو می‌کند: کدام معیار را باید اولویت دهیم؟ پاسخ به این پرسش صرفاً فنی نیست، بلکه یک تصمیم اخلاقی و سیاسی است که باید با مشارکت ذی‌نفعان (از جمله گروه‌های آسیب‌پذیر) اتخاذ شود.

۴-۶. بازتعریف نقش آماردان

چالش‌های عصر داده‌های بزرگ، نقش و مسئولیت آماردان را دگرگون ساخته است. اگر در گذشته آماردان عمدتاً به عنوان تحلیلگر فنی در انتهای زنجیره پژوهش قرار داشت، امروزه از او انتظار می‌رود در

1. Algorithmic fairness
2. Responsible Machine Learning
3. Algorithmic ethics

4. Interpretable
5. Black-box

پزشکی مانند کامل الصناعات الطبیعة، فردوس الحکمة، الحاوی فی الطب (اثر معروف رازی)، ادب الطیب، طب روحانی، سرالطب، محنة الطیب و خواص التلامیذ فصل‌ها یا بخش‌هایی مستقل به اخلاق پزشکی اختصاص یافته است. این سنت غنی اخلاق حرفه‌ای در پزشکی ایرانی-اسلامی، زمینه‌ای فرهنگی برای توجه به اخلاق در سایر حوزه‌های علمی فراهم آورد [۱۸]. در همین سنت فلسفی-اخلاقی، کتاب «اخلاق ناصری» تألیف خواجه نصیرالدین طوسی (درگذشته ۶۷۲ قمری) رویداد مهمی در تدوین نظام‌مند اخلاق حرفه‌ای در تمدن ایرانی به شمار می‌رود. خواجه‌نصیر که در دوران اقامت اجباری خود در قهستان و به درخواست حاکم آن دیار، این کتاب را به زبان فارسی نگاشت، حکمت را به دو شاخه نظری و عملی تقسیم می‌کند و حکمت عملی را شامل سه بخش تهذیب اخلاق، تدبیر منزل و سیاست مدن می‌داند. او فضایل اخلاقی را در چهار جنس حکمت، شجاعت، عفت و عدالت خلاصه می‌کند و عدالت را به معنای مساوات و اعتدال تعریف می‌نماید. این مفهوم از عدالت به‌عنوان مساوات، پیشینه‌ای کهن در اندیشه اخلاقی ایران دارد که می‌تواند با اصول مدرن عدالت آماری (مانند پرهیز از سوگیری، انصاف در تحلیل و عدالت الگوریتمی) پیوند داده شود. همچنین تأکید خواجه‌نصیر بر رعایت حقوق دیگران و مسئولیت اخلاقی انسان در قبال اعمال خویش، می‌تواند زمینه‌ای فرهنگی برای شکل‌گیری خودآگاهی اخلاقی در میان دانشوران ایرانی فراهم آورد.

۷-۲. قوانین و شیوه‌نامه‌های اخلاقی

اگرچه آمار رسمی در ایران سابقه‌ای دیرینه دارد [۱۷] و سرشماری‌های مدرن از اواسط قرن چهاردهم شمسی به شکلی نظام‌مند اجرا شده‌اند [۱۶]، اما ملاحظات اخلاقی صریح و مدون در کارهای آماری، تا سال‌های اخیر حضوری آشکار در اسناد بالادستی کشور نداشته است. نخستین گام‌های نظام‌مند برای نهادینه‌سازی اخلاق در پژوهش در ایران، در حوزه علوم پزشکی برداشته شد. در سال ۱۳۷۰، آیین‌نامه اخلاق در پژوهش به تصویب رسید. در سال ۱۳۷۷، کمیته کشوری اخلاق تشکیل شد و در سال ۱۳۸۱، مرکز تحقیقات اخلاق و تاریخ پزشکی با هدف نظام‌مند کردن پژوهش‌های همه‌گیرشناسی و کارآزمایی‌های بالینی تأسیس گردید. از آنجا که این مطالعات به شدت به روش‌های آماری وابسته هستند، فعالیت‌های این مرکز به طور غیرمستقیم به نهادینه‌سازی ملاحظات اخلاقی در کارهای آماری پژوهش‌ها کمک کرد [۷]. در کنار تحولات پزشکی، قوانین بالادستی متعددی چارچوب حقوقی حفاظت از مالکیت فکری و اصالت علمی را در ایران شکل داده‌اند: قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان (۱۳۴۸)، قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی (۱۳۵۲)، قانون حمایت از حقوق پدیدآورندگان نرم‌افزارهای رایانه‌ای (۱۳۷۹)، و قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در تهیه آثار علمی (۱۳۹۶) [۲، ۵، ۱۰، ۱۲]. قانون

نادرست، توهین آمیز یا تبعیض آمیز توسط این مدل‌ها و آسیب‌های ناشی از تصمیمات الگوریتمی پاسخ‌گوست؟ توسعه‌دهنده الگوریتم؟ صاحب داده؟ کاربر نهایی؟

حریم خصوصی: چگونه می‌توان حریم خصوصی را در عصر داده‌های بزرگ حفظ کرد بدون آنکه توانایی پژوهش‌های مفید اجتماعی را از دست بدهیم؟ آیا می‌توان به مدل‌هایی که بر روی میلیاردها داده استخراج شده از اینترنت (بدون آگاهی و رضایت صاحبان آن‌ها) آموزش دیده است، رضایت آگاهانه نسبت داد؟

مالکیت فکری: هم‌زمان با ظهور مدل‌های زبانی هوش مصنوعی مولد، پرسش‌های تازه‌ای درباره اصالت داده‌ها، مالکیت فکری، و مسئولیت در قبال محتوای تولیدشده توسط ماشین مطرح شده است. مدل‌های زبانی بزرگ بر روی میلیاردها متن، تصویر و اثر هنری از اینترنت آموزش می‌بینند که بسیاری از آن‌ها دارای حق مؤلف (حق نشر) هستند. آیا استفاده از این داده‌ها بدون اجازه صاحبان آن، نقض حق مؤلف محسوب می‌شود؟ اگر یک مدل زبانی، متنی تولید کند که شباهت زیادی به آثار یک نویسنده یا هنرمند خاص داشته باشد، آیا این خروجی، اثری اصیل و متعلق به توسعه‌دهنده مدل است، یا نقض حق مؤلف به شمار می‌رود؟ چه کسی صاحب حقوق معنوی این آثار است؟

این پرسش‌ها نشان می‌دهد که اخلاق آماری در آغاز مرحله‌ای تازه است؛ مرحله‌ای که در آن مرزهای سنتی «اخلاق در آمار» و «عدالت اجتماعی» از میان برمی‌خیزد. آماردان امروز دیگر تحلیلگری بی‌طرف نیست، بلکه ناگزیر به تأمل در نسبت داده، قدرت و عدالت اجتماعی است.

۷. اخلاق آماری در ایران

پرسش اساسی برای جامعه آماری ایران این است: تاریخچه توجه به ملاحظات اخلاقی در کارهای آماری در ایران چگونه بوده است؟ آیا می‌توان از اخلاق آماری در ایران به‌عنوان یک حوزه منضبط و دارای تاریخچه مستند سخن گفت؟ پاسخ به این پرسش، اگر با صداقت تاریخی داده شود، آمیخته از غیبت‌ها، ضرورت‌ها و فرصت‌هایی است که در ادامه به آنها می‌پردازیم.

۷-۱. ریشه‌های کهن

توجه به قوانین و مقررات اخلاقی در پژوهش (به‌ویژه در حوزه پزشکی) در ایران پیشینه‌ای دیرینه دارد. در ایران باستان، در وندیداد (یکی از بخش‌های اوستا) و نیز در قوانین حمورابی (که در میان‌رودان باستان رواج داشت و بر بخش‌هایی از ایران نیز تأثیر گذاشته بود)، به اخلاق پزشکی و حتی مجازات سرپیچی از آن اشاره شده است. این متون کهن نشان می‌دهند که ایده مسئولیت حرفه‌ای و پاسخگویی در قبال خطاهای علمی پیشینه‌ای چندین هزارساله در تمدن ایرانی دارد. پس از اسلام نیز، در کتب معتبر

انتشار و دسترسی آزاد به اطلاعات (۱۳۸۸) و قانون مدیریت داده‌ها و اطلاعات ملی (۱۴۰۱) نیز گام‌های مهمی در جهت ساماندهی به داده‌های ملی و شخصی برداشته‌اند [۶، ۳]. راهنمای کشوری اخلاق در انتشار آثار پژوهشی نیز در سال ۱۳۹۷ توسط کمیته ملی اخلاق در پژوهش به تصویب رسیده است [۹].

در حوزه‌های تخصصی دیگر نیز اسناد اخلاقی تدوین شده است: آئین رفتار حرفه‌ای برای حسابداران (۱۳۹۶)، نظام‌نامه رفتار حرفه‌ای اخلاقی در مهندسی ساختمان (۱۳۹۵) و نظام‌نامه اخلاق حرفه‌ای سازمان نظام روان‌شناسی (۱۳۸۶) [۱، ۴، ۸]. همچنین در حوزه هوش مصنوعی، راهنمای استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی در پژوهش (بنیاد ملی علم، ۱۴۰۴) و آداب نامه استفاده از ابزار هوش مصنوعی مولد (دانشگاه تهران، ۱۴۰۴)، سند ملی هوش مصنوعی جمهوری اسلامی ایران (شورای عالی انقلاب فرهنگی، ۱۴۰۲) گام‌هایی در جهت تنظیم اخلاقی این فناوری‌ها محسوب می‌شوند [۱۳، ۱۴، ۱۵]. اما مهم‌ترین تحول در حوزه اخلاق آماری، تصویب شیوه‌نامه اخلاقی برای کارهای آماری در سال ۱۴۰۴ توسط انجمن آمار ایران است [۱۱]. این شیوه‌نامه که با الهام از شیوه‌نامه‌های اخلاق آماری انجمن‌های بین‌المللی و با توجه به بافت فرهنگی و حقوقی ایران تدوین شده، حوزه‌هایی مانند مسئولیت در قبال آزمودنی‌ها، حریم خصوصی داده‌ها، صداقت در تحلیل و تضاد منافع را پوشش می‌دهد. با این حال، صرف تصویب یک سند اخلاقی کافی نیست؛ چالش اصلی در اجرا و نظارت بر آن است. تجربه موفق کارگروه‌های اخلاق در پژوهش‌های پزشکی می‌تواند الگویی برای ایجاد ساختارهای مشابه در حوزه آمار باشد.

۷-۳ چالش‌های اخلاق آماری در ایران

فراتر از غیبت‌های نهادی، اخلاق آماری در ایران با چالش‌های بومی خاصی مواجه است:

چالش آموزش و فرهنگ‌سازی: آموزش دانشگاهی آمار در ایران از دهه ۱۳۴۰ تا امروز، عمدتاً تحت‌تأثیر رویکرد ریاضی‌وار و فنی بوده است. در این چارچوب، تاریخ، فلسفه و اخلاق آمار موضوعاتی حاشیه‌ای یا غیرضروری تلقی می‌شوند. مفاهیم اخلاقی به‌ندرت در دروس موجود مطرح می‌گردند. پژوهش‌های تاریخی و فلسفی درباره اخلاق آماری در ایران بسیار محدود است و این غیبت، به معنای فقدان خودآگاهی تاریخی در جامعه آماری ایران است. دانشجویان بیشتر با چگونگی تحلیل داده آشنا می‌شوند تا با چرایی انتخاب مسئله و پیامدهای اجتماعی کاربرد روش‌ها.

چالش داده‌های حساس: دسترسی به داده‌های حساس (مانند داده‌های پزشکی، مالی و رفتاری) با محدودیت‌های قانونی و امنیتی همراه است. «قانون انتشار و دسترسی آزاد به اطلاعات» [۶] و «قانون مدیریت داده‌ها و اطلاعات ملی» [۳] می‌توانند

چارچوبی برای دسترسی به داده‌ها ایجاد کرده، اما عدم شفافیت در فرایندهای دسترسی به داده‌های دولتی، پژوهشگران را با چالش دشواری روبه‌رو می‌کند: چگونه می‌توان پژوهش آماری معتبر انجام داد بدون آنکه به حریم خصوصی افراد تجاوز کرد یا با مقررات امنیتی در تضاد افتاد؟

چالش استانداردپذیری و تکرارپذیری: بحران تکرارپذیری در ایران با کمبود منابع و محدودیت دسترسی به داده‌های باکیفیت تشدید شده است. فشار برای افزایش تعداد مقالات منتشرشده می‌تواند به شیوع رفتارهای فرصت‌طلبانه (مشابه p -مقدار) منجر شود. با توجه به چالش‌های موجود، می‌توان دست‌کم چهار ضرورت را برای نهادینه‌سازی اخلاق آماری در ایران برشمرد:

توسعه و روزآمدسازی شیوه‌نامه اخلاقی: انجمن آمار ایران با تصویب شیوه‌نامه اخلاقی برای کارهای آماری در سال ۱۴۰۴ گام مهمی برداشته است. ضرورت دارد این شیوه‌نامه با مشارکت گسترده اعضای انجمن و با توجه به تحولات سریع فناوری (مانند هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ) به طور پیوسته روزآمدسازی شود و سازوکارهای اجرایی و نظارتی مؤثری برای آن تدوین گردد. گنجاندن موضوع اخلاق آماری در برنامه درسی وزارت علوم و انجمن آمار ایران می‌تواند با افزودن دروسی با موضوع اخلاق آماری به برنامه درسی مقاطع مختلف، گامی اساسی در جهت ارتقای خودآگاهی تاریخی و اخلاقی دانشجویان بردارند. راهنمای استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی در پژوهش [۱۳] می‌تواند الگویی برای تدوین راهنماهای مشابه در حوزه آمار باشد.

ایجاد سازوکارهای نظارت بر پژوهش‌های آماری: باید دامنه فعالیت کارگروه‌های اخلاق در پژوهش (که اکنون عمدتاً در علوم پزشکی فعال‌اند) به پژوهش‌های آماری در سایر حوزه‌ها نیز گسترش یابد. همچنین می‌توان سازوکارهای خاصی برای ممیزی مطالعات تکرارپذیر و بررسی شیوع p -مقدار در نشریات علمی ایران طراحی کرد.

تشویق به انجام پژوهش در حوزه اخلاق آماری: این مقاله خود دعوتی است برای جدی‌گرفتن پژوهش‌ها درباره اخلاق آماری و چالش‌های پیرامون آن و بهره‌گیری از تجربیات بین‌المللی برای بومی‌سازی اخلاق آماری در ایران. این موضوع نیازمند همکاری تاریخ‌نگاران علم، آماردانان و فیلسوفان اخلاق است. انجمن آمار ایران می‌تواند نقشی محوری در این مسیر ایفا کند. خبرنامه و نشریات انجمن به‌عنوان بستری برای گفتگوی غیر رسمی اما مستند میان اعضای انجمن، ظرفیت آن را دارد که:

- موضوع اخلاق آماری را از حاشیه به متن گفتگوهای حرفه‌ای بیاورد.
- تجربیات آماردانان ایرانی در مواجهه با چالش‌های اخلاقی را

گردآوری و مستند کند.

• زمینه‌ساز روزآمدسازی و توسعه شیوه‌نامه اخلاقی مصوب انجمن شود.

• پل ارتباطی میان جامعه آماری ایران و تجربیات بین‌المللی در زمینه اخلاق آماری ایجاد کند.

۸. نتیجه‌گیری

این مقاله با مروری بر تاریخ اخلاق آماری آغاز شد و با نگاهی به وضعیت ایران پایان یافت. فاصله میان نهادهای قدرتمند اخلاق‌پژوهش در کشورهای پیشرو و غیبت نسبی گفتگوی تخصصی در ایران، هم هشدار است و هم فرصت. هشدار از آن رو که غفلت از اخلاق آماری می‌تواند اعتبار پژوهش‌های علمی و اعتماد عمومی به آمار را خدشه‌دار کند. فرصت از آن رو که ایران می‌تواند با الهام از تجربیات بین‌المللی و تکیه بر ریشه‌های کهن اخلاق‌پژوهش در فرهنگ خود و تجربیات موفق کارگروه‌های اخلاق پزشکی، الگویی بومی و پیشرو در اخلاق آماری ارائه دهد. سیر تاریخی این مقاله روایتی از تحول تدریجی خودآگاهی اخلاقی جامعه آماردانان بود. این روایت چند درس اساسی برای آینده دارد

• روش‌شناسی صحیح و دقت فنی نمی‌تواند فقدان اخلاق در طراحی پژوهش یا کاربرد نتایج را جبران کند. اتکا به وجدان فردی برای جلوگیری از سوءاستفاده‌های نظام‌مند کافی نیست.

• اخلاق آماری نیازمند نهادهای بازدارنده است.

• فشارهای نهادی می‌توانند به فساد تدریجی رویه‌ها منجر شوند.

منابع

• عدالت، دقت را به چالش می‌کشد. آماردانی که تنها دقت کلی را پیشینه می‌کند، ممکن است ناآگاهانه به بازتولید نابرابری‌ها کمک کند.

در افق پیشرو، چالش‌های تازه‌ای در حوزه هوش مصنوعی مولد (پرسش از رضایت آگاهانه و مسئولیت در قبال محتوای تولیدشده)، تعارض حریم خصوصی با منفعت عمومی (تجربه کووید-۱۹)، و حکمرانی داده (نحوه جلوگیری از استثمار و تبعیض توسط شرکت‌های بزرگ فناوری) وجود دارد. تاریخ اخلاق آماری ما را به بازاندیشی در پرسشی اساسی فرامی‌خواند: آمار صرفاً مجموعه‌ای از روش‌های کمی است، یا حوزه‌ای از دانش با بارهای اجتماعی و اخلاقی عمیق؟ پاسخ دوم (که شواهد تاریخی این مقاله به نفع آن انباشته شده) اخلاق آماری را به عرصه‌ای گسترده بدل می‌کند که در آن پرسش از قدرت، نابرابری، عدالت و مسئولیت اجتماعی در مرکز توجه قرار می‌گیرد.

قدردانی و تشکر

این مقاله به پیشنهاد کارگروه اخلاق انجمن آمار ایران توسط نویسنده تهیه شده است. از نظرات ارزشمند اعضای کارگروه، آقایان دکتر محمد آرشی، دکتر علی رجالی، دکتر محمدرضا فقیهی، دکتر رحیم محمودوند و دکتر حمید نیلی ثانی در تدوین مقاله قدردانی می‌کنم. همچنین از آقای دکتر علی فرازمند سردبیر محترم نامه علوم پایه و آقای دکتر محمدقاسم وحیدی اصل که نسخه اولیه مقاله را مطالعه کردند و نظرات ارزشمندی ارائه نمودند، تشکر می‌کنم.

۱. آئین رفتار حرفه‌ای برای حسابداران (۱۳۹۶). جامعه حسابداران رسمی ایران.
۲. قانون حمایت حقوق مؤلفان و مصنفان و هنرمندان (۱۳۴۸). مصوب مجلس شورای ملی.
۳. قانون مدیریت داده‌ها و اطلاعات ملی (۱۴۰۱). مصوب مجلس شورای اسلامی.
۴. نظام‌نامه رفتار حرفه‌ای اخلاقی در مهندسی ساختمان (۱۳۹۵). مصوب وزارت راه و شهرسازی.
۵. قانون پیشگیری و مقابله با تقلب در تهیه آثار علمی (۱۳۹۶). مصوب مجلس شورای اسلامی.
۶. قانون انتشار و دسترسی آزاد به اطلاعات (۱۳۸۸). مصوب مجلس شورای اسلامی.
۷. قوانین، دستورالعمل‌ها و راهنماهای اخلاق در پژوهش‌های پزشکی (۱۴۰۱). مصوب وزارت بهداشت و درمان و آموزش پزشکی.
۸. نظام‌نامه اخلاق حرفه‌ای سازمان نظام روان‌شناسی (۱۳۸۶). مصوب سازمان نظام روان‌شناسی و مشاوره.
۹. راهنمای کشوری اخلاق در انتشار آثار پژوهشی (۱۳۹۷). مصوب کمیته ملی اخلاق در پژوهش.
۱۰. قانون حمایت از حقوق پدیدآورندگان نرم‌افزارهای رایانه‌ای (۱۳۷۹). مصوب مجلس شورای اسلامی.
۱۱. شیوه‌نامه اخلاقی برای کارهای آماری (۱۴۰۴). مصوب هیئت‌مدیره انجمن آمار ایران.
۱۲. قانون ترجمه و تکتیر کتب و نشریات و آثار صوتی (۱۳۵۲). مصوب مجلس شورای ملی.
۱۳. راهنمای استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی در پژوهش (۱۴۰۴). مصوب بنیاد ملی علم.
۱۴. آداب نامه استفاده از ابزار هوش مصنوعی مولد در تهیه مستندات علمی دانشجویان در دانشگاه تهران (۱۴۰۴). مصوب دانشگاه تهران.
۱۵. سند ملی هوش مصنوعی جمهوری اسلامی ایران (۱۴۰۲). مصوب شورای عالی انقلاب فرهنگی.
۱۶. وحیدی اصل، محمدقاسم (۱۴۰۳). تاریخ آمار، انتشارات مبتکران.

۱۷. تنکابنی، حمید (۱۳۸۳). *درآمدی بر دیوان سالاری در ایران*، انتشارات علمی و فرهنگی، تهران.
۱۸. نیک روان فرد، نازیلا (۱۴۰۲). تاریخچه اخلاق در پژوهش معاصر، *دایره المعارف اخلاق پزشکی اسلامی*، صص ۲۷-۱.
19. Angwin, J., Larson, J., Mattu, S. and Kirchner, L. (2016). *Machine bias*. ProPublica.
20. Annas, G. J. and Grodin, M. A. (Eds.). (1992). *The Nazi Doctors and the Nuremberg Code: Human Rights in Human Experimentation*. Oxford University Press.
21. ASA (American Statistical Association). (1981). *Ethical Guidelines for Statistical Practice*.
22. ASA (American Statistical Association). (2016). ASA statement on p-values: Context, process, and purpose. *The American Statistician*, 70(2),129–133.
23. ASA (American Statistical Association). (2018). *Ethical Guidelines for Statistical Practice* (Revised ed.).
24. Bailar, J. C. and Bailar, M. (1983). Ethics in statistics. *The American Statistician*, 37(4),283–287.
25. Bankert, E. A. and Amdur, R. J. (2006). Institutional Review Board: Management and Function. Jones and Bartlett Pub-lishers.
26. Barocas, S. and Selbst, A. D. (2016). Big data's disparate impact. *California Law Review*, 104(3),671–732.
27. National Commission for the Protection of Human Subjects of Biomedical and Behavioral Research. (1979). The Belmont Report: Ethical principles and guidelines for the protection of human subjects of research. U.S. Government Printing Office.
28. Berger, R. L. (1990). Nazi science: The Dachau hypothermia experiments. *New England Journal of Medicine*, 322(20),4410–5341;
29. Bommasani, R., et al. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. arXiv preprint arXiv:2108.07258.
30. Box, J. F. (1978). R. A. Fisher: The Life of a Scientist. Wiley.
31. Brandt, A. M. (1978). Racism and research: The case of the Tuskegee Syphilis Study. *Hastings Center Report*, 8(6),12–92
32. Brown, T. H. (1952). The statistician and his conscience. *The American Statistician*, 6(5),14–18..
33. Buck v. Bell, 274 U.S. 200(1927).
34. Burleigh, M. (1994). *Death and Deliverance: Euthanasia in Germany c. 1900-1945*. Cambridge: Cambridge University Press.
35. Court, A. T. (1952). Standards of statistical conduct in business and in government. *The American Statistician*, 6(5),6–41
36. Cumming, G. (2014). The new statistics: Why and how. *Psychological Science*, 25(1),7–29..
37. Dastin, J. (2018). Amazon scraps secret AI recruiting tool that showed bias against women. Reuters.
38. Davenport, C. B. (1911). *Heredity in Relation to Eugenics*. New York: Henry Holt & Company.
39. Deming, W. E. (1985). Ethics and statistics. *The American Statistician*, 39(4),253–254.
40. Desrosières, A. (1998). *The Politics of Large Numbers: A History of Statistical Reasoning*. Cambridge, MA: Harvard University Press
41. Dodson, S. and Bartley, J. (2024). (Disrupting) continuities between eugenics and statistics: A critical study of regression analysis. *Proceedings of the Association for Information Science and Technology*, 61(1),892–895..
42. Dwork, C. and Roth, A. (2014). The algorithmic foundations of differential privacy. *Foundations and Trends in Theoretical Computer Science*, 9(3-4),211–407.
43. Ebert, F. W. (2001). Johann Peter Süßmilch, Pfarrer, Universalwissenschaftler und Vater der deutschen Statistik. *Statistische Geschichten, Daten Analysen*, IV/2001. Retrieved from www.statistik-berlin-brandenburg.de
44. Ellenberg, J. H. (1983). Ethical guidelines for statistical practice: A historical perspective. *The American Statistician*, 37(1),1–4.

45. European Union. (2016). General Data Protection Regulation (GDPR). Official Journal of the European Union, 119, 1–88.
46. Fellegi, I. P. (1996). The independence of official statistics. Statistical Journal of the United Nations Economic Commission for Europe, 13(3), 203–212.
47. Fienberg, S. E. (1994). Ethics and statistics. International Statistical Review, 62(1), 1–6.
48. Fisher, R. A. (1924). The biometrical study of heredity. Eugenics Review, 16(3), 189–210.
49. Floridi, L., et al. (2018). AI⁴People: An ethical framework for a good AI society. Minds and Machines, 28(4), 689–707.
50. Freeman, W. W. K. (1952). Discussion of The statistician and his conscience by T. H. Brown. The American Statistician, 6(5), 18–20.
51. Galton, F. (1869). Hereditary Genius: An Inquiry Into its Laws and Consequences. Macmillan.
52. Gelman, A. and Loken, E. (2013). The garden of forking paths: Why multiple comparisons can be a problem, even when there is no fishing expedition or p-hacking and the research hypothesis was posited ahead of time. Department of Statistics, Columbia University.
53. Gigerenzer, G. (2004). Mindless Statistics. The Journal of Socio-Economics, 33(5), 587–606.
54. Hacking, I. (1990). The Taming of Chance. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
55. Heller, J. (1972). Syphilis victims in U.S. study went untreated for 40 years. Associated Press.
56. Ioannidis, J. P. (2005). Why most published research findings are false. PLoS Medicine, 2(8), e124.
57. ISI (International Statistical Institute). (1985). Declaration On Professional Ethics.
58. Jones, J. H. (1993). Bad Blood: The Tuskegee Syphilis Experiment (New and expanded ed.). Free Press.
59. Kleinberg, J., Mullainathan, S. and Raghavan, M. (2017). Inherent trade-offs in the fair determination of risk scores. th Innovations in Theoretical Computer Science Conference.
60. Kühl, S. (1994). The Nazi connection: Eugenics, American Racism, and German National Socialism. New York: Oxford University Press.
61. Laughlin, H. H. (1922). Eugenical Sterilization In the United States. Chicago: Psychopathic Laboratory of the Municipal Court of Chicago.
62. Lombardo, P. A. (2008). Three Generations, no Imbeciles: Eugenics, the Supreme Court, and Buck v. Bell. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
63. MacKenzie, D. (1981). Statistics in Britain, 1865–1930: The social construction of scientific knowledge. Edinburgh University Press.
64. Malthus, T. R. (1798). An Essay on the Principle of Population as it Affects the Future Improvement of Society. London.
65. Mittelstadt, B. D. and Floridi, L. (Eds.). (2016). The Ethics of Biomedical Big data. Springer.
66. Morton, J. E. (1952). Standards of statistical conduct in business and government. The American Statistician, 6(5), 6–7.
67. Munafò, M. R., et al. (2017). A manifesto for reproducible science. Nature Human Behaviour, 1(1), 1–9.
68. Nosek, B. A., et al. (2015). Promoting an open research culture. Science, 348(6242), 1422–1425.
69. Nuremberg Code. (1947). Permissible medical experiments. Trials of War Criminals before the Nuremberg Military Tribunals, 2, 181–182.
70. O’Neil, C. (2016). Weapons of Math Destruction: How Big Data Increases Inequality and Threatens Democracy. Crown Publishers.
71. Open Science Collaboration. (2015). Estimating the reproducibility of psychological science. *Science*, 349 (6251) aac4716.
72. Pearson, K. (1901). National life from the standpoint of science. *Nature*, 64(1661), 441–442.
73. Peng, R. D. (2011). Reproducible research in computational science. *Science*, 334(6060), 1226–1227.

74. Porter, T. M. (1995). *Trust In Numbers: The Pursuit of Objectivity in Science and Public Life*. Princeton University Press.
75. Proctor, R. N. (1988). *Racial Hygiene: Medicine under the Nazis*. Harvard University Press.
76. Rosenthal, R. (1979). The file drawer problem and tolerance for null results. *Psychological Bulletin*, 86(3), 638–641.
77. Simmons, J. P., Nelson, L. D. and Simonsohn, U. (2011). False-positive psychology: Undisclosed flexibility in data collection and analysis allows presenting anything as significant. *Psychological Science*, 22(11), 1359–1366.
78. Stigler, S. M. (2000). *The History of Statistics: The measurement of uncertainty before 1900*. Cambridge, MA: Harvard University Press. (Original work published 1986)
79. Wheatcroft, S. G. (1990). More light on the scale of repression and excess mortality in the Soviet Union in the 1930s. *Soviet Studies*, 42(2), 355–367.
80. World Health Organization. (2020). *Ethical Considerations to Guide the Use of Digital Proximity Tracking Technologies for COVID-19 Contact Tracing*. WHO.

واکاوی تضاد و تعامل بین مکانیسم‌های تکاملی تنازع بقا و نظام‌های اخلاقی در جوامع انسانی

محمد خان احمدی^{۱*}، مریم مالمیر^۲

۱. گروه روانشناسی بالینی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۲. انجمن ایرانی اخلاق در علوم و فناوری

mohammad.khanahmadi@shahed.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

رابطه میان تکامل زیستی و اخلاق انسانی از مهم‌ترین مباحث میان‌رشته‌ای در علوم زیستی، علوم انسانی و فلسفه اخلاق محسوب می‌شود. نظریه تکامل با تأکید بر انتخاب طبیعی و تنازع بقا، تبیینی علمی برای منشأ بسیاری از رفتارهای انسانی ارائه می‌دهد، در حالی که نظام‌های اخلاقی بر ارزش‌هایی چون عدالت، همدلی، نوع‌دوستی، مسئولیت‌پذیری و خیر جمعی استوار هستند. این مطالعه با هدف واکاوی تضاد و تعامل میان مکانیسم‌های تکاملی تنازع بقا و نظام‌های اخلاقی در جوامع انسانی، به بررسی ابعاد زیستی، فرهنگی، شناختی و هنجاری اخلاق پرداخته است. در این راستا، مفاهیمی نظیر بازخوانی تنازع بقا در بستر اجتماعی، تعارض میان بقا و اخلاق، ناهمسازی میان منافع فردی و خیر جمعی، محدودیت‌های رویکرد زیست‌گرایانه در تبیین اخلاق، امکان آشتی میان تکامل و اخلاق و نقش فرهنگ در شکل‌گیری ارزش‌های اخلاقی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که اگرچه بسیاری از خصوصیات اخلاقی آدمی، مانند همکاری، همدلی و انصاف، می‌توانند ریشه‌های تکاملی داشته باشند، اما وجوه اخلاق انسانی را نمی‌توان به عوامل زیستی فروکاست. شکل‌گیری نظام‌های اخلاقی حاصل تعامل پیچیده میان تکامل زیستی، فرآیندهای شناختی، نهادهای اجتماعی و تکامل فرهنگی است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که اخلاق نه در تقابل کامل با تکامل، بلکه به‌عنوان یکی از پیامدهای پیشرفته آن قابل فهم است؛ پدیده‌ای که امکان‌گذار از منافع فردی و شکل‌گیری همکاری‌های گسترده انسانی را فراهم ساخته است. در نتیجه، فهم جامع اخلاق انسانی مستلزم رویکردی میان‌رشته‌ای است که به‌طور همزمان ابعاد زیستی، فرهنگی، اجتماعی و فلسفی رفتار اخلاقی را مورد توجه قرار دهد.

کلیدواژه‌گان: تکامل زیستی، تنازع بقا، اخلاق انسانی، همکاری اجتماعی، نوع‌دوستی، فرهنگ، هم‌تکاملی ژن و فرهنگ، فلسفه اخلاق.

مقدمه

در طول تاریخ تفسیرهای گوناگونی را تجربه کرده است. در برخی برداشتهای اولیه، تنازع بقا به‌عنوان اصلی فراگیر برای توجیه رقابت اجتماعی، نابرابری و برتری گروه‌های خاص تلقی شد و زمینه شکل‌گیری دیدگاه‌هایی همچون داروین‌یسم اجتماعی را فراهم آورد (۳). اما پژوهش‌های جدید در زیست‌شناسی تکاملی نشان داده‌اند که تکامل موجودات تنها مبتنی بر رقابت نیست و همکاری، همیاری، نوع‌دوستی و اعتماد نیز نقش مهمی در موفقیت تکاملی بسیاری از گونه‌ها، به‌ویژه انسان، ایفا کرده‌اند (۴). از این روی، بازخوانی مفهوم تنازع بقا در بستر جوامع انسانی مستلزم فاصله گرفتن از تفسیرهای ساده‌انگارانه و توجه به پیچیدگی روابط اجتماعی و فرهنگی است.

در جوامع انسانی، اخلاق به‌عنوان مجموعه‌ای از هنجارها، ارزش‌ها و قواعد رفتاری عمل می‌کند که روابط میان افراد را تنظیم کرده و امکان زندگی جمعی را فراهم می‌سازد. با این حال، پرسش مهمی

رابطه میان تکامل زیستی و اخلاق انسانی یکی از بنیادی‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین موضوعات در مرز مشترک علوم زیستی، علوم انسانی و فلسفه است. از زمان طرح نظریه تکامل توسط چارلز داروین در قرن نوزدهم، پرسش‌های متعددی درباره منشأ رفتارهای اخلاقی، جایگاه ارزش‌های انسانی در فرآیند تکامل و نسبت میان الزامات زیستی و هنجارهای اخلاقی مطرح شده است. نظریه تکامل با ارائه تبیینی طبیعی از منشأ گونه‌ها و رفتارهای زیستی، چشم‌انداز جدیدی را برای فهم ماهیت رفتارهای انسانی فراهم کرد و موجب شد بسیاری از مفاهیمی که پیش‌تر تنها در حوزه فلسفه، الهیات یا اخلاق مورد بحث قرار می‌گرفتند، از منظر زیست‌شناختی نیز بررسی شوند (۱ و ۲).

یکی از مفاهیم کلیدی در نظریه‌ی تکامل، «تنازع بقا»^۱ است؛ مفهومی که به رقابت موجودات زنده برای دستیابی به منابع محدود و افزایش شانس بقا و تولیدمثل اشاره دارد. با این حال، این مفهوم

می‌شوند، ممکن است در پیشینه‌ی تکاملی بشر نقش مهمی در افزایش انسجام گروهی و موفقیت جمعی ایفا کرده باشند.

با وجود این، تبیین اخلاق تنها بر پایه زیست‌شناسی با محدودیت‌های مهمی مواجه است. یکی از مهم‌ترین این محدودیت‌ها، تنوع گسترده نظام‌های اخلاقی در فرهنگ‌های مختلف است. مطالعات انسان‌شناختی نشان می‌دهند که گرچه برخی اصول اخلاقی به‌طور نسبی در میان جوامع انسانی مشترک‌اند، اما تفسیر و اجرای این اصول تحت تأثیر عوامل فرهنگی، تاریخی و اجتماعی قرار دارد (۱۵). به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران بر نقش فرهنگ در شکل‌دهی و تحول اخلاق تأکید کرده‌اند و معتقدند که اخلاق نتیجه تعامل میان ظرفیت‌های زیستی و فرآیندهای فرهنگی است در این زمینه، نظریه‌ی هم‌تکاملی ژن و فرهنگ اهمیت ویژه‌ای یافته است. این نظریه بیان می‌کند که تکامل انسان تنها در سطح ژنتیکی رخ نداده، بلکه فرهنگ نیز به‌عنوان یک نظام انتقال اطلاعات در شکل‌دهی رفتارهای انسانی نقش تعیین‌کننده داشته است (۱۶). بر اساس این دیدگاه، بسیاری از هنجارهای اخلاقی در نتیجه تعامل میان فرآیندهای زیستی و فرهنگی شکل گرفته‌اند. فرهنگ نه تنها بر رفتارهای فردی اثر می‌گذارد، بلکه خود می‌تواند فشارهای انتخابی جدیدی ایجاد کند و مسیر تکامل انسانی را تغییر دهد. از این روی، فهم اخلاق بدون در نظر گرفتن نقش فرهنگ و یادگیری اجتماعی ناقص خواهد بود.

افزون بر زیست‌شناسی و انسان‌شناسی، روان‌شناسی و علوم اعصاب نیز ابعاد جدیدی به مطالعه‌ی اخلاق افزوده‌اند. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که بسیاری از قضاوت‌های اخلاقی حاصل تعامل میان هیجان‌ها، شهودهای اخلاقی و فرآیندهای شناختی هستند (۱۷). همچنین مطالعات تصویربرداری مغزی نشان داده‌اند که تصمیم‌های اخلاقی با فعالیت شبکه‌های عصبی مرتبط با همدلی، کنترل شناختی و پردازش هیجانی همراه هستند (۱۱). این یافته‌ها نشان می‌دهند که اخلاق بنیان‌های زیستی مشخصی دارد، اما این بنیان‌ها در بستر یادگیری اجتماعی و تجربه فرهنگی شکل می‌گیرند و توسعه می‌یابند.

از سوی دیگر، فلسفه‌ی اخلاق همچنان نقش مهمی در تحلیل این مسئله ایفا می‌کند. یکی از چالش‌های اصلی رویکردهای زیست‌گرایانه، ناتوانی آنها در عبور از شکاف میان «هست» و «باید» است. اینکه رفتاری دارای منشأ تکاملی باشد، لزوماً به معنای درستی اخلاقی آن نیست. برای نمونه، رقابت، جانبداری از خویشاوندان یا حتی خشونت ممکن است در برخی شرایط دارای مزیت تکاملی باشند، اما این امر به‌تنهایی نمی‌تواند مشروعیت اخلاقی آنها را اثبات کند (۸، ۹). از این روی، بسیاری از فیلسوفان بر این باورند که هرگونه تبیین جامع از اخلاق باید افزون بر منشأ زیستی، به ابعاد هنجاری و ارزشی آن نیز توجه داشته باشد.

که همواره مورد توجه اندیشمندان بوده این است که آیا اخلاق پدیده‌ای مستقل از فرآیندهای زیستی است یا اینکه خود محصول تکامل به شمار می‌آید. برخی پژوهشگران معتقدند که بسیاری از ویژگی‌های اخلاقی انسان، از جمله همدلی، انصاف، نوع‌دوستی و همکاری، در نتیجه انتخاب طبیعی و برای افزایش شانس بقا و موفقیت گروهی تکامل یافته‌اند (۵-۷). در مقابل، بسیاری از فیلسوفان اخلاق تأکید می‌کنند که هرچند تکامل می‌تواند منشأ برخی گرایش‌های اخلاقی را توضیح دهد، اما قادر نیست اعتبار هنجاری ارزش‌ها و الزامات اخلاقی را تبیین کند (۸، ۹).

این اختلاف دیدگاه‌ها به شکل‌گیری یکی از مهم‌ترین مباحث معاصر در فلسفه و علوم انسانی منجر شده است؛ یعنی این پرسش که آیا اخلاق را باید تنها به‌عنوان سازوکاری تکاملی برای افزایش بقا و همکاری اجتماعی در نظر گرفت یا اینکه اخلاق دارای ابعادی فراتر از تکامل زیستی است. از یک سو، زیست‌شناسی اجتماعی، روان‌شناسی تکاملی و علوم اعصاب شواهد متعددی درباره‌ی ریشه‌های زیستی رفتارهای اخلاقی ارائه کرده‌اند (۱۰، ۱۱). از سوی دیگر، نظریه‌های فلسفی مبتنی بر عقلانیت، وظیفه، عدالت و کرامت انسانی بر این باورند که ارزش‌های اخلاقی را نمی‌توان به فرآیندهای طبیعی فروکاست و انسان قادر است از طریق استدلال عقلانی و تأمل انتقادی، معیارهایی فراتر از منافع زیستی وضع کند (۱۲).

یکی از نقاط مرکزی این کشمکش، دوگانگی میان منافع فردی و خیر جمعی است. در سطح زیستی، انتخاب طبیعی بیشتر در جهت افزایش موفقیت فردی عمل می‌کند؛ اما بقای جوامع انسانی به همکاری، اعتماد و رعایت هنجارهای مشترک وابسته است. این وضعیت نوعی تعارض بالقوه میان منافع شخصی و مصالح جمعی ایجاد می‌کند که کم و بیش تمامی نظام‌های اخلاقی در تلاش برای مدیریت آن بوده‌اند (۱۳). اخلاق را از این منظر می‌توان مجموعه‌ای از سازوکارهای فرهنگی و هنجاری دانست که رفتارهای خودمحورانه را محدود کرده و امکان همکاری پایدار را فراهم می‌سازند. با این حال، پرسش اساسی همچنان باقی است که آیا این سازوکارها تنها دنباله‌ی فرآیندهای تکاملی هستند یا واجد استقلال هنجاری و فرهنگی‌اند.

مطالعات جدید در حوزه‌ی تکامل همکاری، نشان داده‌اند که همکاری نه یک استثنا، بلکه یکی از نیروهای اصلی تکامل محسوب می‌شود. نظریه انتخاب خویشاوندی، نوع‌دوستی متقابل و مدل‌های مبتنی بر انتخاب گروهی نشان داده‌اند که رفتارهای ایثارگرانه و همکاری‌محور می‌توانند در شرایط خاص مزیت تکاملی ایجاد کنند (۵-۷ و ۱۴). این یافته‌ها دیدگاه سنتی درباره‌ی تقابل کامل میان تکامل و اخلاق را به چالش کشیده‌اند. در حقیقت، بسیاری از ویژگی‌هایی که امروزه به‌عنوان فضایل اخلاقی شناخته

در نخستین نگاه، نظریه‌ی انتخاب طبیعی بر رقابت تأکید دارد. در این چارچوب، موجوداتی که در کسب منابع، دفاع از قلمرو یا دستیابی به فرصت‌های تولیدمثلی موفق‌تر هستند، احتمال بیشتری برای انتقال ژن‌های خود دارند. برخی اندیشمندان قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم از این اصل نتیجه گرفتند که رقابت و غلبه بر دیگران نه تنها امری طبیعی بلکه مطلوب نیز هست. این برداشت تلاش می‌کرد نابرابری‌های اجتماعی را با ارجاع به قوانین طبیعت توجیه کند (۳). با این حال، بسیاری از زیست‌شناسان و فیلسوفان اخلاق تأکید کرده‌اند که استنتاج ارزش‌های اخلاقی از واقعیت‌های زیستی نمونه‌ای از «مغالطه طبیعت‌گرایانه» است؛ یعنی تبدیل آنچه «هست» به آنچه «باید باشد» (۹).

در حقیقت، پژوهش‌های تکاملی معاصر نشان داده‌اند که تنازع بقا تنها به معنای رقابت بی‌رحمانه نیست. رفتارهای همکاری، نوع‌دوستی و همیاری نیز می‌توانند تحت شرایط خاص مزیت تکاملی داشته باشند. نظریه «انتخاب خویشاوندی» که توسط همیلتون^۱ مطرح شد، نشان داد که فداکاری برای خویشاوندان می‌تواند از منظر ژنتیکی سودمند باشد، زیرا به بقای ژن‌های مشترک کمک می‌کند (۵۶). بر اساس قاعده مشهور همیلتون، رفتار ایثارگرانه زمانی از منظر تکاملی قابل توجیه است که هزینه فرد کمتر از منفعتی باشد که با ضریب خویشاوندی به بستگان منتقل می‌شود.

افزون بر این، نظریه‌ی «نوع‌دوستی متقابل» که توسط رابرت تریورز^۲ توسعه یافت، نشان می‌دهد که همکاری میان افراد غیرخویشاوند نیز می‌تواند به افزایش شانس بقا منجر شود، مشروط بر آنکه انتظار بازگشت متقابل کمک وجود داشته باشد (۷). چنین سازوکارهایی بیانگر آن هستند که اخلاق و همکاری نه به ناگزیر در تضاد با تکامل، بلکه در بسیاری از موارد محصول فرآیندهای تکاملی‌اند.

با وجود این، فاصله‌ی مهمی میان سرچشمه‌ی تکاملی رفتارهای اخلاقی و اعتبار هنجاری آنها وجود دارد. از دیدگاه فلسفه‌ی اخلاق، توضیح اینکه رفتاری چگونه پدید آمده است با توجیه اینکه چرا باید انجام شود متفاوت است. برای نمونه، اگر احساس همدلی در نتیجه انتخاب طبیعی شکل گرفته باشد، این امر به خودی خود ثابت نمی‌کند که افراد موظف‌اند بر اساس همدلی عمل کنند. این تمایز که در فلسفه با عنوان فاصله میان «هست» و «باید» شناخته می‌شود که نخستین بار به‌طور نظام‌مند توسط دیوید هیوم مطرح شد (۸). بنابراین، حتی اگر اخلاق ریشه‌های تکاملی داشته باشد، مشروعیت هنجاری آن نیازمند استدلال‌هایی فراتر از زیست‌شناسی است.

از منظر علوم شناختی و روان‌شناسی تکاملی نیز شواهد متعددی

در سال‌های اخیر، رویکردهای تلفیقی تلاش کرده‌اند از دوگانه‌سازی میان طبیعت و فرهنگ یا تکامل و اخلاق فراتر روند. در این رویکردها، اخلاق به‌عنوان محصول تعامل پیچیده میان عوامل زیستی، شناختی، فرهنگی و اجتماعی در نظر گرفته می‌شود (۱۸). بر اساس این دیدگاه، تکامل زیستی ظرفیت‌هایی مانند همدلی، همکاری و حساسیت به هنجارها را فراهم کرده است، در حالی که فرهنگ و عقلانیت انسانی این ظرفیت‌ها را توسعه داده و به نظام‌های اخلاقی پیچیده تبدیل کرده‌اند. در نتیجه، اخلاق نه در تقابل با تکامل، بلکه به‌عنوان یکی از پیامدهای پیچیده آن فهمیده می‌شود؛ پیامدی که در بستر فرهنگ و تعاملات اجتماعی به سطوحی فراتر از الزامات زیستی ارتقا یافته است.

بر این اساس، هدف مقاله حاضر واکاوی تضاد و تعامل میان مکانیسم‌های تکاملی تنازع بقا و نظام‌های اخلاقی در جوامع انسانی است. مقاله می‌کوشد با بهره‌گیری از یافته‌های زیست‌شناسی تکاملی، روان‌شناسی، انسان‌شناسی، جامعه‌شناسی و فلسفه اخلاق، ابعاد مختلف این رابطه را بررسی کند. در این راستا، مفاهیمی همچون تنازع بقا، همکاری، نوع‌دوستی، منافع فردی و خیر جمعی، محدودیت‌های رویکرد زیست‌گرایانه، نقش فرهنگ در تحول اخلاق و امکان آشتی میان تکامل زیستی و اخلاق انسانی مورد بحث قرار خواهند گرفت. فرض اساسی این بررسی آن است که فهم جامع اخلاق انسانی مستلزم رویکردی میان‌رشته‌ای است که بتواند به‌طور همزمان سهم عوامل زیستی، فرهنگی و هنجاری را در شکل‌گیری رفتار اخلاقی توضیح دهد.

بحث

تعارض میان بقا و اخلاق: از ضرورت زیستی تا الزام هنجاری

یکی از بنیادی‌ترین مباحث در مطالعه رابطه میان تکامل زیستی و اخلاق، بررسی تنش میان الزامات بقا و هنجارهای اخلاقی است. نظریه‌ی تکامل از زمان طرح توسط چارلز داروین نشان داد که بسیاری از ویژگی‌های رفتاری موجودات زنده در نتیجه فرآیند انتخاب طبیعی شکل گرفته‌اند؛ فرآیندی که در آن صفاتی که احتمال بقا و تولیدمثل را افزایش می‌دهند، در جمعیت باقی می‌مانند (۲). از این منظر، رفتار انسان نیز تا حدی محصول سازوکارهایی است که در طول تاریخ تکاملی برای افزایش شانس بقا و انتقال ژن‌ها تکامل یافته‌اند. با این حال، نظام‌های اخلاقی انسانی در بیشتر موارد از افراد می‌خواهند برخلاف منافع فوری خود عمل کنند، از دیگران حمایت کنند، منابع را به اشتراک بگذارند و حتی در مواردی جان خود را برای دیگران به خطر اندازند. این وضعیت پرسشی اساسی ایجاد می‌کند: چگونه می‌توان میان منطق زیستی بقا و بایسته‌های اخلاقی که گاه مستلزم فداکاری هستند، رابطه برقرار کرد؟

است. با وجود شهرت فراوان این اصطلاح، درک عمومی از آن در بسیاری موارد با سوء برداشت‌هایی همراه بوده است. در بسیاری از تفسیرهای رایج، تنازع بقا به معنای رقابت مستقیم، خشونت و حذف افراد ضعیف‌تر تلقی می‌شود؛ در حالی که داروین این مفهوم را بسیار گسترده‌تر از رقابتی صرف میان افراد تعریف می‌کرد. او تأکید داشت که تنازع بقا شامل تمامی روابطی است که بر احتمال بقا و تولیدمثل موجودات اثر گذارند؛ از رقابت برای منابع گرفته تا همکاری، وابستگی متقابل و سازگاری با محیط (۱).

در زیست‌شناسی تکاملی، تنازع بقا به معنای تلاش موجودات برای بقا در شرایط محدودیت منابع و فشارهای محیطی است. این مفهوم به حتم نیازمند درگیری مستقیم نیست، بلکه هر عاملی که بر موفقیت زیستی اثر بگذارد بخشی از این فرآیند محسوب می‌شود. از این منظر، همکاری درون‌گروهی، تقسیم کار، مراقبت والدینی و حتی رفتارهای نوع‌دوستانه نیز می‌توانند در خدمت موفقیت تکاملی قرار گیرند (۱۹). بنابراین، یکی از نخستین گام‌ها در بازخوانی مفهوم تنازع بقا در جوامع انسانی، فاصله گرفتن از برداشت‌های تقلیل‌گرایانه‌ای است که آن را به رقابتی بی‌امان میان افراد فرو می‌کاهند.

در اواخر قرن نوزدهم، برخی متفکران اجتماعی از جمله هربرت اسپنسر^۳ کوشیدند اصول انتخاب طبیعی را به حوزه‌ی جامعه تعمیم دهند. اسپنسر اصطلاح «بقای اصلح» را مطرح کرد و برخی پیروان او نتیجه گرفتند که نابرابری‌های اجتماعی، فقر و برتری گروه‌های خاص پیامد طبیعی فرآیندهای تکاملی هستند (۲۰). این رویکرد که بعدها تحت عنوان «داروینیسم اجتماعی» شناخته شد، تأثیر عمیقی بر اندیشه‌های سیاسی و اقتصادی قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم داشت. با این حال، پژوهشگران متعددی نشان داده‌اند که داروینیسم اجتماعی بیش از آنکه مبتنی بر آثار خود داروین باشد، بازتاب ایدئولوژی‌های اقتصادی و سیاسی زمانه خود بوده است (۳).

نقدهای معاصر بر داروینیسم اجتماعی نشان می‌دهد که انتقال مستقیم مفاهیم زیستی به حوزه‌ی اخلاق و سیاست با مشکلات نظری جدی مواجه است. نخست آنکه فرآیندهای تکاملی ماهیتی توصیفی دارند و توضیح می‌دهند که چه رخ داده است، نه اینکه چه باید رخ دهد. دوم آنکه انسان‌ها برخلاف سایر گونه‌ها در قالب نظام‌های فرهنگی، حقوقی و اخلاقی زندگی می‌کنند که رفتار آنها را شکل می‌دهد و محدود می‌کند (۲۱). از این روی، موفقیت در جوامع انسانی تنها تابع توانایی‌های زیستی نیست، بلکه تحت تأثیر آموزش، سرمایه فرهنگی، نهادهای اجتماعی و فرصت‌های ساختاری نیز قرار دارد.

وجود دارد که نشان می‌دهد انسان دارای آمادگی‌های زیستی برای قضاوت‌های اخلاقی است. پژوهش‌های جان‌اتان هایت^۱ نشان داده‌اند که بسیاری از داورهای اخلاقی ابتدا به صورت شهودی و هیجانی شکل می‌گیرند و سپس توسط استدلال‌های عقلانی توجیه می‌شوند (۱۷). این یافته‌ها حاکی از آن است که بخشی از ساختار اخلاقی انسان در نتیجه تاریخ تکاملی او شکل گرفته است. با این حال، همین پژوهش‌ها نشان می‌دهند که فرهنگ، آموزش و نهادهای اجتماعی نقش تعیین‌کننده‌ای در جهت‌دهی و اصلاح این گرایش‌های اولیه دارند.

نکته مهم دیگر آن است که جوامع انسانی از طریق نهادهای اخلاقی و حقوقی تلاش می‌کنند برخی گرایش‌های طبیعی مرتبط با بقا را مهار کنند. برای نمونه، تمایل به ترجیح منافع شخصی، جانبداری از گروه خودی یا رقابت بر سر منابع می‌تواند دارای ریشه‌های تکاملی باشد، اما نظام‌های اخلاقی مدرن بر اصولی همچون؛ عدالت، برابری و حقوق بشر، تأکید می‌کنند که گاه مستلزم محدود کردن همین تمایلات هستند. از این منظر، اخلاق را می‌توان نوعی سازوکار فرهنگی دانست که به انسان امکان می‌دهد از محدودیت‌های ناشی از منافع زیستی کوتاه‌مدت فراتر رود و به اهداف جمعی بلندمدت دست یابد (۱۶).

برخی نظریه‌پردازان مانند مایکل توماسلو^۲ معتقدند که اخلاق انسانی حاصل تعامل پیچیده میان تکامل زیستی و تکامل فرهنگی است. از دیدگاه آنان، همکاری گسترده، شکل‌گیری هنجارهای مشترک و ظرفیت قضاوت اخلاقی در بستری از زندگی اجتماعی پیچیده تکامل یافته‌اند و نمی‌توان آنها را تنها به رقابتی ژنتیکی فروکاست (۱۸). در نتیجه، تنش میان بقا و اخلاق نه تضادی مطلق، بلکه نتیجه همزیستی دو سطح متفاوت از سازمان‌یافتگی انسانی است: سطح زیستی که به حفظ و انتقال ژن‌ها مربوط می‌شود و سطح فرهنگی-هنجاری که به سامان‌دهی روابط اجتماعی و تحقق ارزش‌های مشترک می‌پردازد.

می‌توان گفت که گرچه مکانیسم‌های تکاملی بر افزایش شانس بقا و تولیدمثل استوارند، اما همین فرآیندها زمینه‌ی پیدایش همکاری، همدلی و رفتارهای نوع‌دوستانه را نیز فراهم کرده‌اند. با این حال، اخلاق انسانی را نمی‌توان به‌طور کامل به زیست‌شناسی فروکاست، زیرا مشروعیت هنجاری ارزش‌ها از حوزه‌ای فراتر از تبیین‌های تکاملی سرچشمه می‌گیرد. بنابراین، رابطه‌ی میان بقا و اخلاق را باید نه به‌عنوان تقابل کامل، بلکه به‌مانند تعاملی پیچیده میان ضرورت‌های زیستی و بایسته‌های هنجاری در نظر گرفت.

بازخوانی مفهوم تنازع بقا در بستر جوامع انسانی

مفهوم «تنازع بقا» از بنیادی‌ترین مفاهیم در نظریه‌ی تکامل

1. Jonathan Haidt
2. Michael Tomasello

3. Herbert Spencer

باید آن را در تعامل میان تکامل زیستی و فرهنگی فهمید.

نکته مهم دیگر آن است که بازخوانی مفهوم تنازع بقا می‌تواند در اصلاح برخی سوءبرداشت‌های اخلاقی و سیاسی نیز مؤثر باشد. در طول تاریخ، ایده‌های مبتنی بر رقابت طبیعی گاه برای توجیه استعمار، تبعیض نژادی، نابرابری اقتصادی و سیاست‌های حذف‌گرایانه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما یافته‌های جدید علوم تکاملی نشان می‌دهند که همکاری، اعتماد و همبستگی اجتماعی نیز بخشی جدایی‌ناپذیر از میراث تکاملی انسان هستند (۲۵). بنابراین، ارجاع به تکامل نه تنها می‌تواند از رقابت حمایت کند، بلکه می‌تواند مبنایی برای درک اهمیت همکاری و مسئولیت اجتماعی نیز فراهم آورد.

بازخوانی مفهوم تنازع بقا در بستر جوامع انسانی نشان می‌دهد که این مفهوم بسیار پیچیده‌تر از برداشت کلاسیک «رقابت برای حذف دیگری» است. از این روی، درک معاصر از تنازع بقا مستلزم توجه هم‌زمان به ابعاد زیستی، فرهنگی، اجتماعی و اخلاقی حیات انسانی است؛ ابعادی که در تعامل با یکدیگر مسیر تکامل و توسعه جوامع را شکل می‌دهند.

اخلاق به مانند سازوکار تکاملی یا فراتر از تکامل؟

از مهم‌ترین مباحث در تقاطع زیست‌شناسی تکاملی، فلسفه اخلاق و علوم شناختی، این پرسش است که آیا اخلاق تنها محصول فرآیندهای تکاملی است یا اینکه ماهیتی فراتر از تکامل زیستی دارد؟ این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که پاسخ به آن نه تنها درک ما از منشأ ارزش‌های اخلاقی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه بر نحوه‌ی تبیین مسئولیت اخلاقی، عدالت، حقوق بشر و هنجارهای اجتماعی نیز اثرگذار است. در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل توجه در زیست‌شناسی تکاملی و علوم اعصاب شواهد فراوانی درباره ریشه‌های زیستی رفتارهای اخلاقی فراهم کرده‌اند؛ با این حال، همچنان این پرسش باقی است که آیا منشأ تکاملی اخلاق می‌تواند اعتبار هنجاری آن را نیز توضیح دهد یا خیر.

رویکرد تکاملی به اخلاق بر این فرض استوار است که بسیاری از گرایش‌های اخلاقی انسان در نتیجه انتخاب طبیعی شکل گرفته‌اند. از منظر تکاملی، رفتارهایی که به افزایش بقا و موفقیت تولیدمثلی افراد یا گروه‌ها کمک می‌کنند، در طول زمان تثبیت می‌شوند. از همین رو، احساس همدلی، همکاری، انصاف و نوع‌دوستی می‌توانند به‌عنوان سازوکارهایی در نظر گرفته شوند که در تاریخ تکاملی انسان مزایای انطباقی ایجاد کرده‌اند (۲).

داروین در کتاب *تبار/انسان* بیان می‌کند که غرایز اجتماعی پایه‌های اولیه اخلاق انسانی را تشکیل می‌دهند. به اعتقاد او، تمایل به همدلی، دلسوزی و مراقبت از دیگران در ابتدا به دلیل ارزش

یافته‌های جدید زیست‌شناسی تکاملی نیز تصویری پیچیده‌تر از تنازع بقا ارائه می‌کنند. نظریه‌ی انتخاب خویشاوندی (۵۶)، نوع‌دوستی متقابل (۷) و تکامل همکاری (۱۷) نشان داده‌اند که همکاری همان اندازه برای تکامل اهمیت دارد که رقابت دارد. در بسیاری از گونه‌ها، از جمله انسان، همکاری نه یک استثنا بلکه یکی از مهم‌ترین راهبردهای بقا محسوب می‌شود. در واقع، توانایی انسان برای تشکیل گروه‌های بزرگ، ایجاد اعتماد متقابل و توسعه‌ی هنجارهای همکاری از عوامل اصلی موفقیت تکاملی او به شمار می‌رود (۴).

در این چارچوب، برخی پژوهشگران استدلال می‌کنند که مفهوم تنازع بقا در جوامع انسانی باید از سطح فردی به سطح جمعی منتقل شود. برای نمونه، کروبوتکین^۱ در کتاب *همکاری دوجانبه* بیان کرد که همکاری و یاری متقابل در طبیعت و جامعه نقشی اساسی در بقا دارند و تمرکز انحصاری بر رقابت، تصویری نارسا از تکامل ارائه می‌دهد (۲۲). هرچند برخی از دیدگاه‌های او در چارچوب زیست‌شناسی مدرن نیازمند بازنگری هستند، اما تأکید وی بر اهمیت همکاری بعدها توسط پژوهش‌های تجربی گسترده تأیید شد.

جوامع شکارگر-گردآورنده^۲ که بخش عمده‌ی تاریخ تکاملی انسان را تشکیل می‌دهند، بر پایه‌ی شبکه‌های پیچیده‌ای از همکاری، تقسیم منابع و حمایت متقابل سازمان یافته بودند (۲۳). در چنین جوامعی، بقای فرد بیشتر به بقای گروه وابسته بود. به همین دلیل، بسیاری از صفات اجتماعی انسان مانند همدلی، عدالت، شرم، احساس گناه و تمایل به مجازات متخلفان را می‌توان سازوکارهایی دانست که برای حفظ انسجام گروهی تکامل یافته‌اند (۱۸).

در جوامع مدرن نیز تنازع بقا شکل‌های جدیدی به خود گرفته است. رقابت اقتصادی، علمی، سیاسی و حرفه‌ای همچنان بخشی از زندگی اجتماعی است، اما این رقابت‌ها در چارچوب قوانین، نهادها و هنجارهای اخلاقی مدیریت می‌شوند. برخلاف محیط طبیعی که در آن انتخاب طبیعی بیشتر بر اساس سازگاری زیستی عمل می‌کند، در جوامع انسانی معیارهای موفقیت متنوع‌تر هستند و شامل عوامل فرهنگی، آموزشی و فناورانه نیز می‌شوند (۱۶). به بیان دیگر، انسان‌ها با ایجاد نهادهای اجتماعی توانسته‌اند بخشی از فشارهای مستقیم تنازع بقا را تعدیل کنند.

افزون بر این، فرآیند «تکامل فرهنگی» سبب شده است که انتقال دانش، ارزش‌ها و فناوری‌ها به اندازه انتقال ژن‌ها در بقای جوامع اهمیت پیدا کند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که موفقیت انسان بیش از هر گونه دیگری به ظرفیت یادگیری اجتماعی و انتقال فرهنگی وابسته است (۲۴). از این روی، تنازع بقا در جوامع انسانی را نمی‌توان تنها در سطح زیست‌شناختی تحلیل کرد؛ بلکه

بقایای در گروه‌های انسانی تکامل یافته و سپس با رشد توانایی‌های شناختی و زبانی به نظام‌های پیچیده اخلاقی تبدیل شده است (۱). از این دیدگاه، اخلاق نه پدیده‌ای ماورایی بلکه ادامه تکامل غرایز اجتماعی در انسان است.

پژوهش‌های مربوط به تکامل همکاری نشان داده‌اند که بسیاری از ویژگی‌های اخلاقی انسان در زمینه‌ی زندگی گروهی شکل گرفته‌اند. مارتین نوواک^۱ پنج سازوکار اصلی برای تکامل همکاری شامل انتخاب خویشاوندی، نوع‌دوستی متقابل، شهرت، شبکه‌های اجتماعی و انتخاب گروهی را معرفی کرده است (۴). این یافته‌ها نشان می‌دهند که رفتارهای اخلاقی نه در تقابل با تکامل، بلکه در بسیاری از موارد نتیجه مستقیم فرآیندهای تکاملی هستند.

تحقیقات عصب‌شناختی نشان داده‌اند که نواحی خاصی از مغز، از جمله قشر پیش‌پیشانی و آمیگدال، در پردازش تصمیم‌های اخلاقی نقش دارند (۱۱). وجود این زیرساخت‌های عصبی سبب شده برخی پژوهشگران نتیجه بگیرند که اخلاق دست‌کم تا حدی محصول فرآیندهای زیستی و تکاملی است. مطالعات انجام‌شده بر کودکان خردسال نیز نشان می‌دهد که برخی گرایش‌های مرتبط با انصاف و همکاری پیش از آموزش رسمی اخلاق مشاهده می‌شوند (۲۶).

با وجود قدرت تبیینی رویکرد تکاملی، بسیاری از فیلسوفان اخلاق بر این باورند که این رویکرد تنها منشأ اخلاق را توضیح می‌دهد و قادر به تبیین اعتبار هنجاری آن نیست. این تمایز میان «منشأ» و «اعتبار» یکی از مهم‌ترین مباحث فلسفه اخلاق معاصر است. برای نمونه، اینکه احساس همدلی در نتیجه انتخاب طبیعی تکامل یافته است، توجیهی فراهم می‌کند که چرا انسان‌ها همدلی را تجربه می‌کنند، اما توضیح نمی‌دهد که چرا باید بر اساس آن عمل کنند. به بیان دیگر، توصیف فرآیندهای زیستی نمی‌تواند به تنهایی تکلیف اخلاقی ایجاد کند. هیوم بیان می‌کند که نمی‌توان تنها از واقعیت‌های تجربی به نتایج هنجاری رسید (۸).

در برابر رویکردهای زیست‌گرایانه، بسیاری از نظریه‌های فلسفی اخلاق بر این باورند که اخلاق دارای ابعادی است که نمی‌توان آنها را تنها با تکامل زیستی توضیح داد. برای نمونه، نظریه‌های وظیفه‌گرایانه، به‌ویژه اندیشه‌های کانت، اخلاق را مبتنی بر عقلانیت و اصول جهان‌شمول می‌دانند. از دیدگاه کانت ارزش اخلاقی رفتار، از انگیزه‌ی انجام وظیفه نه از پیامدهای زیستی یا تکاملی آن ناشی می‌شود (۱۲).

همچنین نظریه‌های عدالت، حقوق بشر و کرامت انسانی بیشتر بر مبانی هنجاری استوار هستند که فراتر از ملاحظات تکاملی قرار می‌گیرند. برای نمونه، اصل برابری ذاتی انسان‌ها را نمی‌توان تنها از سازوکارهای انتخاب طبیعی استنتاج کرد، زیرا انتخاب طبیعی ذاتاً

نسبت به مفاهیمی مانند عدالت یا حقوق بی‌طرف است. از این روی، بسیاری از فیلسوفان بر این باورند که هرچند تکامل می‌تواند منشأ برخی گرایش‌های اخلاقی را توضیح دهد، اما محتوای هنجاری اخلاق محصول عقلانیت، فرهنگ و تأمل فلسفی است (۲۷).

در سال‌های اخیر، دیدگاه‌های تلفیقی کوشیده‌اند شکاف میان زیست‌شناسی و فلسفه اخلاق را کاهش دهند. این رویکردها اخلاق را نتیجه تعامل پیچیده میان تکامل زیستی و تکامل فرهنگی می‌دانند. بر اساس نظریه هم‌تکاملی ژن-فرهنگ، بسیاری از هنجارهای اخلاقی در بستر تعامل میان ظرفیت‌های زیستی و محیط‌های فرهنگی شکل گرفته‌اند (۱۶).

توماسلو بیان می‌کند که اخلاق انسانی از همکاری‌های اجتماعی گسترده‌ای سرچشمه گرفته است که در طول تکامل فرهنگی توسعه یافته‌اند. از نگاه او، انسان‌ها نه تنها برای همکاری تکامل یافته‌اند، بلکه توانایی ایجاد هنجارهای مشترک، قضاوت درباره‌ی رفتار دیگران و احساس تعهد نسبت به قواعد جمعی را نیز کسب کرده‌اند (۱۸). در این چارچوب، اخلاق تنها محصول ژن‌ها و عوامل زیستی نیست، بلکه برآیندی از تعامل مستمر میان طبیعت و فرهنگ به حساب می‌آید.

بررسی دیدگاه‌های مختلف نشان می‌دهد که اخلاق را نمی‌توان به‌طور کامل به یکی از دو حوزه‌ی زیست‌شناسی یا فلسفه فروکاست. شواهد تکاملی، شناختی و عصب‌شناختی به‌خوبی نشان می‌دهند که بسیاری از گرایش‌های اخلاقی انسان دارای ریشه‌های زیستی‌اند و در فرآیند انتخاب طبیعی شکل گرفته‌اند. با این حال، تبیین منشأ تکاملی اخلاق به‌تنهایی برای توجیه اعتبار هنجاری آن کافی نیست. مفاهیمی چون عدالت، مسئولیت، کرامت انسانی و الزام اخلاقی نیازمند تحلیل‌هایی هستند که فراتر از چارچوب زیست‌شناختی قرار می‌گیرند. از این روی، دیدگاه‌های معاصر بیش از پیش به سمت رویکردی تلفیقی حرکت کرده‌اند که اخلاق را حاصل تعامل میان ظرفیت‌های تکاملی، فرآیندهای شناختی، نهادهای فرهنگی و تأمل عقلانی می‌دانند.

محدودیت‌های رویکرد زیست‌گرایانه در تبیین اخلاق انسانی

رویکرد زیست‌گرایانه در تبیین اخلاق انسانی بر این فرض استوار است که رفتارها، ارزش‌ها و قضاوت‌های اخلاقی را می‌توان بر اساس سازوکارهای زیستی، ژنتیکی و تکاملی توضیح داد. این رویکرد به‌ویژه پس از گسترش نظریه‌ی تکامل، جامعه‌شناسی زیستی و روان‌شناسی تکاملی، جایگاه مهمی در مطالعات مربوط به منشأ اخلاق پیدا کرد. پژوهش‌های متعدد نشان داده‌اند که بسیاری از ویژگی‌های اخلاقی انسان، از جمله همدلی، همکاری، انصاف و نوع‌دوستی، دارای زیرساخت‌های زیستی و تکاملی هستند (۲، ۱۰).

نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری اخلاق دارند و نمی‌توان همه آنها را به عوامل زیستی تقلیل داد.

از منظر تکامل فرهنگی نیز شواهد فراوانی وجود دارد که نشان می‌دهد بسیاری از هنجارهای اخلاقی با سرعتی بسیار بیشتر از آنچه فرآیندهای ژنتیکی امکان‌پذیر می‌سازند تغییر می‌کنند. نظریه‌ی هم‌تکاملی ژن و فرهنگ که توسط پژوهشگران توسعه یافته است، تأکید می‌کند که رفتارهای انسانی نتیجه تعامل میان عوامل زیستی و فرهنگی هستند (۱۶). در این چارچوب، فرهنگ نه تنها بازتاب زیست‌شناسی، بلکه نیرویی مستقل و تأثیرگذار در شکل‌دهی رفتارهای اخلاقی محسوب می‌شود.

از دیگر محدودیت‌های مهم رویکرد زیست‌گرایانه، دشواری تبیین رفتارهای اخلاقی فداکارانه و جهان‌شمول است. بسیاری از نظام‌های اخلاقی انسان را به حمایت از گروه‌های دوردست، کمک به افراد ناشناس، دفاع از حقوق انسان‌ها بدون توجه به خویشاوندی یا منفعت شخصی و حتی ایثار کامل برای آرمان‌های اخلاقی فرا می‌خوانند. چنین رفتارهایی به‌سادگی در چارچوب منافع ژنتیکی یا بقای فردی قابل توضیح نیستند. برای نمونه، فعالیت‌های بشردوستانه بین‌المللی، دفاع از حقوق نسل‌های آینده یا حمایت از گونه‌های در معرض انقراض اغلب فراتر از منافع مستقیم تکاملی قرار می‌گیرند (۲۸). این موارد نشان می‌دهند که انسان قادر است دایره‌ی ملاحظات اخلاقی خود را بسیار فراتر از محدوده‌ای که تنها توسط انتخاب طبیعی تعیین شده است، گسترش دهد.

افزون بر این، رویکرد زیست‌گرایانه در تبیین نقش عقلانیت و تأمل اخلاقی با چالش مواجه است. بسیاری از نظریه‌های فلسفه اخلاق، به‌ویژه سنت عقل‌گرایانه، بر این باورند که انسان‌ها قادرند از طریق استدلال، نقد و بازاندیشی، هنجارهای اخلاقی خود را اصلاح کنند. نظریه‌ی اخلاقی کانت نمونه‌ی برجسته‌ای از این دیدگاه است. کانت بر این باور بود که الزام اخلاقی از توانایی عقل عملی برای وضع قواعد جهان‌شمول و نه از تمایلات طبیعی یا منافع زیستی، ناشی می‌شود (۱۲). اگرچه پژوهش‌های شناختی نشان داده‌اند که هیجان‌ها و شهودها در تصمیم‌گیری اخلاقی نقش مهمی دارند، اما نقش استدلال آگاهانه و نقد عقلانی نیز غیرقابل انکار است (۲۹).

محدودیت دیگر به خطر جبرگرایی زیستی مربوط می‌شود. برخی تفسیرهای افراطی از زیست‌گرایی ممکن است این تصور را ایجاد کنند که رفتارهای اخلاقی انسان بی‌چون و چرا توسط ژن‌ها یا سازوکارهای تکاملی تعیین می‌شوند. چنین دیدگاهی می‌تواند مسئولیت اخلاقی، اختیار و امکان تغییر رفتار را تضعیف کند. در مقابل، پژوهش‌های معاصر نشان می‌دهند که رفتار انسانی حاصل تعامل پیچیده میان ژنتیک، محیط، فرهنگ، آموزش و انتخاب‌های فردی است (۲۱). بنابراین، فروکاستن اخلاق به زیست‌شناسی نه

با وجود این، بسیاری از فیلسوفان، جامعه‌شناسان و حتی برخی زیست‌شناسان تکاملی بر این باورند که تبیین اخلاق انسانی تنها بر پایه عوامل زیستی با محدودیت‌های نظری و تجربی مهمی مواجه است. به همین دلیل، اگرچه رویکرد زیست‌گرایانه در شناخت منشأ برخی گرایش‌های اخلاقی نقش مهمی ایفا می‌کند، اما به‌تنهایی نمی‌تواند پیچیدگی نظام‌های اخلاقی انسانی را توضیح دهد.

نخستین محدودیت اساسی رویکرد زیست‌گرایانه به تمایز میان منشأ و اعتبار اخلاق مربوط می‌شود. زیست‌شناسی تکاملی می‌تواند توضیح دهد که برخی گرایش‌های اخلاقی چگونه در فرآیند انتخاب طبیعی شکل گرفته‌اند، اما نمی‌تواند به این پرسش پاسخ دهد که چرا رفتاری از نظر اخلاقی درست یا نادرست است. برای نمونه، اگر همدلی در طول تکامل به دلیل افزایش همکاری و بقای گروهی گسترش یافته باشد، این توضیح تنها می‌تواند منشأ این ویژگی را روشن می‌کند، نه اینکه چرا افراد باید بر اساس آن عمل کنند. این مسئله به شکاف معروف میان «هست» و «باید» بازمی‌گردد که نخستین بار توسط هیوم مطرح شد. هیوم استدلال می‌کرد که نمی‌توان از گزاره‌های توصیفی درباره‌ی واقعیت‌های جهان، به‌طور منطقی گزاره‌های هنجاری درباره‌ی آنچه باید انجام شود استخراج کرد (۸). از این چشم‌انداز، حتی کامل‌ترین تبیین‌های زیستی نیز نمی‌توانند به‌تنهایی بنیان بایسته‌های اخلاقی را فراهم کنند.

محدودیت دوم به مسئله «مغالطه طبیعت‌گرایانه» مربوط می‌شود. مور^۱ در اثر کلاسیک خود اصول اخلاق استدلال کرد که مفاهیم اخلاقی را نمی‌توان به ویژگی‌های طبیعی فروکاست. به باور او، تلاش برای تعریف مفاهیمی مانند «خوبی» بر اساس ویژگی‌های زیستی، روان‌شناختی یا طبیعی نوعی خطای منطقی محسوب می‌شود (۹). این نقد اهمیت ویژه‌ای در بحث اخلاق تکاملی دارد، زیرا نشان می‌دهد که حتی اگر رفتاری دارای منشأ طبیعی باشد، این امر بایست آن رفتار را از نظر اخلاقی موجه نمی‌سازد. برای نمونه، رقابت، خشونت یا جانبداری از خویشاوندان ممکن است دارای ریشه‌های تکاملی باشند، اما این واقعیت به‌تنهایی نمی‌تواند مشروعیت اخلاقی آنها را اثبات کند.

محدودیت سوم به تنوع فرهنگی گسترده نظام‌های اخلاقی مربوط می‌شود. اگر اخلاق تنها محصول تکامل زیستی بود، انتظار می‌رفت جوامع انسانی دارای نظام‌های اخلاقی کمابیش مشابهی باشند. در حالی که مطالعات انسان‌شناسی و جامعه‌شناسی نشان می‌دهند که ارزش‌ها، هنجارها و قواعد اخلاقی در فرهنگ‌های مختلف تفاوت‌های قابل توجهی دارند (۱۵). برای نمونه، نگرش‌ها نسبت به عدالت، آزادی، خانواده، مسئولیت اجتماعی، مجازات و حتی مفهوم فضیلت در جوامع مختلف متفاوت است. این تنوع نشان می‌دهد که فرهنگ، تاریخ، دین، آموزش و ساختارهای اجتماعی

از یک تقابل ساده است و می‌توان از امکان نوعی هم‌گرایی و آشتی میان آنها سخن گفت.

نخستین گام در این آشتی، بازنگری در برداشت سنتی از تکامل است. در بسیاری از تفسیرهای عمومی، تکامل با رقابت بی‌رحمانه و حذف ضعیف‌ترها مترادف دانسته می‌شود، اما زیست‌شناسی تکاملی معاصر نشان داده است که همکاری نیز یکی از مهم‌ترین پیامدهای فرآیندهای تکاملی است. از زمان انتشار آثار داروین، مشخص بود که غرایز اجتماعی نقش مهمی در زندگی انسان و سایر گونه‌های اجتماعی دارند. داروین در کتاب تبار انسان بیان کرد که احساس همدردی، دلسوزی و همکاری بخشی از میراث تکاملی انسان هستند و در شکل‌گیری اخلاق نقش اساسی ایفا می‌کنند (۲). بنابراین، برخلاف برخی برداشت‌های تقلیل‌گرایانه، نظریه‌ی تکامل از آغاز ظرفیت تبیین منشأ برخی رفتارهای اخلاقی را در اختیار داشت.

پیشرفت‌های بعدی در زیست‌شناسی تکاملی این دیدگاه را تقویت کردند. نظریه‌ی انتخاب خویشاوندی که توسط هیملتون مطرح شد، نشان داد که رفتارهای ایثارگرانه نسبت به خویشاوندان می‌توانند از منظر تکاملی سودمند باشند، زیرا به بقای ژن‌های مشترک کمک می‌کنند (۶۵). همچنین «نظریه‌ی نوع‌دوستی متقابل ترور» توضیح داد که همکاری میان افراد غیرخویشاوند نیز در شرایط خاص می‌تواند مزیت تکاملی داشته باشد (۷). این نظریه‌ها نشان دادند که رفتارهای اخلاقی به حتم در تعارض با انتخاب طبیعی قرار ندارند، بلکه در بسیاری از موارد خود محصول آن هستند.

گام مهم دیگر در این زمینه، مطالعات مربوط به تکامل همکاری است. پژوهش‌های نوواک نشان داده‌اند که همکاری یکی از نیروهای اساسی تکامل در کنار جهش و انتخاب طبیعی است. وی پنج سازوکار اصلی برای تکامل همکاری شامل انتخاب خویشاوندی، نوع‌دوستی متقابل، شهرت، شبکه‌های اجتماعی و انتخاب گروهی را معرفی کرده است (۴). این یافته‌ها نشان می‌دهند که بقای انسان نه تنها بر رقابت، بلکه بر توانایی ایجاد روابط مبتنی بر همکاری و حفظ انسجام اجتماعی استوار بوده است. در نتیجه، بسیاری از ارزش‌های اخلاقی مانند اعتماد، انصاف و مسئولیت‌پذیری را می‌توان به‌عنوان سازوکارهایی در نظر گرفت که موفقیت گروه‌های انسانی را افزایش داده‌اند.

محدودیت‌های زیست‌شناسی تکاملی بایست مانعی برای آشتی میان تکامل و اخلاق تلقی نمی‌شود. بسیاری از نظریه‌پردازان معاصر بر این باورند که تکامل زیستی پیش زمینه‌ی پیدایش اخلاق را فراهم کرده و سپس فرهنگ، زبان و عقلانیت انسانی این ظرفیت‌ها را گسترش داده‌اند. در این چارچوب، اخلاق محصول تعامل میان طبیعت و فرهنگ است. نظریه‌ی هم‌تکاملی ژن و

تنها از نظر علمی نارساست، بلکه ممکن است پیامدهای فلسفی و اجتماعی چالش برانگیزی نیز در بر داشته باشد.

تجربه‌ی تاریخی نیز محدودیت‌های رویکرد زیست‌گرایانه را آشکار کرده است. در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم، برخی جریان‌های فکری با استناد به برداشت‌های خاصی از تکامل، نابرابری اجتماعی، استعمار، تبعیض نژادی و سیاست‌های اصلاح نژادی را توجیه می‌کردند. این رویکردها که بعدها تحت عنوان داروینیسم اجتماعی شناخته شدند، نشان دادند که انتقال مستقیم مفاهیم زیستی به حوزه اخلاق و سیاست می‌تواند به سوءاستفاده‌های نظری و عملی منجر شود (۳). این تجربه تاریخی ضرورت تمایز میان تبیین علمی و توجیه اخلاقی را برجسته می‌کند.

امروزه بسیاری از پژوهشگران رویکردی تلفیقی را ترجیح می‌دهند که در آن اخلاق نتیجه تعامل چندین سطح از عوامل زیستی، شناختی، فرهنگی و اجتماعی تلقی می‌شود. در این دیدگاه، تکامل زیستی ظرفیت‌هایی مانند همدلی، همکاری و حساسیت به هنجارها را فراهم کرده است، اما محتوای اخلاقی این ظرفیت‌ها در بستر فرهنگ، زبان، آموزش و نهادهای اجتماعی شکل می‌گیرد (۱۸). بنابراین، زیست‌شناسی شرط لازم برای پیدایش اخلاق است، اما شرط کافی برای تبیین کامل آن محسوب نمی‌شود.

رویکرد زیست‌گرایانه سهم مهمی در فهم منشأ برخی گرایش‌های اخلاقی انسان داشته و نشان داده است که اخلاق به طور کامل جدا از تاریخ تکاملی بشر نیست. با این حال، این رویکرد با محدودیت‌های مهمی از جمله ناتوانی در تبیین اعتبار هنجاری اخلاق، نادیده گرفتن تنوع فرهنگی، دشواری توضیح رفتارهای جهان‌شمول اخلاقی، کم‌توجهی به نقش عقلانیت و خطر جبرگرایی زیستی مواجه است. از این روی، تبیین جامع اخلاق انسانی نیازمند رویکردی میان‌رشته‌ای است که همزمان به ابعاد زیستی، روان‌شناختی، فرهنگی، اجتماعی و فلسفی توجه کند.

امکان تعامل میان تکامل زیستی و اخلاق انسانی

یکی از مهم‌ترین پرسش‌ها در مطالعات میان‌رشته‌ای مربوط به تکامل و اخلاق این است که آیا میان مکانیسم‌های تکامل زیستی و نظام‌های اخلاقی انسانی تعارضی بنیادین وجود دارد یا اینکه می‌توان نوعی سازگاری و آشتی میان این دو حوزه برقرار کرد. در نخستین مواجهه، به نظر می‌رسد که اصول انتخاب طبیعی بر رقابت، تنازع بقا و موفقیت تولیدمثلی استوارند، در حالی که اخلاق انسانی بر ارزش‌هایی همچون؛ همدلی، عدالت، نوع‌دوستی، همکاری و حمایت از افراد آسیب‌پذیر تأکید می‌کند. همین تفاوت ظاهری سبب شده است که برخی اندیشمندان، اخلاق را نقطه مقابل منطق تکاملی تلقی کنند. با این حال، پژوهش‌های چند دهه اخیر نشان داده‌اند که رابطه میان تکامل و اخلاق بسیار پیچیده‌تر

انتخاب طبیعی شکل گرفته باشند (۲). این دیدگاه زمینه‌ساز پیدایش مطالعاتی شد که اخلاق را نه پدیده‌ای مستقل از طبیعت، بلکه امتداد فرآیندهای تکاملی در انسان تلقی می‌کردند.

پژوهش‌های بعدی در زیست‌شناسی رفتاری و جامعه‌زیست‌شناسی این ایده را توسعه دادند. نظریه‌ی انتخاب خویشاوندی نشان داد که رفتارهای نوع‌دوستانه می‌توانند از طریق افزایش بقای خویشاوندان دارای ژن‌های مشترک تکامل یابند (۵۶). همچنین نظریه‌ی نوع‌دوستی متقابل توضیح داد که همکاری میان افراد غیرخویشاوند نیز در شرایط خاص می‌تواند مزیت تکاملی داشته باشد (۷). این یافته‌ها نشان دادند که بسیاری از رفتارهایی که در نظام‌های اخلاقی ارزشمند تلقی می‌شوند، دارای بنیان‌های زیستی قابل شناسایی هستند.

با این حال، تبیین اخلاق تنها بر اساس زیست‌شناسی با محدودیت‌های جدی مواجه شد. تفاوت‌های گسترده‌ی اخلاقی میان جوامع مختلف نشان می‌داد که فرهنگ نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری ارزش‌ها و هنجارهای اخلاقی دارد. انسان‌شناسان فرهنگی از جمله کلیفورد گیرتز^۱ تأکید کردند که انسان موجودی است که در شبکه‌های معنایی و نمادین زندگی می‌کند و رفتارهای او بدون توجه به بستر فرهنگی قابل فهم نیستند (۳۰). از این دیدگاه، هرچند زیست‌شناسی ظرفیت‌های ابتدایی اخلاق را فراهم می‌کند، اما محتوای اخلاقی این ظرفیت‌ها در قالب فرهنگ شکل می‌گیرد.

اهمیت فرهنگ در تبیین اخلاق به ویژه در مطالعات تطبیقی آشکار شده است. پژوهش‌های انسان‌شناختی نشان می‌دهند که مفاهیمی مانند: عدالت، مسئولیت، فضیلت، آزادی و حتی مفهوم «خیر» در جوامع مختلف معانی متفاوتی دارند (۱۵). برای نمونه، در برخی فرهنگ‌ها ارزش‌های جمع‌گرایانه و مسئولیت نسبت به گروه اهمیت بیشتری دارند، در حالی که در برخی دیگر استقلال فردی و حقوق شخصی در مرکز نظام اخلاقی قرار می‌گیرند. این تنوع فرهنگی نشان می‌دهد که اخلاق تنها بازتابی از سازوکارهای زیستی نیست، بلکه تحت تأثیر فرآیندهای تاریخی، اجتماعی و نمادین قرار دارد.

یکی از مهم‌ترین چارچوب‌های نظری برای پیوند دادن زیست‌شناسی و فرهنگ، نظریه‌ی «هم‌تکاملی ژن و فرهنگ» است. این نظریه استدلال می‌کند که تکامل انسان حاصل تعامل مداوم میان فرآیندهای ژنتیکی و فرهنگی است (۱۶). بر اساس این دیدگاه، فرهنگ نه تنها محصول زیست‌شناسی است، بلکه می‌تواند بر مسیر تکامل زیستی تأثیر بگذارد. برای نمونه، گسترش همکاری‌های اجتماعی، تقسیم کار و انتقال دانش فرهنگی شرایطی را ایجاد کرده است که برخی ویژگی‌های شناختی و اجتماعی انسان تحت فشارهای

فرهنگ نشان می‌دهد که بسیاری از هنجارهای اخلاقی در نتیجه‌ی تعامل مستمر میان فرآیندهای زیستی و فرهنگی شکل گرفته‌اند (۱۶). بر اساس این دیدگاه، تکامل فرهنگی توانسته است دامنه‌ی همکاری و مسئولیت اخلاقی را بسیار فراتر از محدودیت‌های اولیه‌ی زیستی گسترش دهد.

در نهایت، آشتی میان تکامل زیستی و اخلاق انسانی زمانی امکان‌پذیر می‌شود که از دو افراط پرهیز شود: از یک سو فروکاستن اخلاق به زیست‌شناسی و از سوی دیگر نادیده گرفتن بنیان‌های تکاملی اخلاق. رویکرد نخست نمی‌تواند اعتبار هنجاری ارزش‌های اخلاقی را توضیح دهد و رویکرد دوم نیز از تبیین منشأ بسیاری از گرایش‌های اخلاقی ناتوان است. دیدگاه‌های معاصر بیش از پیش به سمت رویکردی تلفیقی حرکت کرده‌اند و اخلاق را محصول تعامل پویا میان فرآیندهای تکاملی، ساختارهای شناختی، نهادهای فرهنگی و تأمل عقلانی می‌دانند. در این چارچوب، اخلاق نه در تقابل با تکامل، بلکه به‌عنوان یکی از پیچیده‌ترین دستاوردهای آن فهمیده می‌شود؛ دستاوردی که به انسان امکان داده است از محدودیت‌های منافع فردی فراتر رود و اشکال گسترده‌ای از همکاری، همبستگی و مسئولیت اخلاقی را پدید آورد.

ابعاد میان‌رشته‌ای رابطه تکامل، فرهنگ و اخلاق

رابطه‌ی میان تکامل، فرهنگ و اخلاق از پیچیده‌ترین و در عین حال پربارترین حوزه‌های پژوهشی در علوم انسانی و زیستی معاصر است. در گذشته، مطالعه اخلاق در قلمرو فلسفه قرار داشت و منشأ ارزش‌های اخلاقی بیشتر در عقل، دین یا قراردادهای اجتماعی جستجو می‌شد. با پیدایش نظریه‌ی تکامل در قرن نوزدهم و گسترش علوم رفتاری و شناختی در قرن بیستم، این دیدگاه به چالش کشیده شد و پژوهشگران کوشیدند نقش فرآیندهای زیستی و تکاملی را در شکل‌گیری رفتارهای اخلاقی توضیح دهند. در دهه‌های اخیر نیز گسترش انسان‌شناسی تکاملی، روان‌شناسی اخلاق، علوم اعصاب، جامعه‌شناسی فرهنگی و نظریه‌ی هم‌تکاملی ژن و فرهنگ سبب شده است که مطالعه‌ی اخلاق به حوزه‌ای میان‌رشته‌ای تبدیل شود که در آن هیچ رشته‌ای به تنهایی قادر به ارائه تبیینی جامع از اخلاق انسانی نیست. از این منظر، اخلاق را باید محصول تعامل چندلایه میان عوامل زیستی، شناختی، فرهنگی و اجتماعی دانست؛ تعاملی که در طول تاریخ تکاملی و فرهنگی بشر شکل گرفته است.

نقطه‌ی آغاز این بحث در زیست‌شناسی تکاملی قرار دارد. نظریه‌ی انتخاب طبیعی نشان داد که بسیاری از ویژگی‌های رفتاری موجودات زنده در نتیجه‌ی فرآیندهای انطباقی تکامل یافته‌اند. داروین در کتاب «تبار‌انسان» بیان کرد که غرایز اجتماعی مانند؛ همدلی، دلسوزی و تمایل به همکاری نیز می‌توانند تحت تأثیر

انتخابی جدید قرار گیرند.

مطالعات علوم شناختی نیز بُعد دیگری به این بحث افزوده‌اند. پژوهشگران این حوزه نشان داده‌اند که قضاوت‌های اخلاقی حاصل تعامل میان فرآیندهای شناختی، هیجانی و اجتماعی هستند. هایت در نظریه‌ی «شهودگرایی اجتماعی» استدلال می‌کند که بسیاری از داوری‌های اخلاقی ابتدا به صورت شهودی و هیجانی شکل می‌گیرند و سپس توسط استدلال‌های عقلانی توجیه می‌شوند (۱۷). این یافته‌ها نشان می‌دهند که اخلاق را نمی‌توان تنها به محاسبات عقلانی یا بایسته‌های فرهنگی فروکاست؛ بلکه ساختارهای شناختی تکامل یافته نیز در آن نقش دارند.

همزمان، علوم اعصاب تلاش کرده‌اند زیربناهای عصبی رفتارهای اخلاقی را شناسایی کنند. پژوهش‌های تصویربرداری مغزی نشان داده‌اند که قضاوت‌های اخلاقی با فعالیت شبکه‌های عصبی مرتبط با همدلی، هیجان، تصمیم‌گیری و کنترل شناختی همراه هستند (۱۱). این یافته‌ها نشان می‌دهند که اخلاق دارای زیرساخت‌های زیستی مشخصی است، اما نحوه‌ی فعال شدن و جهت‌گیری این سازوکارها تحت تأثیر یادگیری اجتماعی و فرهنگی قرار دارد. به بیان دیگر، مغز انسان ظرفیت‌های اخلاقی را فراهم می‌کند، اما فرهنگ تعیین می‌کند که این ظرفیت‌ها چگونه به کار گرفته شوند.

از منظر جامعه‌شناسی نیز اخلاق بخشی از نظام تنظیم‌کننده‌ی روابط اجتماعی محسوب می‌شود. جامعه‌شناسان کلاسیکی مانند درکهایم^۱ اخلاق را از مهم‌ترین ابزارهای حفظ انسجام اجتماعی می‌دانستند. از نظر دورکهایم، ارزش‌ها و هنجارهای اخلاقی از طریق فرآیند اجتماعی شدن به افراد منتقل می‌شوند و نقش مهمی در تداوم نظم اجتماعی دارند (۳۱). این دیدگاه بر این نکته تأکید می‌کند که اخلاق تنها پدیده‌ای فردی یا زیستی نیست، بلکه کارکردی اجتماعی نیز دارد.

در دهه‌های اخیر، روان‌شناسی تکاملی و انسان‌شناسی تکاملی کوشیده‌اند میان این سطوح مختلف تحلیل پیوند برقرار کنند. پژوهش‌های توماسلو نشان می‌دهد که اخلاق انسانی در بستر همکاری‌های اجتماعی پیچیده تکامل یافته است. از دیدگاه او، توانایی انسان برای شکل‌دهی اهداف مشترک، درک دیدگاه دیگران و پایبندی به هنجارهای جمعی، نقش مهمی در پیدایش نظام‌های اخلاقی داشته است (۱۸). در این چارچوب، اخلاق نتیجه تعامل سه سطح است: ظرفیت‌های زیستی تکامل یافته، فرآیندهای شناختی و یادگیری فرهنگی.

از منظر فلسفه اخلاق نیز یافته‌های علوم تجربی اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده‌اند. اگرچه فیلسوفان همچنان تأکید می‌کنند که اعتبار هنجاری ارزش‌ها را نمی‌توان تنها از واقعیت‌های زیستی استخراج کرد، اما بسیاری از آنان باور دارند که شناخت منشأ تکاملی و

فرهنگی اخلاق می‌تواند در فهم بهتر ماهیت آن مؤثر باشد (۳۲). به بیانی دیگر، فلسفه‌ی اخلاق امروز بیش از گذشته از یافته‌های زیست‌شناسی، روان‌شناسی و انسان‌شناسی بهره می‌گیرد و در عین حال می‌کوشد پرسش‌های مربوط به بایسته‌های اخلاقی، عدالت و ارزش را بررسی کند.

رابطه‌ی میان تکامل، فرهنگ و اخلاق را نمی‌توان در چارچوب رشته علمی واحدی توضیح داد. زیست‌شناسی منشأ برخی ظرفیت‌های اخلاقی را روشن می‌کند؛ روان‌شناسی و علوم اعصاب سازوکارهای شناختی و هیجانی آنها را توضیح می‌دهند؛ انسان‌شناسی و جامعه‌شناسی نقش فرهنگ و نهادهای اجتماعی را آشکار می‌سازند؛ و فلسفه‌ی اخلاق به بررسی اعتبار هنجاری این پدیده‌ها می‌پردازد. از این روی، اخلاق انسانی را باید محصول فرآیندی چندسطحی و میان‌رشته‌ای دانست که در آن تکامل زیستی، تکامل فرهنگی، ساختارهای شناختی و نظام‌های اجتماعی به صورت متقابل بر یکدیگر اثر گذارند. چنین رویکردی تصویری جامع‌تر از اخلاق ارائه می‌دهد و امکان درک عمیق‌تر رابطه‌ی پیچیده میان طبیعت انسانی، فرهنگ و ارزش‌های اخلاقی را فراهم می‌سازد.

نتیجه‌گیری

بررسی رابطه‌ی میان مکانیسم‌های تکاملی تنازع بقا و نظام‌های اخلاقی در جوامع انسانی نشان می‌دهد که این دو حوزه نه در قالب تقابلی مطلق، بلکه در چارچوب تعاملی پیچیده، پویا و چندلایه قابل فهم هستند. اگرچه نظریه تکامل در نگاه نخست بر رقابت، بقا و موفقیت تولیدمثلی تأکید دارد و اخلاق انسانی بر ارزش‌هایی چون؛ عدالت، همدلی، همکاری، ایثار و مسئولیت‌پذیری استوار است، اما تحلیل‌های معاصر در زیست‌شناسی تکاملی، انسان‌شناسی، روان‌شناسی و فلسفه‌ی اخلاق نشان می‌دهند که این دو قلمرو بیش از آنکه در تعارض باشند، در فرآیندی طولانی از هم‌تکاملی و تأثیر متقابل شکل گرفته‌اند.

یافته‌های پژوهش حاضر نشان می‌دهند که مفهوم «تنازع بقا» در جوامع انسانی را نمی‌توان تنها به معنای رقابت فردی برای حذف رقیب یا کسب برتری تفسیر کرد. برخلاف برخی برداشت‌های ساده‌انگارانه و تاریخی از نظریه‌ی تکامل، بقای انسان در طول تاریخ بیش از هر چیز به توانایی او در ایجاد شبکه‌های همکاری، اعتماد متقابل و نظم اجتماعی وابسته بوده است. در واقع، انسان نه تنها به عنوان موجودی رقابت‌گر، بلکه به عنوان موجودی همکاری‌جو و هنجارپذیر توانسته است مسیر تکامل خود را طی کند. از این منظر، بسیاری از ارزش‌های اخلاقی را می‌توان به عنوان سازوکارهایی برای مدیریت تعارض‌های درون‌گروهی و تضمین بقای جمعی تفسیر کرد.

از منظر میان‌رشته‌ای، مهم‌ترین دستاورد این پژوهش آن است که هیچ‌یک از رویکردهای زیستی، فرهنگی، روان‌شناختی یا فلسفی به‌تنهایی قادر به تبیین کامل اخلاق انسانی نیستند. اخلاق پدیده‌ای چندبعدی است که در آن فرآیندهای تکاملی، ساختارهای شناختی، تجربه‌های فرهنگی، روابط اجتماعی و تأملات عقلانی به‌صورت هم‌زمان و متقابل نقش‌آفرینی می‌کنند. بنابراین، فهم دقیق اخلاق مستلزم عبور از مرزهای سنتی رشته‌ها و حرکت به سوی رویکردی تلفیقی و میان‌رشته‌ای است.

می‌توان گفت که بزرگ‌ترین دستاورد تکامل انسانی نه تنها توانایی رقابت، بلکه توانایی فراتر رفتن از منطق صرف رقابت بوده است. اخلاق را می‌توان از برجسته‌ترین نمودهای این فراروی دانست؛ پدیده‌ای که اگرچه ریشه در تاریخ طبیعی انسان دارد، اما در مسیر تحول خود به عرصه‌ای از خودآگاهی، مسئولیت‌پذیری و انتخاب آگاهانه وارد شده است. انسان موجودی است که از دل تنازع بقا برخاسته، اما توانسته است ارزش‌هایی را بیافریند که گاه در برابر منافع آنی بقا قرار می‌گیرند. از این منظر، اخلاق نه نفی تکامل، بلکه پیچیده‌ترین و انسانی‌ترین صورت تکامل است؛ مرحله‌ای که در آن طبیعت به فرهنگ، غریزه به مسئولیت و بقا به معنا تبدیل می‌شود.

بر این اساس، آینده پژوهش در حوزه‌ی اخلاق و تکامل نیز در گرو توسعه مطالعات میان‌رشته‌ای خواهد بود؛ مطالعاتی که بتوانند با بهره‌گیری هم‌زمان از زیست‌شناسی، علوم شناختی، انسان‌شناسی، جامعه‌شناسی و فلسفه، تصویری جامع‌تر از ماهیت اخلاق انسانی ارائه دهند و به فهم بهتر جایگاه انسان در پیوند میان طبیعت، فرهنگ و ارزش‌های اخلاقی کمک کنند.

با این حال، بررسی مبانی نظری اخلاق نشان داد که فروکاستن اخلاق به زیست‌شناسی با محدودیت‌های جدی مواجه است. زیست‌شناسی تکاملی می‌تواند منشأ برخی گرایش‌های اخلاقی مانند؛ همدلی، انصاف، نوع‌دوستی و همکاری را توضیح دهد، اما قادر نیست به پرسش‌های هنجاری بنیادین پاسخ دهد؛ پرسش‌هایی از این دست که چرا یک رفتار باید اخلاقی تلقی شود یا چه معیاری برای داوری درباره‌ی درستی و نادرستی اعمال وجود دارد. شکاف میان تبیین علمی و توجیه اخلاقی نشان می‌دهد که اخلاق انسانی واجد ابعادی است که فراتر از الزامات تنها زیستی قرار می‌گیرند.

در همین راستا، نقش فرهنگ به‌عنوان حلقه واسط میان طبیعت و اخلاق اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. فرهنگ بستری است که در آن ظرفیت‌های زیستی انسان به هنجارها، ارزش‌ها و نهادهای اخلاقی تبدیل می‌شوند. انسان نه تنها وارث ژن‌ها، بلکه وارث سنت‌ها، زبان‌ها، نمادها و نظام‌های معنایی نیز هست. از این روی، اخلاق را باید حاصل تعامل مداوم میان میراث زیستی و میراث فرهنگی دانست؛ تعاملی که در قالب فرآیند هم‌تکاملی ژن و فرهنگ، به پیدایش جوامع پیچیده انسانی انجامیده است.

همچنین بررسی تنش میان منافع فردی و خیر جمعی نشان داد که بخش مهمی از تاریخ اخلاق را می‌توان تلاشی برای ایجاد تعادل میان این دو قطب دانست. از یک سو، انسان دارای گرایش‌های طبیعی برای حفظ منافع فردی و بقای شخصی است و از سوی دیگر، زندگی اجتماعی او مستلزم رعایت قواعدی است که گاه محدودکننده منافع کوتاه‌مدت فردی هستند. نظام‌های اخلاقی در واقع پاسخ فرهنگی و هنجاری بشر به این تعارض بنیادین محسوب می‌شوند و امکان همزیستی پایدار در گروه‌های انسانی را فراهم می‌آورند.

منابع

1. Darwin, C. (2009). *On the origin of species*. Harvard University Press. (Original work published 1859)
2. Darwin, C. (1871). *The descent of man, and selection in relation to sex*. 1st edition, John Murray.
3. Hofstadter, R. (1944). *Social Darwinism in American thought*. Beacon Press.
4. Nowak, M. A. (2006). Five rules for the evolution of cooperation. *Science*, 314(5805), 1560–1563. <https://doi.org/10.1126/science.1133755>
5. Hamilton, W. D. (1964a). The genetical evolution of social behaviour I. *Journal of Theoretical Biology*, 7(1), 1–16. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(64\)90038-4](https://doi.org/10.1016/0022-5193(64)90038-4)
6. Hamilton, W. D. (1964b). The genetical evolution of social behaviour II. *Journal of Theoretical Biology*, 7(1), 17–52. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(64\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0022-5193(64)90039-6)
7. Trivers, R. L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *Quarterly Review of Biology*, 64(1), 35–57 <https://doi.org/10.1086/406755>
8. Hume, D. (1978). *A treatise of human nature*. Oxford University Press. (Original work published 1739)
9. Moore, G. E. (1903). *Principia Ethica*. Cambridge University Press.
10. Wilson, E. O. (1975). *Sociobiology: The new synthesis*. Harvard University Press.

11. Greene, J. D., Sommerville, R. B., Nystrom, L. E., Darley, J. M., & Cohen, J. D. (2001). An fMRI investigation of emotional engagement in moral judgment. *Science*, 293(5537), 2105–2108. <https://doi.org/10.1126/science.1062872>
12. Kant, I. (2012). *Groundwork of the metaphysics of morals*. Cambridge University Press. (Original work published 1785)
13. Olson, M. (1965). *The logic of collective action*. Harvard University Press.
14. Axelrod, R., & Hamilton, W. D. (1981). The evolution of cooperation. *Science*, 211(4489), 1390–1396. <https://doi.org/10.1126/science.7466396>
15. Shweder, R. A., Much, N. C., Mahapatra, M., & Park, L. (1997). The “big three” of morality (autonomy, community, divinity) and the “big three” explanations of suffering. In A. M. Brandt & P. Rozin (Eds.), *Morality and health* (pp. 119–169). Routledge.
16. Richerson, P. J., & Boyd, R. (2005). *Not by genes alone: How culture transformed human evolution*. University of Chicago Press.
17. Haidt, J. (2001). The emotional dog and its rational tail: A social intuitionist approach to moral judgment. *Psychological Review*, 108(4), 814–834. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.108.4.814>
18. Tomasello, M. (2016). *A natural history of human morality*. Harvard University Press.
19. Ridley, M. (1996). *The origins of virtue: Human instincts and the evolution of cooperation*. Penguin Books.
20. Spencer, H. (1864). *Principles of biology* (Vol. 1). London: Williams and Norgate.
21. Lewontin, R. C., Rose, S., & Kamin, L. J. (1984). *Not in our genes: Biology, ideology, and human nature*. New York, NY: Pantheon Books.
22. Kropotkin, P. (2008). *Mutual aid: A factor of evolution*. Charleston, SC: Forgotten Books. (Original work published 1902).
23. Boehm, C. (2012). *Moral origins: The evolution of virtue, altruism, and shame*. New York, NY: Basic Books.
24. Henrich, J. (2016). *The secret of our success: How culture is driving human evolution, domesticating our species, and making us smarter*. Princeton University Press.
25. Nowak, M., & Highfield, R. (2011). *Super cooperators: Altruism, evolution, and why we need each other to succeed*. Free Press.
26. Hamlin, J. K., Wynn, K., & Bloom, P. (2007). Social evaluation by preverbal infants. *Nature*, 450(7169), 557–559. <https://doi.org/10.1038/nature06288>
27. Korsgaard, C. M. (2006). *The sources of normativity*. Cambridge University Press.
28. Singer, P. (2011). *The expanding circle: Ethics, evolution, and moral progress* (2nd ed.). Princeton University Press.
29. Greene, J. D. (2013). *Moral tribes: Emotion, reason, and the gap between us and them*. Penguin Press.
30. Geertz, C. (1973). *The interpretation of cultures*. Basic Books.
31. Durkheim, E. (1951). *Suicide: A study in sociology* (J. A. Spaulding & G. Simpson, Trans.). Free Press. (Original work published 1897).
32. Kitcher, P. (2011). *The ethical project*. Harvard University Press.

ساعت‌های اتمی، مولکولی و زیستی: روایت‌های متفاوت زمان

بهاره احمدی^۱، علی اکبر موسوی موحدی^۲*

۱. مرکز تحقیقات بیوشیمی و بیوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲. عضو پیوسته فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران، عضو پیوسته آکادمی جهانی علوم (تواس)،
عضو پیوسته آکادمی علوم جهان اسلام
moosavi@ut.ac.ir
نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

زمان، مفهومی بنیادین در فهم طبیعت است که در تجربه روزمره با گردش شب و روز، تغییر فصل‌ها و حرکت اجرام آسمانی شناخته می‌شود، اما در علم مدرن به پدیده‌ای چندبعدی تبدیل شده که از مقیاس‌های زیراتمی تا سامانه‌های زیستی و فرایندهای تکاملی را در بر می‌گیرد. این مقاله با رویکردی مروری و میان‌رشته‌ای، سیر تحول مفهوم زمان و روش‌های زمان‌سنجی را از نخستین ابزارهای مبتنی بر پدیده‌های طبیعی تا پیشرفته‌ترین استانداردهای علمی بررسی می‌کند. ابتدا، روند تاریخی شکل‌گیری واحدهای زمانی و تکامل ابزارهای زمان‌سنجی از ساعت‌های آفتابی، آبی و مکانیکی تا ساعت‌های کوارتزی و اتمی تشریح شده، نقش این تحولات در افزایش دقت اندازه‌گیری زمان تبیین می‌شود. سپس، مبانی فیزیکی تعریف نوین ثانیه بر اساس گذار فوق‌ریز اتم سزیم-۱۳۳ و جایگاه ساعت‌های اتمی در استانداردسازی زمان، ناهوری ماهواره‌ای، مخابرات و پژوهش‌های علمی مورد بحث قرار می‌گیرد.

در ادامه، مفهوم زمان در زیست‌شناسی تکاملی از منظر ساعت مولکولی بررسی می‌شود؛ روشی که با اتکا به نرخ انباشت جهش‌های ژنتیکی، امکان برآورد زمان واگرایی گونه‌ها، بازسازی روابط تبارزایی و مطالعه تاریخ تکامل موجودات زنده را فراهم می‌کند. همچنین، محدودیت‌ها، فرضیات و عوامل مؤثر بر دقت این روش، از جمله تفاوت نرخ جهش در ژن‌ها و دودمان‌های مختلف، مورد توجه قرار می‌گیرد. بخش پایانی مقاله به ساعت زیستی و ریتم‌های سیرکادین^۲ اختصاص دارد؛ سامانه‌ای درون‌زاد که با هماهنگ‌سازی چرخه خواب و بیداری، تنظیم ترشح هورمون‌ها، متابولیسم، عملکرد ایمنی و بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک، نقش اساسی در حفظ هم‌ایستایی بدن ایفا می‌کند. همچنین، پیامدهای اختلال در این ریتم‌ها و ارتباط آن با بیماری‌های متابولیک، قلبی-عروقی، عصبی و روان‌شناختی مرور می‌شود.

در مجموع، این مقاله نشان می‌دهد که مفهوم زمان، با وجود نمود واحد در زندگی روزمره، در علوم مختلف تعاریف و کاربردهای متفاوت اما مکملی دارد. از نوسان‌های کوانتومی اتم‌ها که دقیق‌ترین معیار سنجش زمان را فراهم می‌کنند، تا تغییرات تدریجی ژنوم‌ها که تاریخ تکامل حیات را آشکار می‌سازند، و نیز ریتم‌های زیستی که سلامت موجودات زنده را تنظیم می‌کنند، همگی بیانگر آن هستند که زمان نه تنها یک کمیت فیزیکی، بلکه چارچوبی بنیادین برای درک ساختار، تحول و پویایی جهان طبیعی است.

کلیدواژه‌گان: زمان‌سنجی، سزیم-۱۳۳، ساعت اتمی، ثانیه، ساعت مولکولی، تکامل مولکولی، ساعت زیستی، ریتم سیرکادین.

ساعت اتمی

زمان، از مهم‌ترین مواردی است که سنجش و اطلاع از آن، از اهمیت زیادی برخوردار است. دغدغه اندازه‌گیری زمان به اندازه تاریخ بشر قدمت دارد. پیدایش کشاورزی، گسترش تمدن‌ها و نظم اجتماعی و به جا آوردن آیین‌های قومی تنها بخشی از این انگیزه بوده است. داستان زمان‌سنجی، حاصل تلاش جمعی از تمدن‌های گوناگون در طول هزاران سال می‌باشد که منجر شد تا امروز قادر باشیم با دقت بسیار بالا زمان را اندازه بگیریم. تمدن بین‌النهرین بیشترین سهم را در تفهیم مفهوم زمان داشته است. آنچه امروزه به عنوان واحدهای بنیادین زمان می‌شناسیم، شامل تقویم دوازده ماهه و تقسیم‌بندی ساعت بر پایه عدد شصت، ریشه

در نوآوری‌های سومریان و بابلی‌ها دارد. گویا این تمدن‌ها نخستین کسانی بودند که با ابداع دستگاه شمارش شش‌تایی^۳ (مبنای ۶۰)، چارچوبی ریاضی برای اندازه‌گیری زمان ایجاد کردند که اساس تقسیم هر ساعت به شصت دقیقه و هر دقیقه به شصت ثانیه را تشکیل داد (۱). ساعت‌های آفتابی حدود ۱۵۰۰ سال پیش از میلاد ساخته شدند. مصریان با درک محدودیت ساعت آفتابی در شب و روزهای ابری، مخزنی ساختند که آب از آن با شاری منظم خارج می‌شد، و با اندازه‌گیری سطح آب، زمان را نشان می‌داد. آن‌ها همچنین با تهیه نقشه‌هایی از آسمان و ستارگان، روشی برای سنجش زمان در شب ابداع کردند [۱].

ایرانیان در عصر طلایی اسلام، تقویم خورشیدی بسیار دقیقی ایجاد کردند و همچنین، ابزارهای زمان‌سنجی پیشین را اصلاح کردند. به‌عنوان مثال، جهت تقسیم عادلانه آب قنات بین کشاورزان، دستگاهی به نام فنجان (پنگان) را طراحی کردند که کاربرد آن دست کم به ۲۴۰۰ سال پیش بازمی‌گردد. این ساعت آبی بر پایه اصل شناوری و جریان یکنواخت آب، یکی از دقیق‌ترین ابزارهای زمان‌سنجی محسوب می‌شد (۲). علاوه بر بحث زمان‌شناسی، فلسفه زمان‌شناسی نیز مورد توجه ایرانیان بوده است. کتاب آثار الباقیه عن القرون الخالیه از ابوریحان بیرونی را می‌توان یکی از نخستین مطالعات در زمینه جهان‌شناسی مفهوم زمان دانست. بیرونی به تعریف شب و روز و آغاز هر یک از نظر ملل مختلف می‌پردازد و ماهیت و مبدأ سال‌ها و ماه‌ها را بررسی می‌کند [۲]. اختراع اولین ساعت‌های مکانیکی در قرون وسطی گامی بزرگ به شمار می‌رفت. مبنای عملکرد این دستگاه‌ها، نوسان یک جسم فیزیکی است، از قوانین پیش‌بینی پذیر فیزیک کلاسیک تبعیت می‌کنند و وابسته به شرایط محیطی مانند دما و اصطکاک می‌باشند. به این صورت در طراحی آنها، تلاش برای حذف اثر این عوامل صورت می‌گیرد. در این زمان، نیاز به زمان‌شماری که بدون توجه به متغیرهای محیطی، دقت خود را حفظ و همچنان قابل اعتماد باشد احساس شد. ساعتی که افت و خیز، اساس عملکرد آن باشد نه عامل خطا، و خود این نوسانات رفتار واحدی را از خود نشان دهند. همین مسئله، توجه را از فیزیک کلاسیک به فیزیک کوانتومی معطوف کرد، به گونه‌ای که تیک تاک ساعت، انتقالات گسسته الکترون‌ها بین ترازهای انرژی در اتم باشد. در پدیده‌های ذرات کوانتومی، عدم قطعیت اساس کار است و از نظر مفهومی در رده‌ای جداگانه از سایر ساعت‌ها قرار دارد. البته در فیزیک کوانتوم نیز بحث ثابت بودن ثابت‌ها پیچیده است. برخی نظریه‌ها پیشنهاد می‌کنند که ثابت‌های طبیعت ممکن است در طول زمان یا در مکان‌های مختلف تغییر کنند و ما صرفاً در یک حالت ویژه از این ثابت‌ها زندگی می‌کنیم.

اتم‌ها، با توجه به اصول فیزیک، گزینه‌ای ایده‌آل به عنوان مبنای عملکرد ساعت هستند. در هر اتم، الکترون‌ها فقط می‌توانند در ترازهای انرژی مشخص و گسسته قرار بگیرند و اختلاف انرژی بین دو تراز یک عدد ثابت است. این عدد به شرایط محیطی (مثل دما یا فشار) وابسته نیست و در سراسر هستی یکسان است. بر اساس معادله پلانک^۱، اختلاف انرژی بین دو تراز، با فرکانس نور جذب‌شده یا گسیل‌شده، رابطه مستقیم و خطی دارد. از آنجا که ثابت پلانک، یک ثابت جهانی است، بنابراین فرکانس نیز ثابت می‌شود و فرکانس نوسان یک اتم (مثلاً سزیم-۱۳۳) به عنوان یک ثابت بنیادین در نظر گرفته می‌شود. بنابراین می‌توان از آن به

عنوان یک استاندارد زمان بسیار دقیق و تغییرناپذیر استفاده کرد. این بر خلاف ساعت‌های مکانیکی است که فرکانس آنها تحت تأثیر عواملی مانند دما، فشار، طول عمر و ... قرار می‌گیرد. اتم‌های متعلق به ستون اول جدول تناوبی (مانند سزیم)، یک الکترون در لایه بیرونی اوربیتال مولکولی خود دارند [۳]. به دلیل تمایل اتم‌ها برای رسیدن به آرایش پایدار گاز نجیب، این الکترون به راحتی با امواج الکترومغناطیس برهمکنش می‌کند تا به آرایش اتم نجیب قبل از خود برسد و به دلیل فاصله قابل توجهش از هسته، کمتر تحت تأثیر مزاحمت‌های داخلی قرار می‌گیرد و منحنی تشدید بسیار باریک‌تری تولید می‌کند. باریکی منحنی به معنای دقت بسیار عالی ساعت است. به دلیل همین خواص ویژه اتم سزیم، ساعت‌های اتمی بر مبنای سزیم هستند. در یک ساعت اتمی استاندارد، موج الکترومغناطیس به مجموعه‌ای از اتم‌های سزیم-۱۳۳ توسط امواج ریزموج تابانده می‌شوند. هنگامی که فرکانس امواج دقیقاً با فرکانس طبیعی اتم‌ها مطابقت پیدا کند، اتم‌ها انرژی جذب کرده، دچار انتقال کوانتومی می‌شوند. این فرکانس تشدید، همان فرکانس پایدار و قابل پیش‌بینی اتم‌های سزیم است (۳). از سال ۱۹۶۷ مطابق با سال ۱۳۴۵ شمسی، ثانیه، واحد زمان در دستگاه بین‌المللی یکاها (SI) دیگر بر اساس حرکت زمین تعریف نمی‌شود، بلکه بر اساس رفتار اتم سزیم تعریف شده است. طبق نتیجه سیزدهمین کنفرانس عمومی اوزان و مقیاس‌ها در سال ۱۹۶۷، ثانیه مدت زمان ۹,۱۹۲۶۳۱,۷۷۰ دوره از تابش متناظر با انتقال بین دو تراز حالت پایه اتم سزیم-۱۳۳ است (۴). اهمیت این تعریف در آن است که شمارش تغییرات فرکانس سزیم-۱۳۳ همیشه ثابت و قابل اعتماد است. زیرا این اتم دارای گذار فوق‌ریز^۲ با فرکانسی بسیار پایدار، تکرارپذیر و مستقل از شرایط محیطی است. مزیت اصلی سزیم، دقت فوق‌العاده، پایداری بلندمدت، قابلیت بازتولید در آزمایشگاه‌های مختلف جهان و حساسیت اندک به تغییرات دما، فشار و میدان‌های خارجی است. به همین دلیل، ساعت‌های اتمی سزیمی مبنای استاندارد جهانی زمان^۳، سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای، مخابرات، اخترشناسی و بسیاری از اندازه‌گیری‌های دقیق علمی و فناوری هستند. بنابراین، به طور قراردادی، ۱ ثانیه برابر نوسانات اتم سزیم تعریف می‌شود.

پیشینه ساعت اتمی

بیش از نیم قرن پیش از آنکه ساعت اتمی ساخته شود، فیزیک‌دانی بریتانیایی به نام جیمز کلرک مکسول^۴ در کتاب مهم خود به نام در باب الکتریسیته و مغناطیس در سال ۱۸۷۳ مطابق با ۱۲۵۱ شمسی ایده‌ای مهم را مطرح کرد. مکسول که به خاطر معادلاتش در الکترومغناطیس شهرت دارد، به چرخش زمین به عنوان مبنای اندازه‌گیری زمان نگاه انتقادی داشت. او استدلال می‌کرد که چرخش

1. $E = h \times f$

2. Hyperfine Transition

3. Coordinated Universal Time

4. James Clerk Maxwell (1831-1879)

می‌شود. با انجام دقیق همین فرآیند بر روی اتم سزیم به عنوان بهترین نمونه، فرکانس پایه $9,192,631,770$ هرتز اندازه‌گیری شد که این فرکانس مطلق و تغییرناپذیر است [۶]. به این ترتیب دستاورد بزرگ رابی در این دوره، ابداع روش تشدید مغناطیسی پرتو مولکولی بود [۷] که او این کشف را در سال ۱۹۳۷ گزارش کرد و به پاس آن در سال ۱۹۴۴ مطابق با ۱۳۲۲ شمسی برنده جایزه نوبل فیزیک شد.

با وجود پیشنهاد رابی، تلاش‌های بیشتری جهت پیاده کردن ایده ساعت اتمی لازم بود که تا سال‌ها محقق نشد. سرانجام، دانشمند بریتانیایی در آزمایشگاه ملی فیزیک انگلستان در سال ۱۹۵۵، مطابق با ۱۳۳۳ شمسی، لوییس اسن^۶، ساعت اتمی موفق را با استفاده از اتم‌های سزیم-۱۳۳ به عنوان نوسان‌ساز ساخت [۸]. این ساعت که به دلیل ظاهر منحصر به فردش «تخت پرنده» نام گرفته بود، با دقت بی‌نظیر یک ثانیه خطا در ۳۰۰ سال، تمام استانداردهای قبلی را پشت سر گذاشت و ناپایداری چرخش زمین را نداشت. با این وجود اما هنوز محدودیت‌هایی وجود داشت؛ در ساعت‌های اتمی اولیه که با پرتو حرارتی، سزیم را امتیاز می‌کردند، اتم‌ها با سرعت بسیار بالا از میان حفره تشدید کننده موج عبور می‌کردند که این سرعت زیاد باعث می‌شد زمان برهم‌کنش بسیار کوتاه باشد و در نتیجه پهنای خطوط سیگنال بزرگ شود. هر چه پهنای خط بزرگتر باشد، دقت در تشخیص فرکانس تشدید اتمی کمتر است.

جرالد زاخاریاس^۷، فیزیکدان آمریکایی برای حل این محدودیت پیشنهاد کرد که پرتو اتمی به سمت بالا پرتاب شود، در نقطه اوج متوقف شود و به سوی پایین سقوط کند و بار دیگر از همان حفره عبور کند. به این ترتیب با دو بار عبور، زمان برهم‌کنش بالا رفته و دقت بشدت بهبود خواهد یافت. اما تعداد اتم‌هایی که بعد از خروج از منبع حرارتی حرکت کندی داشته باشند و همچنین در مسیر به سوی بالا با یکدیگر برخورد نکنند و به سلامت به سمت پایین بازگردند، بسیار اندک است. به نظر می‌آمد این ایده مناسبی نیست اما با ظهور فناوری خنک‌سازی لیزری در دهه ۹۰ میلادی، توانستند اتم‌ها را مستقیماً سرد کنند و سرعت آنها را به شدت کاهش دهند. با این فناوری اتم‌های سزیم از دمای اتاق، حدود ۳۰۰ کلوین و سرعت حدود ۲۰۰ متر بر ثانیه، به دمای حدود ۱ میکروکلوین می‌رسند و سرعت آنها حدود چند سانتی‌متر بر ثانیه کاهش می‌یابد. به این شکل، زمان برهم‌کنش با امواج ریزموج ۱۰۰۰ برابر افزایش می‌یابد. اما داستان تمام نشد، برای اینکه بتوان پهنای خط را بیشتر کاهش داد، باید مسیر حرکت پرتو را زیاد کرد

زمین یکنواخت نیست و تغییرات غیرقابل پیش‌بینی دارد؛ بنابراین نمی‌تواند مبنایی ایده‌آل برای تعریف یکاهای زمان در سراسر جهان باشد. جایگزین پیشنهادی مکسول این بود که به جای چرخش سیاره، از ارتعاشات نور استفاده شود؛ چرا که فرکانس این ارتعاشات توسط اتم‌ها تعیین می‌شود و اتم‌ها یکسان و نامتغیرند [۴].

گام بنیادین دیگر توسط اتو اشترن^۱ و والتر گرلاخ^۲ در سال ۱۹۲۲ مطابق با ۱۳۰۰ شمسی برداشته شد. آنها با آزمایش معروف خود نشان دادند که گشتاور مغناطیسی اتم‌ها در یک میدان مغناطیسی خارجی فقط می‌تواند جهت‌گیری‌های گسسته داشته باشد، پدیده‌ای که به کوانتیزه شدن جهت اسپین معروف است. این کشف، امکان جداسازی اتم‌ها بر اساس جهت اسپین را فراهم کرد [۵]. اشترن به پاس این دستاوردها و به ویژه توسعه روش پرتو مولکولی و اندازه‌گیری گشتاور مغناطیسی پروتون، در سال ۱۹۴۳ مطابق با ۱۳۲۱ شمسی جایزه نوبل فیزیک را دریافت کرد (۵). در این روش پرتوی از اتم‌های خنثی از یک میدان مغناطیسی غیریکنواخت عبور داده می‌شود. این میدان، اتم‌ها را بر اساس جهت اسپین از هم جدا می‌کند و از میان دو یا چند بخش جدا شده، فقط اتم‌هایی با یک جهت اسپین مشخص (مثلاً اسپین به سمت بالا) اجازه عبور داده می‌شوند. اوتو فریش^۳ و امیلیو سگره^۴، شاگردان اشترن، مسیر تعدادی از پرتوها را مسدود کردند تا فقط اتم‌ها با جهت اسپین دلخواه باقی بمانند. به این شکل، اتم‌ها توسط آشکارساز شمرده می‌شوند.

ایزیدور رابی^۵، از دیگر شاگردان اشترن، پرتوی انتخاب‌شده را به ناحیه‌ای هدایت کرد که در آن دو میدان مغناطیسی اعمال می‌شد؛ یک میدان مغناطیسی یکنواخت که جهت اسپین اتم‌ها را تثبیت می‌کند و یک میدان مغناطیسی نوسانی عمود بر میدان ایستا، به طوری که فرکانس میدان نوسانی به آرامی تغییر داده می‌شود. هنگامی که فرکانس این میدان با اختلاف انرژی بین دو سطح کوانتومی اتم برابر شود، اتم‌ها انرژی را جذب کرده، جهت اسپین آنها عوض می‌شود. پس از خروج از ناحیه میانی، پرتو از دومین میدان مغناطیسی غیریکنواخت عبور می‌کند. این آهنربا، تحلیلگر نام دارد و گرادیان میدان آن برعکس آهنربای اول است. اگر فرکانس میدان نوسانی با فرکانس تشدید اتم همخوانی نداشته باشد، جهت اسپین اتم‌ها تغییر نمی‌کند و مسیر آنها توسط تحلیلگر به سمت آشکارساز متمرکز می‌شود و سیگنال دریافت می‌شود. اما اگر فرکانس میدان نوسانی دقیقاً با فرکانس تشدید اتم برابر باشد، اتم‌ها در ناحیه میانی، اسپین خود را می‌چرخانند. در نتیجه دیگر به سمت آشکارساز منحرف نمی‌شوند و تعداد اتم‌های رسیده به آشکارساز کاهش می‌یابد و یک کاهش واضح در سیگنال مشاهده

1. Otto Stern (1888-1969)

2. Walther Gerlach (1889-1979)

3. Otto Frisch (1904-1979)

4. Emilio Segrè (1905-1979)

5. Isidor Rabi (1898-1988)

6. Louis Essen (1908-1997)

7. Jerrold Reinach Zacharias (1905-1986)

ساعت مولکولی

ساعت مولکولی، یک مفهوم کلیدی در زیست‌شناسی تکاملی و ژنتیک است و برخلاف ساعت معمولی که دقیقاً یک ثانیه یک ثانیه به طور ثابت و جهانی پیش می‌رود، یک ساعت تصادفی محسوب می‌شود؛ زیرا جهش‌های ژنتیکی که مبنای عملکرد آن هستند، به صورت تصادفی رخ می‌دهند. با این حال، اگر میانگین جهش‌ها را در دوره‌های زمانی بسیار طولانی در نظر بگیریم، به یک نرخ متوسط نسبتاً قابل پیش‌بینی می‌رسیم. به این ترتیب می‌توان از تغییرات مولکولی به عنوان ساعتی برای اندازه‌گیری زمان جدایی گونه‌ها استفاده کرد. ساعت مولکولی به طور مستقیم زمان را اندازه نمی‌گیرد، بلکه تعداد اختلافات ژنتیکی را می‌سنجد [۱۰]. برای درک آن از یک مثال ساده استفاده می‌کنیم؛ فرض کنید در یک ژن خاص، نرخ جهش DNA به طور متوسط ۱ جهش در هر میلیون سال باشد. حالا اگر توالی همان ژن را در دو گونه مختلف مقایسه شود در ۵ جایگاه با هم تفاوت دارند، تخمین این دو گونه تقریباً ۵ میلیون سال پیش از یکدیگر جدا شده‌اند. این همان مفهوم ساعت مولکولی است.

پیشینه ساعت مولکولی

با بررسی منابع، به این احتمال می‌رسیم که مفهوم ساعت مولکولی توسط امیل زاکرکاندل^۱ و لینوس پاولینگ^۲ در سال ۱۹۶۲ میلادی مطابق با سال ۱۳۴۰ شمسی به عنوان «ساعت مولکولی تکاملی» مطرح شده باشد. اینطور فرض شد که اگر تغییرات تکاملی مولکول‌ها، مانند حرکات حرارتی ملایم آن‌ها، دارای نرخ ثابت و تصادفی باشد، می‌توان از آن به عنوان ساعتی برای اندازه‌گیری زمان تکامل گونه‌ها استفاده کرد [۱۱]. این نظریه در سال ۱۹۶۸ مطابق با سال ۱۳۴۶ شمسی توسط موتو کیمورا^۳ تکمیل شد. او به محاسبات هالدين^۴ اشاره می‌کند که نشان داد اگر تکامل نتیجه انتخاب طبیعی باشد، نرخ تثبیت یک جهش در پروتئین با ۱۰۰ آمینواسید حدود ۸-۱۰ خواهد بود. از آنجا که نرخ مشاهده‌شده در طبیعت بیشتر از این مقدار است، نمی‌توان گفت این تغییرات حاصل انتخاب طبیعی هستند. در واقع بیشتر آن‌ها یا جهش‌های خنثی (فاقد نفع و ضرر) هستند که تنها تحت تأثیر رانش ژنتیکی تثبیت می‌شوند، و یا چون به شدت مضرند طبیعت آن‌ها را به سرعت حذف می‌کند. بنابراین فقط جهش‌های خنثی باقی می‌مانند و نرخ تثبیت این تغییرات برابر با نرخ رخداد جهش خواهد بود. از آنجا که نرخ جهش ثابت فرض می‌شود، می‌توان از آن به عنوان ساعتی برای اندازه‌گیری زمان واگرایی استفاده کرد. این نظریه به نظریه خنثی معروف است و مفهومی تحت عنوان ساعت سخت را معرفی می‌کند [۱۲].

اما این افزایش مسیر محدودیت فضایی دارد و در ضمن، این اتفاق منجر به پخش شدن ابر اتمی و کاهش قدرت آشکارسازی می‌شود. به این ترتیب، دانشمندان مسیر جدیدی را آغاز کردند؛ استفاده از نور به جای امواج ریزموج برای سنجش زمان. ساعت‌های نوری نیز مانند ساعت‌های قبلی از یک گذار اتمی به عنوان مرجع استفاده می‌کنند، اما نه در محدوده ریزموج، بلکه در محدوده نور مرئی یا فرابنفش. با این اتفاق، بدلیل تعداد بسیار بیشتر سیکل‌های نوسان در واحد زمان، پایداری کوتاه‌مدت ساعت به شدت بهبود می‌یابد. در عمل، با استفاده از تله‌های نوری و لیزرهای فوق پایدار، پهنای خط باریک‌تر هم می‌شود. اثرات مزاحم مانند برخورد اتم‌ها یا میدان‌های خارجی، یک جابجایی مطلق (ΔE) در سطوح انرژی ترازها ایجاد می‌کند. اما آنچه برای دقت مهم است، جابجایی نسبی ($\Delta E/E$) است. چون انرژی فوتون نوری حدود $1000/1$ برابر بیشتر از فوتون ریزموج است، اثر نسبی همان اغتشاشات خارجی به همان نسبت کوچکتر می‌شود. به همین دلیل، ساعت‌های نوری به طور ذاتی در برابر نویزهای محیطی بسیار مقاوم‌ترند [۶].

امروزه، تصور دنیا بدون وجود ساعت اتمی تقریباً ناممکن است. فناوری ساعت اتمی، ستون فقرات فناوری‌های ناوبری مانند سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی هستند و برای همگام‌سازی شبکه‌های مخابراتی و ارتباطی ضروری هستند. با ورود به عصر کوانتومی، اهمیت وجود آن بیش از پیش برجسته می‌شود چرا که ارتباطات و محاسبات کوانتومی برای عملکرد صحیح خود، به سطوح بی‌سابقه‌ای از همگام‌سازی زمانی نیاز دارند [۹]. در عصر پیش رو، ساعت‌های کوانتومی در حال ظهور می‌باشند که در آن‌ها، چندین ساعت نوری از طریق فیبر نوری یا فضا با یکدیگر مقایسه می‌شوند تا دقت و پایداری بی‌سابقه‌ای به دست آید. این شبکه‌ها می‌توانند به عنوان آشکارسازهای امواج گرانشی یا ردیاب‌های ماده تاریک عمل کنند (۶). بنابراین هنوز داستان یافتن دقیق‌ترین ساعت جهان به پایان نرسیده و بزودی بازتعریف ثانیه، تغییراتی بزرگ را خواهد گشود.

در نهایت ساعت‌های کوانتومی، به‌ویژه ساعت‌های نوری، با بهره‌گیری از گذارهای نوری اتم‌هایی مانند استرانسیم و ایتربیوم، دقیق‌ترین ابزار سنجش زمان می‌توانند باشند. دقت آن‌ها صدها برابر بیشتر از ساعت‌های سزیمی است و تنها در میلیاردها سال حدود یک ثانیه خطا دارند. این فناوری، زیرساخت نسل آینده ناوبری، مخابرات، اینترنت، فیزیک بنیادی و فناوری‌های کوانتومی خواهد بود. انتظار می‌رود در آینده نزدیک، تعریف رسمی «ثانیه» نیز بر پایه ساعت‌های کوانتومی بازنگری شود و استاندارد نویین برای زمان در جهان شکل گیرد.

1. Émile Zuckerkandl (1922-2013)
2. Linus Pauling (1901-1994)

3. Motoo Kimura (1924-1994)
4. J.B.S. Haldane (1892-1964)

میمون‌های دنیای قدیم حدود ۳۰ میلیون سال پیش است، این عدد را به عنوان نقطه مرجع گرفته، زمان واگرایی انسان و کپی‌های آفریقایی را حدود ۵ میلیون سال پیش محاسبه کردند [۱۹]. محققان بعدی با اصلاح نقطه مرجع ساعت به ۲۵ تا ۳۵ میلیون سال پیش، زمان واگرایی را به ۶ تا ۸ میلیون سال پیش رساندند [۲۰]. با جایگزینی روش‌های مبتنی بر DNA به جای روش‌های ایمنی شناختی، محدوده ۶ تا ۸ میلیون سال پیش به عنوان تخمینی قابل قبول تثبیت شد [۲۱].

یکی از دیگر اصلی‌ترین کاربردها، تخمین زمان واگرایی گونه‌های ویروسی از نیای مشترک است [۲۲]. ویروس‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: ویروس‌های RNA و ویروس‌های DNA؛ ویروس‌های RNA نرخ جهش بسیار بالایی دارند و برای مطالعات ساعت مولکولی ایده‌آل هستند [۲۳]. از مهم‌ترین و نخستین موارد، تعیین نرخ تکامل ویروس HIV-۱ و زمان پیدایش سویه‌های آن است که پیش‌بینی می‌کند جد مشترک سویه‌های اصلی در حدود سال ۱۹۲۰ میلادی می‌زیسته است [۲۴]. ساعت مولکولی در تعیین رویدادهای زمین‌شناختی مانند زمان باز شدن اقیانوس‌ها و جدایی قاره‌ها نیز به کار می‌رود [۲۵] و در پزشکی قانونی برای تخمین زمان مرگ استفاده می‌شود [۲۶].

با وجود کاربرد گسترده، این ابزار از ابتدا با نقدهای جدی مواجه بوده اند. مهم‌ترین نقد وارده، نقض فرض نرخ ثابت است. به یاد داریم اساسی‌ترین فرض ساعت مولکولی اولیه (ساعت سخت) این بود که نرخ انباشت جهش‌ها در طول زمان و در میان گونه‌های مختلف ثابت است. اما شواهد نشان از ناهمسانی نرخ تکامل دارند که در سطوح زیر قابل مشاهده است:

نرخ جانشینی بین گونه‌های مختلف تفاوت زیادی دارد. مثلاً نرخ تکامل در جوندگان بسیار سریع‌تر از نخستی‌ها و در نهنگ‌ها بسیار کندتر از پستانداران کوچک است. درختان و لاک‌پشت‌ها نیز نرخ جانشینی بسیار پایین‌تری نسبت به پستانداران هم‌جثه دارند [۲۷].

حتی در یک گونه و یک ژنوم واحد، نرخ جانشینی در ژن‌های مختلف و در جایگاه‌های مختلف یک ژن یکسان نیست. برخی ژن‌ها مانند سیتوکروم c رفتار ساعت‌مانند نسبتاً منظمی نشان می‌دهند، در حالی که ژن‌های دیگر مانند سوپراکسید دیسموتاز^۶ رفتار بسیار نامنظم و نوسانی دارند. برای SOD، نرخ متوسط جانشینی اسید آمینه بین قارچ‌ها و جانوران ۵.۵ در ۱۰۰ میلیون سال، بین حشرات و پستانداران ۹.۱، و بین پستانداران با یکدیگر ۲۷.۸ است. این تنوع نشان می‌دهد اتکا به یک نرخ ثابت برای همه ژن‌ها نتایج معتبری ارائه نمی‌دهد [۲۸].

توموکو اوتا^۱ این دیدگاه را کامل کرد. او جهش‌های کمتر مضر را نیز در نظر گرفت که سرنوشت آن‌ها به اندازه جمعیت بستگی دارد. در نتیجه عنوان کرد که نرخ تکامل همه جا ثابت نیست؛ در جمعیت‌های کوچک (مانند پرندگان) حتی جهش‌هایی که کمتر مضر هستند نیز تثبیت می‌شوند و نرخ تکامل در این جمعیت‌ها بیشتر از جمعیت‌های بزرگ (مانند انسان) می‌شود. پس در واقع نرخ تکامل، تابع نرخ جهش، اندازه جمعیت و میزان ضرر جهش است [۱۳]. این یعنی ساعت مولکولی یک ابزار کلی نبوده و در گونه‌های مختلف متفاوت است؛ بنابراین باید تفاوت‌های ژنی و جمعیتی نیز لحاظ شوند.

به دنبال این یافته‌ها، از اواخر دهه ۹۰ میلادی توجه‌ها به مدل‌های آماری برای اعمال متغیرها معطوف شد. مایکل ساندرسون^۲ ایده‌ای مطرح کرد که در آن فرض کرد نرخ تکامل در طول زمان به تدریج تغییر می‌کند و تغییرات در شاخه‌های مجاور، همبسته است. به این ترتیب می‌توان تخمینی قطعی و واحد از زمان واگرایی به دست آورد [۱۴]. مهم‌ترین تحول در این زمینه، مفهوم ساعت‌های مولکولی آرامش‌یافته است. جفری تورن^۳ هم با رد کردن نرخ ثابت مدلی ارائه داد که بر اساس آن، نرخ هر شاخه از درخت تکاملی به طور تصادفی اما وابسته به شاخه‌های مجاور تغییر می‌کند. او به جای یک تخمین نقطه‌ای، توزیعی احتمالی از زمان واگرایی ارائه داد [۱۵]. مدل‌های جدید در تلاش‌اند تا دقت تخمین زمان واگرایی را بهبود بخشند. برای نمونه، ساعت مولکولی آرامش‌یافته فاقد همبستگی فرض همبستگی مدل تورن را همیشه برقرار نمی‌داند [۱۶] و ساعت محلی تصادفی نیز تغییرات نرخ را یک فرآیند پیوسته در نظر نمی‌گیرد [۱۷]. امروزه، این ابزارها با بهره‌گیری از داده‌های ژنومی گسترده، الگوریتم‌های پیشرفته و سوابق فسیلی، به یکی از ستون‌های اصلی زیست‌شناسی تکاملی تبدیل شده‌اند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، پژوهشگران همچنان در تلاش برای افزایش دقت، کاهش خطاهای سیستماتیک و گسترش کاربردهای ساعت مولکولی به حوزه‌های جدیدی مانند حفاظت از گونه‌ها هستند.

دامنه کاربرد این ساعت‌ها از چند سال تا چندین میلیون سال متغیر است. یکی از قدیمی‌ترین و شناخته‌شده‌ترین کاربردهای ساعت مولکولی، تخمین زمان جدایی اجداد انسان و شامپانزه است [۱۸]. مطالعه ساریچ^۴ و ویلسون^۵ یکی از مؤثرترین کاربردهای اولیه ساعت مولکولی محسوب می‌شود. این دو پژوهشگر به بررسی آلبومین سرم خون انسان و گوریل پرداختند و شباهت زیادی بین آن‌ها یافتند. بر اساس آن، با فرض ثابت بودن نرخ تکامل و پذیرش فرض رایج در دهه ۶۰ میلادی مبنی بر اینکه زمان جدایی انسان و

1. Tomoko Ohta (1933)

2. Michael J. Sanderson (1960)

3. Jeffrey Loren Thorne (1963)

4. Vincent Sarich (1934-2012)

5. Allan Wilson (1934-1991)

6. Superoxide Dismutase (SOD)

منظم است که در بسیاری از موقعیت‌ها به عنوان یک ساعت عمل کند، اما عدم قطعیت درباره ویژگی‌های ساعت (برای مثال شرایطی که ممکن است به نوسانات بزرگ در نرخ جانشینی منجر شود) ایجاب می‌کند که با احتیاط از آن استفاده شود [۲۸].

ساعت مولکولی امروز در نقطه عطفی از تحول خود قرار دارد. با ورود به عصر ژنومیک و کلان داده‌ها، این حوزه با سرعتی بی‌سابقه در حال گسترش است. یکی از محدودیت‌های بنیادین ساعت مولکولی کلاسیک آن بود که مطالعه رویدادهای چند ساله تا چند دهه را غیرممکن می‌ساخت. ساعت‌های اپی‌ژنتیک این شکاف را پر کرده‌اند. یکی از انواع آنها، ساعت اپی‌موتاسیون در گیاهان، به جای جهش‌های DNA از تغییرات شیمیایی تصادفی روی DNA (متیل‌دار کردن سیتوزین) استفاده می‌کند. این تغییرات که اپی‌موتاسیون نام دارند، صدها هزار بار سریع‌تر از جهش‌های DNA رخ می‌دهند. این ویژگی امکان مطالعه رویدادهای تکاملی در مقیاس چند سال را فراهم می‌آورد و می‌تواند برای بررسی پدیده‌هایی مانند تغییرات اقلیمی، مهاجرت‌های فصلی و تهاجم گونه‌های بیگانه به کار رود [۳۴]. ساعت‌های هیستونی دسته جدیدی از ساعت‌های اپی‌ژنتیک هستند که تغییرات شیمیایی روی پروتئین‌های هیستون (پروتئین‌های پیچنده دور DNA) را اندازه می‌گیرند تا سن بیولوژیک را تخمین بزنند. با بالا رفتن سن، الگوی این تغییرات تغییر می‌کند و با تشخیص این الگوها می‌توان سن همه موجودات زنده را با دقت بالایی پیش‌بینی کرد [۳۵].

بنابراین ساعت مولکولی برای درک تقویم تکامل حیات روی زمین قدرتمند، اما نه بی‌نقص، است. این ابزار از یک ایده ساده (همبستگی خطی تفاوت‌های مولکولی با زمان فسیلی) آغاز شد و امروز با مدل‌های آرامش‌یافته و داده‌های ژنومی دقت بالایی یافته است. با وجود چالش‌های جدی مانند ناهمسانی نرخ، کالیبراسیون فسیلی و عدم قطعیت آماری، این ابزار همچنان یکی از ستون‌های اصلی زیست‌شناسی تکاملی باقی می‌ماند. افق‌های جدید مانند ساعت‌های اپی‌ژنتیک نویدبخش گسترش کاربرد آن به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر و حوزه‌های جدیدتر هستند.

ساعت زیستی

در درون بدن موجودات زنده، ساعتی طبیعی به نام ساعت زیستی درونی وجود دارد که چندین نوع ریتم را تولید و هماهنگ می‌کند. یکی از این ریتم‌ها، ریتم سیرکادین^۱ (چرخه شبانه روزی) است که چرخه حدوداً ۲۴ ساعته را در بدن تنظیم می‌کند. برخی منابع، این چرخه را معادل ساعت زیستی بدن معرفی می‌کنند [۳۶]. در حالی که برخی دیگر، آن را زیر مجموعه ساعت زیستی در نظر می‌گیرند. دو ریتم دیگر که تحت نظارت این سیستم می‌باشند عبارتند از ریتم

عواملی دیگری که بر نرخ جهش موثرند، عبارت‌اند از طول نسل، اندازه بدن و نرخ متابولیسم. گونه‌هایی با نسل کوتاه‌تر، در بازه زمانی معین تعداد دفعات بیشتری DNA خود را تکثیر می‌کنند و فرصت بیشتری برای انباشت جهش دارند. بنابراین نرخ جانشینی سالانه در جوندگان (نسل کوتاه) بیشتر از انسان (نسل بلند) است، هرچند این رابطه کاملاً خطی نیست [۲۹]. همچنین ارتباط معکوسی بین اندازه بدن و نرخ جانشینی وجود دارد؛ نهنگ‌ها کندترین نرخ و جوندگان سریع‌ترین نرخ را دارند. این همبستگی ممکن است از طریق ارتباط اندازه بدن با طول نسل و نرخ متابولیسم توجیه شود. از طرفی موجودات با نرخ متابولیسم بالاتر، اکسیژن فعال بیشتری تولید می‌کنند که می‌تواند به DNA آسیب برساند و نرخ جهش را افزایش دهد [۲۷].

مسئله مهم و اساسی دیگر، کالیبره شدن است که مرحله‌ای تعیین‌کننده در هر تحلیل ساعت مولکولی است [۳۰]، اما به دلایل بسیاری یکی از آسیب‌پذیرترین نقاط روش‌شناسی به شمار می‌رود. مهم‌ترین آنها، عدم قطعیت تعیین مرجع است. قدیمی‌ترین فسیل شناخته شده از یک گونه لزوماً نشان‌دهنده زمان پیدایش آن نیست؛ ممکن است فسیل‌های قدیمی‌تری وجود داشته باشند که هنوز کشف نشده‌اند. برآوردهای سن فسیلی همواره با خطاهای سیستماتیک و عدم قطعیت همراه هستند. نادیده گرفتن این عدم قطعیت منجر به تخمین‌های زمانی با فاصله اطمینان بیش از حد خوش‌بینانه می‌شود [۳۱]. گاهی اختلافات دوبرابری بین تاریخ‌های مولکولی و فسیلی گزارش شده است. برای مثال، شکاف بین قدیمی‌ترین فسیل یک کلاد و بازه اطمینان ۹۵٪ تخمین ساعت مولکولی در سوسک‌ها بین ۵۵ تا ۱۳۴ میلیون سال و در برخی خارپوستان بین ۴۰ تا ۶۵ میلیون سال تخمین زده شده است [۳۲]. با این حال، این اختلافات لزوماً به معنای نادرستی ساعت مولکولی نیست؛ ممکن است سابقه فسیلی ناقص باشد یا نرخ‌های تکامل در گذشته متفاوت بوده و مدل‌های فعلی قادر به بازسازی دقیق آن تغییرات نباشند. اگر همه مفروضات نظری برقرار باشند، تخمین‌های ساعت مولکولی همواره با درجاتی از عدم قطعیت آماری همراه هستند. حتی در چارچوب نظریه خنثی که نرخ ثابت را پیش‌بینی می‌کند، نوسانات تصادفی در نرخ جانشینی در طول زمان باعث نادقیق بودن تخمین‌های زمان مولکولی می‌شود [۳۳].

بنابراین آیا می‌توان گفت ساعت مولکولی به کلی نامعتبر است؟ علیرغم تمام نقدهای فوق، اکثر محققان معتقدند که ساعت مولکولی همچنان یک ابزار اساسی برای درک زمان و نرخ تکامل باقی می‌ماند. این نقدها ساعت مولکولی را باطل نمی‌کنند، بلکه زیربنای نظری برای پیش‌بینی ویژگی‌های آن را تضعیف می‌کنند. مقایسه توالی‌ها نشان می‌دهد که تکامل مولکولی به اندازه کافی

خواب و برخی بیماری‌های مرتبط کمک می‌کند [۴۳]. افزون بر آنکه ملاتونین دقیق‌ترین نشانگر فاز شبانه‌روزی محسوب می‌شود، این هورمون دارای خواص آنتی‌اکسیدانی نیز هست و در محافظت سلول‌ها در برابر استرس اکسایشی نقش دارد. ترشح ملاتونین وابسته به تاریکی و خواب طبیعی است و خواب منظم علاوه بر همگام‌سازی ساعت زیستی، در حفظ هموستازی و پاکسازی فرآورده‌های حاصل از متابولیسم مغز نیز نقش مهمی ایفا می‌کند [۴۴].

همان‌طور که اشاره شد، در دهه ۱۷۰۰ میلادی، دانشمندان مفهوم ساعت درونی را پذیرفته بودند اما پرسش بنیادین چگونگی عملکرد این ساعت همچنان بی‌پاسخ مانده بود. نخستین گام در سال ۱۹۷۱ (سال ۱۳۴۹ شمسی) توسط رونالد کونوپکا^۷ و سیمور بنزر^۸ برداشته شد. آنها اولین ژن مرتبط با ریتم شبانه‌روزی را کشف کردند و آن را (PER) نامیدند. چرا که جهش در این ژن باعث تغییر طول دوره ۲۴ ساعته می‌شد [۴۵]. در سال ۱۹۸۴ مطابق با سال ۱۳۶۳ شمسی، عملکرد این ژن روشن شد و مشخص گردید که پروتئین PER در طول شبانه‌روز ساخته می‌شود و سرانجام به هسته سلول بازمی‌گردد تا رونویسی ژن خودش را مهار کند، درست مانند عقربه‌ای که ساعت را بازنشانی می‌کند. سپس با تجزیه پروتئین، مهار برداشته شده و چرخه از نو آغاز می‌شود [۴۶]. این چرخه خودتنظیم‌شونده با کشف دو ژن دیگر^۹ کامل شد. بدون این حلقه بازخورد، هیچ نوسان ۲۴ ساعته‌ای وجود نخواهد داشت و خواب و بیداری، ترشح هورمون‌ها و متابولیسم از ریتم طبیعی خارج می‌شوند [۴۷]. به پاس این کشف، جایزه نوبل فیزیولوژی ۲۰۱۷ به جفری هال^{۱۱}، مایکل رزبش^{۱۲} و مایکل یانگ^{۱۳} اهدا شد (۸).

در پستانداران، سیستم ساعت زیستی از یک فرماندهی مرکزی و تعداد زیادی تنظیم‌کننده‌های محیطی تابع تشکیل شده است. ساعت زیستی اصلی در هسته سوپراکیاسماتیک^{۱۴} (SCN) درون هیپوتالاموس، درست بالای عصب بینایی، جای دارد. SCN سیگنال نور را دریافت می‌کند و از طریق مسیرهای عصبی، هورمونی و رفتاری، تمام ساعت‌های بدن را با ریتم ۲۴ ساعته محیط هماهنگ می‌کند [۴۸، ۴۹]. قرار گرفتن در معرض نور روز موجب فعال شدن مسیرهای عصبی وابسته به ساعت مرکزی و افزایش هوشیاری می‌شود، در حالی که با کاهش نور در ساعات شب، پیام‌های لازم برای آغاز خواب و افزایش ترشح ملاتونین ارسال می‌شود. بدین ترتیب، نور مهم‌ترین عامل محیطی در هم‌زمان‌سازی ساعت درونی با چرخه شب و روز به شمار می‌رود [۵۰]. هرچند تمام سلول‌های بدن دارای ساعت درونی مبتنی

اولترادیان^۱ و ریتم اینفرادیان^۲ [۳۷]. افزون بر تنظیم چرخه خواب و بیداری، ساعت زیستی در کنترل بسیاری از فرایندهای فیزیولوژیک از جمله تنظیم دمای بدن، ترشح هورمون‌ها، متابولیسم انرژی و سطح هوشیاری نقش اساسی دارد. در واقع، خواب و بیداری تنها یکی از خروجی‌های این سامانه پیچیده محسوب می‌شوند و بسیاری از عملکردهای بدن به هماهنگی صحیح ساعت زیستی وابسته‌اند [۳۸]

پیشینه ساعت زیستی

بیش از ۲۵۰۰ سال پیش، آرکیلوکوس^۳، شاعر یونانی، یکی از سروده‌هایش را با چنین پرسشی آغاز کرد: «چه ریتمی بر انسان حاکم است؟» این نشان می‌دهد که انسان از دیرباز به چرخه‌های تکرارشونده در بدن خود توجه می‌کرده و در جستجوی آهنگی منظم که آن را تحت کنترل دارد بوده است (۷). نخستین گام‌های علمی برای درک این ریتم در موجودات زنده به سال ۱۷۲۹ میلادی مطابق با سال ۱۱۰۴ شمسی بازمی‌گردد، زمانی که ژان-ژاک دو مریان^۴، ستاره‌شناس فرانسوی، آزمایش ساده‌ای انجام داد. او یک گیاه را در اتاقی کاملاً تاریک قرار داد تا بدون توجه به روز و شب، رفتار گیاه را بررسی کند. او انتظار داشت روز بعد، گیاه در غیاب نور و هوای تازه طراوت خود را از دست بدهد اما مشاهده کرد که گیاه، همچنان زنده است [۳۸]. بر پایه همین مشاهدات، اروین بونینگ^۵، گیاه‌شناس آلمانی، ادعا کرد که گیاهان از یک ساعت درونی برای سنجش طول روز استفاده می‌کنند و براساس آن، می‌توانند زیست خود را مدیریت کنند [۴۰]. بعدها، کالین پیتندریف^۶ که به پدر ساعت زیستی شهرت یافت، با قوانین ریاضی و فیزیک این مفهوم را اثبات کرد. او نشان داد ریتم شبانه‌روزی بر هر موجودی حاکم است که برای هر کدام، مقداری مختص به خود می‌باشد؛ مثلاً برای موش‌ها ۲۳.۵ ساعت و انسان حدود ۲۴ ساعت می‌باشد. همچنین منحنی پاسخ فاز را مدل‌سازی کرد [۴۱]. منحنی پاسخ فاز نشان می‌دهد هر محرکی (مانند نور) دقیقاً چه تأثیری بر ساعت درونی موجودات می‌گذارد. اهمیت این منحنی در آن است که پزشکان با استفاده از آن می‌توانند زمان دقیق تجویز داروهای خواب را برای افرادی که دچار اختلالات خواب می‌باشند تعیین کنند تا ساعت درونی به الگوی طبیعی خود بازگردد [۴۲]. برای سنجش عملکرد ساعت درونی، پژوهشگران از روش‌های گوناگونی استفاده می‌کنند. استاندارد طلایی، اندازه‌گیری سطح ملاتونین است. ملاتونین در پاسخ به تاریکی از غده پینه‌آل ترشح می‌شود و شروع ترشح آن دقیق‌ترین نشانگر فاز شبانه‌روزی محسوب می‌گردد، زیرا تکرارپذیری بالایی دارد. پایش ملاتونین به تشخیص اختلالات

1. Ultradian
2. Infradian
3. Archilochus
4. Jean-Jacques d'Ortous de Mairan (1678-1771)
5. Erwin Bünning (1906-1990)
6. Colin Pittendrigh (1918-1998)
7. Ronald J. Konopka (1947-2015)

8. Seymour Benzer (1921-2007)
9. Per Time
10. Tim, DBT
11. Jeffrey C. Hall (-1945)
12. Michael Rosbash (-1944)
13. Michael W. Young (-1949)
14. Suprachiasmatic nucleus (SCN)

بر حلقه بازخورد هستند، بافت‌هایی مانند کبد، کلیه، قلب، روده، ماهیچه اسکلتی و ریه نیز ساعت‌های مستقل خود را دارند و بر اساس وظایف خود، برنامه زمانی مخصوصی را اجرا می‌کنند. برای نمونه، ساعت قلب، ضربان و متابولیسم انرژی را در طول شبانه‌روز تنظیم می‌کند اما در مجموع همه این ساعت‌های محیطی تحت نظارت SCN قرار دارند [۵۱].

در بحث ساعت‌های زیستی، متغیرهای محیطی بخشی از مکانیسم ساعت را تشکیل می‌دهند. برای نمونه، نوسانات غلظت پروتئین‌های PER و CRY که در حلقه‌ی بازخورد منفی نقش دارند، نتیجه مستقیم فرایندهای تصادفی تولید و تجزیه‌ی مولکول‌ها در دمای بدن است. بنابراین طبیعت با استفاده از همین نويزهای آماری، یک ساعت قابل اعتماد و پایدار ساخته است که از قوانین ترمودینامیک حاصل می‌شود.

به طور کلی، ریتم‌های بیولوژیکی بر اساس طول دوره به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- سیرکادین حدود ۲۴ ساعت؛ چرخه خواب و بیداری، نوسان دمای بدن، ترشح ملاتونین و کورتیزول
- اولترادین کمتر از ۲۴ ساعت؛ ضربان قلب، چرخه خواب عمیق^۱
- اینفرادین بیشتر از ۲۴ ساعت؛ چرخه قاعدگی انسان، خواب زمستانی حیوانات

واژه سیرکادین از دو کلمه لاتین Circa (حدود) و Dies (روز) ساخته شده و به معنای حدود یک روز است. این ریتم یک چرخه طبیعی درونی است که در اغلب موجودات زنده وجود دارد و به آنها اجازه می‌دهد خود را با چرخه شب و روز هماهنگ کنند؛ در نتیجه فرآیندهایی مانند خواب، بیداری، متابولیسم و ترشح هورمون‌ها همزمان با تغییرات محیطی مدیریت می‌شوند [۵۲]. گرچه هر سه نوع ریتم برای بقا ضروری‌اند، اما سیرکادین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این سیستم با داشتن مرکز فرماندهی، تنها ریتمی که توسط یک ساعت مرکزی در هیپوتالاموس (SCN) کنترل می‌شود. سایر ریتم‌ها فاقد چنین سیستم مرکزی هستند. همچنین نقش تنظیم گسترده فرآیندهای زیستی را به عهده دارد؛ متابولیسم گلوکز، ترشح ملاتونین و انسولین، فشار خون و عملکرد قلب و عروق [۵۳]. مورد دیگر، حفاظت‌شدگی تکاملی است. این ریتم در طیف وسیعی از موجودات زنده در طول میلیون‌ها سال حفظ شده و به عنوان ابزاری ضروری برای بقا بدون تغییر باقی مانده است [۵۴]. هماهنگی مستقیم با چرخه روز و شب، از موارد مهم دیگری است؛ نور از راه مسیر رتینوهیپوتالاموسی^۲ و سلول‌های گانگلیونی شبکه به SCN می‌رسد و ساعت را هر روز با دوره ۲۴ ساعته زمین تنظیم می‌کند [۵۵]. ساعت زیستی هر فرد پویاست و تحت تأثیر ژنتیک، سن، جنسیت و محیط، فاز، دوره و دامنه آن دستخوش دگرگونی می‌شوند. برای نمونه، ریتم شبانه‌روزی در نوزادان نامنظم است، در حالی

که در سالمندی با پیشرفتگی فاز (زود خوابیدن و زود بیدار شدن) و کاهش دامنه نوسان (تضعیف سیگنال ساعت) همراه می‌گردد [۵۶]. اما تغییر الگوی ساعت می‌تواند اکتسابی باشد. نور مصنوعی در شب، شیفت کاری، الگوی نامنظم غذا، چرخه‌های خواب نادرست و اضطراب می‌تواند هماهنگی بین ساعت مرکزی و ساعت‌های محیطی را برهم زند و فرد را با مشکلاتی مانند فشار خون بالا، ضربان قلب نامنظم، اختلالات هورمونی، چاقی و دیابت نوع ۲ همراه کند. برای نمونه، خوردن غذا در ساعات پایانی روز با تأثیر منفی روی ساعت درونی منجر به افزایش فشار خون، قند خون و بروز چاقی می‌شود [۵۷]. یکی از جالب‌توجه‌ترین نتایج برهم خوردن تنظیمات این ساعت، پدیده‌ای به نام جت‌لگ^۳ روده‌ای است. ساعت زیستی و میکروبیوتای روده که نقش کلیدی در هضم و متابولیسم دارد، ارتباط پیچیده‌ای دارند و جت‌لگ این هماهنگی را شدیداً مختل می‌کند. اختلال حاصل باعث تغییر ریتم میکروبیوتا و تولید نامنظم اسیدهای چرب کوتاه زنجیره (که برای حرکات پیش‌رونده روده حیاتی هستند) می‌شود و در نهایت به یبوست می‌انجامد [۵۸]. اما اختلالات ریتم تنها جسم را هدف قرار نمی‌دهند، بلکه می‌تواند آسیب‌های روانی نیز به بار آورد. یکی از باورهای نادرست مردم این است که برخی به طور ذاتی، تمایل به شب زنده‌داری دارند و این سیستمی است که برای آنها تعریف شده و ضرری ندارد. برای همین با خیال راحت، دیر خوابیدن خود را توجیه می‌کنند. اما مشخص شده صرف نظر از ترجیح ذاتی فرد برای زودخوابی یا دیرخوابی، دیر خوابیدن باعث افزایش خطرات رفتاری و افسردگی می‌شود. این دقیقاً نشان می‌دهد ارتباط ثابتی بین ساعت خواب و طول مدت خواب با سیستم درونی وجود دارد و بنابراین تنظیم برنامه خواب، فارغ از کرونوتاپ^۴ (تیپ زمانی) ذاتی، یک راهکار پیشگیرانه برای سلامت روان به حساب می‌آید [۵۹].

از ساده‌ترین نشانه‌هایی که می‌توان به عملکرد ساعت درونی پی برد، بررسی الگوی خواب است. مؤسسه ملی خواب آمریکا این اختلالات را به شش دسته تقسیم کرده است (۹):

- سندروم فاز تأخیری خواب؛ شروع خواب و بیداری به طور مداوم ۲ ساعت یا بیشتر نسبت به زمان مرسوم به تأخیر می‌افتد؛
- سندروم فاز پیش‌افتاده خواب؛ بیداری چند ساعت زودتر از زمان مرسوم رخ می‌دهد؛
- اختلال ریتم غیر ۲۴ ساعته؛ ریتم شبانه‌روزی با چرخه ۲۴ ساعته هماهنگ نیست؛
- اختلال ریتم نامنظم؛ فقدان الگوی مشخص خواب و بیداری در طول ۲۴ ساعت؛
- اختلال ناشی از شیفت کاری؛ بی‌خوابی یا خواب‌آلودگی شدید به دلیل برنامه کاری غیرمعمول؛
- پرواززدگی؛ اختلال گذرا پس از سفر هوایی در چندین منطقه زمانی

1. Rapid Eye Movement
2. The Retino-Hypothalamo-Pineal (RHP) Pathway

3. Jet lag
4. Chronotype

شیفت کاری و الگوهای نامنظم غذا - نه تنها کیفیت زندگی را کاهش می‌دهد، بلکه خطر ابتلا به بیماری‌های مزمن مانند دیابت، چاقی، افسردگی و حتی سرطان را افزایش می‌دهد. خوشبختانه، درک عمیق از مکانیسم‌های مولکولی ساعت زیستی، راه را برای مداخلات مؤثری مانند کرونوتراپی، کرونونوتریشن و استفاده از کرونوبیوتیک‌ها گشوده است. آینده پزشکی، بیش از پیش به سمت شخصی‌سازی درمان بر اساس ریتم بیولوژیک هر فرد حرکت می‌کند. انسان متعادل با طبیعت و فطرت، سلامت خود را تضمین نموده است. رمز اعتدال یافتگی در انسان، داشتن دانش از نفس خود و طبیعت بیرون بدن است. خودشناسی زیربنای سلامت و سعادت بشر است. امروز با توجه به سبک زندگی ماشینی و دوری از طبیعت، توجه به ساعت زیستی و هماهنگی با چرخه‌های طبیعی از اهمیت دوچندانی برخوردار است. اصلاح الگوی خواب، تغذیه مناسب، ورزش منظم و کاهش استرس، همگی در راستای حفظ تعادل این ساعت درونی و در نهایت، سلامت پایدار انسان مؤثر هستند [۶۳].

در پایان این بخش، خاطرنشان می‌شود که ما با پدیده‌ای فراتر از یک ساعت ساده مواجهیم. ساعت زیستی نه تنها زمان را اندازه می‌گیرد، بلکه درک موجود زنده را از زمان نیز شکل می‌دهد. چرخه‌های خواب و بیداری، احساس خستگی در ساعات خاص و حتی نوسانات خلقی، همگی نشانه‌هایی از این ادراک زیستی-شناختی هستند. این در حالی است که در ساعت اتمی، هیچ‌گونه ادراکی از زمان وجود ندارد؛ صرفاً یک شمارشگر کوانتومی است. تفاوت میان زمان به عنوان یک مفهوم فیزیکی و ادراک زمان به عنوان یک پدیده‌ی شناختی-زیستی، یکی از عمیق‌ترین پرسش‌های فلسفی و علمی است که می‌تواند افق‌های جدیدی در پژوهش‌های میان‌رشته‌ای بگشاید.

نتیجه‌گیری

در این مقاله با مرور سه روایت زمان در سطوح اتمی، مولکولی و زیستی، نشان دادیم که سنجش زمان لزوماً بر مبنای فیزیک نیست، بلکه پدیده‌ای چندبعدی است که از نوسان کوانتومی اتم‌ها تا تغییرات تکاملی ژنوم و نظم فیزیولوژیک بدن را دربرمی‌گیرد. ساعت اتمی بر مبنای نوسان پایدار سزیم-۱۳۳، دگرگونی در تعریف ثانیه ایجاد کرد. نسل جدید ساعت‌های نوری، دقتی فراتر از استانداردهای فعلی ارائه می‌دهند که زیربنای فناوری‌های ناوبری و ارتباطات کوانتومی خواهد بود. از سوی دیگر، ساعت مولکولی با وجود نقدهای وارد بر نرخ ناهمسان جانشینی و عدم قطعیت در کالیبراسیون فسیلی، کماکان ابزاری توانمند برای تخمین زمان واگرایی گونه‌ها و بازسازی تاریخچه حیات بر روی زمین محسوب می‌شود. در نهایت، ساعت زیستی یا ریتم سیرکادین، با هماهنگ‌سازی خواب، متابولیسم و ترشح هورمون‌ها، نقشی حیاتی در سلامت انسان ایفا

در صورتیکه فرد قادر به اصلاح الگوی خواب خود نباشد، می‌تواند با مصرف کرونوبیوتیک‌ها، ساعت درونی خود را تنظیم کند. کرونوبیوتیک، ترکیبی است که می‌تواند فاز، دامنه و دوره ریتم شبانه‌روزی را تغییر دهد؛ به عبارت دیگر، ساعت زیستی را با چرخه ۲۴ ساعته محیط هماهنگ می‌کند. این ماده به طور مستقیم با هدف قرار دادن ژن‌های سازنده ساعت و یا به طور غیرمستقیم از راه مسیرهای سیگنالینگ، عمل می‌کند. شناخته‌شده‌ترین کرونوبیوتیک، ملاتونین است؛ از این رو درمان مبتنی بر ملاتونین یکی از راهکارهای اصلی تنظیم ساعت خواب به شمار می‌رود [۶۰]. از آنجا که تولید ملاتونین وابسته به تاریکی و نظم خواب است، رعایت بهداشت خواب، کاهش مواجهه با نور آبی در ساعات شب و حفظ زمان‌بندی منظم خواب و بیداری می‌تواند در بسیاری از افراد، پیش از نیاز به مداخلات دارویی، به بهبود عملکرد ساعت زیستی کمک کند [۴۴]. همچنین ترکیبات دارای گروه‌های آروماتیک و اسیدهای چرب کوتاه زنجیر (مانند پروآنتوسیانیدین‌ها^۱، اپی‌گالوکاتچین گالات^۲، رسوراترول^۳، اسید سینامیک^۴ و اسید بوتیریک^۵) که در دانه انگور، چای سبز، اکیناسه و کاسنی یافت می‌شوند، می‌توانند چرخه سیرکادین را تنظیم کنند [۶۰].

وجود ساعت درونی، فقط محدود به مدیریت سیستم زیستی فرد نمی‌شود و می‌توان با درک شیوه عملکرد آن، مداخلات را با آن تنظیم کرد. به عنوان مثال، پزشکی زمان‌محور، به معنای هماهنگ‌سازی درمان با ریتم شبانه‌روزی بدن است تا اثربخشی درمان به حداکثر برسد و عوارض جانبی کاهش یابد. از آنجا که فرآیندهای فارماکوکینتیک (جذب، توزیع، متابولیسم و دفع دارو) در طول شبانه‌روز نوسان دارند، اثرگذاری داروها به زمان مصرف بستگی دارد. این زمان بهینه برای همگان یکسان نیست و به کرونوتا‌پ بیمار وابسته است. از آنجا که ریتم تقسیم سلولی در سلول‌های توموری با سلول‌های سالم تفاوت دارد، با زمان‌بندی شیمی‌درمانی در ساعتی که سلول‌های سالم کمترین حساسیت را دارند، می‌توان عوارض جانبی را تا حد زیادی کاهش داد. تنظیم زمان مصرف غذا بر اساس ریتم شبانه‌روزی، تغذیه مبتنی بر زمان نام دارد. برخلاف ساعت مرکزی که عمدتاً به نور پاسخ می‌دهد، ساعت‌های محیطی در کبد به شدت تحت تأثیر زمان دریافت غذا هستند. با هماهنگی زمان مصرف غذا و ساعت‌های وابسته، می‌توان به کنترل وزن و قند خون کمک کرد [۶۱، ۶۲].

ساعت زیستی انسان، سیستمی شگفت‌انگیز و پیچیده است که میلیون‌ها سال تکامل، آن را به هماهنگ‌کننده‌ای مرکزی برای تمام فرآیندهای فیزیولوژیک تبدیل کرده است. از تنظیم خواب و بیداری گرفته تا متابولیسم، عملکرد قلب، سیستم ایمنی و حتی سلامت روان، همه تحت تأثیر تیک‌تاک این ساعت درونی قرار دارند. اختلال در این هماهنگی - ناشی از سبک زندگی مدرن، نور مصنوعی،

1. Proanthocyanidins
2. Epigallocatechin gallate
3. Resveratrol

4. Cinnamic acid
5. Butyric acid

سپاس‌گزاری:

بدین‌وسیله از نظرات ارزشمند جناب آقای دکتر شیخ‌جباری، عضو پیوسته محترم فرهنگستان علوم، صمیمانه سپاس‌گزاری و قدردانی می‌شود.

می‌کند و بی‌توجهی به آن در سبک زندگی مدرن، خطر ابتلا به بیماری‌های مزمن را افزایش می‌دهد. در پایان، هم‌افزایی این سه حوزه، چشم‌اندازی روشن برای آینده‌ای ترسیم می‌کند که در آن زمان‌سنجی دقیق با فناوری‌های پیشرفته تلفیق می‌شود.

فهرست وبگاه‌های بازدید شده

1. Sexagesimal. (2026, April 21). In Wikipedia
۲. ساعت آبی. (۲۰۲۵، اکتبر ۱۷). در ویکی‌پدیا، دانشنامه آزاد.
3. International Bureau of Weights and Measures. (n.d.). Second. BIPM. Retrieved June 9 ,2026
4. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. (n.d.). What is a second? PTB. Retrieved June 9 ,2026
5. <https://www.nobelprize.org/>
6. Bureau International des Poids et Mesures. (2024). Frequently Asked Questions concerning the Redefinition of the Second. BIPM. Retrieved June 9 ,2026.
7. Aschoff, J. (Ed.). (1981). Biological rhythms (Handbook of behavioral neurobiology, Vol. 4). Plenum Press.
8. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2017/summary/>
9. Cataletto, M. E., & Benbadis, S. R. (2025). Sleeplessness and circadian rhythm disorder

منابع

1. Belmonte, J.A., Lull, J. (2023). Measuring Time: Ancient Egyptian Star, Water, and Solar Clocks. In: Astronomy of Ancient Egypt. Historical & Cultural Astronomy. Springer, Cham.
۲. بیرونی، ابوریحان، الآثارالباقیة، به کوشش ادوارد زاخائو، لایبزیک، ۱۹۳م
۳. احمدی، ب، یوسفی، ر، موسوی موحدی، ع، ا، (۱۴۰۴). جدول تناوبی و سرگذشت مندلیف. نامه علوم پایه شماره ۱۵، بهار و تابستان ۱۴۰۴، صفحات ۱۲۸-۱۲۱.
4. Maxwell, J. C. (1873). A Treatise on Electricity and Magnetism (Vols. 1-2). Oxford: Clarendon Press.
5. Frisch, R. (1970). Otto Stern (1888-1969). Nature, 226(5247), 873-874.
6. Scharf, R., & Middelmann, T. (Eds.). (2016). Experiments for the new SI [Special issue]. PTB-Mitteilungen, 126(2) 2nd ed., published July 2018)
7. Smuda, J., & Logothetis, N. K. (2026). Principles of Diagnostics and Monitoring in Nonhuman Primate Research. In Nonhuman Primate Research in the Laboratory: Core Principles and Practical Considerations (pp.57-121). Cham: Springer Nature Switzerland.
8. National Physical Laboratory, Tedddington, UK, and Ray Essen, "The Memoirs of Louis Essen, father of atomic time" (2015), Chapter V
9. Bisht, A., Arora, P. & Achanta, V.G. Precision timekeeping with atomic clocks: evolution and future directions. Nature Commun (2026).
10. Mello, B., & Schrago, C. G. (2024). Modeling substitution rate evolution across lineages and relaxing the molecular clock. Genome Biology and Evolution, ,16(9), evae199.
11. Zuckerkandl, Emile, and Linus Pauling. «Evolutionary divergence and convergence in proteins.» Evolving genes and proteins. Academic Press, 1965 ,97-166.
12. Kimura, M. (1968). Evolutionary rate at the molecular level. Nature, 217(5129), 624-626.
13. Ohta, T. (1992). The nearly neutral theory of molecular evolution. Annual Review of Ecology and Systematics, 263-286.
14. Sanderson, M. J. (1997). A nonparametric approach to estimating divergence times in the absence of rate constancy. Molecular Biology and Evolution, 14(12), 1218.
15. Thorne, J. L., Kishino, H., & Painter, I. S. (1998). Estimating the rate of evolution of the rate of molecular evolution. Molecular Biology and Evolution, 15(12), 1647-1657.
16. Drummond, A. J., Ho, S. Y. W., Phillips, M. J., & Rambaut, A. (2006). Relaxed phylogenetics and dating with confidence. PLoS Biology, 4(5), e88.

17. Drummond, A. J., & Suchard, M. A. (2010). Bayesian random local clocks, or one rate to rule them all. *BMC Biology*, 8(1), 114.
18. Easteal, S., & Herbert, G. (1997). Molecular evidence from the nuclear genome for the time frame of human evolution. *Journal of Molecular Evolution*, 44(Suppl 1), S-121S132.
19. Sarich, V. M., & Wilson, A. C. (1967). Immunological time scale for hominid evolution. *Science*, 158(3805), 1200–1203.
20. Sibley, C. G., & Ahlquist, J. E. (1984). The phylogeny of the hominoid primates, as indicated by DNA-DNA hybridization. *Journal of Molecular Evolution*, 20(1), 2–15.
21. Caccone, A., & Powell, J. R. (1989). DNA divergence among hominoids. *Evolution*, 43(5), 925–942.
22. Dos Reis, M., Donoghue, P. C., & Yang, Z. (2016). Bayesian molecular clock dating of species divergences in the genomics era. *Nature Reviews Genetics*, 17(2), 71–80.
23. Domingo, E. (2019). Long-term virus evolution in nature. *Virus as Populations*, 225.
24. Bletsa, M., Suchard, M. A., Ji, X., Gryseels, S., Vrancken, B., Baele, G., ... & Lemey, P. (2019). Divergence dating using mixed effects clock modelling: An application to HIV-1. *Virus Evolution*, 5(2), vez036.
25. De Baets, K., Antonelli, A., & Donoghue, P. C. (2016). Tectonic blocks and molecular clocks. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 371(1699).
26. Sibbens, L., Van de Voorde, W., Decorte, R., & Bekaert, B. (2017). The development of a forensic clock to determine time of death. *Forensic Science International: Genetics Supplement Series*, 6, e-162e163.
27. Martin, A. P., & Palumbi, S. R. (1993). Body size, metabolic rate, generation time, and the molecular clock. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(9), 4087–4091.
28. Ayala, F. J. (1986). On the virtues and pitfalls of the molecular evolutionary clock. *Journal of Heredity*, 77(4), 226–235.
29. Chao, L., & Carr, D. E. (1993). The molecular clock and the relationship between population size and generation time. *Evolution*, 688–690.
30. Warnock, R., Parham, J. F., Joyce, W. G., Lyson, T. R., & Donoghue, P. C. (2015). Calibration uncertainty in molecular dating analyses: there is no substitute for the prior evaluation of time priors. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1798).
31. Pulquerio, M. J., & Nichols, R. A. (2007). Dates from the molecular clock: how wrong can we be?. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(4), 180–184.
32. Budd, G. E., & Mann, R. P. (2024). Two notorious nodes: a critical examination of relaxed molecular clock age estimates of the bilaterian animals and placental mammals. *Systematic Biology*, 73(1), 323–334.
33. Bromham, L., & Penny, D. (2003). The modern molecular clock. *Nature Reviews Genetics*, 4(3), 216–224.
34. Yao, N., Zhang, Z., Yu, L., Hazarika, R., Yu, C., Jang, H., ... & Johannes, F. (2023). An evolutionary epigenetic clock in plants. *Science*, 381(6665), 1440–1445.
35. Niu, Z., Liu, C., Fan, Y., & Gu, L. (2026). Histone modification clocks for robust cross-species biological age prediction and elucidating senescence regulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 123(11), e2533687123.
36. Walker, W. H., Walton, J. C., DeVries, A. C., & Nelson, R. J. (2020). Circadian rhythm disruption and mental health. *Translational psychiatry*, 10(1), 28.
37. Borb, A. A., & Achermann, P. (1999). Sleep homeostasis and models of sleep regulation. *Journal of Biological Rhythms*, 14(6), 559–570.
38. Kuhlman, S. J., Craig, L. M., & Duffy, J. F. (2018). Introduction to chronobiology. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 10(9), a033613.
39. Bünning, E. (1936). 5. Erwin Bünning: Die endonome Tagesrhythmik als Grundlage der photoperiodischen Reaktion. *Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft*, 54(10), 590–607.
40. Pittendrigh, C. S. (1993). Temporal organization: reflections of a Darwinian clock-watcher. *Annual Review of Physiology*, 55(1), 17–54.
41. Mansbach, P. (2014). Phase Response Curve (PRC). Circadian Sleep Disorders Network.

42. Pandi-Perumal, S. R., Smits, M., Spence, W., Srinivasan, V., Cardinali, D. P., Lowe, A. D., & Kayumov, L. (2007). Dim light melatonin onset (DLMO): a tool for the analysis of circadian phase in human sleep and chronobiological disorders. *Progress in Neuro-Psychopharmacology and Biological Psychiatry*, 31(1), 1–11.
۴۳. سلیمان پور، م.، یوسفی، ر.، و موسوی موحدی، ع. ا. (۱۳۹۶). ملاتونین: آنتی اکسیدان محصول خواب با کیفیت. نشریه نشان علم، مجلد ۷، شماره ۲، صفحات ۱۱۵–۱۰۷.
44. Konopka, R. J., & Benzer, S. (1971). Clock mutants of *Drosophila melanogaster*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 68(9), 2112–2116
45. Hardin, P. E., Hall, J. C., & Rosbash, M. (1990). Feedback of the *Drosophila* period gene product on circadian cycling of its messenger RNA levels. *Nature*, 343(6258), 536–540.
46. Voss hall, L. B., Price, J. L., Sehgal, A., Saez, L., & Young, M. W. (1994). Block in nuclear localization of period protein by a second clock mutation, timeless. *Science*, 263(5153), 1606–1609.
47. Price, J. L., Blau, J., Rothenfluh, A., Abodeely, M., Kloss, B., & Young, M. W. (1998). double-time is a novel *Drosophila* clock gene that regulates PERIOD protein accumulation. *Cell*, 94(1), 83–95.
48. Moore, R. Y., Speh, J. C., & Leak, R. K. (2002). Suprachiasmatic nucleus organization. *Cell and Tissue Research*, 309(1), 89–98.
49. Antle, M. C., & Silver, R. (2005). Orchestrating time: arrangements of the brain circadian clock. *Trends in Neurosciences*, 28(3), 145–151.
50. Bautista, J., Ojeda-Mosquera, S., Ordóñez-Lozada, D., & López-Cortés, A. (2025). Peripheral clocks and systemic zeitgeber interactions: from molecular mechanisms to circadian precision medicine. *Frontiers in Endocrinology*, 16, 1606242.
51. Vitaterna, M. H., Takahashi, J. S., & Turek, F. W. (2001). Overview of circadian rhythms. *Alcohol Research & Health*, 25(2), 85
52. Kk Xie, Y., Tang, Q., Chen, G., Xie, M., Yu, S., Zhao, J., & Chen, L. (2019). New insights into the circadian rhythm and its related diseases. *Frontiers in Physiology*, 10, 682.
53. Palm, D., Uzoni, A., Simon, F., Fischer, M., Coogan, A., Tucha, O., ... & Faltraco, F. (2021). Evolutionary conservations, changes of circadian rhythms and their effect on circadian disturbances and therapeutic approaches. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 128, 21–34.
54. de Assis, L. V. M., & Kramer, A. (2024). Circadian de(regulation) in physiology: implications for disease and treatment. *Genes & Development*, 38(21-24), 933–951.
55. Morin, R., Forest, G., & Imbeault, P. (2025). Circadian rhythms revealed: unraveling the genetic, physiological, and behavioral tapestry of the human biological clock and rhythms. *Frontiers in Sleep*, 4, 1544945.
56. Nuskiewicz, J., Rzepka, W., Markiel, J., Porzych, M., Woźniak, A., & Szewczyk-Golec, K. (2025). Circadian rhythm disruptions and cardiovascular disease risk: the special role of melatonin. *Current Issues in Molecular Biology*, 47(8), 664.
57. Li, J., Yu, K., Sui, X., Deng, H., Leng, Y., & Liu, T. (2025). Gut jet lag: how circadian rhythm disruption undermines the Chrono-Microbiota-Motility axis and induces functional constipation. *Frontiers in Nutrition*, 12, 1678482.
58. Lok, R., & Zeitzer, J. M. (2025). Chronotype and mental health: are late sleepers more vulnerable? *Current Psychiatry Reports*, ۵۵۲-۵۴۴, (۱۰) ۲۷.
59. Arendt, J., & Skene, D. J. (2005). Melatonin as a chronobiotic. *Sleep Medicine Reviews*, 9(1), 25–39.
60. Dafne, V. J., Manuel, M. A., & Rocío, C. V. (2024). Chronobiotics, satiety signaling, and clock gene expression interplay. *The Journal of Nutritional Biochemistry*, 126, 109564.
61. Flanagan, A., Bechtold, D. A., Pot, G. K., & Johnston, J. D. (2021). Chrono-nutrition: from molecular and neuronal mechanisms to human epidemiology and timed feeding patterns. *Journal of Neurochemistry*, 157(1), 53–72
۶۲. پیرحقی، م.، و موسوی موحدی، ع. ا. (۱۴۰۲). ساعت زیستی بدن: رونمایی از ریتم‌های حیات. نشریه نشان علم، سال سیزدهم، شماره دوم، خرداد ماه ۱۴۰۲، صفحات ۱۷۳–۱۸۲.
۶۳. پیرحقی، م.، فرهادی، م.، و موسوی موحدی، ع. ا. (۱۳۹۵). سبک زندگی و پزشکی خواب. نشریه نشان علم، مجلد ۶، شماره ۲، صفحات ۱۱۳–۱۰۳.

تفکر محاسباتی انسان‌محور: معلم درونی در تربیت تمام‌ساختی

آرتا امیر جمشیدی^{۱*} و نقی اسدی لمعه‌دشت^۱

۱. آزمایشگاه تحقیقاتی علوم داده و مدل‌سازی، دانشکده ریاضی،
آمار و علوم کامپیوتر، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران.
arta.jamshidi@ut.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

تربیت تمام‌ساختی به رشد همه‌جانبه فرد در ابعاد شناختی، اجتماعی، عاطفی، اخلاقی و جسمی اشاره دارد. این رویکرد، برخلاف الگوهای تقلیل‌گرایانه‌ای که یادگیری را به انتقال دانش شناختی محدود می‌کنند، بر پیوند و تعامل پویای ابعاد گوناگون رشد انسانی تأکید دارد و آموزش را فرایندی یکپارچه و چندساختی می‌داند. هدف آن، تربیت افرادی است که بتوانند در دنیای واقعی، با تفکر انتقادی و خلاق، در حل مسائل مختلف به طور توانمند فعالیت کنند. لذا افراد نیازمند مهارت‌هایی هستند که همه ابعاد وجودی آنان را با در نظر گرفتن استعدادهای ذاتی بالقوه و کشف استعدادهای پنهان، رشد و ترقی بخشند. این مهارت‌ها باید افراد را برای ورود و تعامل با دنیای واقعی، تصمیم‌گیری‌های منطقی و آگاهانه آماده کرده، به آن‌ها توانایی حل مسئله به کمک توانایی‌های ذهن و بهره‌گیری از ابزار هوشمند محاسباتی را بدهند. تفکر محاسباتی انسان‌محور مهارتی بنیادی برای تربیت افراد در جهت رشد در همه ابعاد وجودی است. این مهارت، نقشی اساسی در شکل‌دهی و تحقق تربیت تمام‌ساختی ایفا می‌کند. تفکر محاسباتی انسان‌محور با تأکید بر توانایی‌های ذهن در نقش «معلم درونی»، با مؤلفه‌های انتزاع، تجزیه و تحلیل، الگوریتم، اتوماسیون، اشکال‌زدایی و تعمیم، به پرورش مهارت‌های حل مسئله افراد کمک می‌کند. با ادغام این مؤلفه‌ها در برنامه‌های آموزشی، می‌توان افرادی را پرورش داد که نه تنها در حوزه علمی و فنی توانمند هستند، بلکه در ابعاد عاطفی، اجتماعی و اخلاقی نیز به‌طور کامل رشد یافته‌اند. در این میان معلمان در نقش آموزش‌دهنده، الگوی رفتاری، راهنما و تسهیل‌گر یادگیری، ضمن کمک به آموزش تفکر محاسباتی انسان‌محور، سنگ‌بنای تحقق تربیت تمام‌ساختی را فراهم می‌کنند. از این‌رو، کیفیت نظام تربیتی هر جامعه تا حد زیادی به شایستگی، تعهد و توانمندی معلمان آن وابسته است. از طرفی بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته مانند هوش مصنوعی می‌تواند مسیر رسیدن به تربیت تمام‌ساختی را هموارتر سازد. ادغام تفکر محاسباتی انسان‌محور (معلم درونی)، نقش هدایت‌گری معلمان (معلم بیرونی) و بهره‌گیری از هوش مصنوعی (ابزار تسهیل‌گر)، مثلی استراتژیک برای تحقق تربیت تمام‌ساختی است. در پرتو این هم‌افزایی، پرورش انسان‌های کمال‌یافته و متوازن، امری کاملاً دست‌یافتنی و محقق‌شدنی است.

کلیدواژگان: تربیت تمام‌ساختی، تفکر محاسباتی انسان‌محور، آموزش و پرورش، معلم، هوش مصنوعی.

مقدمه

کمک می‌کند. این رویکرد به‌ویژه در دنیای امروز که افراد با چالش‌های متعدد اجتماعی، فرهنگی و علمی روبه‌رو هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. **تفکر محاسباتی انسان‌محور^۱** با آموزش افراد به تفکر منطقی، انتقادی و سیستماتیک، همچون یک معلم درونی عمل کرده، آن‌ها را قادر می‌سازد تا با دقت، کارایی و خلاقیت به حل مسائل مختلف بپردازند [۴۲]. این نوع تفکر با مؤلفه‌های انتزاع، تجزیه و تحلیل، الگوریتم، اتوماسیون، اشکال‌زدایی و تعمیم، ابزاری قدرتمند برای پرورش مهارت‌هایی است که به افراد کمک می‌کند، علاوه بر زمینه‌های علمی و فنی، در ابعاد عاطفی، اجتماعی و اخلاقی نیز رشد کنند [۴۰]. این نوع تفکر به افراد امکان می‌دهد تا به طور چندجانبه به تحلیل مسائل پرداخته، راه‌حل‌های مؤثری ارائه داده

اهمیت تربیت تمام‌ساختی در دنیای معاصر که شاهد شتاب بی‌سابقه در تغییرات فنی، اجتماعی و فرهنگی است، بیش از هر زمان دیگر آشکار شده است. افراد نیازمند ابزارهایی هستند که بتوانند به طور مؤثر به حل مشکلات پیچیده و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه پرداخته، در تمامی جنبه‌های زندگی خود رشد کنند. تربیت تمام‌ساختی یا تربیت فراگیر به فرآیند آموزشی و تربیتی اشاره دارد که در آن توجه به همه ابعاد و جوانب رشد انسان، از جمله ساحت‌های اعتقادی و اخلاقی، زیستی و بدنی، اجتماعی و سیاسی، اقتصادی و حرفه‌ای، علمی و فناوری و زیبایی‌شناختی و هنری مورد توجه قرار می‌گیرد. این نوع تربیت، افراد را به اندیشیدن کلان، ارزش‌گذاری منطقی و ارتباط مؤثر با محیط اطراف ترغیب کرده، به بهترین شکل ممکن به رشد و توسعه همه جانبه آنان

و در نهایت به افرادی خلاق، مسئول و هوشمند تبدیل شوند. مهمترین ویژگی تفکر محاسباتی انسان محور همگانی بودن آن است؛ همچنین این مهارت را می توان به افراد آموزش داد. از طرفی گستره استفاده از این مهارت بسیار وسیع است و تقریباً می توان در همه جوانب زندگی از آن استفاده کرد [۴۲].

تلفیق تفکر محاسباتی انسان محور و تربیت تمام ساحتی، در گذار از نظام های سنتی تربیتی به الگوهای نوین تعلیم و تربیت امری ضروری است. رویکردی که به جای انتقال صرف دانش، بر شکوفایی قابلیت های شناختی و فراشناختی تمرکز دارد. این رویکرد مفهوم تربیت تمام ساحتی را آرمان غایی نظام های آموزشی بیان می کند. همچنین به دنبال رشد متوازن و هماهنگ فرد در تمامی ابعاد وجودی، از ساحت علمی و فناورانه گرفته تا ساحت های اخلاقی، اجتماعی و زیباشناختی است. با این حال، تحقق این هدف متعالی مستلزم تجهیز یادگیرندگان به یک چارچوب ذهنی قدرتمند و کارآمد است که نه تنها در محیط مدرسه، بلکه در تمام مراحل زندگی به عنوان یک راهنمای درونی عمل کند. این مقاله استدلال می کند که تفکر محاسباتی انسان محور، به مثابه یک معلم درونی، سازوکاری شناختی است که می تواند این خلاء را به صورت کامل پر کرده، با هم افزایی با نقش تحول یافته ی معلم بیرونی، مسیر رسیدن به تربیت تمام ساحتی را هموار سازد. برخلاف تصور غالب که تفکر محاسباتی را صرفاً به حوزه ی علوم کامپیوتر محدود می کند، تفکر محاسباتی انسان محور، یک فرآیند حل مسئله جهان شمول است که بر قابلیت های منحصربه فرد ذهن انسان تکیه دارد. این چارچوب شناختی از مجموعه ای منسجم از مهارت ها تشکیل شده است که به فرد امکان مواجهه نظام مند با مسائل پیچیده را می دهد. تفکر محاسباتی انسان محور صرفاً به دنبال یافتن یک راه حل نیست، بلکه به دنبال بهترین راه حل با در نظر گرفتن پیامدهای اخلاقی، اجتماعی، فرهنگی و عاطفی آن برای تمام افراد است [۴۲]. این همان نقطه ای است که منطق سرد الگوریتم و محاسبه ماشینی با مسئولیت پذیری اجتماعی پیوند می خورد و ذهن انسان و اندیشه بشری را به معلم درونی که راهنمایی خردمند است، تبدیل می کند. از سوی دیگر، در آموزش رسمی، معلمان در انتقال دانش و مهارت های ضروری به یادگیرندگان نقش بسیار مهم و حیاتی دارند و راهنما و الگو برای رفتارهای اخلاقی و اجتماعی نیز شناخته می شوند. لذا معلم دیگر یک منبع صرف اطلاعات نبوده، بلکه به معمار زیست بوم های یادگیری و تسهیل گر فرآیندهای فکری بدل می شود. وظیفه ی اصلی معلم، طراحی موقعیت ها، پروژه ها و چالش های یادگیری اصیل و چندوجهی است که افراد را به طور طبیعی برای به کارگیری و تمرین مؤلفه های شش گانه ی

تفکر محاسباتی تعلیم می دهد. در این زیست بوم، معلم با طرح پرسش های عمیق، مدل سازی فرآیندهای فکری و فراهم آوردن بازخوردهای سازنده، به دانش آموزان کمک می کند تا به تدریج داربست های این معلم درونی را در ذهن خود بنا نهند [۳۶]. تربیت تمام ساحتی، در عمل، محصول هم افزایی میان معلم بیرونی (به عنوان معمار) و معلم درونی (به عنوان سازوکار شناختی) فعال شده در ذهن یادگیرنده است. این فرآیند در تمامی ساحت های تربیتی قابل مشاهده است. در ساحت علمی و فناورانه، این رویکرد به تحلیل پدیده های پیچیده ی طبیعی و طراحی راه حل های نوآورانه می انجامد. در ساحت اجتماعی و سیاسی، به دانش آموزان امکان می دهد تا معضلات کلان اجتماعی مانند فقر یا بحران های زیست محیطی را با نگاهی سیستمی تجزیه کرده، الگوهای زیربنایی آن را انتزاع نموده و راه حل های الگوریتمیک (سیاست گذاری ها) را با در نظر گرفتن عدالت و پیامدهای انسانی طراحی و اشکال زدایی کنند. حتی در ساحت اعتقادی و اخلاقی، این تفکر به فرد کمک می کند تا در مواجهه با دوره های اخلاقی، ابعاد مسئله را تجزیه کرده، با انتزاع اصول حاکم، پیامدهای الگوریتم های رفتاری مختلف را پیش بینی و ارزیابی نماید.

نگاهی به پژوهش های انجام شده در زمینه تربیت تمام ساحتی
در دهه های اخیر مؤید این است که این نوع تربیت یکی از رویکردهای تحول آفرین در آموزش و پرورش می باشد. این نوع تربیت بر رشد همه جانبه انسان در ابعاد شناختی، عاطفی، اخلاقی، اجتماعی، فرهنگی و فنی تأکید دارد [۷]. دیدگاه های اولیه درباره تربیت فراگیر در آثار اندیشمندانی چون فوربز^۱ [۸] و گزارش های سازمان یونسکو [۱۱] مطرح شده اند. در این پژوهش ها، یادگیری نه صرفاً به انتقال دانش، بلکه به پرورش شخصیت متعادل و آگاه انسان نسبت داده می شود. لذا هدف اصلی این رویکرد، پرورش انسان هایی متفکر، خودآگاه، اخلاق مدار و مشارکت جو در جامعه است.

از سوی دیگر، در ادبیات آموزشی معاصر، تفکر محاسباتی، مجموعه ای از مهارت ها برای حل مسائل پیچیده و تفکر منطقی است که قلب فرآیند یادگیری در قرن بیست و یکم به شمار می رود. تفکر محاسباتی در دیدگاه نوین، مهارتی بنیادین مشابه خواندن و نوشتن است [۹]. با توجه به این نگرش، برنان^۲ و رزنیک^۳ چارچوبی سه بعدی برای آموزش تفکر محاسباتی ارائه کردند که شامل ابعاد مفهومی (مانند الگوریتم، انتزاع و تجزیه)، عملکردی (مانند اشکال زدایی و بازآزمایی) و نگرشی (مانند پشتکار و همکاری) است [۱۰]. پژوهش گروور^۴ و پی^۵ نیز با بررسی کاربرد تفکر محاسباتی در آموزش k-12 نشان داد که این نوع تفکر موجب ارتقای

1. Forbes
2. Brennan
3. Resnic
4. Grover

5. Pea
6. Kafai
7. Burke

دارد که آموزش تفکر سطح بالا از سوی معلمان، موجب ارتقای توان تحلیل، حل مسئله و خوداندیشی در دانش‌آموزان می‌شود [۱۵]. در همین راستا، نادینگر^۳ در رویکرد تربیت مراقبتی بر اهمیت رابطه انسانی، همدلی و مسئولیت‌پذیری معلم در فرایند تربیتی تأکید کرده است [۱۶].

هوش مصنوعی در سال‌های اخیر، توجه به نقش فناوری‌های هوشمند در حمایت از تربیت تمام ساحتی را به طور فزاینده افزایش داده است. لاکین^۴ [۱۷] و هولمز^۵، بیالیک^۶ و فدل^۷ [۱۸] در پژوهش‌های خود نشان داده‌اند که هوش مصنوعی می‌تواند نقش تسهیل‌گر یادگیری را ایفا کرده و از طریق شخصی‌سازی آموزش، بازخورد فوری و تحلیل داده‌ها، زمینه‌ی رشد تفکر نقاد، خودآگاهی و یادگیری مادام‌العمر را فراهم کند. این یافته‌ها حاکی از آن است که بکارگیری هوش مصنوعی به همراه تلفیق تفکر محاسباتی انسان محور با تربیت تمام ساحتی می‌تواند مدلی نوین از تربیت برای پرورش انسان‌های یادگیرنده، خلاق و مسئول در عصر دیجیتال ارائه دهد.

توالی مطالب در این مقاله به صورت زیر است. در بخش دوم به بررسی «مزایای تربیت تمام ساحتی» پرداخته می‌شود. در بخش سوم، پیوند میان «تفکر محاسباتی انسان محور و تربیت تمام ساحتی» تبیین شده است. در بخش چهارم، «نقش این تفکر در ساحت‌های تربیتی از جنبه‌های عملی و نظری» مورد واکاوی قرار می‌گیرد. بخش پنجم با نگاهی تطبیقی به بررسی «تعالی تمام ساحتی ابن سینا در سایه تفکر محاسباتی انسان محور» اختصاص یافته است.

پس از آن، عاملیت‌های کلیدی این رویکرد در بخش ششم تحت عنوان «نقش معلم در تربیت تمام ساحتی» و در بخش هفتم با عنوان «نقش هوش مصنوعی در تحقق تربیت تمام ساحتی» تحلیل می‌شوند. در بخش هشتم، «راهکارهای تحقق تربیت تمام ساحتی» ارائه شده است. سپس در بخش نهم نگاهی به «تاریخچه تربیت تمام ساحتی» خواهیم داشت. در نهایت، این پژوهش در بخش دهم با ارائه «بحث و نتیجه‌گیری» و جمع‌بندی دستاوردها به پایان می‌رسد.

۲. مزایای تربیت تمام ساحتی

پیاده‌سازی تربیت تمام ساحتی، که از ارکان سند تحول بنیادین است، نظام تعلیم و تربیت را از «آموزش محوری» به «تربیت محوری» تغییر می‌دهد [۱۹، ۲۷]. این رویکرد، مزایای بنیادین متعددی دارد که در ادامه به برخی از آن‌ها که در شکل ۱ نشان داده شده اشاره می‌کنیم.

خودتنظیمی، تفکر انتقادی و خلاقیت در یادگیرندگان می‌شود [۱۲]. بر اساس پژوهش‌های کافی^۸ و بارک^۹، یادگیری بر پایه کد نویسی و شبیه‌سازی، علاوه بر رشد مهارت‌های شناختی، به گسترش مهارت‌های عاطفی و اجتماعی نیز منجر می‌شود [۱۳].

ما در گامی رو به جلو با توسعه تفکر محاسباتی در قالب انسان محوری و ترکیب این دو جریان (تربیت تمام ساحتی و تفکر محاسباتی انسان محور) نشان داده‌ایم که یادگیری و به دنبال آن هنر حل مسئله، فرایندی پویا، میان‌رشته‌ای و انسان محور است. توسعه مفهوم تفکر محاسباتی از رویکردی ماشین محور به رویکردی انسان محور، در عین حفظ اصول بنیادین دیدگاه کلاسیک مانند تجزیه مسئله، انتزاع، تشخیص الگو و طراحی الگوریتم، تلاشی برای بازتعریف نقش محاسبه در خدمت توانمندسازی شناختی انسان است. در این رویکرد، ذهن انسان به عنوان پیچیده‌ترین و منعطف‌ترین سامانه محاسباتی در نظر گرفته می‌شود که قادر است فرایندهای محاسباتی را نه صرفاً برای اجرای ماشینی، بلکه برای فهم عمیق‌تر مسائل، تصمیم‌گیری آگاهانه و تولید دانش به کار گیرد. بنابراین، تفکر محاسباتی از محدوده مهارت‌های فنی مرتبط با برنامه‌نویسی فراتر رفته و به چارچوبی شناختی برای سازمان‌دهی اندیشه، تحلیل مسائل پیچیده و توسعه توانایی‌های حل مسئله در انسان تبدیل می‌شود. [۴۴-۴۱]

این نگاه با رویکرد انسان محوری در فناوری آموزشی همسوئی دارد. رویکردی که در آن فناوری نه به عنوان هدف، بلکه به عنوان ابزاری در خدمت یادگیری معنادار و رشد ظرفیت‌های شناختی، عاطفی و اجتماعی یادگیرندگان طراحی و به کار گرفته می‌شود. در چنین چارچوبی، فناوری‌های آموزشی باید با ویژگی‌های شناختی انسان، شیوه‌های یادگیری و نیازهای آموزشی او سازگار باشند و محیط‌هایی فراهم کنند که یادگیرندگان بتوانند از طریق تعامل، کاوش و حل مسئله، مهارت‌های تفکر سطح بالا را توسعه دهند. از این منظر، پیوند میان تفکر محاسباتی انسان محور و فناوری آموزشی انسان محور می‌تواند زمینه‌ای نظری و عملی برای طراحی محیط‌های یادگیری نوآورانه فراهم آورد که در آن‌ها محاسبه و فناوری در خدمت پرورش تفکر، خلاقیت و توان حل مسئله انسان قرار می‌گیرند. جایی که فرد می‌آموزد از فناوری نه به عنوان ابزار صرف، بلکه به عنوان شریک شناختی استفاده کند [۴۴].

نقش معلمان در تحقق این رویکرد بسیار اساسی است. بر اساس تحقیقات دارلینگ-هاموند^{۱۰}، نظام‌های آموزشی موفق جهان معلمان را توانمند می‌سازند تا علاوه بر انتقال دانش، نقش تسهیل‌گر، راهنما و الگوی اخلاقی را ایفا کنند [۱۴]. زهر^{۱۱} تأکید

1. Darling-Hammond
2. Zohar
3. Noddings
4. Luckin

5. Holmes
6. Bialik
7. Fadel



شکل ۱. مزایای تربیت تمام‌ساحتی.

کاربردی تمرکز دارد. با ادغام مهارت‌های تفکر انتقادی، خلاقیت و حل مسئله در بطن برنامه‌های درسی، فرآیند تعلیم و تربیت از حالت تک‌بعدی خارج شده و بستری برای یادگیری معنادار فراهم می‌آید [۱۳]. تفکر محاسباتی انسان‌محور، با فراهم آوردن چارچوبی برای تجزیه، تحلیل، طراحی الگوریتم و ارزیابی راه‌حل‌ها به شیوه‌ای که نیازها و توانایی‌های انسانی را در اولویت قرار می‌دهد، این فرآیند را توانمند می‌سازد. خروجی این رویکرد، نسلی پویا و کارآمد است که قادر به حل مسائل پیچیده با رویکردی خلاقانه و انسان‌دوستانه است.

۲-۴. پیوند نظام آموزشی با نیازهای واقعی زندگی (آمادگی زیستی و اجتماعی)

تربیت تمام‌ساحتی، دانش‌آموز را برای مواجهه هوشمندانه با پیچیدگی‌های زندگی فردی و اجتماعی تجهیز می‌کند. این رویکرد، مهارت‌های زندگی را نه به عنوان یک پیوست جانبی، بلکه به عنوان جزء تفکیک‌ناپذیر برنامه‌های درسی در نظر می‌گیرد [۱۳]. در این چارچوب، تفکر محاسباتی انسان‌محور به دانش‌آموز کمک می‌کند تا با تجزیه و تحلیل موقعیت‌های پیچیده زندگی، شناسایی الگوها، طراحی راه‌حل‌های خلاقانه و ارزیابی نتایج، مهارت‌های خود را در زمینه‌هایی چون حل مسئله، تصمیم‌گیری، مدیریت هیجانات و روابط بین فردی به شکلی عمیق‌تر و کاربردی‌تر توسعه دهند. این امر منجر به تقویت هویت ملی و آمادگی برای نقش‌آفرینی مؤثر در جامعه می‌شود [۲۴].

توجه متوازن به ساحت‌های شش‌گانه (اعتقادی، اخلاقی، علمی، زیستی، هنری و حرفه‌ای)، مانع از فشار مضاعف ناشی از رقابت‌های تک‌بعدی تحصیلی می‌شود. تفکر محاسباتی انسان‌محور به افراد این امکان را می‌دهد که با تجزیه و تحلیل اهداف آموزشی در هر ساحت، طراحی برنامه‌هایی منعطف و شخصی‌سازی‌شده و ارزیابی مستمر پیشرفت، به تحقق این تعادل‌بخشی دست یابند [۲۳]. این رویکرد، با کاهش اضطراب‌های تحصیلی و تقویت اعتمادبه‌نفس

۲-۱. بازتعریف هویت حرفه‌ای معلمان و توانمندسازی آنان

در رویکرد تمام‌ساحتی، معلم از «منتقل‌کننده دانش» به «تسهیل‌گر، الگوی اخلاقی و مهندس یادگیری» ارتقا می‌یابد. این تحول نقشی، با حضور تفکر محاسباتی انسان‌محور، معنای عمیق‌تری پیدا می‌کند؛ چرا که معلم نه تنها باید دانش‌آموزان را در ابعاد مختلف رشد دهد، بلکه باید آن‌ها را برای مواجهه با مسائل پیچیده عصر دیجیتال نیز آماده کند. بنابراین، معلم در این مدل، مهندس یادگیری‌ای است که با تلفیق اصول تربیتی و تفکر محاسباتی، فضایی را خلق می‌کند تا دانش‌آموزان بتوانند خلاقانه، منطقی و اخلاق‌مدارانه مسائل را تحلیل و حل کنند. این چرخش، ضرورت بازنگری در برنامه‌های تربیت معلم و آموزش‌های ضمن خدمت را برای تجهیز معلمان به این مهارت‌های نوین دوچندان می‌کند.

۲-۲. هم‌افزایی ساختاری و بهینه‌سازی منابع آموزشی

این رویکرد، نگرش مدیران و سیاست‌گذاران را از نگاه تک‌بعدی به آموزش، به سمت توسعه همه‌جانبه و چندوجهی انسان تغییر می‌دهد. با اتخاذ نگاه تمام‌ساحتی، تمامی سرمایه‌های انسانی، مالی و زیرساخت‌های فیزیکی (مانند فضاهای ورزشی، آزمایشگاهی و پرورشی) در یک راستای واحد و با هم‌افزایی، برای حمایت از رشد چندبعدی افراد به کار گرفته می‌شوند [۲۰، ۲۱]. در این میان، «تفکر محاسباتی انسان‌محور» به عنوان یک عامل کلیدی عمل می‌کند؛ چرا که مدیران را قادر می‌سازد تا با درک عمیق از نحوه یادگیری و حل مسئله توسط انسان در عصر دیجیتال، تخصیص منابع و طراحی زیرساخت‌ها را به گونه‌ای هدایت کنند که علاوه بر مهارت‌های فنی، ابعاد خلاقیت، تفکر انتقادی، همکاری و مسئولیت‌پذیری اجتماعی نیز پرورش یابند و بستری جامع برای رشد همه‌جانبه فراهم گردد.

۲-۳. ارتقای کیفیت و عمق‌بخشی به فرآیند یادگیری

تربیت تمام‌ساحتی با عبور از حافظه‌محوری، بر یادگیری عمیق و

ابعاد وجودی انسان است. در این رویکرد یکپارچه، انسان صرفاً دریافت‌کننده منفعل اطلاعات نیست؛ بلکه موجودی معنا ساز، ارزش‌مدار و مسئولیت‌پذیر است. بنابراین، تربیت مجموعه‌ای از بخش‌های پراکنده نیست، بلکه نظامی منسجم است که در آن، هر ساحت به رشد و سامان‌دهی کنش‌های عقلانی و رفتاری فرد کمک می‌کند [۳۸].

در این چارچوب، تفکر محاسباتی انسان محور از ارکان بنیادین تربیت تمام ساحتی است. این مفهوم، فراتر از نگاه صرفاً فناورانه و الگوریتمی به محاسبه است. در علوم شناختی نوین، ذهن انسان به عنوان یک «ماشین هوشمند معناپرداز» و سیستمی پیچیده، خودتنظیم و یادگیرنده شناخته می‌شود. تفاوت اساسی ذهن انسان با رایانه در این است که انسان پردازش اطلاعات و محاسبه را با هیجان، معنا، ارزش‌ها، تجربه‌های زیسته و بسترهای اخلاقی و اجتماعی پیوند می‌زند. در واقع، ذهن موقعیت‌ها را درک می‌کند، از خطاهای خود می‌آموزد و آگاهانه تصمیم می‌گیرد؛ توانمندی‌هایی که هیچ ماشین صرفاً محاسباتی قادر به بازتولید کامل آن‌ها نیست [۴۴]. از این منظر، تفکر محاسباتی انسان محور هم‌اگرایی شناختی برای فهم بهتر فرایندهای ذهنی است و هم سازوکاری کارآمد برای تربیت. منطق درونی این تفکر به فرد کمک می‌کند تا شناخت، تصمیم‌گیری و عمل خود را در نظام پیچیده‌ی زندگی سامان داده و در مسیر رشد همه‌جانبه قدم بردارد.

بنابراین، مطابق شکل ۲، تفکر محاسباتی انسان محور و تربیت تمام ساحتی، در مسیر پرورش انسانی متعالی و چندبعدی مکمل یکدیگرند. این پیوند و ارتباط را می‌توان از طریق ابعاد زیر تبیین کرد:

در حوزه‌های مورد علاقه دانش‌آموز، به سلامت روان و شکوفایی استعدادهای نهفته آنان یاری می‌رساند و بستری برای رشد همه‌جانبه فراهم می‌آورد.

۲-۶. افزایش تاب‌آوری نظام آموزشی در برابر تغییرات محیطی

نظام‌های آموزشی تک‌بعدی، به شدت در برابر تغییرات سریع فناوری و اجتماعی آسیب‌پذیرند [۲۵]. تربیت تمام ساحتی با پرورش ابعاد مختلف شخصیتی دانش‌آموز (به‌ویژه ساحت‌های عقلانی و حرفه‌ای)، او را به قدرت «انطباق‌پذیری» و «یادگیری مادام‌العمر» مجهز می‌کند. این ویژگی باعث می‌شود دانش‌آموزان در آینده در مواجهه با تغییرات سریع بازار کار و تحولات اجتماعی، تاب‌آوری بیشتری داشته باشند.

۲-۷. ارتقای سرمایه اجتماعی و مشارکت‌پذیری

با تأکید بر ساحت «اجتماعی و سیاسی»، این رویکرد روحیه مشارکت‌جویی، کارگروهی و مسئولیت‌پذیری مدنی را در دانش‌آموزان تقویت می‌کند. خروجی چنین تربیتی، شهروندانی است که علاوه بر تعهد به رشد فردی، نسبت به سرنوشت جمعی و خیر عمومی جامعه دغدغه‌مند هستند [۲۴].

موارد ذکر شده تنها بخشی از مزایای متعدد و ارزش تربیت تمام ساحتی هستند که نیاز است به طور ویژه مورد توجه و بررسی قرار گیرند.

۳. تفکر محاسباتی انسان محور و تربیت تمام ساحتی

تربیت تمام ساحتی به معنای پرورش متوازن و هماهنگ تمامی



شکل ۲. ارتباط تفکر محاسباتی انسان محور و تربیت تمام ساحتی.
انسان توانمند، مسئله‌محور، اخلاق‌مدار و خلاق در دنیای دیجیتال

۳-۱. تفکر محاسباتی و تربیت تمام‌ساختی در قالب یک سیستم پویا:

تفکر محاسباتی به عنوان یک رویکرد شناختی نظام‌مند، چارچوبی برای تحلیل مسائل پیچیده، مدل‌سازی و طراحی راه‌حل‌های ساختارمند فراهم می‌کند. در مقابل، تربیت تمام‌ساختی با تأکید بر رشد متوازن ابعاد مختلف وجودی انسان شامل ساحت‌های عقلانی، اخلاقی، اجتماعی، زیستی و زیباشناختی، جهت‌گیری ارزشی و غایت‌مند به فرآیند یادگیری می‌بخشد. ترکیب این دو رویکرد می‌تواند به شکل‌گیری یک نظام آموزشی پویا و چندبعدی منجر شود که در آن مهارت‌های شناختی پیشرفته در کنار پرورش ارزش‌ها و هویت فردی و اجتماعی دانش‌آموزان توسعه می‌یابد. در چنین سیستمی، یادگیری صرفاً انتقال دانش نیست، بلکه فرآیندی تعاملی برای رشد همه‌جانبه فراگیران تلقی می‌شود.

۳-۲. هم‌افزایی

تفکر محاسباتی با تکیه بر مؤلفه‌هایی مانند انتزاع، تجزیه مسئله، طراحی الگوریتم، اتوماسیون، اشکال‌زدایی و تعمیم، به پرورش مهارت‌های تحلیلی، منطقی و حل مسئله کمک می‌کند و بستری برای مواجهه ساختارمند با مسائل پیچیده فراهم می‌آورد. با این حال، در چارچوب تربیت تمام‌ساختی این مهارت‌ها صرفاً در سطح شناختی باقی نمی‌مانند، بلکه در بستر ارزش‌های اخلاقی، تعاملات اجتماعی و حساسیت‌های عاطفی معنا پیدا می‌کنند. به این ترتیب، یادگیری به فرآیندی تبدیل می‌شود که علاوه بر کارآمدی شناختی، مسئولیت‌پذیری اجتماعی و توجه به پیامدهای انسانی تصمیم‌ها را نیز تقویت می‌کند. این هم‌افزایی می‌تواند به تربیت افرادی بینجامد

که هم توان تحلیل مسائل را دارند و هم نسبت به آثار اجتماعی و اخلاقی راه‌حل‌های خود آگاه هستند.

۳-۳. تبدیل دانش به حکمت

یکی از چالش‌های نظام‌های آموزشی معاصر، فاصله میان کسب دانش و به‌کارگیری مسئولانه آن در زندگی فردی و اجتماعی است. در این میان، تفکر محاسباتی با ارائه چارچوبی برای سازمان‌دهی دانش و حل مسائل، بعد «چگونگی» عمل را تقویت می‌کند، در حالی که تربیت تمام‌ساختی با تأکید بر ارزش‌ها، معنا و مسئولیت اجتماعی، بعد «چرایی» و پیامدهای انسانی تصمیم‌ها را برجسته می‌سازد. پیوند این دو رویکرد می‌تواند به فرایندی آموزشی منجر شود که در آن دانش صرفاً به مهارت فنی محدود نمی‌شود، بلکه به فهم عمیق‌تر، قضاوت اخلاقی و کاربرد خردمندانه دانش در موقعیت‌های واقعی زندگی تبدیل می‌گردد. در چنین چارچوبی، آموزش به بستری برای تبدیل دانش به حکمت و تربیت انسان‌های مسئول و متعهد بدل می‌شود. در ادامه با مثال‌هایی ارتباط تفکر محاسباتی انسان‌محور و تربیت تمام‌ساختی را به طور دقیق‌تر بررسی می‌کنیم.

۴. نقش تفکر محاسباتی انسان‌محور در ساحت‌های تربیتی از جنبه‌های عملی و نظری

هر یک از ساحت‌های شش‌گانه تربیت (دینی- اخلاقی، علمی- فناوریانه، اجتماعی- سیاسی، زیستی- بدنی، هنری- زیبایی‌شناختی و اقتصادی- حرفه‌ای) با مکانیسم‌های خاصی از تفکر محاسباتی انسان‌محور تغذیه می‌شوند. در جدول ۱، نمونه‌هایی از نقش هر یک از مؤلفه‌های تفکر محاسباتی در ساحت‌های تربیت تمام‌ساختی آورده شده است.

جدول ۱. نقش تفکر محاسباتی انسان‌محور در ساحت‌های تربیت تمام‌ساختی.

ساحت تربیتی	نقش تفکر محاسباتی	مثال کاربردی
علمی-فناورانه	طراحی الگوریتم برای مدل‌سازی پدیده‌های طبیعی	شبیه‌سازی رشد جمعیت با مدل‌سازی ریاضی و استفاده از هوش مصنوعی
اجتماعی-سیاسی	تحلیل الگوهای رفتاری در شبکه‌های اجتماعی با داده کاوی	پیش‌بینی جریان‌های مهاجرتی با تحلیل کلان‌داده‌ها
دینی-اخلاقی	ساختاردهی منطقی به مسائل اخلاقی پیچیده	طراحی درخت تصمیم برای معضلات اخلاقی در فناوری نانو
زیستی-بدنی	بهینه‌سازی برنامه‌های ورزشی با الگوریتم‌های تکاملی	طراحی رژیم غذایی شخصی‌سازی شده با یادگیری ماشین
هنری-زیبایی‌شناختی	خلق آثار دیجیتال آرت با الگوریتم‌های ژنتیکی	تولید موسیقی الگوریتمی بر اساس الگوهای فراکتالی
اقتصادی-حرفه‌ای	مدل‌سازی بازارهای مالی با روش‌های محاسباتی	پیش‌بینی روند بورس با شبکه‌های عصبی مصنوعی

مطابق جدول ۲، از چگونگی تلفیق تفکر محاسباتی انسان‌محور و ساحت‌های تربیت تمام‌ساختی برای رفع معضل آلودگی را آورده‌ایم. در کلاس درس یا گروه‌های آموزشی محله‌محور، یک پروژه آموزشی تلفیقی می‌تواند این مراحل را طی کند:

در آموزش نیز می‌توان از مهارت‌های تفکر محاسباتی انسان‌محور با تأکید بر جنبه‌های گوناگون تربیت تمام‌ساختی بهره گرفت. باید در نظر داشت که در این رویکرد، فناوری ابزار یاری‌رسان بوده و انسان و پیامدهای اجتماعی در مرکز تحلیل قرار دارند. در ادامه الگویی عملی

جدول ۲. ارتباط ساحت‌های تربیت تمام‌ساحتی در حل مسئله پدیده آلودگی.

ساحت	نحوه تحقق در طرح	ابزار- روش پیشنهادی
اعتقادی-اخلاقی	مسئولیت‌پذیری نسبت به محیط زیست	نقش‌آفرینی، بحث گروهی
اجتماعی-سیاسی	درک نقش شهروندی در کاهش آلودگی	نقشه مسئولیت، پیشنهاد به شورا
زیستی-بدنی	شناخت اثرات آلودگی بر سلامت	داده‌های بهداشتی، نمودارهای سلامت
علمی-فناورانه	تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی پدیده آلودگی	نرم‌افزارهای جدول‌محور، شبیه‌سازی
زیبایی‌شناختی	طراحی پوستر و ارائه خلاقانه راه‌های مقابله با آلودگی	طراحی پوستر، ارائه بصری
اقتصادی-حرفه‌ای	بررسی هزینه‌های اقتصادی آلودگی (هزینه- فایده)	محاسبه هزینه‌های مستقیم- غیرمستقیم

کار گروهی: نقشه مسئولیت

هر گروه یک نقش (شهروند، مسئول شهری، کارگر کارخانه، معلم) را بر عهده گرفته و نقش‌آفرینی می‌کند. هر گروه وظایف و مسئولیت‌های خود را نسبت به بهبود کیفیت هوا می‌نویسد. نتایج در یک تابلو مشترک جمع‌آوری می‌شود. این کار علاوه بر برش تحلیلی از مناظر مختلف به مسئله، حس مسئولیت‌پذیری و همدلی را نیز تقویت می‌کند.

اجرای مراحل تفکر محاسباتی

انتزاع (تمرکز بر عوامل کلیدی، ساحت‌های علمی- فناورانه و اعتقادی- اخلاقی)

در این مرحله دانش‌آموزان از میان عوامل متعدد، مهم‌ترین متغیرهای مستقل و وابسته پدیده آلودگی را مشخص می‌کنند. به عنوان مثال، تعداد خودروها، ریزگردها، سرعت باد، مراکز صنعتی آلاینده، کیفیت سوخت مصرفی و تراکم جمعیت را می‌توان عوامل کلیدی و اصلی در آلودگی هوای شهری در نظر گرفت. با این فعالیت دانش‌آموزان می‌آموزند که در مواجهه با یک مسئله با اولویت بندی متغیرهای کلیدی را استخراج کنند. سپس با ارائه راه‌کارهایی مانند طراحی یک نمودار، رابطه بین عوامل مختلف و متغیرهای وابسته مانند «تعداد خودرو» و «افزایش ذرات معلق» را درک و کشف می‌کنند.

تجزیه (شکستن مسئله، ساحت‌های علمی- فناورانه، اجتماعی- سیاسی و اقتصادی- حرفه‌ای)

در این فرآیند دانش‌آموزان در گروه‌های مختلف، پدیده آلودگی هوا را به زیرمسئله‌ها تقسیم می‌کنند که می‌تواند شامل: منابع آلاینده (خودرو، کارخانه، گرد و غبار)، پیامدهای بهداشتی، پیامدهای اقتصادی، نقش دولت، نقش شهروندان و شرایط جغرافیایی باشد. در این مرحله با شناخت ابعاد و تشکیل زیر مسئله‌ها به کمک تحلیل، طبقه‌بندی و تفکیک علی، دید دقیق‌تری از فرآیند حل مسئله به‌دست می‌آید.

تشخیص یک مسئله اجتماعی: آلودگی هوا در محیط شهری

ابتدا ارتباط مسئله آلودگی هوا با ساحت‌های تربیت تمام‌ساحتی را بررسی می‌کنیم. در شکل ۳، مراحل حل مسئله آلودگی در کلاس درس به صورت نظام‌مند و به صورت تلفیق تفکر محاسباتی انسان‌محور و تربیت تمام‌ساحتی نشان داده شده است.



شکل ۳. مراحل حل مسئله آلودگی در کلاس درس.

مرحله اول: طرح مسئله

با انجام فعالیت آغازین و نمایش تصویری از وضعیت آلودگی در شهرهای بزرگ مانند تهران و اهواز مسئله آلودگی را به صورت کلی مطرح می‌کنیم. با هدف درگیرسازی ذهنی و فعال‌سازی دانش پیشین، طرح پرسش‌های محرک مانند: «اگر امروز شاخص کیفیت هوا خطرناک باشد، چه اتفاقی برای زندگی ما می‌افتد؟» و یا «کدام گروه‌های جامعه بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد؟» برای آغاز فعالیت مناسب است.

تعمیم (یادگیری عمیق و کاربرد، تمام ساحت‌ها)

در مرحله تعمیم، دانش‌آموزان می‌آموزند یافته‌ها و الگوریتم‌های خود را به موقعیت‌های گسترده‌تر یا مشابه گسترش دهند. به عنوان نمونه، الگوریتم کاهش آلودگی شهری می‌تواند برای تحلیل سایر چالش‌های زیست‌محیطی مانند مدیریت پسماند، مصرف انرژی یا آلودگی صوتی نیز به کار رود. با شناسایی الگوهای مشترک میان مسائل گوناگون، فراگیران توانایی انتقال دانش، الگوسازی مفهومی و به‌کارگیری اصول تفکر محاسباتی در زمینه‌های جدید را کسب می‌کنند. این مرحله به تثبیت یادگیری عمیق، خلاقیت و حل مسئله در موقعیت‌های ناآشنا منجر می‌شود.

به‌کارگیری مراحل تفکر محاسباتی در حل مسئله، از انتزاع و تجزیه تا الگوریتم‌نویسی، اشکال‌زدایی، اتوماسیون و تعمیم، موجب می‌شود دانش‌آموزان با رویکردی ساخت‌یافته، تحلیلی و مبتنی بر منطق به حل مسائل پیچیده اقدام کنند. این روش علاوه بر افزایش توانایی حل مسئله، مهارت‌های تفکر سیستمی، تشخیص روابط علی، ساده‌سازی هوشمندانه و تحلیل داده را در آنان تقویت می‌کند. اجرای مدل‌ها و شبیه‌سازی آن‌ها سبب می‌شود فراگیران پیامدهای تصمیم‌های خود را به‌صورت عینی مشاهده کنند و از طریق اشکال‌زدایی، مهارت بازبینی انتقادی و تاب‌آوری شناختی را بیاموزند. همچنین اتوماسیون و تعمیم، قدرت انتقال یادگیری به موقعیت‌های جدید، خلاقیت و توانایی استفاده از فناوری برای تصمیم‌گیری مؤثر را افزایش می‌دهد. در مجموع، این رویکرد ذهنی فعال، علمی و آینده‌نگر را در دانش‌آموزان پرورش می‌دهد و آنان را برای مواجهه با مسائل واقعی زندگی و محیط پیرامون توانمند می‌سازد. نتیجه نهایی بکارگیری این روش تبدیل دانش به حکمت و ایجاد پلی از علوم نظری تحصیل شده به کاربرد است. در بخش آتی تأثیر این رویکرد ذهنی در حل مسئله و کاربست آن در زمینه‌های مختلف توسط ابن سینا که از مفاخر بی‌بدیل علمی در طول تاریخ است را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۵. تعالی تمام‌ساختی ابن سینا در سایه تفکر محاسباتی انسان‌محور

ابن سینا را می‌توان نمونه‌ای برجسته از افرادی دانست که در همه‌ی ابعاد و ساحت‌های تربیتی به مراتب عالی کمال انسانی دست یافته است؛ اندیشمندی که توانسته با به‌کارگیری عمیق و نظام‌مند تفکر محاسباتی انسان‌محور از طریق تحلیل زمینه‌مند، معنای‌دازی، استدلال منسجم و تصمیم‌گیری آگاهانه میان دانش، تجربه، اخلاق و عمل پیوندی هماهنگ برقرار کند و به الگویی تمام‌ساختی در تاریخ اندیشه بدل شود. هرچند این مفاهیم در روزگار او با اصطلاحات معاصر نام‌گذاری نشده بودند، اما در شیوه اندیشیدن، روش حل مسئله، سازمان‌دهی دانش و نگرش انسان‌شناختی او حضوری بنیادین داشتند. بررسی آثار ابن سینا،

الگوریتم (الگوسازی، ساحت‌های علمی- فناوریانه، اجتماعی- سیاسی و اقتصادی- حرفه‌ای)

بر پایه زیرمسئله‌های شناسایی شده، هر گروه یک «دستورالعمل گام به گام» برای کاهش یک منبع خاص آلودگی (مثلاً کاهش تعداد خودروهای شخصی) می‌نویسند. به عنوان مثال «اگر تعداد خودرو بیشتر از تعداد مشخصی باشد، تصمیم مقتضی با آن گرفته شود»؛ این قالب منجر به تولید روندنمای ذهنی می‌شود. در صورت لزوم روندنماهای ذهنی را می‌توان با برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزاری پیاده‌سازی کرد. در صورت دسترسی به ابزارهای هوشمند و برخط، الگوریتم‌ها اجرا شده، اثرات آن (مثلاً کاهش ۲۰٪ خودرو) بر شاخص کیفیت هوا بررسی و بازخورد آن به واحد تصمیم‌گیری منطقی جهت تصمیم‌گیری‌های جدید ارجاع داده می‌شود. با انجام این فرآیند، مدل‌های روابط بین متغیرها با یکدیگر و شاخص آلودگی به‌دست می‌آید. هر گروه متناسب با زیر مسئله تعریف شده، نتایج را جهت ارائه به کلاس آماده می‌کند. با جمع‌بندی نتایج و تعامل بین گروهی، ضمن بهبود مدل‌های ارائه شده، یک مدل کلی جهت تصمیم‌گیری‌های کلان به‌دست می‌آورند.

اشکال‌زدایی (بهبود عملکرد، ساحت‌های علمی- فناوریانه، اجتماعی- سیاسی و اقتصادی- حرفه‌ای)

در این مرحله، دانش‌آموزان به بررسی عملکرد الگوریتم‌ها و شبیه‌سازی‌های طراحی شده می‌پردازند تا خطاهای احتمالی یا نتایج غیرمنتظره را شناسایی و اصلاح کنند. برای مثال، ممکن است دریابند که کاهش تعداد خودروها در مدل آن‌ها، کمتر از مقدار پیش‌بینی شده بر کیفیت هوا اثر گذاشته است؛ یا ورودی داده‌های نادرست باعث بروز خطا در نتایج شده باشد. با تحلیل این خطاها، فراگیران می‌آموزند که تفکر انتقادی، بازبینی فرضیات و اصلاح مداوم مدل از مراحل ضروری در حل مسئله است. این فعالیت، عادت به دقت، بازخوردپذیری و بررسی منطقی روابط علی را در آنان تقویت می‌کند.

اتوماسیون (سرعت و دقت، ساحت‌های علمی- فناوریانه، زیستی- بدنی و اقتصادی- حرفه‌ای)

در این گام، هدف آن است که فرآیندهای طراحی شده از حالت دستی به حالت خودکار و سیستماتیک تبدیل شوند. دانش‌آموزان می‌توانند از ابزارهای دیجیتال ساده یا نرم‌افزارهای شبیه‌سازی برای اجرای خودکار الگوریتم‌های خود استفاده کنند؛ برای مثال، ساخت مدل‌هایی که به طور ساده رابطه بین متغیرهایی مانند تعداد خودرو یا سرعت باد را با شاخص آلودگی را محاسبه و نمایش دهند. این کار، درک آنان از چگونگی بهره‌گیری از فناوری برای بهبود تصمیم‌گیری و صرفه‌جویی در زمان را افزایش داده، به آن‌ها اجازه می‌دهد مفهوم «تفکر ماشینی» را در بستر واقعی تجربه کنند.

مبانی شناخت بشر را در چهار حوزه منطق، طبیعیات، ریاضیات و الهیات بررسی می‌کند و تصویری یکپارچه از جهان و نظام اندیشه ارائه می‌دهد. در قانون، همین نگاه نظام‌مند را به قلمرو پزشکی می‌برد و با ترکیب تجربه، مشاهده و استدلال دقیق، دانشی جامع درباره بدن و سلامت انسان ارائه می‌دهد. رساله سیاست نیز بازتاب دیدگاه تربیتی و اخلاقی اوست؛ جایی که تربیت را فرآیندی برای پرورش انسان خردمند، مسئول و بافضیلت می‌داند. مجموع این آثار نشان می‌دهد که ابن‌سینا توانسته میان فلسفه، علم و اخلاق پیوندی هماهنگ برقرار کند و نمونه‌ای از تربیت تمام‌ساختی و به‌کارگیری تفکر محاسباتی انسان‌محور باشد.



شکل ۴. تربیت تمام‌ساختی در سایه تفکر محاسباتی انسان‌محور ابن‌سینا.

میان ابعاد مختلف بدن، روان و محیط تحلیل می‌شود. این نوع استفاده از تجزیه نشان می‌دهد که تفکر محاسباتی در اندیشه ابن‌سینا عمیقاً با رویکرد تمام‌ساختی و انسان‌محوری پیوند خورده است.

تفکر الگوریتمی در ساختار آثار ابن‌سینا، علی‌الخصوص در شفا، گواهی روشن بر اندیشیدن مرحله‌ای و نظام‌مند اوست. چپش مباحث از منطق به طبیعیات، سپس به ریاضیات و در نهایت الهیات، خود نوعی الگوریتم کلان معرفتی را نشان می‌دهد که حرکت عقل از ابزار اندیشیدن تا فهم هستی را ترسیم می‌کند. در کتاب *قانون* نیز این تفکر الگوریتمی به صورت عملی بروز می‌یابد؛ جایی که تشخیص، تحلیل علل، انتخاب درمان و ارزیابی نتیجه، در توالی منطقی و منسجم قرار می‌گیرند. این تفکر الگوریتمی، نه مکانیکی، بلکه عقلانی و اخلاق‌مدار است و همواره در خدمت خیر و سلامت انسان قرار دارد.

اتوماسیون انسان‌محور در اندیشه ابن‌سینا را به ویژه در مباحث منطقی آثار و دستاوردهای وی می‌توان مشاهده کرد. تدوین قواعد منطق و قیاس، نوعی خودکارسازی عقلانی است که به ذهن انسان

به‌ویژه کتاب‌های «الشفا» و «رساله سیاست» در کنار «القانون فی الطب»، نشان می‌دهد که ذهن او نه حافظه‌محور و نقلی صرف بود و نه شهودگرایی رها از عقل، بلکه همچون یک نظام عقلانی هوشمند عمل می‌کرد [۳۹]؛ نظامی که به صورت منسجم به تحلیل، تجزیه، سامان‌دهی، حل مسئله و هدایت کنش انسانی می‌پرداخت. این ویژگی به روشنی با تعریف معاصر تفکر محاسباتی انسان‌محور هم‌خوانی دارد، جایی که به طور مشابه در اندیشه ابن‌سینا، عقلانیت همواره در پیوند با معنا، اخلاق و غایت انسانی قرار می‌گیرد. شفا، قانون و رساله سیاست هر کدام بخشی از نگاه گسترده و چندبعدی او را نشان می‌دهند. در شفا، ابن‌سینا با رویکردی عقلانی و منسجم،

انتزاع در تفکر محاسباتی انسان‌محور، نخستین مؤلفه برجسته در اندیشه ابن‌سینا است. در بخش‌های منطقی و فلسفی شفا، به ویژه در منطق و الهیات، او نشان می‌دهد که چگونه ذهن انسان می‌تواند از محسوسات و داده‌های جزئی به مفاهیم کلی، ماهیت و اصول بنیادین هر مفهوم و واقعیتی دست یابد. همین توان انتزاعی است که به ابن‌سینا امکان می‌دهد میان تجربه حسی، تحلیل عقلانی و معناهای کلی پیوند برقرار کند. در پزشکی نیز، انتزاع به او اجازه می‌دهد از مشاهده‌های بالینی، قوانین کلی سلامت و بیماری را استخراج کند. از نگاه ابن‌سینا، انتزاع صرفاً یک مهارت صوری نیست، بلکه حرکتی عقلانی در مسیر شناخت کمال نفس و تحقق انسان متعادل است.

تجزیه در اندیشه ابن‌سینا، نقشی اساسی در فهم انسان و جهان دارد. او در فلسفه نفس، قوای انسانی را به دقت از یکدیگر تفکیک می‌کند؛ اما این تفکیک هرگز به معنای گسست یا فروکاست نیست، بلکه مقدمه‌ای برای فهم وحدت وجودی انسان است. همین منطق تجزیه در پزشکی نیز توسط وی به کار می‌رود؛ جایی که بیماری نه به عنوان یک نقص ساده جسمانی، بلکه عامل برهم خوردن تعادل

شخصیت باشد. این کمال انسانی در کلاس درس، تنها زمانی محقق می‌شود که معلم خود، الگویی از تربیت متوازن باشد [۳۰-۳۷]؛ اگر معلمی مسیر تربیت تمام‌ساختی را نپیموده باشد، نمی‌تواند مربی تمام‌ساختی پرورش دهد. در ادامه برای تعریف نقش معلم در این چارچوب ارائه شده است [۳۲]. در رویکرد تربیت تمام‌ساختی، معلم راهبر رشد همه‌جانبه بوده، تفکر محاسباتی انسان‌محور را به ابزاری برای تعالی ابعاد وجودی انسان (عقلی، اخلاقی، زیستی، اجتماعی و هنری) تبدیل می‌کند. نقش معلم در این هم‌افزایی عبارتند از:

۶-۱. معماری محیط یادگیری برای رشد چندبعدی

معلم محیطی طراحی می‌کند که در آن تفکر محاسباتی تنها ابزاری برای کنونیسی یا حل مسائل ریاضی نیست، بلکه وسیله‌ای برای نظم‌بخشی به ذهن در مواجهه با چالش‌های اخلاقی و اجتماعی است. او با طرح پروژه‌هایی که جنبه‌های مختلف زندگی (مثلاً مسئولیت‌های مدنی یا مراقبت از سلامت) را در بر می‌گیرد، دانش‌آموز را تشویق می‌کند تا برای بهبود وضعیت خود و جامعه، از استدلال الگوریتمیک استفاده کند و بدین‌سان، ساخت عقلی و اجتماعی را در خود تعالی بخشد.

۶-۲. انتزاع مفاهیم اخلاقی و ارتقای ساخت شناختی

معلم با به‌کارگیری مهارت انتزاع، به دانش‌آموز می‌آموزد که چگونه از بین متغیرهای فراوان مسائل پیچیده به اصول بنیادین و ارزشی برسد. در این مسیر، معلم به دانش‌آموز کمک می‌کند تا مدل‌های ذهنی خود را بر پایه فضایل انسانی (مانند عدالت و انصاف) بنا کند. این یعنی معلم ساخت اخلاقی را با استفاده از ابزارهای شناختی، ساختارمند می‌کند.

۶-۳. انسان‌محوری به مثابه‌ی قطب‌نمای تربیتی

معلم همواره بر جنبه انسان‌محوری در حل مسائل تأکید دارد؛ یعنی به دانش‌آموز می‌آموزد که هر الگوریتم یا راه‌حلی که ارائه می‌شود، در نهایت حاصل تفکر خود اوست. معلم در اینجا نقش ناظر ارزش‌ها را ایفا می‌کند تا دانش‌آموز بیاموزد که تفکر منطقی باید در خدمت کرامت انسانی باشد. این رویکرد، ساخت «اعتقادی و عبادی» را نیز با نگاه مسئولیت‌پذیری در قبال هستی و مخلوقات پیوند می‌دهد.

۶-۴. الگوی عقلانیت منطقی

معلم باید نمونه‌ای از یک انسان تمام‌ساختی باشد. او با نشان دادن نحوه به‌کارگیری تفکر نظام‌مند در حل مسائل روزمره (سیاست، مدیریت زمان، تصمیم‌گیری‌های حساس)، به دانش‌آموز می‌آموزد که عقلانیت حاصل از منطق در خدمت شکوفایی استعدادها و رسیدن به زندگی متعالی است.

کمک می‌کند بدون گرفتارشدن در خطاهای تکراری، مسیر صحیح استدلال را طی کند. هدف این‌سینا از این نظام‌مندی، جایگزینی عقل انسانی نیست، بلکه آزادسازی ظرفیت عقل برای پرداختن به سطوح بالاتر فهم، دآوری و حکمت است. به این معنا، اتوماسیون در اندیشه او ابزاری در خدمت رشد عقلانی و اخلاقی انسان به شمار می‌آید.

اشکال‌زدایی یا اصلاح خطا نیز یکی از ویژگی‌های برجسته روش‌شناسی ابن‌سینا است که در شفا به خوبی نمایان است. او در این اثر، آراء فیلسوفان پیشین، به‌ویژه ارسطو، را با دقت بررسی می‌کند و هر جا که ناسازگاری مفهومی یا تعارض با تجربه و عقل می‌یابد، به نقد و بازسازی آن‌ها می‌پردازد. این رویکرد نشان می‌دهد که از نگاه ابن‌سینا، معرفت امری ایستا و مصون از خطا نیست، بلکه فرایندی پویا و اصلاح‌پذیر است. چنین نگرشی با هسته تفکر محاسباتی انسان‌محور، که بر یادگیری از خطا تأکید دارد، کاملاً هم‌سو است.

تعمیم در اندیشه ابن‌سینا، به‌ویژه در پیوند میان شفا و قانون، نقشی کلیدی دارد. او مفاهیم فلسفی را به حوزه پزشکی، اخلاق و تربیت انسانی تعمیم می‌دهد و در مقابل، یافته‌های تجربی را به نظریه‌های کلی فلسفی پیوند می‌زند. همین توان تعمیم است که اندیشه او را از تخصص‌گرایی محدود فراتر می‌برد و به یک نظام معرفتی یکپارچه و تمام‌ساختی تبدیل می‌کند.

از منظر تربیت تمام‌ساختی، ابن‌سینا در آثارش تصویری جامع از انسان ارائه می‌دهد؛ انسانی که دارای ابعاد اعتقادی، اخلاقی، زیستی، اجتماعی، علمی و زیبایی‌شناختی است. غایت این تربیت، صرفاً دانستن نیست، بلکه رسیدن به سعادت، تعادل و فعلیت یافتن همه استعدادهای انسانی است. پزشکی در خدمت سلامت و کرامت انسان قرار می‌گیرد، فلسفه در خدمت تهذیب عقل و نفس و علم در خدمت نظم بخشی به زندگی فردی و اجتماعی.

به طور کلی می‌توان گفت که تفکر محاسباتی انسان‌محور در اندیشه ابن‌سینا، ابزار سامان‌دهی اندیشه و حل مسئله را فراهم می‌کند و تربیت تمام‌ساختی جهت، معنا و غایت این ابزار را تعیین می‌سازد. نتیجه این پیوند، انسانی است که عقلانیت دقیق او از اخلاق و معنا جدا نمی‌شود و محاسبه در اندیشه‌اش همواره در خدمت رشد، حکمت و کمال انسانی قرار دارد. به همین دلیل، ابن‌سینا نه‌تنها یک متفکر تاریخی، بلکه الگویی زنده و الهام‌بخش برای بازاندیشی معاصر در پیوند میان تفکر محاسباتی انسان‌محور و تربیت تمام‌ساختی به‌شمار می‌آید.

۶. نقش معلم در تحقق تربیت تمام‌ساختی

پیوند میان تربیت تمام‌ساختی و تفکر محاسباتی انسان‌محور، نیازمند معلمی است که نه یک مدرس فنی، بلکه معمار جامع

۵-۶. ارزیابی فرآیندی در جهت کمال انسانی

معلم در ارزیابی خود، صرفاً به خروجی فنی اکتفا نمی‌کند. او رشد دانش‌آموز را در ساحت‌های مختلف و در جریان حل مسئله می‌سنجد. این نگاه، معلم را از یک داور نمرات، به یک مربی تراز انسانی تبدیل می‌کند.

به طور کلی در این دیدگاه، معلم از طریق تفکر محاسباتی انسان‌محور، ذهن دانش‌آموز را برای درک عمیق و منطقی از جهان آماده می‌کند و در عین حال، با جهت‌دهی تربیتی، او را به انسانی تمام‌ساختی تبدیل می‌کند که می‌تواند با ابزارهای دقیق اندیشه، زیستی متعالی و سرشار از فضیلت داشته باشد. اینجاست که نقش کلیدی معلمان در تربیت چند بعدی افراد و ایجاد پیوند میان آموزش و پرورش بیش از پیش به چشم می‌آید.

حال که نقش معلم در تربیت تمام‌ساختی تبیین شد به بررسی جایگاه و نقش هوش مصنوعی در تربیت تمام‌ساختی می‌پردازیم.

۷. نقش هوش مصنوعی در تربیت تمام‌ساختی

امروزه فناوری‌های نوین و هوش مصنوعی در بهره‌وری آموزش و پرورش نقش گسترده‌ای دارند [۳۲، ۳۳، ۳۴]. در سال‌های اخیر، فناوری اطلاعات و ارتباطات، رویکردهای یادگیری را دچار تغییر و تحول اساسی کرده است [۳۷]. هوش مصنوعی با توانایی خود در پردازش داده‌های کلان، شخصی‌سازی و خودکارسازی، می‌تواند به معلم در طراحی آموزشی برای تحقق تربیت تمام‌ساختی کمک شایانی کند. هوش مصنوعی یک دستیار هوشمند و توانمندساز است که نمی‌تواند جایگزین معلم باشد [۳۵]. در ادامه نقش تسهیل‌گری هوش مصنوعی در هر مرحله از طراحی آموزشی مشخص شده است.

۱-۷. تحلیل و تشخیص نیازهای فردی دانش‌آموزان

هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های آموزشی مانند عملکرد در تکالیف، آزمون‌ها و تعاملات دیجیتال، امکان شناسایی الگوهای یادگیری و نیازهای خاص هر دانش‌آموز را فراهم می‌کند. این فناوری با ارائه بازخورد شخصی‌سازی شده، پیشنهاد محتوای آموزشی تطبیقی و طراحی برنامه‌های درسی منعطف، به معلمان در ایجاد مداخلات هدفمند از طرق زیر کمک می‌کند.

• **تشخیص سبک یادگیری:** سیستم‌های هوش مصنوعی با تحلیل نحوه تعامل دانش‌آموزان با محتوا (آیا با ویدیو بهتر یاد می‌گیرند یا با متن و تمرین تعاملی) می‌توانند سبک یادگیری غالب آن‌ها را شناسایی و به معلم گزارش دهند.

• **شناسایی نقاط قوت و ضعف:** هوش مصنوعی با بررسی عملکرد دانش‌آموزان در ارزیابی‌های مختلف، به طور دقیق نقاط ضعف و

قوت دانش‌آموزان را مشخص می‌کند. این تحلیل می‌تواند، شامل حوزه‌های غیردرسی مانند مهارت‌های همکاری در پروژه‌های گروهی (ساحت اجتماعی) یا پشتکار (ساحت اخلاقی) باشد.

• **پایش سلامت روان و عواطف:** ابزارهای تحلیل احساسات می‌توانند با بررسی نوشته‌های دانش‌آموزان یا گفت‌وگوهای کلاسی، نشانه‌های استرس، اضطراب یا بی‌انگیزگی را شناسایی و به معلم هشدار دهند تا مداخله کند. این امر با ساحت تربیت زیستی و بدنی و ساحت اخلاقی مرتبط است [۲۲].

این رویکرد داده‌محور، آموزش را به سمت عدالت آموزشی و بهینه‌سازی تجربه یادگیری فردی سوق می‌دهد.

۲-۷. طراحی و تولید محتوای آموزشی تلفیقی و شخصی شده

ابزارهای هوشمند به ویژه هوش مصنوعی پتانسل بسیار مناسبی برای طراحی و تولید محتوای آموزشی را به وجود آورده‌اند. این ابزار با ایجاد محیط‌های یادگیری مدرن و جذاب، همچنین قابلیت‌های سمعی و بصری پیشرفته، مسیر رسیدن به اهداف آموزشی و تربیتی را از راه‌های زیر تسهیل می‌کنند.

• **تولید محتوای شخصی شده:** هوش مصنوعی می‌تواند محتوای درسی را به گونه‌ای تولید یا تنظیم مجدد کند که با سطح و علایق هر دانش‌آموز سازگار باشد. این امر به معلمان اجازه می‌دهد تا به جای ارائه یک روش آموزشی یکسان برای همه، بر ارائه حمایت فردی و راهنمایی متمرکز شوند.

• **خلق محتوای چندرسانه‌ای برای ساحت‌های مختلف:** معلم می‌تواند از ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی برای خلق سریع محتوای متنوع استفاده کند. مثلاً در ساحت هنری تولید تصاویر، موسیقی یا طرح‌های هنری بر اساس متن برای الهام بخشی به دانش‌آموزان، در ساحت اجتماعی ساخت سناریوهای شبیه‌سازی شده برای تمرین مهارت‌های گفتگو، حل تعارض و تصمیم‌گیری اخلاقی و در ساحت بدنی طراحی برنامه‌های ورزشی و تغذیه‌ای شخصی‌شده را نام برد.

۳-۷. تسهیل و اجرای یادگیری در کلاس و خارج از آن

• **دستیاران هوشمند چت‌باتی:** چت بات‌های هوشمند می‌توانند به سؤالات دانش‌آموزان در هر ساعت از شبانه‌روز پاسخ دهند و به آنان در حل تمرینات کمک کنند. این امر بار کاری معلم را کاهش می‌دهد و امکان پشتیبانی مستمر را فراهم می‌کند.

• **شبیه‌سازهای هوشمند:** برای دروس آزمایشگاهی و دروس نیازمند به تمرین عملی، هوش مصنوعی می‌تواند محیط‌های واقعیت مجازی^۱ ایجاد کند که دانش‌آموزان به صورت امن و با هزینه کم بتوانند آزمایش‌های پیچیده را بارها تکرار کنند [۳۱].

۷-۴. ارزشیابی همه جانبه و ارائه بازخورد فوری

• **ارزشیابی فرایندمحور:** برخلاف ارزشیابی سنتی که فقط نتیجه نهایی را می‌سنجد، هوش مصنوعی می‌تواند کل فرآیند یادگیری را رصد کند. مثلاً تلاش، پشتکار، خلاقیت در حل مسئله و نحوه همکاری در پروژه گروهی را تحلیل کند.

• **بازخورد فوری و سازنده:** سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند بلافاصله پس از انجام تمرین، بازخوردی دقیق و شخصی شده ارائه دهند. این بازخورد می‌تواند شامل توضیح اشتباه، پیشنهاد منابع برای مطالعه بیشتر و تشویق برای تلاش باشد. این امر به رشد مستمر دانش‌آموزان (یادگیری مادام‌العمر) کمک می‌کند.

• **ارزشیابی مهارت‌های نرم:** هوش مصنوعی می‌تواند با تحلیل داده‌ها، پیشرفت دانش‌آموزان را در مهارت‌هایی مثل رهبری، کار تیمی و تفکر انتقادی ارزیابی کند.

۸. راهکارهای تحقق تربیت تمام ساحتی

در مسیر تحقق تربیت تمام‌ساحتی، نظام آموزشی با مجموعه‌ای از فرصت‌های منحصر به فرد روبرو است که با نگاهی نوآورانه و راهبردی، می‌توانند به پیشران‌های اصلی این رویکرد تبدیل شوند [۲۶]. برخی این فرصت‌ها عبارتند از:

۸-۱. فرصت‌های ساختاری و سیاست‌گذاری برای یادگیری عمیق

• **توسعه یادگیری فعال و مهارت‌محور:** با وجود تأکید بر مطالب کتب درسی و آزمون‌های استاندارد، بازنگری در رویکردهای آموزشی می‌تواند به گونه‌ای باشد که خروجی اهداف آموزشی و انتظارات از سطح محفوظات فراتر رفته، بر کسب مهارت‌های عملی، تفکر انتقادی و خلاقیت تمرکز شود. این امر می‌تواند با طراحی ماژول‌های آموزشی منعطف و پروژه‌محور محقق گردد.

• **بهینه‌سازی فضای یادگیری:** تراکم بالای کلاس‌ها، تلنگری برای خلاقیت در استفاده از فضاهای آموزشی جایگزین، یادگیری مشارکتی در گروه‌های کوچک‌تر و بهره‌گیری از ظرفیت‌های همیاری دانش‌آموزان برای یادگیری است. این شرایط، معلم را به سمت نقش تسهیل‌گر و مدیر یادگیری هدایت کرده، دانش‌آموزان را در فرآیند یادگیری، فعال‌تر و محیط کلاسی را به آزمایشگاه پویای یادگیری تبدیل می‌کند.

• **طراحی برنامه‌های غنی و منعطف:** فشرده بودن برنامه درسی، انگیزه را برای یافتن راه‌های میان‌بر و ادغام فعالیت‌های فوق برنامه مانند بازدیدهای علمی و پروژه‌های گروهی در دل دروس اصلی ایجاد می‌کند، تا بدین ترتیب، فرصت‌های یادگیری تجربی افزایش یابد.

۸-۲. فرصت‌های ناشی از ارتقاء زیرساخت‌ها و منابع

• **پیشبرد سواد دیجیتال و فناوریانه:** ضعف زیرساخت‌های فناوری اگرچه مانعی بزرگ بر سر راه تربیت تمام ساحتی است اما می‌تواند انگیزه‌ای برای جذب سرمایه‌گذاری و مشارکت در توسعه دسترسی به اینترنت پرسرعت، تجهیز مدارس به فناوری‌های نوین، و بهره‌گیری از نرم‌افزارهای آموزشی خلاقانه باشد. این امر نه تنها شکاف دیجیتال را کاهش می‌دهد، بلکه مهارت‌های فناوریانه مورد نیاز آینده را در دانش‌آموزان تقویت می‌کند.

• **خلاقیت در تأمین و تخصیص منابع:** مدیریت هوشمند و بهینه منابع و بودجه، معلمان و مدارس را به سمت استفاده خلاقانه از منابع موجود، جلب مشارکت والدین و جامعه و بهره‌گیری از منابع در دسترس برای فعالیت‌های عملی، هنری و ورزشی سوق می‌دهد.

۸-۳. فرصت‌های ارتقاء توانمندی و آمادگی حرفه‌ای معلمان

• **طراحی برنامه‌های یادگیری حرفه‌ای مستمر و کاربردی:** بازنگری در دوره‌های تربیت معلم و ضمن خدمت و ارتقاء سطح دانش معلمان ابزاری است تا مهارت‌های کلیدی مانند طراحی آموزشی تلفیقی، استفاده مؤثر از فناوری‌های نوین، روانشناسی رشد و روش‌های ارزشیابی کیفی به صورت عملی و کارگاه‌محور آموزش داده شوند.

• **ترویج فرهنگ نوآوری و تسهیل‌گری:** فضایی حمایتی و تشویقی که در آن معلمان نوآور تشویق شده، تجربیات موفق خود را به اشتراک بگذارند و با اطمینان خاطر، نقش مربی و تسهیل‌گر را در فرایند یاددهی-یادگیری ایفا کنند، می‌تواند نسلی از دانش‌آموزان، معلمان و مدیران خلاق، متخصص و متعهد را پرورش دهد.

• **مدیریت بهینه بار کاری:** با درک فشار کاری معلمان، می‌توان با ابزارهای نوین مدیریتی، همکاری تیمی و استفاده از فناوری برای خودکارسازی برخی فرآیندها، بار کاری را به شکلی بهینه مدیریت کرد تا منابع بیشتری برای تمرکز بر تربیت تمام‌ساحتی مهیا شود.

۸-۴. فرصت‌های فرهنگی و نگرشی برای درک عمیق‌تر تربیت

• **تغییر نگرش جامعه و خانواده به سوی تربیت جامع:** مدیریت فشار روانی خانواده‌ها و جامعه در رابطه با نتایج تحصیلی، فرصتی برای فرهنگ‌سازی و تبیین اهمیت تربیت ساحت‌های مختلف وجودی انسان به وجود می‌آورد. این رویکرد با نشان دادن نتایج ملموس و بلندمدت تربیت تمام‌ساحتی بر موفقیت و شادکامی دانش‌آموزان، به سلامت روحی و روانی جامعه کمک شایانی می‌کند.

• **ایجاد ثبات و پایداری در سیاست‌های آموزشی:** ثبات در

داشت و عمیقاً به سوی الهیات معطوف بود [۴]، در ایران و جهان اسلام نگاهی جامع‌تر به تربیت در حال شکل‌گیری بود [۵،۶]. در این دوران، اندیشمندانی چون ابن‌سینا در آثاری نظیر *رساله سیاست*، بر ضرورت هماهنگی در رشد جسمی، عقلی و اخلاقی کودک تأکید ورزیدند [۳۹]. هم‌زمان با تأسیس نهادهایی چون نظامیه‌ها و مدارس دینی، مجموعه‌ای فراگیر از علوم فقهی، کلامی، فلسفی، ریاضیات و طب به فراگیران آموزش داده می‌شد که غایت نهایی آن، پرورش جامع فرد در افق دینی و اخلاقی بود [۵،۶].

با آغاز دوران مدرن و دگرگونی‌های پس از رنسانس، کانون توجه آموزش در اروپا به تدریج به سوی علوم تجربی چرخید و اندیشمندانی نظیر جان لاک^۲ و ژان-ژاک روسو^۳ با طرح مفهوم «تربیت طبیعی»، مسیر جدیدی را در تربیت همه‌جانبه‌گشودند که یادگیرنده را در مرکز توجه قرار می‌داد.

در قرن بیستم، این سیر تحولی با تکیه بر رویکردهای انسان‌گرایانه شکلی علمی‌تر و منسجم‌تر به خود گرفت. جان دیوی^۴ بر لزوم توازن میان تربیت بدنی، روحی و فکری تأکید کرد و ماریا مونتسوری^۵ با ابداع روش‌های کودک‌محور، در کنار متفکرانی چون کارل راجرز^۶، آبراهام مزلو^۷ و جان میلر^۸، رویکرد آموزش تمام‌ساختی را با محوریت خودشکوفایی تعمیق بخشیدند. در همین دوران در ایران، با تأسیس نهادهایی چون دارالفنون و گسترش مدارس جدید، آموزش رسمی از سنت مکتب‌خانه‌ای فاصله گرفت و بیشتر به سوی انتقال علوم مدرن و مهارت‌های فنی سوق یافت؛ تحولی که پیامد ناخواسته آن، کم‌رنگ‌تر شدن جنبه‌های اخلاقی و معنوی در برنامه درسی رسمی بود.

در دوران معاصر، جبران این خلأ و بازگشت به رویکرد کل‌نگر به یک ضرورت آموزشی در سطح جهان تبدیل شده است. در نظام آموزشی ایران، تدوین و ابلاغ «سند تحول بنیادین آموزش و پرورش» در سال ۱۳۹۰، نقطه عطفی بود که چارچوبی راهبردی برای پرورش متوازن دانش‌آموزان در شش ساحت اعتقادی-عبادی، اخلاقی، علمی-فناورانه، حرفه‌ای-اقتصادی، هنری-زیباشناختی، اجتماعی-سیاسی و زیستی-بدنی ارائه کرد. این رویکرد همسو با دغدغه مشترک سیاست‌گذاران آموزشی در کشورهای پیشرو است که در پی پرورش ابعاد چندگانه یادگیرندگان هستند. در نهایت و در چشم‌انداز آینده، ادغام فناوری و نوآوری‌های برخاسته از انقلاب دیجیتال، در صورت تلفیق با تفکر محاسباتی انسان‌محور، دیگر یک چالش ابزاری نیست، بلکه فرصت و توانمندساز بی‌نظیری است که می‌تواند برای ارتقا، شخصی‌سازی و تحقق عینی تربیت تمام‌ساختی به کار گرفته شود.

سیاست‌های کلان، انگیزه و فرصتی برای تدوین برنامه‌های اجرایی بلندمدت و پایدار فراهم می‌آورد که با مشارکت فعال معلمان و کارشناسان، ضمانت اجرایی بالاتری داشته باشند و اطمینان بلندمدت را برای سرمایه‌گذاری بر روی تغییرات تربیتی ایجاد کنند.

۸-۵. فرصت‌های پیشگامانه در فناوری و اخلاق کاهش شکاف دیجیتال از طریق سیاست‌گذاری هوشمند

دسترسی برابر به فناوری، فرصتی برای طراحی سیاست‌های حمایتی جهت فراهم آوردن بهره‌مندی عادلانه به ابزارهای هوشمند و اینترنت برای همه دانش‌آموزان است. این امر می‌تواند با اولویت‌دهی به مدارس مناطق کمتر برخوردار و ارائه یارانه‌های هوشمند محقق شود.

• **نهادینه‌سازی اخلاق حرفه‌ای در عصر دیجیتال:** تدوین چارچوب‌های اخلاقی شفاف، آموزش سواد دیجیتال و اخلاقی به معلمان و دانش‌آموزان و ایجاد سازوکارهای نظارتی قوی برای استفاده مسئولانه از داده‌ها و هوش مصنوعی در محیط آموزشی از جمله عوامل مؤثر در رفع نگرانی‌های اخلاقی و حریم خصوصی در استفاده از فناوری می‌باشند.

۹. تاریخچه تربیت تمام‌ساختی

هرچند «تربیت تمام‌ساختی» در ادبیات معاصر اصطلاحی نوین به شمار می‌رود، اما ریشه‌های این کل‌گرایی تربیتی را می‌توان به‌صورت پیوسته در امتداد تاریخ اندیشه بشر پی گرفت. از منظر تاریخی، سنت‌های شرقی و به‌ویژه دیدگاه‌های تربیتی ایران باستان بر اندیشه‌های کلاسیک غربی مقدم‌اند؛ چنان‌که در سنت زرتشتی، سه‌گانه طلایی «پندار نیک، گفتار نیک، کردار نیک» تبلور روشنی از یک کل‌گرایی اخلاقی-عملی است که بر پرورش هم‌زمان ابعاد شناختی، بیانی و رفتاری انسان دلالت دارد [۲،۳]. در این سنت، هسته اولیه تربیتی بشر شکل گرفته، سعادت فرد با مسئولیت اخلاقی وی گره خورده است. قرن‌ها بعد و در امتداد همین نگاه جامع، در یونان باستان مفهوم «پایدیا»^۱ با هدف تربیت انسان فاضل و متوازن در ابعاد اخلاقی، عقلانی و اجتماعی پایه گذاشته شد. متفکرانی چون سقراط، افلاطون و ارسطو، غایت تربیت را نیل به فضیلت اخلاقی و عقل عملی دانسته و برای تحقق آن، بر تلفیق هماهنگ آموزش موسیقی، ژیمناستیک، بلاغت و فلسفه تأکید می‌ورزیدند [۱].

با ورود به قرون میانه، مسیر تربیت در شرق و غرب تفاوت‌هایی یافت؛ در حالی که آموزش در اروپا غالباً تحت سلطه کلیسا قرار

1. Paideia
2. John Locke
3. Jean-Jacques Rousseau
4. John Dewey

5. Maria Montessori
6. Carl Rogers
7. Abraham Maslow
8. John Miller

۱۰. بحث و نتیجه گیری

تربیت تمام‌ساحتی در دهه‌های اخیر، رویکردی نوین در نظام‌های آموزشی و تربیتی معرفی شده است؛ رویکردی که هدف آن، پرورش انسان‌هایی چندبعدی، مسئولیت‌پذیر، خلاق و دارای عاملیت برای نقش‌آفرینی در جهان پیچیده معاصر است. در این راستا، پژوهش حاضر با معرفی تفکر محاسباتی انسان‌محور در نقش هسته مرکزی و محرک این تحول، گامی روبه‌جلو در آموزش افراد به صورت تمام‌ساحتی برداشته است. برخلاف رویکردهای تقلیل‌گرایانه سنتی که تفکر محاسباتی را صرفاً مهارتی فنی و ابزاری الگوریتمی می‌پندارند، ما آن را به‌مثابه «معلم درونی» و «ماشین هوشمند معناپرداز» بازتعریف کرده‌ایم [۴۲-۴۴]. این سازوکار شناختی نوین، نه تنها در ساحت علمی-فناورانه، بلکه در تمامی ابعاد وجودی انسان از استدلال‌های اخلاقی گرفته تا خلق هنری و تعاملات پیچیده اجتماعی، نقشی محوری ایفا می‌کند.

برای درک چگونگی انجام این فرآیند، باید به تغییر کارکرد مؤلفه‌های شناختی این نوع تفکر توجه کرد. دستورالعملی این رویکرد، فراهم‌سازی بستر تحقق تربیت تمام‌ساحتی با اتکا به ظرفیت‌های پردازش ذهنی یادگیرندگان است. در این الگو نشان داده شد که مؤلفه‌های شش‌گانه تفکر محاسباتی (انتزاع، تجزیه، الگوریتم، اتوماسیون، اشکال‌زدایی و تعمیم)، با گذر از کارکردهای مکانیکی و محاسباتی صرف، به ابزارهایی راهبردی برای معناسازی، تصمیم‌گیری اخلاقی و خلاقیت مسئولانه بدل می‌شوند. بدین ترتیب، این الگو دیگر به حل مسائل بسته ریاضی محدود نیست؛ بلکه چارچوبی برای پردازش معضلات پیچیده اخلاقی، مدیریت بحران‌های اجتماعی و حتی تعمیق ادراک معنوی ارائه می‌دهد. به کارگیری این تفکر، فرایند یادگیری را از بازتولید منفعلانه اطلاعات به کنشگری خلاق سوق داده و دانش‌آموز را از موقعیت «مصرف‌کننده داده» به جایگاه «معمار دانش» ارتقا می‌بخشد.

این ارتقای شناختی، به‌ویژه در مواجهه با بحران‌های اخلاقی و وجودی عصر دیجیتال، اهمیتی دوچندان و حیاتی می‌یابد. جوامع معاصر، به‌رغم برخورداری از توانمندی‌های بی‌سابقه فناوری، در برابر پیچیدگی‌ها و معضلات برآمده از همان فناوری‌ها به‌شدت آسیب‌پذیر نشان داده‌اند. تفکر محاسباتی انسان‌محور، با تربیت نسلی که ضمن درک الگوریتمیک از پدیده‌ها، آن را با ارزش‌های اصیل انسانی پیوند می‌زند، پاسخی بنیادین به این چالش است. این رویکرد نحوه مهار «قدرت محاسباتی» در چارچوب «حکمت انسانی» را مدون می‌سازد [۴۲]. در همین راستا، تحلیل تاریخی نظام فکری ابن‌سینا در این پژوهش، گواهی روشن بر این مدعاست که تلاقی تفکر نظام‌مند با بصیرت معنوی و اخلاقی، به تولید دانشی پایدار و تعالی‌بخش منجر می‌گردد.

پیاده‌سازی چنین الگوی پیشرویی، مستلزم بازتعریف نقش

کارگزاران آموزشی، در بستر فناوری‌های نوپدید است. اولین و مهم‌ترین نکته در عصر هوش مصنوعی این است که، معلم نه تنها جایگزین‌پذیر نیست، بلکه در جایگاه «معمار اکوسیستم یادگیری چندبعدی» قرار می‌گیرد. معلم با ایفای نقش منتزع‌کننده مفاهیم، پیچیدگی‌های مسائل را به چالش‌های قابل‌تحلیل تبدیل کرده و به‌عنوان الگوی زنده عقلانیت، تفکر مسئولانه را نهادینه می‌سازد. از این‌رو، تحول ساختاری در برنامه‌های تربیت معلم برای آموزش نحوه زمینه‌مندسازی این مؤلفه‌های محاسباتی در ساحت‌های گوناگون تربیتی، یک الزام قطعی است.

در این معماری نوین آموزشی، رابطه انسان و ماشین نیز از اساس بازتعریف می‌شود. برخلاف جبرگرایی فناورانه که مبتنی بر حذف تدریجی نقش انسان است، این پژوهش تبیین نمود که هوش مصنوعی در سایه تفکر محاسباتی انسان‌محور، توانمندساز و ابزاری تسهیل‌گر است. هوش مصنوعی قادر است در تحلیل کلان‌داده‌های آموزشی، شبیه‌سازی‌های پیچیده و ارزشیابی‌های تکوینی ایفای نقش کند؛ اما حوزه‌های بنیادینی نظیر تفسیر بافتار، قضاوت اخلاقی و راهبری عاطفی، منحصراً در دامنه عاملیت معلم انسانی باقی می‌ماند. این تقسیم کار بهینه، معلم را از کارهای فرسایشی رها ساخته و تمرکز او را به مربیگری عمیق انسانی معطوف می‌دارد.

با این وجود، گذار از مبانی نظری به ساحت عمل، با موانع ساختاری متعددی روبه‌روست که نیازمند اتخاذ رویکردی هوشمندانه است. در الگوی پیشنهادی ما، چالش‌ها به فرصت‌های نوآوری تبدیل شده‌اند: فشرده‌گی برنامه درسی به کاتالیزوری برای طراحی یادگیری پروژه‌محور؛ تراکم کلاس‌ها به انگیزه‌ای برای استقرار الگوهای یادگیری ترکیبی؛ و ضعف زیرساخت‌ها به محرکی برای توسعه خلاقانه سواد دیجیتال بدل می‌گردد. این راهبرد اثبات می‌کند که شرط اساسی تحقق تربیت تمام‌ساحتی، دگردیسی در نگرش کلان است: گذر از رویکرد انتقال محتوا به رویکرد پرورش ظرفیت‌های جامع شناختی و رفتاری.

برآیند این مباحث نشان می‌دهد که تحقق این زیست‌بوم نوین، در گرو هم‌افزایی بنیادین است. ارائه جداول کاربردی در این پژوهش روشن ساخت که تفکر محاسباتی انسان‌محور، راهبردی کاملاً عمل‌گرایانه است. با این حال، استقرار آن نیازمند بازطراحی منعطف برنامه‌های درسی ملی، تحول در رویکردهای دانشگاهی تربیت معلم، و تغییر نگرش فرهنگی خانواده‌ها نسبت به شاخص‌های موفقیت است. این بازاندیشی بنیادین، نویدبخش پرورش نسلی است که ظرفیت‌های محاسباتی را با خردگرایی، مهارت‌های فنی را با مسئولیت‌پذیری اخلاقی، و نوآوری را با عدالت اجتماعی در هم می‌آمیزد؛ چشم‌اندازی که شرط بقا و بالندگی جوامع در قرن بیست‌ویکم محسوب می‌شود.

یابیه استفاده از فناوری‌ها و ابزارهای هوش مصنوعی مولد

در جریان آماده‌سازی این مقاله، نویسندگان از GPT Image 1/5 صرفاً جهت طراحی بصری و تولید عناصر گرافیکی شکل‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ استفاده کرده‌اند. تمامی پرامپت‌ها (دستورهای ورودی)، ایده‌های مفهومی، برجسب‌های متنی و محتوای درون شکل‌ها تماماً توسط نویسندگان تدوین، تنظیم و اعتبارسنجی شده است. نویسندگان خروجی‌های تصویری را به‌دقت بازبینی کرده و مسئولیت کامل صحت و اصالت اشکال نهایی را بر عهده دارند.

منابع

1. Lee, T.Y. (2001). *Education in Greek and Roman Antiquity*. Brill Academic Publishers. Leiden.
2. Rose, J. (2011). *Zoroastrianism: An Introduction*. I.B. Tauris. London.
3. Skjærvø, P. O. (2005). *Introduction to Zoroastrianism*. Harvard University. Cambridge.
4. Knowles, D. (1963). *The evolution of medieval thought*. Philosophical Studies, 12, pp. 271-275.
5. Nasr, S. H., & Leaman, O. (1996). *History of Islamic Philosophy*. Routledge. London/New York.
6. Anggraini, R. D., & Kawakib., A. N. (2025). *Islamic Education at the Nizhamiyah Madrasah During the Abbasid Era: Models of Financing, Curriculum Design, and Pedagogical Priorities*. Jurnal Studi Islam, 2(1): 49-62.
7. Miller, J. P. (2007). *The Holistic Curriculum* (2nd ed.). University of Toronto Press. Toronto.
8. Forbes, S. H. (2003). *Holistic Education: An Analysis of Its Ideas and Nature*. Solomon Press/ Foundation for Educational Renewal. Brandon.
9. Wing, J. M. (2006). *Computational thinking*. Communications of the ACM, 49(3), pp. 33-35.
10. Brennan, K., & Resnick, M. (2012). *New frameworks for studying and assessing the development of computational thinking*. In Proceedings of the 2012 annual meeting of the American Educational Research Association, Vancouver, Canada, (1), p. 25.
11. *Rethinking Education: Towards a global common good?*. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2015).
12. Grover, S., & Pea, R. (2013). *Computational thinking in K-12: A review of the state of the field*. Educational Researcher, 42(1), pp. 38-43.
13. Kafai, Y. B., & Burke, Q. (2015). *Connected code: Why children need to learn programming*. MIT Press. Cambridge.
14. Darling-Hammond, L. (2017). *Empowered educators: How high-performing systems shape teaching quality around the world*. John Wiley & Sons. Hoboken.
15. Zohar, A. (2016). *Teaching thinking*. In D. Wyse, L. Hayward, & J. Pandya (Eds.), *The SAGE handbook of curriculum, pedagogy and assessment*, pp. 529-543. SAGE Publications.
16. Noddings, N. (2013). *Caring: A relational approach to ethics and moral education* (2nd ed., updated). University of California Press. Berkeley.
17. Luckin, R. (2018). *Machine learning and human intelligence: The future of education for the 21st century*. UCL Institute of Education Press. London.
18. Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning*. Center for Curriculum Redesign. Boston.
19. Fullan, M. (2007). *The new meaning of educational change* (4th ed.). Teachers College Press. New York.
20. Muhammad, M. B., & Rondo, M. R. (2025). Analysis of the Appropriateness of Human Resource Management and Infrastructure: Synergy and Efficiency in School Institution Development. In Proceeding International Conference on Religion, Science and Education, 4, pp. 9-14.
21. National Research Council. (2012). *Education for life and work: Developing transferable knowledge and skills in the 21st century*. The National Academies Press. Washington.
22. Lazarus, R. S., & Folkman, S. (1984). *Stress, appraisal, and coping*. Springer Publishing Company. New York.

23. Trilling, B., & Fadel, C. (2009). *21st century skills: Learning for life in our times*. John Wiley & Sons. Hoboken.
24. Print, M. (2007). *Citizenship education and youth participation in democracy*. British Journal of Educational Studies, 55(3), pp. 325-345.
25. Azevedo, R., & Gašević, D. (2019). *Analyzing multimodal multichannel data about self-regulated learning with advanced learning technologies: Issues and challenges*. Computers in Human Behavior, 96, pp. 207-210.
26. Kozleski, B., & Baustien Siuty, M. (2016). *Essential Approaches for Excellence & Sustainable School System Transformation -Equity-Centered Capacity Building Network (ECCBN)*.
۲۷. شورای عالی آموزش و پرورش. (۱۳۹۰). سند تحول بنیادین آموزش و پرورش جمهوری اسلامی ایران. تهران: دبیرخانه شورای عالی آموزش و پرورش. تهران.
۲۸. کردلو، م. (۱۴۰۱). تربیت تمام ساحتی: نمودشناسی تفسیری فهم معلمان از ساحت‌های تربیتی، مجله رشد فناوری آموزشی، ۱۱(۲)، ۳۵-۳۲.
۲۹. وفایی، علی؛ قمشی، فاطمه؛ فرد، علی اکبر. (۱۳۹۶). اثربخشی بسته یادگیری تلفیقی بر یادگیری خودراهبر و انگیزش تحصیلی دانش‌آموزان متوسطه. فصلنامه روان‌شناسی تربیتی، ۲۲-۱، ۱۲(۴۱).
۳۰. احمدی، م. و رضایی، س. (۱۴۰۰). بررسی تطبیقی تربیت تمام ساحتی در اسناد تحولی ایران و رویکردهای جهانی. فصلنامه پژوهش در مسائل تعلیم و تربیت اسلامی، ۱۳۵-۱۱۲، ۲۹(۴۵).
۳۱. کرمی، ا. احمدلو، پ. (۱۴۰۲). نقش فناوری‌های نوین و هوش مصنوعی در ارتقای بهره‌وری آموزش و پرورش، هفدهمین کنفرانس بین‌المللی روان‌شناسی، مشاوره و علوم تربیتی، سازمان بین‌المللی مطالعات دانشگاهی اسپانیا.
۳۲. وفایی، ر. فضل الهی قمشی، س. طالعی فرد، ا. (۱۳۹۶). بررسی میزان توجه به ساحت‌های شش‌گانه تربیت سند تحول بنیادین آموزش و پرورش در کتاب‌های درسی مطالعات اجتماعی دوره ابتدایی. مسائل کاربردی تعلیم و تربیت اسلامی، ۱۵۴-۱۳۱، ۲(۳).
۳۳. طالقانی، ز. نبوی، ز. (۱۴۰۲). بررسی فناوری هوش مصنوعی در راستای رویکردهای آموزشی نوین و نقش آن در کیفیت یاددهی معلمان و یادگیری دانش‌آموزان در نظام تعلیم و تربیت: چالش‌ها و فرصت‌ها. دومین کنگره علمی دانشجویان روان‌شناسی، علوم تربیتی و مشاوره، مرکز توسعه علمی و فناوری دانشجویان. تهران.
۳۴. اسدالهی، ح. (۱۴۰۱). کاربردهای هوش مصنوعی در آموزش و پرورش، پنجمین همایش بین‌المللی روان‌شناسی، علوم و مطالعات اجتماعی. همدان.
۳۵. هادی‌پور، آ. بهارلویی یانچشمه، ز. نکوئی شهرکی، م و نیکخواه، م. (۱۴۰۲). توانمندسازی معلمان و دانش‌آموزان با تأکید بر تربیت تمام ساحتی، ششمین کنفرانس ملی مدیریت، اقتصاد و علوم اسلامی. تهران.
۳۶. عبدلی چوبقلو، ف. عبدلی چوبقلو، ت. (۱۴۰۳). جایگاه و نقش معلم در تربیت تمام ساحتی دانش‌آموزان. دومین کنفرانس بین‌المللی آموزش و پرورش. مدیریت، تعلیم و تربیت در آموزش. تهران.
۳۷. روش، عبدالکریم. (۱۳۸۲). فلسفه تعلیم و تربیت: درآمدی بر مبانی، اهداف و روش‌ها. تهران: انتشارات صراط.
۳۸. بهشتی، سید محمد. (۱۳۶۸). تعلیم و تربیت اسلامی. تهران: دفتر نشر فرهنگ اسلامی.
۳۹. ابن‌سینا. (۱۳۷۱). رساله سیاست. در مجموعه مقالات ابن‌سینا (صص. ۵۳-۱). به کوشش محمدرقی دانش‌پژوه. تهران: دانشگاه تهران.
۴۰. اسدی لمعه‌دشت، نقی. (۱۴۰۳). رویکرد هندسی داده محور برای تشخیص الگوهای مؤثر بر تفکر محاسباتی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران.
۴۱. جمشیدی، آرتا امیر؛ اسدی لمعه‌دشت، نقی. (۱۴۰۳). نگرشی نوین به تفکر محاسباتی و هوش مصنوعی در آموزش ریاضی. ۵۵ امین کنفرانس ریاضی ایران. مشهد. صص. ۹۵-۹۹.
۴۲. جمشیدی، آرتا امیر؛ اسدی لمعه‌دشت، نقی. (۱۴۰۴). معرفی تفکر محاسباتی انسان‌محور و تبیین آن از دیدگاه نظریه رسته‌ها. تهران: نامه علوم پایه شماره ۱۵. صص. ۳۵-۱۵.
۴۳. جمشیدی، آرتا امیر؛ اسدی لمعه‌دشت، نقی. (۱۴۰۴). توسعه معیارهای اندازه‌گیری مهارت‌های تفکر محاسباتی. ۵۶ امین کنفرانس ریاضی ایران. رفسنجان. صص. ۳۹-۴۳.
۴۴. جمشیدی، آرتا امیر؛ اسدی لمعه‌دشت، نقی. (۱۴۰۴). چرخه یادگیری پویا: تأثیر کنشگری متقابل تفکر محاسباتی و تعامل انسان- ماشین در یادگیری. ۵۶ امین کنفرانس ریاضی ایران. رفسنجان. صص. ۴۷-۴۴.

ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران

احمد عباس نژاد^{۱*}، بهنام عباس نژاد^۱

بخش زمین شناسی دانشگاه شهید باهنر کرمان
aabbas@uk.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

ارسنیک یکی از عناصر سمناک مهم است که اگرچه در تمام اجزای محیط زیست وجود دارد ولی معمولاً بالاترین غلظت‌های آن در منابع آب زیرزمینی یافت می‌شوند. با توجه به طیف وسیع بیماری‌هایی که این عنصر می‌تواند عارض شود که شامل چند نوع سرطان هم می‌باشند، سنجش غلظت و منشاء آن در منابع آب زیرزمینی ایران اهمیت زیادی دارد. هدف از این مطالعه مرور منابع فارسی و انگلیسی منتشر شده در مورد غلظت ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران و منشاء آن است. براساس آن، بسیاری از آب‌های زیرزمینی ایران که غلظت ارسنیک در آن‌ها مورد سنجش قرار گرفته دارای مقادیر بالاتر از حد مجاز شرب (۱۰ میکروگرم در لیتر) می‌باشند. منشاء این ارسنیک متنوع است و شامل موارد متعددی نظیر ژئوترمال، تجزیه سولفیدها، واجذب، انحلال احیایی، تبخیر و آلودگی انسان‌زاد (به ویژه از نوع کشاورزی و معدنکاری) می‌باشند. توصیه می‌شود غلظت این عنصر در همه منابع آب زیرزمینی ایران مورد سنجش قرار گیرد و در صورتیکه در آب شرب بالاتر از حد مجاز بود، با استفاده از تکنیک‌های موجود تحت ارسنیک زدایی قرار گیرند.

کلیدواژگان: ارسنیک، آب زیرزمینی، واجذب، ژئوترمال، تجزیه سولفیدها.

مقدمه

میلیگرم بر کیلوگرم)، چهاردهمین عنصر در آب دریا و دوازدهمین در بدن انسان است. ارسنیک شدیداً کالکوفیل است و به همین دلیل اغلب همراه با کانی‌های سولفیدی، به ویژه در رالگار و اریپمنت، دیده می‌شود. رایج‌ترین کانی ارسنیک ارسنوپیریت است که همراه با نهشته‌های معدنی طلا، مس، قلع، تنگستن، نقره، روی و سرب یافت می‌شود. ارسنیک به طور گسترده به عنوان عنصر فرعی در کانی‌های سولفیدی گالن، پیریت و اسفالریت هم دیده می‌شود.

ارسنیک خصلتاً یک عنصر فراگیر (همه جایی) است و به مقدار قابل سنجش در تمام خاک‌ها و تمام اجزاء محیط زیست وجود دارد. شیمی ارسنیک شباهت زیادی با گوگرد دارد و به همین دلیل در ساختمان بلورین بسیاری از مواد معدنی سولفیدی به صورت جانشین دیده می‌شود. اکسیدهای آهن حاصل از تجزیه پیریت به شدت جاذب ارسنیک می‌باشند. در هر حال، پیریت یک کانی معمول حاوی ارسنیک است و تا ۵۶۰۰ میلی گرم در کیلوگرم ارسنیک دارد. در خاک‌های حاصل از شیل پیریتی مقدار ارسنیک تا ۱۰ برابر بیش از زمینه طبیعی است.

اهمیت ارسنیک

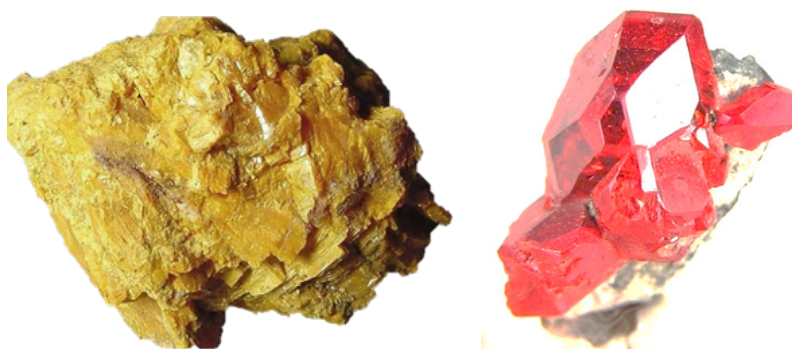
ارسنیک عادی‌ترین ماده سمی محیط زیست است و در گروه ۱ عوامل سرطان‌زا قرار دارد. مهم‌ترین جنبه‌های سمناکی ارسنیک

ارسنیک که یک ماده سمی معروف است امروزه یکی از بزرگ‌ترین خطرهای زیست محیطی است و جان حداقل چند صد میلیون نفر در جهان را تهدید می‌کند. این ماده که به عنوان «زهر پادشاهان» و «پادشاه زهرها» هم معروف است چند هزار سال پیش شناسایی شده و در خاورمیانه در حدود ۳۰۰۰ سال قبل از میلاد برای سخت کردن برنز و در مصر، یونان و روم باستان به عنوان رنگ استفاده می‌شده است. در قرن‌های اول و دوم میلادی، در امپراطوری روم از ارسنیک برای کشتن دشمنان استفاده می‌کردند. مرگ و میر ناشی از آب‌های زیرزمینی غنی از ارسنیک در بعضی از کشورها (نظیر بنگلادش) در چند دهه گذشته بیش از تمام مرگ و میرهای قبلی ناشی از مسمومیت به آن بوده است و این لزوم توجه به آن را نشان می‌دهد. مسمومیت مزمن به ارسنیک بسیار رایج‌تر از نوع حاد آن است. این نوع مسمومیت معمولاً ناشی از مصرف آب غنی از ارسنیک است. اثرات آن را می‌توان به انواع تنفسی، معدی-روده‌ای، قلبی-عروقی، عروق محیطی، مغزی-عروقی، تصلب شرایین، فشارخون، اختلال در عملکرد غدد درون ریز، کبدی، عصبی، پوستی، خونی، ژنتیکی، کلیوی، سرطانی و غیره تقسیم کرد (۱).

ارسنیک معمولاً به صورت ترکیب در طبیعت یافت می‌شود و سی و نهمین عنصر در کیهان (با میانگین غلظت ۰/۰۰۸ میلی گرم بر کیلوگرم)، بیستمین عنصر فراوان پوسته زمین (با میانگین ۱/۸

آن عبارتند از جانشینی در ساختمان پیریت، کالکوپیریت، گالن و اسفالریت. این کانی‌ها معمولاً در مناطق با فعالیت هیدروترمال تشکیل می‌شوند و اغلب با کانسارهای فلزی همراه می‌باشند. البته، پیریت که فراوان‌ترین سولفید است در باتلاق‌ها، حوضه‌های توری، در رسوبات بستر دریاچه‌ها و دریاها و در بعضی از آبخوان‌ها هم تشکیل می‌شود. نکته مهم این است که تا مادام که اکسیژن وجود نداشته باشد سولفیدها پایدار خواهند بود، ولی در اثر تماس با اکسیژن به راحتی اکسید می‌شوند. کانی‌های اکسیدی حاصله، ارسنیک را به خوبی در داخل ساختمان خود قرار نمی‌دهند ولی توانایی آن‌ها در جذب ارسنیک در سطح خود زیاد است.

ارسنیک جزء اصلی بیش از ۲۴۵ کانی است و به مقدار زیاد در نهشته‌های سولفیدی دیده می‌شود و در ۲۷ کانی ارسنیدی، ۱۲ کانی سولفیدی و ۶۵ کانی سولفوسالت وجود دارد (جدول ۱). ارسنیک یک عنصر جزئی در پوسته زمین است. لذا، وجود آب‌های غنی از آن یک امر غیر متعارف است. اگرچه ارسنیک در ساختمان بعضی از کانی‌های سیلیکاتی (نظیر بیوتیت) دیده می‌شود، ولی غلظت‌های بالای آن در دو گروه از کانی‌ها که عبارتند از سولفیدها و اکسیدها یافت می‌شوند (جدول ۲). ارسنیک می‌تواند کانی‌های سولفیدی نظیر اریپمنت، رآلگار (شکل ۳) و ارسنوپیریت را بسازد و، همچنین، در ساختمان سولفیدها جانشین گوگرد شود. نمونه‌های



شکل ۲. تصویر دو مورد از معروف‌ترین کانی‌های ارسنیک: اریپمنت (سمت چپ) و رآلگار (سمت راست)

شدن از آب‌های ژئوترمال و تمرکز (غلظت) ناشی از تبخیر در مناطق خشک می‌باشد. میکروپها نیز می‌توانند باعث افزایش انحلال احیایی اکسیدهای فریک ارسنیک‌دار شوند. اکسایش سولفیدهای ارسنیک‌دار یکی از فرآیندهای ژئوشیمیایی برای آزاد شدن ارسنیک است (جدول ۳).

اکسیژن محلول مهم‌ترین اکسیدکننده ترکیبات احیایی در زون غیراشباع و در آب زیرزمینی کم عمق می‌باشد. واجذب شدن ارسنیک از اکسیدهای آهن و منگنز در pH بالای ۸/۵ صورت می‌گیرد. حضور آنیون رقیب؛ مثل فسفات، بی‌کربنات یا سیلیکات می‌تواند واجذب ارسنیک را افزایش دهد. ممکن است توسعه شرایط انحلال احیایی در pH نزدیک به خنثی باعث واجذب ارسنیک از این اکسیدها و یا انحلال احیایی ارسنیک از اکسیدهای آهن و منگنز ارسنیک‌دار شود. ایجاد شرایط احیا باعث افزایش غلظت ارسنیک و آهن می‌شود، ولی سولفات افزایش نمی‌یابد (۶).

تبخیر زیاد در مناطق خشک منجر به افزایش تمرکز املاح در آب زیرزمینی می‌شود. ارسنیک در چنین آبخوان‌هایی متحرک می‌شود. علت آن pH بالا (> ۸.۵) است که توسط غلظت فلزات قلیایی و قلیایی خاکی در محلول ایجاد می‌گردد (۷ و ۸).

ارسنیک در آب زیرزمینی

احتمال بالا بودن غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی بیش از سایر انواع منابع آب است، زیرا که منابع ورود ارسنیک معمولاً در خاک، رسوب و سنگ قرار داشته و آن را وارد آب زیرزمینی می‌کنند. در ایران نیز بسیاری از موارد گزارش شده مبنی بر غلظت بالای ارسنیک به آب زیرزمینی مربوط می‌شوند. در موارد نادری که آب‌های سطحی (مثل رودخانه‌های کوچک) آلوده بوده‌اند، به‌دلیل تخلیه آب‌های زیرزمینی آلوده به داخل آن‌ها بوده است.

غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی اغلب کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر است. ولی، بعضی از آب‌های زیرزمینی طبیعی غنی از ارسنیک در نقاطی از دنیا دیده می‌شوند که غلظت ارسنیک در آن‌ها می‌تواند در حد میلی‌گرم در لیتر هم باشد. آب‌های زیرزمینی که به‌طور صنعتی از ارسنیک آلوده شده باشند معمولاً در وسعت‌های موضعی و محلی دیده می‌شوند.

آلودگی ارسنیک در آب زیرزمینی سراسر جهان به چند فرآیند ژئوشیمیایی نسبت داده می‌شود که شامل اکسایش سولفیدهای ارسنیک‌دار، واجذب ارسنیک از اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن و منگنز، انحلال احیایی ارسنیک از اکسید و هیدرواکسیدها، آزاد

جدول ۱. رایج‌ترین کانی‌های ارسنیک‌دار (۴).

کانی	فرمول	گروه کانی	شرایط تشکیل
آدامیت Adamite	$Zn_2(OH)(AsO_4)$	ارسنات	محصول هوازدگی
آنابرژیت Annabergite	$(Ni,Co)_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
Arsenic (rhombohedral)	As(0)	عنصری	نهشته‌های هیدروترمال
ارسنولیت Arsenolite	As_2O_3	ارسنیت	هوازدگی، آتش سوزی در معادن یا رگه‌های زغال سنگ
Arsenolamprite	As(0)	عنصری	نهشته‌های هیدروترمال
ارسنوپیریت Arsenopyrite	FeAsS	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال، سنگ‌های مختلف
کلوانتیت Chloanthite	$(Ni,Co)As_{3-x}$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
کلودتیت Claudetite	As_2O_3	ارسنیت	محصول هوازدگی
کبالتیت Cobaltite	$(Co,Fe)AsS$	ارسنوسولفید	سنگ‌های دگرگونی، نهشته‌های هیدروترمال
کانچالسیت Conichalcite	$CaCu(AsO_4)(OH)$	ارسنات	محصول هوازدگی
انارژیت Enargite	Cu_3AsS_4	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
اریتریت Erythrite	$Co_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
ژرسدورفیت Gersdorffite	NiAsS	ارسنوسولفید	سنگ‌های دگرگونی، نهشته‌های هیدروترمال
گلوکودوت Glaucodot	$(Co,Fe)AsS$	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
هماتولیت Haematolite	$(Mn,Mg)_4Al(AsO_4)(OH)_8$	ارسنات	محصول هوازدگی
هورنسیت Hoernesite	$Mg_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
جانبومیت Johnbaumite	$Ca_5(AsO_4)_3(OH)$	ارسنات	سنگ‌های دگرگونی
لولینژیت Loellingite	$FeAs_2$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
لوزونیت Luzonite	Cu_3AsS_4	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
منسفیلدیت Mansfieldite	$AlAsO_4 \cdot 2H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
میمتیت Mimetite	$Pb_3(AsO_4)_3Cl$	ارسنات	محصول هوازدگی
نیکولیت Niccolite	NiAs	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال، سنگ‌های آذرین نفوذی میفیک
اسکوترودیت skutterudite	$(Ni,Co)As_3$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
الونیت Olivenite	Cu_2OHAsO_4	ارسنات	محصول هوازدگی
ارپیمنت Orpiment	As_2S_3	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال، سنگ‌های آذرین، آتشفشانی
پارالگار Pararealgar	AsS (As_4S_4)	ارسنوسولفید	در معرض نور آفتاب قرار گرفتن رالگار
Pararsenolamprite	As(0)	عنصری	نهشته‌های هیدروترمال
Pharmacosiderite	$Fe_3(AsO_4)_2(OH)_3 \cdot 5H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
پروستیت Proustite	Ag_3AsS_3	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
راملسبرژیت ammelsbergite	$NiAs_2$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
رالگار Realgar	AsS (As_4S_4)	ارسنوسولفید	هیدروترمال، سنگ‌های آذرین، آتشفشان‌ها
سافلوریت Safflorite	$(Co,Fe)As_2$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
اسکرویدت Scorodite	$FeAsO_4 \cdot 2H_2O$	ارسنات	محصول هوازدگی
سلیگمانیت Seligmannite	$PbCuAsS_3$	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
اسکوترودیت Skutterudite	$(Co,Ni)As_3$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
اسمالتیت Smaltite	$(Co,Ni)As_{3-x}$	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال
اسپرلیت Sperrylite	$PtAs_2$	ارسنید	سنگ‌های آذرین نفوذی میفیک و اولترامیفیک
تنانتیت Tennantite	$(Cu,Fe)_{12}As_4S_{13}$	ارسنوسولفید	نهشته‌های هیدروترمال
وسترولدیت Westerveldite	FeAs	ارسنید	نهشته‌های هیدروترمال

جدول ۲. غلظت آرسنیک در بعضی از کانی‌ها (۵)

نام کانی	غلظت آرسنیک (mg/kg)
کانی‌های سولفیدی	
آرسنوپیریت	۴۶٪ وزنی
پیریت	۷۷۰۰ تا ۱۰۰
پروتیت	۱۰۰ تا ۵
مارکاسیت	۱۲۶۰۰ تا ۲۰
گالن	۱۰۰۰۰ تا ۵
اسفالریت	۱۷۰۰۰ تا ۵
کالکوپیریت	۵۰۰۰ تا ۱۰
کانی‌های اکسیدی	
هماتیت	۱۶۰ تا
اکسیدهای تفکیک نشده آهن	۲۰۰۰ تا
اکسی هیدروکسیدهای فریک	۷۶۰۰۰ تا
مگنتیت	۴۱ تا ۷/۲
ایلمنیت	کمتر از ۱
کانی‌های سیلیکاتی	
کوارتز	۳/۱ تا ۴/۰
فلدسپات	کمتر از ۱/۰ تا ۱/۲
پیروکسن	۱۷/۱ تا ۰۸/۰
کربنات‌ها	
کلسیت	۸ تا ۱
دلومیت	کمتر از ۳
سیدریت	کمتر از ۳
سایر کانی‌ها	
آپاتیت	کمتر از ۱ تا ۱۰۰۰
فلوریت	کمتر از ۲

جدول ۳. مشخصات شیمیایی کلی آب‌های زیرزمینی غنی از آرسنیک (۳)

پارامتر	نوع آب			
	احیاء نزدیک به خنثی	قلیایی-اکسیک	اسید-سولفات	ژئوترمال
نحوه متحرک شدن	انحلال احیایی	وا جذب قلیایی	اکسید شدن سولفید	ژئوترمال
مثال‌ها	حوضه بنگال، آبخوان‌های آبرفتی- یخچالی در آمریکا	دشت‌های برامیایی آرژانتین، جنوب آمریکا	ویسکانسین (آمریکا)، پرت (استرالیا)	شیلی، تبت و نیوزیلند
غلظت آرسنیک آب	تا چند ppm	تا حدود ۱۰ ppm	تا چند ده ppm	تا ۱۲۰ ppm
گونه آرسنیک	As (III)	As (V)	As (V)	بیشتر As (III)
دمای آب	هر عددی	هر عددی	هر عددی	تا ۸۵C
pH	حدود ۰/۷	≥ ۰/۸	اسیدی	متغیر (معمولاً کمتر از ۶)
اکسیژن محلول	فاقد	زیاد (چند ppm)	متغیر	کم
کلرید	کم	متغیر	متغیر	همبستگی مثبت با آرسنیک
HCO ₃	زیاد	متوسط	کم تا متوسط	کم تا متوسط
SO ₄	خیلی کم (< ۵ ppm)	متوسط تا زیاد (> ۵ ppm)	زیاد تا خیلی زیاد	متغیر
PO ₄	زیاد (> ۱ ppm)	متغیر	متغیر	کم
NO ₃	خیلی کم (< ۱ ppm)	کم تا متوسط	متغیر	کم
NH ₄	زیاد (۵-۵۰ ppm)	فاقد	فاقد	کم
مواد آلی محلول	زیاد (> ۲ ppm)	متغیر	خیلی کم	کم
آهن	زیاد (۱-۱۰ ppm)	کم تا متوسط (< ۱ ppm)	کم تا زیاد	متغیر
منگنز	زیاد تا کم	کم تا متوسط	متغیر	متغیر
فلوراید	کم تا متوسط	متوسط تا زیاد (> ۵/۱ ppm)	کم تا متوسط	کم تا متوسط

بالای ارسنیک با آهن و مس را ناشی از جذب ارسنیک توسط اکسیدها و هیدروکسیدهای آن‌ها دانسته‌اند. با افزایش pH، غلظت ارسنیک هم زیاد شده است. منشاء ارسنیک زمین‌زاد اعلام شده و انحلال کانی‌های موجود در سازندهای میوسن (مارن، شیل، ماسه و کنگلومرای قرمز رنگ) و پلیوسن (کنگلومرا با میان لایه‌های مارن و ماسه) بر ارسنیک تاثیر داشته است.

نوروزی و همکاران (۱۲) اقدام به مطالعه ارسنیک در آب زیرزمینی دشت ملکان کرده‌اند. همبستگی مثبت بین نیترات و ارسنیک به عنوان منشاء انسان‌زاد در نظر گرفته شده، ولی آلودگی قسمت جنوب شرقی آبخوان را از نوع زمین‌زاد (ناشی از سولفیدهای ارسنیک درون شکستگی‌های داخل مارن‌های میوسن) اعلام کرده‌اند.

توزندجانی و همکاران (۱۳) اقدام به سنجش غلظت ارسنیک در ۹۴ نمونه آب زیرزمینی دشت بهار همدان نموده‌اند و با استفاده از مدل‌های نشانگر کریجینگ نقشه احتمال آلودگی را تهیه کرده‌اند. میانگین غلظت ارسنیک بالاتر از حد مجاز گزارش شده است. در حدود ۱۱٪ از محدوده مورد مطالعه احتمال آلودگی بالا است. بالاترین غلظت ارسنیک در محیط‌های کشاورزی مشاهده شده و براساس آن نتیجه گیری شده که منشاء ارسنیک فعالیت‌های کشاورزی است.

پازند و سروستانی (۱۴) مطالعات هیدروژئوشیمیایی منطقه طبس را انجام داده‌اند. در این منطقه، غلظت کاتیون و آنیون‌های اصلی و ارسنیک هم تعیین شده است. آن‌ها منشاء ارسنیک آب زیرزمینی را هوازدگی کانی‌های سولفیدی، نظیر ارسنوپیریت، در نظر گرفته‌اند. همبستگی بین ارسنیک با Fe و Mn دیده نشده است، ولی همبستگی خوبی با سولفات و بی‌کربنات مشاهده شده است که براساس آن نتیجه گرفته‌اند ارسنیک محصول هوازدگی سولفیدها است.

پازند (۱۵) ویژگی‌های هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی منطقه فردوس در استان خراسان جنوبی را مطالعه کرده است. در این منطقه، مقدار ارسنیک در محدوده ۰/۳۸ تا ۲۶ میکروگرم در لیتر متفاوت بوده است. در آن، آب زیرزمینی حاوی مقدار Fe بالا (نسبت به Mn) دارای مقادیر ارسنیک بالا است. همچنین، پیشنهاد شده که ارسنیک از طریق انحلال احیایی اکسی/هیدروکسیدهای آهن وارد آب زیرزمینی شده است.

پازند (۱۶) غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت بافق را در محدوده ۰/۹ تا ۷۴/۷ میکروگرم در لیتر اعلام کرده است. در ۳۵ درصد از نمونه‌های برداشت شده غلظت ارسنیک بالاتر از حد مجاز بوده است. نامبرده، منشاء ارسنیک را انحلال احیایی دانسته

شرایط احیا مناسب برای متحرک شدن ارسنیک، اغلب در رسوبات جوان از نوع آبرفت دلتایی دیده می‌شود که در آنجا رسوبات به سرعت همراه با مواد آلی تازه دفن شده‌اند. توالی‌های ضخیم رسوبات جوان حاوی مواد آلی، اغلب مهم‌ترین مکان‌های حاوی غلظت بالای ارسنیک می‌باشند. نمونه‌های بارز آن در بنگلادش و بنگال غربی دیده می‌شوند. نمونه‌های دیگر در دشت وسیع مجارستان و رومانی، در دلتای رود قرمز در ویتنام و در بخش‌هایی از غرب ایالات متحده وجود دارند. استخراج آب زیرزمینی از این مناطق با مشکل بالا بودن غلظت ارسنیک مواجه است.

ارسنیک در منابع آب زیرزمینی ایران

گزارش‌های زیادی در منابع داخلی و خارجی در مورد حضور ارسنیک به میزان بالاتر از حد مجاز در منابع آب زیرزمینی ایران منتشر شده است. در اینجا، این گزارش‌ها مرور می‌شوند تا بر اساس آن‌ها جمع بندی کلی در مورد مقادیر و راه‌های ورود ارسنیک به منابع آب ایران صورت گیرد.

در دشت تبریز دو آبخوان (سطحی و عمقی) وجود دارد. میانگین غلظت ارسنیک در آبخوان‌های سطحی و عمقی به ترتیب ۲۵/۸ و ۱۲۲/۵ میکروگرم در لیتر بوده است. در اینجا، غلظت ارسنیک در ۱۶ نمونه‌ی برداشت شده، در حد ۳ تا ۱۵۰ میکروگرم در لیتر بوده است. در آبخوان عمقی، واکنش‌های اکسید-احیا باعث آزادسازی ارسنیک از سطح اکسی‌هیدروکسیدهای آهن شده‌اند. سازندهایی نظیر توف‌های سهند به عنوان منشاء اصلی آن معرفی شده‌اند (۹). غلظت ارسنیک در آبخوان دشت تبریز توسط برزگر و همکاران (۱۰) هم مورد مطالعه قرار گرفته است. در اینجا ۱۲ نمونه آب از چاه‌های با عمق ۸ تا ۱۵۰ متر تهیه گردیده و غلظت ارسنیک تا به ۱۵۰ میکروگرم در لیتر رسیده است. کمترین مقدار آن در چاه‌های با عمق کم و بالاترین مقدار در چاه با عمق ۱۲۰ متر به دست آمده است. براساس آن، ارسنیک در منابع آب زیرزمینی این محل از سازندهای زمین‌شناختی، نظیر توف‌های کوه سهند منشاء گرفته است. غلظت آن وابستگی شدیدی با شرایط هیدروژئولوژیکی و عوامل احیاکننده، زمان اقامت آب و عمق چاه نشان می‌دهد (۱۰). با توجه به مجاورت با آتشفشان سهند، ممکن است منشاء ارسنیک در این دشت ژئوترمال باشد.

اصغری مقدم و جلالی (۱۱) غلظت ارسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت خوی را مطالعه کرده‌اند. در این مطالعه، غلظت یون‌های اصلی، فلورید، نیترات و مقدار EC و pH مورد سنجش قرار گرفته است. مطالعه آن‌ها نشان داده که غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی قسمت‌های شرقی این دشت بالاتر است. همچنین، بین غلظت ارسنیک با مقدار آهن، مس، سدیم، کلرید، سولفات و pH آب همبستگی مثبت دیده شده است. نامبردگان، همبستگی

بالا بودن غلظت ارسنیک دانسته‌اند. در مطالعه آن‌ها، همبستگی مثبت بین ارسنیک و pH دیده شده است.

صفری و همکاران (۲۳) اقدام به مطالعه ارسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت چهار دولی استان کردستان کرده‌اند. براساس آن، غلظت ارسنیک تا به ۲۷۰ میکروگرم در لیتر رسیده است. همچنین، این عنصر با سدیم، پتاسیم و سیلیس همبستگی مثبت داشته و منشاء آن زمین‌زاد (از سنگ‌های آتشفشانی منطقه) اعلام شده است. نحوه آزادسازی آن را به رقابت سیلیس محلول با ارسنیک برای جذب شدن در مکان‌های جذب (اکسیدهای آهن، آلومینیوم و منگنز) دانسته‌اند.

دهبندی و همکاران (۲۴) ارسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت سیرجان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. دامنه مقدار ارسنیک ۲/۴ تا ۵۴۵/۸ (با مقدار متوسط ۸۶/۶) میکروگرم در لیتر به دست آمده است و در نیمی از نمونه‌ها مقدار ارسنیک بیش از حد مجاز (۱۰) میکروگرم در لیتر) بوده است. آب زیرزمینی از نوع Na-Cl و قلیایی (ناشی از هوازدگی سیلیکات‌ها، تبادل یونی و تبخیر) گزارش شده است. مقادیر بالای ارسنیک در آب‌های با pH بالاتر از ۷/۵ دیده شده‌اند. ارسنیک با pH و بی‌کربنات در یک گروه قرار گرفته است. در عین حال، تبخیر و نفوذ آب‌های شور غنی از ارسنیک عامل مهم معرفی شده‌اند.

رهنما راد و همکاران (۲۵) داده‌های مربوط به غلظت ارسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان را منتشر ساخته‌اند. براساس آن، غلظت ارسنیک در حد ۴ تا ۲۷۸ (با میانگین ۵۹) میکروگرم در لیتر بوده است. غلظت در ۸۵/۳ درصد نمونه‌ها بیش از حد مجاز بوده است.

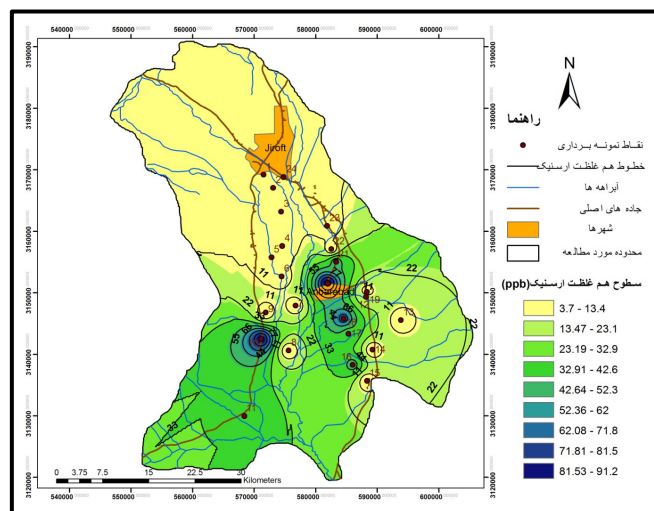
ابوالپور و همکاران (۲۶) تغییرات غلظت ارسنیک در منطقه جیرفت را مورد سنجش قرار داده و تاثیر عمق چاه، آبدهی، بارش و کاربری زمین را روی غلظت ارسنیک تعیین کرده‌اند. بر اساس این مطالعه، محل‌های با خاک اینسپتیسول آلودگی بالاتری داشته‌اند. مقدار غلظت ارسنیک در محدوده ۰/۵ تا ۱۵۳ میکروگرم در لیتر متغیر بوده است و بسیاری از چاه‌های با آب آلوده به ارسنیک نزدیک زمین‌های کشاورزی قرار داشته‌اند. در این مطالعه ارتباط معنی‌داری بین ارسنیک با عمق چاه، آبدهی چاه و میزان بارش دیده نشده است. عباس نژاد (۲۷) هم غلظت ارسنیک در دشت جیرفت را تعیین کرده است (شکل ۴). با توجه به این شکل، مقدار غلظت این عنصر به سمت قسمت‌های مرکزی و جنوبی دشت جیرفت افزایش یافته است. حداقل مقدار ارسنیک در دشت ۳/۷ میکروگرم در لیتر، میانگین آن ۲۰/۹ میکروگرم در لیتر و حداکثر آن ۹۱/۲۵ میکروگرم در لیتر ثبت شده است.

و رابطه معکوس بین غلظت ارسنیک با بی‌کربنات وجود داشته است که علت آن را جذب و هم‌رسوبی ارسنیک با کلسیت دانسته است. نامبرده، یکی از منابع ارسنیک آب را معدن سنگ آهن بافق دانسته است.

در یک مطالعه توسط عباس نژاد و همکاران (۱۷)، تعداد ۶۳ نمونه از آب‌های زیرزمینی دشت بردسیر کرمان برداشت شد. میانگین غلظت ارسنیک در آن‌ها ۱۳۴/۲ میکروگرم در لیتر بوده است. در این منطقه، شرایط اکسیدان و pH در حد خنثی تا بازیکی باعث رها شدن ارسنیک جذب شده از سطح اکسیدهای آهن موجود در رسوبات شده‌اند. بنابراین، هرچه غلظت ارسنیک در رسوبات بیشتر باشد مقدار آن در آب زیرزمینی موجود در آن رسوبات هم بالاتر خواهد بود. مقایسه نقشه pH با نقشه تغییرات غلظت ارسنیک معرف هماهنگی خوب بین این دو است و به ویژه غلظت ارسنیک هر جا که pH بالای ۸ باشد خیلی زیاد است. ولی همبستگی بین نقشه TDS و غلظت آهن با ارسنیک دیده نمی‌شود. چشمه‌های آبگرم در بردسیر کرمان ۱۵۹۰۰ تا ۳۰۵۰۰ میکروگرم در لیتر ارسنیک دارند (۱۸). این منطقه در زون آتشفشانی ارومیه-دختر قرار دارد.

دهقانی و عباس نژاد (۱۹) و عباس نژاد (۲۰) غلظت نیترات، سرب و ارسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت انار کرمان را تعیین کرده‌اند. غلظت ارسنیک در نمونه آب‌های جنوب شرق این دشت (مجاور معادن مس) و حوالی بیاض بیش از مقدار مجاز برای شرب بوده است. به عقیده نامبردگان، منشاء احتمالی کادمیوم، ارسنیک و سرب در نمونه‌های جنوب شرق این دشت اکسید شدن سولفیدهای معادن مس منطقه است.

پازند و جوانشیر (۲۱) غلظت ارسنیک در آب زیرزمینی دشت راین کرمان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این دشت غلظت ارسنیک بین کمتر از ۰/۵ تا ۲۵۰۰۰ میکروگرم در لیتر متغیر است. در این محل، همبستگی مثبت بین غلظت ارسنیک با بی‌کربنات و pH دیده شده است. لذا، نامبردگان نتیجه گرفته‌اند که ارسنیک از دو طریق اصلی وارد منابع آب شده است که اولی احیا اکسید/هیدروکسیدهای آهن حاوی ارسنیک است. در این حالت، ممکن است آهن به صورت سولفید رسوب کرده باشد. عامل دوم انتقال ارسنیک به داخل سیستم آب در اثر تماس با سنگ‌های آتشفشانی اسیدی در نظر گرفته شده است (۲۱). نظری و عباس نژاد (۲۲) هم غلظت ارسنیک در منابع آب زیرزمینی دشت راین کرمان را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها ۲۹ نمونه آب از چشمه‌ها، قنات‌ها و چاه‌ها گرفته‌اند و غلظت ارسنیک را در حد ۰/۱ تا ۲۰۴/۸ میکروگرم در لیتر به دست آورده‌اند. نامبردگان، واجذب ارسنیک از سطح اکسید و هیدروکسیدهای آهن و نفوذ آب‌های هیدروترمال را عامل اصلی



شکل ۴. تغییرات غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت جیرفت (۲۷)

هیدروترمال بر سنگ‌ها در حین عبور از سنگ می‌باشند.

میانگین غلظت آرسنیک در چشمه‌های آبگرم میدان آتشفشانی سبلان ۱۶۰۰ میکروگرم در لیتر بوده است (۳۱). فعالیت‌های آتشفشانی و ژئوترمالی عامل مهم بالا بودن غلظت آرسنیک در منابع آب شهر اردبیل معرفی شده‌اند (۳۲ و ۳۳).

در یک مطالعه دیگر، ژئوشیمی زیست‌محیطی و منابع آرسنیک طبیعی در چشمه‌های آبگرم خرقان قزوین توسط یزدی و همکاران (۳۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. نامبردگان غلظت آرسنیک در چشمه‌های آبگرم خرقان قزوین را ۱۴۰ تا ۹۵۰ میکروگرم در لیتر گزارش کرده‌اند. غلظت آرسنیک در این چشمه‌های آبگرم هم بالا است. انتشار آرسنیک موجود در آب این چشمه‌ها به داخل آب‌های زیرزمینی کم عمق محل که برای شرب استفاده می‌شوند می‌تواند باعث آلودگی آن‌ها شود. منشأ آرسنیک ژئوترمال و معدنی کاری اعلام شده است.

کشاورزی و همکاران (۳۵) غلظت آرسنیک در چاه‌ها و چشمه‌های سه روستای کردستان و آذربایجان غربی را مطالعه کرده‌اند. براساس این مطالعه، آب چشمه‌های تراورتن‌ساز از آرسنیک غنی است. بالاترین مقدار آرسنیک در نزدیکی محلی ثبت شده که چشمه تراورتن‌ساز به یک سیستم هیدروترمال وابسته به فعالیت آتشفشانی در منطقه متعلق بوده است.

تغییرات ناحیه‌ای ریسک کمی و خطر آرسنیک در قروه کردستان توسط نصرآبادی و بیدآبادی (۳۶) مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، ۱۳ نمونه آب برداشت و آنالیز شده است. غلظت آرسنیک در آن‌ها ۷۶ تا ۴۲۰ میکروگرم در لیتر بوده است. فعالیت آتشفشانی در محدوده زمانی میوسن بالایی و پلیستوسن به عنوان منبع زمین‌شناختی اصلی آلودگی آرسنیک معرفی شده است.

چیت سازان و همکاران (۲۸) پیدایش، توزیع و منشأ آرسنیک در چاه‌های آب عمیق در منطقه میداوود خوزستان را مطالعه کرده‌اند. غلظت آرسنیک در ۸۱٪ از چاه‌های عمیق بیش از مقدار مجاز بوده است. آن‌ها پیشنهاد کرده‌اند که کانی‌های سازند آسماری منبع اصلی آرسنیک بوده‌اند و مکانیسم اصلی تحرک آرسنیک در آبخوان، تجزیه بیولوژیکی موادالی مرتبط با نفت و انحلال احیایی اکسید و هیدروکسیدهای آهن بوده است. در این مطالعه، همبستگی مثبت بالایی بین غلظت کل آرسنیک با مقدار کل آهن، مقدار کل منگنز، نیکل و وانادیوم و همبستگی منفی نسبتاً قوی بین آرسنیک و نیترات و نیز، همبستگی منفی بین آرسنیک و Eh دیده شده است.

شیخی و همکاران (۲۹) اقدام به مطالعه مقدار آرسنیک در آب‌های زیرزمینی هشت‌رود کرده‌اند. براساس آن، در ۶۰ درصد موارد مقدار آرسنیک کمتر از ۱۰ میکروگرم در لیتر بوده است. بالاترین مقدار آرسنیک در این منطقه ۲۴۵ میکروگرم در لیتر اعلام شده است.

نوروزی و اصغری مقدم (۳۰) مقدار آرسنیک در آب‌های آبخوان میاندوآب را مورد مطالعه قرار داده‌اند. مقادیر میانگین، حداقل و حداکثر آرسنیک در ۳۶ نمونه آبی که در این مطالعه برداشت شده به ترتیب ۰/۰۱۱۷، ۰/۰۰۱ و ۰/۰۹۳۶ میلی‌گرم در لیتر بوده است. در این آبخوان، منشأ اصلی آرسنیک زمین‌زاد اعلام شده است.

مدبری و یکتا (۳۱) تغییرات فصلی در پارامترهای صحرایی و شیمیایی (pH، EC، کاتیون‌ها و آنیون‌ها) و غلظت عناصر نادر در فصل‌های خشک و مرطوب در چشمه‌های آبگرم نیر و مشکین شهر واقع در استان اردبیل را مطالعه کرده‌اند. غلظت اکثر عناصر نادر به مراتب بیش از استاندارد بوده است. چنین تصور شده که As^+ ، B^+ ، Ba^+ ، Br^- ، Li^+ ، Na^+ ، Rb^+ ، Sr^+ ، EC ، K^+ ، Cl^- ، HCO_3^- و V منشأ ماگمایی-هیدروترمالی داشته و محصول تأثیر سیالات

غنی بوده‌اند (با میانگین حدود ۱۵۰ میلی‌گرم در کیلوگرم). ظرفیت رهاسازی آرسنیک این تراورتن‌ها می‌تواند بالا باشد.

مقدار آرسنیک در دشت نوق در حد ۰/۵ تا ۱۳۵/۹ با متوسط ۲۰/۱ میکروگرم در لیتر گزارش شده است (۴۲). همبستگی مثبت آن با pH آب به عنوان نقش واجذب در رهاسازی آن بیان شده است. در عین حال، رهاسازی از کنگلومراهای میوسن و شیل‌های ژوراسیک هم به عنوان عوامل دیگر بیان شده است.

بر اساس مطالعات غلامی گودیزی (۴۳)، مقدار آرسنیک در منابع آب دشت شهداد در محدوده ۰/۷۵ تا ۲۶ میکروگرم در لیتر (با میانگین ۸/۵) متغیر بوده است. همبستگی خوب آن با مقدار املاح محلول مبین تاثیر شدید تبخیر در افزایش غلظت آرسنیک در نظر گرفته شده است.

سلطانی نژاد (۴۴) دامنه غلظت آرسنیک در دشت شهرابک را در حد ۰/۵ تا ۶۲۱ میکروگرم در لیتر (با میانگین ۱۵۲/۲) اعلام کرده است. در این دشت نیز همبستگی مثبت آرسنیک با املاح محلول اصلی به عنوان تاثیر شدید تبخیر در افزایش غلظت آرسنیک بیان شده است. ولی، نامبرده معتقد است آرسنیک در اصل از طریق تجزیه سولفیدهای موجود در سنگ‌های آتشفشانی منطقه و فعالیت ژئوترمالی منتسب به گسل فعال دهشیر- بافت وارد منابع آب شده است. جهت اطلاع در مورد مقدار آرسنیک در منابع آب سطحی و غذای ایران به عباس نژاد و عباس نژاد (۴۵) مراجعه شود.

خلاصه و نتیجه‌گیری

در جدول ۴ خلاصه گزارش‌های مربوط به منشاء آرسنیک در آب‌های زیرزمینی ایران درج شده است. با توجه به آن، طیف نسبتاً وسیعی از عوامل؛ نظیر انحلال احیایی، فعالیت‌های آتشفشانی و ژئوترمالی، تجزیه سولفیدها، واجذب قلیایی، معدن‌کاری، کشاورزی و تبخیر در افزایش مقدار آرسنیک در منابع آب ایران نقش دارند که تابع موقعیت زمین‌شناختی محل، شرایط هیدروژئولوژیکی، آب و هوا و نوع فعالیت‌های بشر است. به نظر می‌رسد که نقش فعالیت‌های ژئوترمال، واجذب و تجزیه سولفیدها بیش از سایرین است و به همین دلیل غلظت آرسنیک در آب‌های زیرزمینی دشت‌های داخل و حاشیه کمربند ارومیه- دختر ایران بیش از سایر نقاط است. در مجموع، پراکندگی عوامل موثر موید این نکته است که آب‌های زیرزمینی هر محل از ایران می‌توانند دارای آرسنیک به مقدار بیش از مقدار مجاز باشند. پس، لازم است سنجش غلظت این عنصر در تمام منابع آب زیرزمینی ایران مورد توجه قرار گیرد. در صورتیکه غلظت آرسنیک در آب شرب بیش از حد مجاز باشد راه‌های مختلفی برای آرسنیک زدایی از آب وجود دارد که در منابع مختلف توضیح داده شده‌اند.

غلظت آرسنیک در چشمه‌های تراورتن‌ساز منطقه قروه- تکاب و بیجار (نظیر باباگرگر- امامزاده پیرصالح و تخت سلیمان) در حد ۲۱۲ تا ۹۸۶ میلی‌گرم در لیتر است (۳۷). این چشمه‌ها را عامل اصلی آلودگی آب‌های زیرزمینی منطقه به آرسنیک در نظر گرفته‌اند (۳۷). در این منطقه، همبستگی مثبت و قوی بین آرسنیک و سزیم، لیتیم، روبیدیوم و پتاسیم دیده شده است و از آنجا که این عناصر در سیالات مراحل نهایی تفریق ماگمایی غنی می‌شوند و این منطقه دارای شرایط پسین فعالیت آتشفشانی است که با وجود چشمه‌های تراورتن‌ساز هم تأیید می‌شود منشاء آرسنیک سیالات ماگمایی ذکر شده است. براساس نسبت Br/Cl و B/Cl، گرمایی بودن آب چشمه‌ها تأیید شده است (۳۷).

طاهری و همکاران (۳۸) غلظت آرسنیک در منابع آب چلیو واقع در استان خراسان رضوی را در حد ۱۶ تا ۶۰۶ میکروگرم در لیتر اعلام کرده‌اند. مطالعات نامبردگان حاکی از لیچینگ جزئی به صورت تبادل یونی در زون‌های گرمایی است و منبع اصلی آرسنیک را اکسیدشدن کانی‌های سولفیدی آرسنیک؛ نظیر اریپمنت، رآلگار و ارسنوپیریت در زون دگرسانی آرژلیک- پیریتی دانسته‌اند. در اینجا، pH بالای ۸ قلیابیت مورد نیاز برای تشدید اکسیدشدن سولفید و رها شدن آرسنیک را فراهم کرده است.

شاکری (۳۹) کیفیت آب سطحی و زیرزمینی در میدان ژئوترمالی تقتان را مورد مطالعه قرار داده است. مطالعه در دو فصل متفاوت صورت گرفته است. آرسنیک در ۳۰٪ نمونه آب‌های زیرزمینی بیش از استاندارد WHO بوده است. مقدار آن در چشمه‌های آبگرم خیلی بالا بوده است (تا ۳۷۸۸ میکروگرم در لیتر). غلظت‌های بالای عناصر نادر و یون‌ها در آب چاه‌ها و چشمه‌های آبگرم معرف واکنش بین آب و سنگ است.

شریفی و همکاران (۴۰) مقدار آرسنیک در آب و رسوبات میدان ژئوترمالی تکاب را که در آن کانیسازی طلا هم صورت گرفته مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این مطالعه، بین غلظت آرسنیک در آب و رسوب همبستگی دیده شده است. غلظت آرسنیک در رسوب ۲۰/۲ تا ۲۱۰/۸ میلی‌گرم در کیلوگرم بوده و در آب ۵/۲۲ تا ۱۹۴/۲۵ میکروگرم در لیتر به دست آمده است.

محمدی و همکاران (۴۱) غلظت آرسنیک در تراورتن‌های چشمه‌های تراورتنی قروه را مطالعه کرده‌اند. غلظت آرسنیک در تراورتن‌ها تا ۱۰ گرم در کیلوگرم به دست آمده است. در این منطقه دو نوع تراورتن تشخیص داد شده است. تراورتن‌های با منشا شکافی با سنگ بستر کربناته، آرسنیک کمی داشته‌اند و آب آنها بیش از ۱۵۰ میکروگرم در لیتر آرسنیک دارد. تراورتن‌های تپه‌ای غنی از ناخالصی غیرکربناته با بستر آتشفشانی از آرسنیک

جدول ۳. خلاصه گزارش‌های مربوط به آرسنیک در آب‌های زیرزمینی ایران در مورد منشاء آرسنیک

نام محل	گزارش کننده	منشاء آرسنیک
تبریز	برزگر و همکاران، ۲۰۱۵	اصغری مقدم و همکاران، ۲۰۱۵
خوی	اصغری مقدم و جلالی (۲۰۱۵)	واجدب قلیایی
ملکان	نوروزی و همکاران (۲۰۱۶)	انسانزا و تجزیه سولفید
بهار	توزندجانی و همکاران، ۲۰۱۷	کشاورزی
دشت طیس	پازند و سروسنایی، ۲۰۱۳	تجزیه سولفید
دشت فردوس	پازند، ۲۰۱۴	انحلال احیایی
دشت بافق	پازند، ۲۰۱۸	انحلال احیایی
دشت بردسیر کرمان	عباس نژاد و همکاران، ۲۰۱۳	واجدب قلیایی
دشت انار	دهقانی و عباس نژاد، ۲۰۱۱	عباس نژاد، ۱۳۸۸
راین	پازند و جوانشیر، ۲۰۱۳	انحلال احیایی و اکسید شدن سولفیدها
راین	نظری و عباس نژاد، ۲۰۱۵	واجدب و هیدروترمال
دشت چهاردولی	صفری و همکاران، ۱۳۹۵	واجدب
دشت سیرجان	دهبندی و همکاران، ۲۰۱۹	تبخیر و نفوذ آب شور غنی از آرسنیک
دشت جیرفت	ابولپور و همکاران، ۲۰۲۱	انسانزاد
منطقه میداوود	چیت سازان و همکاران، ۲۰۰۹	انحلال احیایی
میاندوآب	نوروزی و اصغری مقدم، ۲۰۲۲	زمین زاد
چشمه آبگرن نیر و مشکین شهر	مدبری و یکتا، ۲۰۱۴	ژئوترمال
چشمه های آب گرم سبلان	مسافری و همکاران، ۲۰۱۴	صادقی و همکاران، ۲۰۱۷
چشمه های آبگرم خرقان	یزدی و همکاران، ۲۰۱۵	ژئوترمال و معدنکاری
آذربایجان غربی	کشاورزی و همکاران، ۲۰۱۱	فعالیت هیدروترمال
قروه کردستان	نصرآبادی و بیدآبادی (۲۰۱۳)	ژئوترمال
قروه، تکاب و بیجار	کشاورزی، ۱۳۹۰	ژئوترمال
اردبیل	مسافری و همکاران، ۲۰۱۴	ژئوترمال و زمین زاد
منطقه چلیو	طاهری و همکاران، ۲۰۱۷	اکسید شدن سولفیدها
منطقه چلیو	طاهری و همکاران، ۲۰۱۶	ژئوترمال
تفتان	شاگری، ۲۰۱۵؛ قریشی و همکاران، ۲۰۲۰	ژئوترمال
بزمان	دشایی و همکاران، ۲۰۲۲	ژئوترمال
تکاب	شریفی و همکاران، ۲۰۱۶	ژئوترمال
نوق	حسن زاده و عباس نژاد، ۲۰۲۴	واجدب
شهداد	غلامی گودیزی، ۱۴۰۱	تبخیر
شهربابک	سلطانی نژاد، ۱۴۰۳	تبخیر، تجزیه سولفیدها و ژئوترمال

منابع

1. Hamza, M., Alam, S., Rizwan, M. and Naz, A., 2022. Health Risks Associated with Arsenic Contamination and Its Biotransformation Mechanisms in Environment: A Review. *Hazardous Environmental Micro-pollutants, Health Impacts and Allied Treatment Technologies*, pp.241-288.
2. Cullen, W.R. and Reimer, K.J., 2016. Arsenic is everywhere: cause for concern?. Royal Society of Chemistry.
3. Ravenscroft, P., Brammer, H. and Richards, K., 2009. Arsenic pollution: a global synthesis. John Wiley & Sons.
4. Henke, K. (2009). Arsenic: environmental chemistry, health threats and waste treatment. John Wiley & Sons.
5. Smedley, P.L. and Kinniburgh, D.G., 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied geochemistry*, 17(5), pp.517-568.

6. Garelick, H., Jones, H., Dybowska, A. and Valsami-Jones, E., 2008. Arsenic pollution sources. Reviews of environmental contamination volume 197: International perspectives on arsenic pollution and remediation, pp.17-60.
7. Garelick, H. and Jones, H. eds., 2008. Reviews of Environmental Contamination Volume 197: Arsenic Pollution and Remediation: An International Perspective (Vol. 197). Springer Science & Business Media.
8. Kuhlmeier, P.D., 1997. Partitioning of arsenic species in fine-grained soils. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47(4), pp.481-490.
9. Asghari Moghaddam, A. and Barzegar, R., 2015. Considering factors affecting high Arsenic concentration in groundwater resources of Tabriz Plain aquifers. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94), pp.177-190.
10. Barzegar, R., Asghari Moghaddam, A. and Kazemian, N., 2015. Assessment of heavy metals concentrations with emphasis on arsenic in the Tabriz plain aquifers, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74, pp.297-313.
11. Asghari Moghaddam, A. and Jalali, L., 2015. Investigation of Arsenic Anomalies and Its Probable Origin in Groundwater of Khoy Plain. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 24(94), pp.147-154.
12. Norouzi, H., Nadiri, A., & Asghari Moghadam, A. (2016). Investigation of groundwater contamination in Malekan Plain due to Arsenic. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 13. 3(2), 151-166. Touzandejani, M., Soffianian, A., Mirghafari, N. and Soleimani, M., 2017. Assessment of arsenic contamination probability of groundwater in Hamedan-Bahar Basin using geostatistical methods. *Water and Soil*, 31(3), pp.۸۸۵-۸۷۴.
13. Pazand, K. and Sarvestani, J.F., 2013. Hydrogeochemical investigation in an arid region of Iran (Tabas, Central Iran). *Environmental earth sciences*, 70, pp.743-752.
14. Pazand, K., 2014. Geochemical and hydrogeochemical evolution of groundwater in Ferdows area, northeast of Iran. *Environmental earth sciences*, 71, pp.685-695.
15. Pazand, K., 2018. Controls on the distribution of arsenic and rare earth elements in groundwaters of the Bafgh city area, central Iran. *Water Science and Technology: Water Supply*, 18(5), pp.1590-1597.
16. Abbasnejad, A., Mirzaie, A., Derakhshani, R. and Esmaeilzadeh, E., 2013. Arsenic in groundwaters of the alluvial aquifer of Bardsir plain, SE Iran. *Environmental earth sciences*, 69, pp.2549-2557.
17. Khorasanipour, M. and Esmaeilzadeh, E., 2015. Geo-genic arsenic contamination in the Kerman Cenozoic Magmatic Arc, Kerman, Iran: Implications for the source identification and regional analysis. *Applied Geochemistry*, 63, pp.610-622.
18. Dehghani, M. and Abbasnejad, A., 2011. Cadmium, Arsenic, Lead and nitrate pollution in the groundwater of Anar Plain.
19. Abbasnejad, A., 2011. Pollution of Anar plain with respect to cadmium, arsenic, lead and nitrate. *Journal of Environmental Studies*, 36(56), pp.87-100.
20. Pazand, K. and Javanshir, A.R., 2013. Hydrogeochemistry and arsenic contamination of groundwater in the Rayen area, southeastern Iran. *Environmental earth sciences*, 70, pp.2633-2644.
21. Nazari, Y. and Abbasnejad, A., 2015. Determining the origin and distribution of arsenic in groundwater in the rayen plain (southeast of kerman) using statistical techniques. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(99), pp.261-270.
22. Safari, S.H., Asghari Moghaddam, A., Nadiri, A. and Siahcheshm, K., 2016. Arsenic source and mechanism of its releases into groundwater resources of Chahardoli plain, Kurdistan province. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 25(99), pp.261-270.
23. Dehbandi, R., Abbasnejad, A., Karimi, Z., Herath, I. and Bundschuh, J., 2019. Hydrogeochemical controls on arsenic mobility in an arid inland basin, Southeast of Iran: The role of alkaline conditions and salt water intrusion. *Environmental Pollution*, 249, pp.910-912.
24. Rahnamarad, J., Derakhshani, R. and Abbasnejad, A., 2020. Data on arsenic contamination in groundwater of Rafsanjan plain, Iran. *Data in brief*, 31, p.105772.
25. Abolpour, B., Najaf Tarqi, M., Askari Dolatabad, Y. and Salahi Sarbijan, F., 2021. Risk evaluation and distribution of arsenic concentration in groundwater resources of villages in Jiroft County, Kerman Province,

Iran. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 19(3), pp.559-573.

۲۶. عباس نژاد، ب. زمین‌شناسی زیست‌محیطی دشت جیرفت، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۳۹۱.

27. Chitsazan, M., Dorranejad, M.S., Zarasvandi, A. and Mirzaii, S.Y., 2009. Occurrence, distribution and source of arsenic in deep groundwater wells in Maydavood area, southwestern Iran. *Environmental geology*, 58, pp.727-737.
28. Sheikhi, S., Faraji, Z. and Aslani, H., 2021. Arsenic health risk assessment and the evaluation of groundwater quality using GWQI and multivariate statistical analysis in rural areas, Hashtroud, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, pp.3617-3631.
29. Norouzi, H. and Moghaddam, A.A., 2022. Determining the origin of arsenic anomalies in groundwater using multivariate statistical methods (case study: Miandoab plain aquifer, NW of Iran). *Environmental Earth Sciences*, 81(10), p.301.
30. Modabberi, S. and Jahromi Yekta, S.S., 2014. Environmental geochemistry and sources of potentially toxic elements in thermal springs in the Sabalan volcanic field, NW Iran. *Environmental earth sciences*, 71, pp.2821-2835.
31. Mosaferi, M., Shakerkhatibi, M., Dastgiri, S., Jafar-abadi, M.A., Khataee, A. and Sheykholeslami, S., 2014. Natural arsenic pollution and hydrochemistry of drinking water of an urban part of Iran. *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*, 1(1), pp.7-16.
32. Mosaferi, M., Sheykholeslami, S., Dastgiri, S. and Shakerkhatibi, M., 2017. Determination of arsenic in recreational hot water springs in sarein-ardabil region considering possible dermal exposure. *Medical Journal of Tabriz University of Medical Sciences*, 39(2), pp.70-76.
33. Yazdi, M., Taheri, M. and Navi, P., 2015. Environmental geochemistry and sources of natural arsenic in the Kharaqan hot springs, Qazvin, Iran. *Environmental earth sciences*, 73, pp.5395-5404.
34. Keshavarzi, B., Moore, F., Mosaferi, M. and Rahmani, F., 2011. The source of natural arsenic contamination in groundwater, west of Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 3, pp.135-147.
35. Nasrabadi, T. and Bidabadi, N.S., 2013. Evaluating the spatial distribution of quantitative risk and hazard level of arsenic exposure in groundwater, case study of Qorveh County, Kurdistan Iran. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10, pp.1-8.
۳۶. کشاورزی، ب. زمین‌شناسی پزشکی و منشاء آرسنیک در کمر بند دگرگونی-ماگمایی سندنجان-سیرجان شمالی، پایان نامه دکترا، دانشگاه شیراز، ۱۳۹۰.
37. Taheri, M., Gharaie, M.H.M., Mehrzad, J., Afshari, R. and Datta, S., 2017. Hydrogeochemical and isotopic evaluation of arsenic contaminated waters in an argillic alteration zone. *Journal of geochemical exploration*, 175, pp.1-10.
38. Shakeri, A., Ghoreyshinia, S. and Mehrabi, B., 2015. Surface and groundwater quality in Taftan geothermal field, SE Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 7, pp.205-218.
39. Sharifi, R., Moore, F. and Keshavarzi, B., 2016. Mobility and chemical fate of arsenic and antimony in water and sediments of Sarouq River catchment, Takab geothermal field, northwest Iran. *Journal of environmental management*, 170, pp.136-144.
40. Mohammadi Z., Claes H., Cappuyns V., Nematollahi MJ., Helser J., Amjadian K., and Swennen R. 2021, High geogenic arsenic concentrations in travertines and their spring waters: Assessment of the leachability and estimation of ecological and health risks. *Journal of hazardous materials*. 409:124429 ;5.
41. Hassanzadeh, B. and Abbasnejad, A., 2024. Arsenic Concentration in Groundwater Resources of the Noug Plain (Iran) and Evaluation of Influencing Factors, *Civil and Geoengineering Letters* 1(2), 1-11 .
۴۲. غلامی گودیزی، ف.، ۱۴۰۱، هیدروژئوشیمی زیست‌محیطی دشت شهداد، استان کرمان، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۴۳. سلطانی نژاد، ف.، ۱۴۰۳، بررسی هیدروژئوشیمی زیست‌محیطی آرسنیک در سفره آب زیرزمینی دشت شهر بابک، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۴۴. عباس نژاد ا. و عباس نژاد ب.، ۱۴۰۳، آرسنیک در محیط زیست، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان.

هرباریوم‌ها به‌عنوان زیرساخت‌های داده‌ای تنوع زیستی، از مجموعه‌های گیاهی تا پایگاه‌های داده هوشمند

فرخ قهرمانی نژاد^{۱*}، حمید نظری^۲، مریم خواجه پیری^۳، احسان حسینی^۱

۱. گروه علوم گیاهی، دانشگاه خوارزمی
۲. گروه زیست‌شناسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان
۳. گروه زیست‌شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان
fgh@khu.ac.ir
نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

هرباریوم‌ها که در گذشته عمدتاً به‌عنوان مجموعه‌هایی فیزیکی از گیاهان خشک‌شده شناخته می‌شدند، امروزه به زیرساخت‌های عظیم داده‌محور برای پایش و مدیریت تنوع زیستی تغییر ماهیت داده‌اند. هر نمونه هرباریومی، فراتر از یک نمونه فیزیکی، ثبتي دقیق از حضور گونه در ابعاد زمان و مکان است که زیربنای مطالعات گوناگونی از رده‌بندی و سیستماتیک مولکولی گرفته تا مدل‌سازی توزیع گونه‌ها، پایش تغییرات اقلیمی و پژوهش‌های باستان‌شناسی را تشکیل می‌دهد. در این مقاله، با اتخاذ رویکردی تحلیلی، ابتدا مفهوم هرباریوم در قالب یک سیستم داده‌ای تبیین شده، سپس چرخه عمر یک نمونه از برنامه‌ریزی جمع‌آوری تا دیجیتال‌سازی و بهره‌برداری نوین علمی تشریح می‌گردد. تمرکز اصلی این پژوهش بر نقش فناوری‌های نوظهور نظیر توالی‌یابی نسل جدید، داده‌های بزرگ و هوش مصنوعی در تحول کارکردهای هرباریوم است. همچنین ابعاد حقوقی و اخلاقی بین‌المللی از جمله پروتکل ناگویا در مدیریت این مجموعه‌ها بررسی می‌شود. در نهایت، با نگاهی به وضعیت هرباریوم‌های مرجع، چالش‌ها و چشم‌انداز آینده این زیرساخت‌های حیاتی مورد واکاوی قرار می‌گیرد تا نقشه راهی برای گذار از انبار نمونه به پایگاه داده‌های هوشمند ترسیم شود.

کلید واژگان: تنوع زیستی، دیجیتال‌سازی، توالی‌یابی DNA، مدل‌سازی توزیع گونه‌ها، پروتکل ناگویا، هوش مصنوعی

مقدمه

تنوع زیستی سیاره زمین با سرعتی بی‌سابقه در حال تغییر است و در این میان، درک صحیح از الگوهای توزیع و فرایندهای تکاملی گیاهان، بیش از هر زمان دیگری به دسترسی به داده‌های دقیق و تاریخی وابسته است. هرباریوم‌ها (گیاکده‌ها) که به طور سنتی به عنوان گنجینه‌های فیزیکی از گیاهان خشک‌شده شناخته می‌شدند، امروزه در آستانه یک تحول بنیادین قرار دارند. این نهادها دیگر تنها مخازنی برای گیاه‌شناسی سنتی نیستند، بلکه به عنوان زیرساخت‌های داده‌ای تنوع زیستی^۳ در قرن بیست و یکم بازتعریف شده‌اند [۱]. هر نمونه هرباریومی در دنیای امروز، یک واحد اطلاعاتی چندبعدی است که داده‌های ریخت‌شناسی، ژنتیکی، بوم‌شناختی و زمانی را در خود نهفته دارد.

با ظهور عصر دیجیتال و پیشرفت در فناوری‌های تصویربرداری با وضوح بالا، مفهوم هرباریوم مجازی مرزهای فیزیکی را درنوردیده و امکان دسترسی جهانی به داده‌های مجموعه‌ها را فراهم کرده است [۲]. (شکل ۱).

علاوه بر این، استخراج DNA از نمونه‌های تاریخی و استفاده از روش‌های توالی‌یابی نسل جدید (NGS)، هرباریوم‌ها را به



شکل ۱. دیجیتال‌سازی نمونه‌های هرباریومی، دسترسی جهانی و ماندگاری بی‌پایان این گنجینه‌های گیاهی را برای نسل‌های آینده تضمین می‌کند.

بیوبانک‌های ژنومیک تبدیل کرده است که پاسخگوی پرسش‌های پیچیده در حوزه فیلوژنی و حفاظت زیستی هستند [۳]. از سوی دیگر، چالش‌های جهانی نظیر تغییر اقلیم، تقاضا برای تحلیل‌های کلان‌داده بر پایه نمونه‌های هرباریومی را افزایش داده است تا بتوان تغییرات در زمان گلدهی و جابه‌جایی محدوده‌های جغرافیایی گونه‌ها را با دقت پیش‌بینی کرد [۴].

مقاله حاضر با اتخاذ رویکردی تحلیلی و داده‌محور، بر نقش نوین هرباریوم‌ها به عنوان زیرساخت‌های اطلاعاتی در مطالعات هوشمند

1. NGS: Next-Generation Sequencing
2. Big Data

3. Biodiversity Data Infrastructures

که بر روی برگه‌های مقوایی با ابعاد استاندارد نصب و برچسب‌گذاری شده‌اند. اما در نگرش نوین، هر نمونه فراتر از یک نمونه فیزیکی، یک حسگر زیستی و یک رکورد داده‌ای^۱ در مقیاس زمان و مکان محسوب می‌شود [۱]. در این نگاه، اعتبار علمی هر نمونه منوط به وجود سه‌گانه اطلاعاتی (نام گونه، مکان دقیق و زمان ثبت) است. داده‌های هرباریومی می‌توانند الگوهای تنوع زیستی را با دقت مناسبی بازنمایی کرده، در بسیاری موارد نسبت به داده‌های حاصل از مشاهدات عمومی، سوگیری کمتری داشته باشند [۷][۶]. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، طبق استانداردهای بین‌المللی تبادل داده‌های تنوع زیستی، یک رکورد کامل هرباریومی باید شامل موارد زیر باشد.



شکل ۲. داده‌های یک نمونه ثبت شده هرباریومی، طبق استانداردهای بین‌المللی.

تغییرات اقلیمی و بررسی جابه‌جایی تقویم گلدهی گیاهان در طول سده‌ها است [۹].

علاوه بر نمونه‌های خشک استاندارد، هرباریوم‌های پیشرو برای پاسخ به نیازهای پژوهشی نوین، مجموعه‌های زیر را نیز ادغام کرده‌اند.

– **بانک بافت و DNA:** نگهداری قطعات گیاهی در سیلیکاژل یا فریزرهای دمای فوق پایین جهت تضمین کیفیت استخراج اسیدهای نوکلئیک برای مطالعات نسل جدید توالی‌یابی (NGS) [۱۰].

شکل ۳ بخشی از دمای ذخیره شده در هرباریوم باغ گیاه‌شناسی کیو را که در ظروف مخصوص شماره‌گذاری شده‌اند نشان می‌دهد.



شکل ۳. ظروف مخصوص ذخیره DNA در هرباریوم باغ گیاه‌شناسی کیو لندن (تصویر از وبسایت باغ گیاه‌شناسی کیو).

تنوع زیستی و فناوری‌های مرتبط تمرکز دارد. هدف از این نوشتار، تبیین جایگاه هرباریوم در اکوسیستم داده‌های علمی نوین و بررسی چالش‌های انتقال از هرباریوم سنتی به دیجیتال در راستای مدیریت پایدار تنوع زیستی است.

مقاله حاضر در ادامه مطالعه قهرمانی [۵]، با تمرکز بر نقش داده محور و فناوری‌ها تدوین شده است.

۲- هرباریوم به‌عنوان یک سیستم داده‌ای

۲-۱. تعریف هرباریوم در نگاه داده‌محور

در تعاریف کلاسیک، هرباریوم مجموعه‌ای از نمونه‌های گیاهی است

– **هویت زیستی و تبارشناختی:** نام علمی به‌روز (شامل سرده، گونه و واحدهای زیرگونه‌ای) که بر اساس آخرین تغییرات رده‌بندی در پایگاه‌هایی مثل IPNI اصلاح شده باشد.

– **اطلاعات گردآوری:** نام گردآورنده و شماره جمع‌آوری که امکان ردیابی نمونه در سایر مجموعه‌ها را فراهم می‌کند.

– **فراادهای مکانی و بوم‌شناختی:** مختصات جغرافیایی دقیق (طول و عرض جغرافیایی)، از سطح دریا و شرح ویژگی‌های زیستگاه. دقت این داده‌ها برای تحلیل‌های مدرن نظیر مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (SDM) حیاتی است [۸].

– **فراادهای زمانی:** تاریخ دقیق جمع‌آوری که زیربنای مطالعات



شکل ۴. مجموعه‌هایی که علاوه بر نمونه‌های خشک استاندارد، در هرباریوم‌ها نگهداری می‌شوند. نمونه‌های بافت زنده (سمت راست) پس از قرار گرفتن در سیلیکاژل، در فریزر قرار داده می‌شوند.

این ساختار نظام مند داده‌ها باعث می‌شود هرباریوم به عنوان یک زیرساخت در شبکه جهانی اطلاعات تنوع زیستی عمل کرده و از مرزهای یک انبار فیزیکی فراتر رود.

۳- تحول تاریخی هرباریوم‌ها: از مخزن فیزیکی تا زیرساخت دیجیتال

۳-۱. مسیر جهانی: از مجموعه‌های پزشکی تا کلان‌داده

هرباریوم‌ها از مهم‌ترین منابع علمی در مطالعات گیاه‌شناسی، تنوع زیستی و تاریخ طبیعی به شمار می‌آیند و نمونه‌های نگهداری شده در آن‌ها، علاوه بر کاربردهای تاکسونومیک و شناسایی گونه‌ها، به عنوان اسناد تاریخی ارزشمند برای بررسی تغییرات فلور، پراکنش گیاهان و تحولات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. بخش قابل توجهی از مجموعه‌های ارزشمند هرباریومی جهان حاصل سفرهای علمی و اکتشافی قرن نوزدهم است که با هدف مطالعه مناطق ناشناخته، انجام شدند. در این سفرها پژوهشگران علاوه بر مطالعات جغرافیایی و طبیعی، اقدام به گردآوری نمونه‌های گیاهی کردند که امروزه اهمیت فراوانی در بازسازی پوشش گیاهی گذشته و مطالعات تاریخی دارند [۱۸] [۱۹]. نمونه‌ای برجسته از این اهمیت، مجموعه گیاهان گردآوری شده در سفر علمی چادبورن^۲ به گرینلند در سال ۱۸۶۰ است که شامل بیش از ۲۲۰ نمونه گیاهی و ۹۳ آرایه بوده و به عنوان یکی از قدیمی‌ترین و منظم‌ترین مجموعه‌های هرباریومی غرب گرینلند شناخته می‌شود. بررسی مجدد این نمونه‌ها پس از گذشت بیش از ۱۶۰ سال نشان داده است که مجموعه‌های هرباریومی کهن همچنان دارای ارزش علمی، تاریخی و تاکسونومیک قابل توجهی هستند و می‌توانند در مطالعات فلور تاریخی، تغییرات محیطی و تاریخ اکتشافات علمی مورد استفاده قرار گیرند [۲۰] [۲۱].

ریشه‌های هرباریوم مدرن به دوران رنسانس در اروپا (قرن شانزدهم) بازمی‌گردد؛ زمانی که «لوکا گینی»^۳، پزشک و گیاه‌شناس ایتالیایی، برای اولین بار روش خشک کردن گیاهان تحت فشار و چسباندن

– زیلاریوم: بایگانی نمونه‌های چوبی جهت مطالعات آناتومی، درخت‌گاه‌شناسی یا دندرولوژی و شناسایی گونه‌های تجاری (شکل ۴)
– مجموعه‌های نگهداری شده در مایع: نگهداری نمونه‌ها در محلول‌های تثبیت‌کننده (مانند FAA) برای حفظ ساختار سه‌بعدی اندام‌های ظریف و گل‌های پیچیده که در روش خشک کردن از بین می‌روند (شکل ۴).

موانع فنی ناشی از نمونه‌های DNA کم کیفیت و تخریب شده که در نمونه‌های بسیار قدیمی یا به خوبی خشک نشده یافت می‌شوند، در بسیاری از موارد به وسیله فناوری‌های توالی‌یابی نسل جدید برطرف شده‌اند. در نتیجه، از اوایل قرن بیست و یکم، حجم عظیم دیگری از داده‌های ژنتیکی و فیلوژنتیکی استخراج شده از مجموعه‌های تاریخ طبیعی در دسترس قرار گرفت [۱۱] [۱۲] [۱۳] [۱۴] [۱۵].

۲-۲. اصطلاحات کلیدی و نقش آن‌ها در استانداردسازی علمی

برای اینکه هرباریوم از یک مجموعه شخصی به یک سیستم مرجع جهانی تبدیل شود، بکارگیری اصطلاحات و استانداردهای زیر الزامی است.

نمونه شاهد: این نمونه‌ها سندیت علمی پژوهش‌ها هستند. هرگونه تحقیق در حوزه‌های فیتوشیمی، ژنتیک یا اکولوژی بدون سپردن نمونه شاهد به یک هرباریوم رسمی، فاقد قابلیت تکرارپذیری علمی است [۱۶].

نمونه تیپ: این نمونه‌ها در واقع استاندارد طلایی نام‌گذاری گیاه‌شناسی هستند. هر نام علمی جدیدی که منتشر می‌شود، باید به یک نمونه فیزیکی (معمولاً هولوتیپ) در یک هرباریوم معتبر متصل باشد. این نمونه‌ها به دلیل ارزش غیرقابل جایگزین، معمولاً در بخش‌های با امنیت بالا نگهداری می‌شوند.

اکسیکاتا^۱: توزیع مجموعه‌های شماره‌دار همسان بین هرباریوم‌های مختلف جهان، نه تنها ضریب ایمنی حفظ داده‌ها را بالا می‌برد، بلکه به هماهنگی بین‌المللی در تفسیر گونه‌ها کمک شایانی می‌کند.

1. Exsiccata
2. Paul A. Chadbourne

3. Luca Ghini

هرباریوم در منابع کلاسیک به کار نرفته است، اما دانشمندان معروفی همچون ابوعلی سینا در کتاب *قانون در طب و زکریای رازی در الحاوی*، با دقت زیادی به توصیف ویژگی‌های ریخت‌شناسی و دارویی گیاهان پرداخته‌اند. پزشکان و عطاران در گذشته برای حفظ اصالت داروها، نمونه‌های خشک گیاهی را در بسته‌بندی‌های خاصی نگهداری می‌کردند که می‌شود آن را فرمی اولیه از مجموعه‌های گیاهی دانست. تحول مدرن هرباریوم در ایران با تأسیس مدرسه دارالفنون آغاز شد. با شکل‌گیری دانشگاه‌های مختلف، هرباریوم‌های دانشگاهی و ملی متعددی ایجاد شدند. امروزه، هرباریوم‌های ایران نه تنها به عنوان آرشیو فلوریستیک، بلکه به عنوان مراکز اصلی مطالعات فیلوژنی مولکولی و پایش تنوع زیستی در منطقه غرب آسیا شناخته می‌شوند و در حال گذار به سمت دیجیتال‌سازی مرجع هستند [۵].

۴- چرخه عمر نمونه هرباریومی: از میدان تا پایگاه داده (رویکرد مرحله‌به‌مرحله)

تبدیل یک گیاه در طبیعت به یک نمونه استنادی در هرباریوم، فرایندی دقیق است که استاندارد بودن هر مرحله از آن، ارزش علمی نهایی نمونه را تعیین می‌کند. شکل ۵ چرخه عمر نمونه هرباریومی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. چرخه و مراحل که یک نمونه هرباریومی پشت سر می‌گذارد. نگهداری ایمن نمونه و داده‌ها • به روزرسانی و پشتیبان‌گیری • انتقال دانش و نمونه به نسل‌های آینده

گام ۲: جمع‌آوری میدانی و ثبت کلان-داده‌ها

نمونه باید نماینده واقعی جمعیت باشد. اولویت با جمع‌آوری گیاهان کامل (شامل ریشه، ساقه، برگ، گل و در صورت امکان میوه) است - شماره جمع‌آوری: هر نمونه باید یک شماره منحصر به فرد دریافت کند که به عنوان کد شناسایی در تمام پایگاه‌های داده آتی عمل می‌کند.

- ثبت صحرائی: یادداشت ویژگی‌هایی که پس از خشک شدن از

آن‌ها بر روی کاغذ را برای اهداف آموزشی و مطالعه گیاهان دارویی ابداع کرد [۵]. در قرون هفدهم و هجدهم، عصر سفرهای اکتشافی، هرباریوم‌ها از مجموعه‌های شخصی به نهادهای علمی تبدیل شدند. نمونه‌های جمع‌آوری شده توسط کاشفانی نظیر بانک و سولاندر، شالوده هرباریوم‌های عظیم امروزی مانند هرباریوم باغ گیاه‌شناسی کیو (Kew) و هرباریوم موزه تاریخ طبیعی پاریس (P) را بنا نهادند که در ایندکس هرباریومی از مهم‌ترین و شاخص‌ترین هرباریوم‌های دنیا به شمار می‌روند [۲۲].

در قرن هجدهم، کارل لینه به صورت نظام‌مند از نمونه‌های هرباریومی برای تدوین نامگذاری دونامی، جایگاه هرباریوم را به عنوان استاندارد مرجع در رده‌بندی تثبیت کرد. در قرن نوزدهم و بیستم، با گسترش موزه‌های تاریخ طبیعی، هرباریوم‌ها به ابزار اصلی مطالعات فلوریستیک و تکاملی تبدیل شدند [۲۳]. امروزه در قرن بیست‌ویکم، هرباریوم‌ها شاهد تحولی بنیادین هستند؛ جایی که دیجیتال‌سازی و ایجاد پایگاه‌های داده برخط (مانند GBIF و iDigBio)، این مراکز را از مخازن فیزیکی محدود به زیرساخت‌های جهانی و در دسترس برای تحلیل‌های کلان‌داده تبدیل کرده است [۱].

۳-۲. پیشینه در ایران: از طب سنتی تا هرباریوم‌های نوین

سنت مستندسازی گیاهان در ایران پیشینه‌ای کهن دارد. گرچه واژه

گام ۱: برنامه‌ریزی و الزامات قانونی

پیش از عزیمت به میدان، تعیین اهداف پژوهشی (مانند بررسی‌های فلوریستیک، فیلوژنتیک یا تبارشناختی) جهت انتخاب ابزار مناسب ضروری است. در این مرحله، اخذ مجوزهای قانونی از سازمان‌های متولی منطقه بر پروتکل ناگوبا برای دسترسی به ذخایر ژنتیکی الزامی است [۵]. تجهیزات باید شامل پرس‌های استاندارد، کاغذهای خشک‌کن با قدرت جذب بالا، GPS با دقت زیاد و دفاتر یادداشت ضدآب باشد.

دست می‌روند (مانند رنگ دقیق گلبرگ‌ها، بوی گیاه، وجود لاتکس و ارتفاع گیاه زنده) اساسی است. امروزه استفاده از نرم افزارهای ثبت داده میدانی برای ثبت مستقیم مختصات و زمان، ضریب خطای انسانی را به شدت کاهش داده است [۲۴].

گام ۳: پرس و آماده سازی نمونه

هدف از این مرحله، خشک کردن سریع نمونه برای جلوگیری از فساد بافتی و در عین حال حفظ ویژگی‌های ریخت‌شناسی است.

– **آرایش نمونه:** برگ‌ها باید به گونه‌ای قرار گیرند که هم سطح رویی و هم سطح زیرین قابل مشاهده باشد. اندام‌های متراکم باید برش داده شوند تا از ایجاد برآمدگی و حبس رطوبت جلوگیری شود.

– **مدیریت رطوبت:** تعویض روزانه کاغذهای مرطوب یا استفاده از دستگاه‌های خشک‌کن با دمای کنترل‌شده (۴۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد) برای حفظ کیفیت DNA و جلوگیری از رشد قارچ‌ها ضروری است [۲۵].

گام ۴: نصب^۱ و برچسب‌گذاری

در این مرحله، گیاه بر روی مقواهای استاندارد بدون اسید نصب می‌شود.

– **فنون نصب:** استفاده از چسب‌های خنثی یا نوارچسب‌های پارچه‌ای و در مورد اندام‌های سنگین، دوختن با نخ‌های کتان توصیه می‌شود.

– **برچسب:** برچسب هرباریومی شناسنامه نمونه است. علاوه بر نام علمی و اطلاعات مکانی، افزودن بارکد فیزیکی در این مرحله، اتصال نمونه به دنیای دیجیتال را برقرار می‌سازد.

گام ۵: انبارش و حفاظت پایدار

نگهداری فیزیکی در محیطی با دمای ثابت (۱۵ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد) و رطوبت نسبی زیر ۵۰٪ برای پیشگیری از تخریب زیستی الزامی است.

مدیریت آفات: امروزه روش‌های غیرشیمیایی مانند انجامد نمونه‌های جدید در دمای ۳۰- درجه سانتی‌گراد به مدت ۷۲ ساعت جایگزین سموم خطرناک شده است تا سلامت محققان و کیفیت بافت برای استخراج DNA حفظ شود [۲۶].

گام ۶: دیجیتال‌سازی و اشتراک‌گذاری داده‌ها

دیجیتال‌سازی نقطه عطفی است که نمونه را از قفسه‌های تاریک به شبکه جهانی اطلاعات متصل می‌کند.

– **تصویربرداری:** تهیه اسکن‌های با وضوح ۶۰۰ dpi (نقطه در اینچ) یا بالاتر که شامل خط‌کش مدرج و نمودار رنگ^۲ باشد.

– **یکپارچه‌سازی:** ورود کلان‌داده‌ها به پایگاه‌های داده استاندارد (مانند نرم‌افزار Specify) و اتصال آن به شبکه‌های همکاری بین‌المللی نظیر GBIF، امکان استفاده از نمونه را در تحلیل‌های کلان‌داده فراهم می‌کند [۱] [۲۵].

گام ۷: بهره‌برداری چندمنظوره

در نهایت، نمونه وارد چرخه خدمت‌رسانی به علم می‌شود:

– **پژوهشی:** استخراج DNA برای فیلوژنی مولکولی یا آنالیز عناصر شیمیایی.

– **حفاظتی:** استفاده از نقاط ثبت‌شده برای تعیین مناطق مهم گیاهی (IPAs).

– **آموزشی و قانونی:** مستندسازی فلوربستیک برای اثبات مالکیت‌های معنوی ملی یا ارائه شواهد در دعوی زیست‌محیطی.

۵- کاربردهای هرباریوم در علوم و مدیریت تنوع زیستی

هرباریوم‌ها امروزه از نقش سنتی خود به عنوان بایگانی‌های ساکن خارج شده و به آزمایشگاه‌های زنده تبدیل شده‌اند که پاسخگوی پیچیده‌ترین پرسش‌های زیست‌شناختی و زیست‌محیطی هستند.

۵-۱. سیستماتیک، فیلوژنی و انقلاب ژنومیک

هرباریوم‌ها زیربنای اصلی تاکسونومی و توصیف تنوع زیستی زمین هستند. هر تجدیدنظر رده‌بندی یا مونوگراف یا شرح آرایه‌های جدید، مستلزم بررسی دقیق ریخت‌شناسی مقایسه‌ای در نمونه‌های هرباریومی است.

– **نقش نمونه‌های تیپ:** این نمونه‌ها به عنوان استانداردهای عینی برای نام‌گذاری علمی عمل می‌کنند و بدون دسترسی به آن‌ها، پایداری نام‌گذاری گیاهی از بین می‌رود.

– **فیلوژنی مولکولی:** با ظهور فناوری‌های نوین استخراج DNA از نمونه‌های تاریخی، هرباریوم‌ها به منبعی بی‌بدیل برای ترسیم درخت حیات تبدیل شده‌اند. این امر به‌ویژه برای گونه‌هایی که در مناطق صعب‌العبور قرار دارند یا منقرض شده‌اند، حیاتی است [۱۰].

۵-۲. تغییر اقلیم و مدل‌سازی پیش‌دستانه توزیع گونه‌ها

یکی از راهبردی‌ترین کاربردهای نوین هرباریوم، استفاده از داده‌های مکانی^۱ برای مدل‌سازی توزیع گونه‌ها (SDM) است [۲۶].

– **پایش تغییرات فنولوژیک:** بررسی نمونه‌های جمع‌آوری شده در طول بیش از یک قرن نشان می‌دهد که زمان گل‌دهی بسیاری از گونه‌ها در پاسخ به گرمایش زمین تغییر کرده است [۹].

– **پیش‌بینی الگوهای آتی:** با ترکیب داده‌های هرباریومی و

1. Mounting
2. Color checker

3. Georeferenced data

قدیمی، تنوع ژنتیکی از دست رفته در ارقام مدرن کشاورزی را شناسایی و بازیابی می‌کند.

– **قوم گیاه‌شناسی و طب سنتی:** برچسب‌های هرباریومی اغلب حاوی یادداشت‌های میدانی ارزشمندی درباره نام‌های محلی، مصارف دارویی و روش‌های سنتی استفاده از گیاهان توسط مردم محلی هستند. در موارد متعددی، این برچسب‌ها تنها سند مکتوب از دانش بومی در گذشته محسوب می‌شوند که می‌تواند سرمنشا تولید داروهای جدید باشند [۵].

شکل ۶ بخشی از پیوند هرباریوم با کشاورزی، دانش بومی و تغذیه را نشان می‌دهد.



شکل ۶. پیوند هرباریوم‌ها با کشاورزی، امنیت غذایی و دانش بومی؛ از حفاظت تنوع ژنتیکی گیاهان زراعی تا ثبت دانش سنتی جوامع محلی.

مداوم آفات در مجموعه‌های فیزیکی مستلزم بودجه پایدار است. همچنین، نیاز به متخصصانی که علاوه بر گیاه‌شناسی، در حوزه «بیوانفورماتیک» و «مدیریت پایگاه داده» مهارت داشته باشند، بیش از پیش احساس می‌شود.

– **کند بودن فرایند دیجیتال‌سازی:** بسیاری از مجموعه‌های دانشگاهی ایران هنوز دارای بانک اطلاعاتی آنلاین نیستند. این موضوع باعث می‌شود داده‌های ارزشمند ایران در تحلیل‌های جهانی تنوع زیستی (مانند GBIF) غایب باشند [۵].

– **ملاحظات حقوقی و اخلاقی:** اجرای دقیق مفاد «پروتکل ناگویا» در تبادلات بین‌المللی نمونه‌ها و حفاظت از حقوق حاکمیتی بر ذخایر ژنتیکی، نیازمند تدوین آیین‌نامه‌های داخلی منسجم‌تر در هرباریوم‌ها است.

۲-۶ چشم‌انداز و نقشه راه آینده

ایجاد شبکه ملی هرباریوم‌های ایران: یکپارچه‌سازی پایگاه‌های داده پراکنده در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی در قالب یک پلتفرم

متغیرهای بیوکلیماتیک^۱، می‌توان جابه‌جایی محدوده پراکنش گونه‌ها را پیش‌بینی کرد. این تحلیل‌ها ابزاری کلیدی برای تعیین مناطق حفاظت‌شده آینده و شناسایی گونه‌های در معرض انقراض ناشی از تغییر اقلیم هستند [۱].

۳-۵. کشاورزی، امنیت غذایی و دانش بومی (قوم گیاه‌شناسی)

هرباریوم‌ها گنجینه‌ای از خویشاوندان وحشی گیاهان زراعی هستند که حاوی ژن‌های مقاوم به تنش‌های محیطی، آفات و بیماری‌ها هستند.

– **اصلاح نباتات:** محققان با بازگشت به نمونه‌های هرباریومی

۴-۵. باستان‌شناسی، پالئوبوتانی و تاریخ علم

کاربردهای هرباریوم مرزهای زیست‌شناسی را درنور دیده و به علوم انسانی و زمین‌شناسی پیوند خورده است.

– **گیاه باستان‌شناسی:** نمونه‌های هرباریومی به عنوان مجموعه‌های مرجع برای شناسایی بقایای گیاهی، دانه‌های میکروسکوپی و گرده‌های استخراج شده از سایت‌های باستانی و لایه‌های رسوبی استفاده می‌شوند.

– **تاریخ علم و تبادلات علمی:** هر برگه هرباریوم، سندی از تاریخ سفرهای اکتشافی، روابط بین‌المللی دانشمندان و تحول اندیشه علمی در گذر زمان است. دست‌نوشته‌های دانشمندان بزرگ بر روی این برگه‌ها، منابعی دست اول برای مورخان علم جهت بازسازی شبکه‌های تبادل دانش در سده‌های گذشته است.

۱-۶. چالش‌های کنونی

کمبود بودجه و نیروی متخصص: نگهداری استاندارد و پایش

1. Bioclimatic variables

واحد، می‌تواند ایران را به قطب داده‌های گیاهی غرب آسیا تبدیل کند.

- **بهره‌گیری از هوش مصنوعی:** استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای شناسایی خودکار گونه‌ها از روی تصاویر اسکن شده و استخراج متاداده‌ها، می‌تواند سرعت دیجیتال سازی را در ایران به شکل توان‌نمایی افزایش دهد [۲۷].

- **هرباریوم به مثابه بیوبانک:** تجهیز هرباریوم‌ها به امکانات نگهداری بافت در دمای فوق‌پایین، آن‌ها را از آرشیوهای خشک به بانک‌های ژنومیک تبدیل می‌کند که پشتیبان برنامه‌های اصلاح نباتات و امنیت غذایی کشور خواهد بود.

۷- در نظر گرفتن مجموعه‌های تاریخ طبیعی به عنوان هم‌نویسندگی^۱ مقالات پژوهشی

هر چند مجموعه‌های تاریخ طبیعی در بسیاری از حوزه‌های پژوهشی افق‌های تازه‌ای گشوده‌اند، سهم حیاتی آن‌ها در مقالات پژوهشی علمی غالباً تنها در بخش قدرانی‌ها ذکر می‌شود و از این رو، مشارکت‌های بنیادی آن‌ها در پژوهش و کشف علمی به‌سختی قابل ردیابی است. در نتیجه، نقش واقعی مجموعه‌های تاریخ طبیعی تا حد زیادی نادیده گرفته شده و ارزش واقعی آنان نمایان نمی‌شود. این وضعیت در نهایت می‌تواند پایداری آن‌ها و توان آینده‌شان برای پشتیبانی از پژوهش علمی را با اختلال مواجه کند. استدلال ما این است که مجموعه‌های تاریخ طبیعی می‌توانند در آن مواردی که مشارکت آن‌ها حیاتی است، از طریق هم‌نویسندگی کامل مقالات علمی به دیده‌شدگی مناسب و مشروع دست یابند. این مشارکت می‌تواند به‌صورت موردبه‌مورد^۲ تعیین شود. وظایف زیربنایی که چنین هم‌نویسندگی‌ای را توجیه می‌کنند شامل گردآوری و نگهداری مجموعه‌ها، شناسایی‌های تاکسونومیک، تصدی‌گری علمی^۳، کار با نمونه‌ها، و حفاظت بلندمدت نمونه‌های مرجع/شاهد^۴ است. متأسفانه، تمامی این فرایندهای زمان‌بر و پرهزینه اغلب نادیده گرفته می‌شوند، با آن که مستلزم مهارت‌ها و رویه‌های متعدد، دانش تخصصی، و تخصص تاکسونومیک مبتنی بر تجربه‌ای گسترده و

جمعی هستند که طی نسل‌ها به‌دست آمده است.

مجموعه‌های تاریخ طبیعی، صرفاً به‌عنوان نام یک نهاد یا گروه، باید به‌عنوان نویسنده مقالاتی که از مجموعه‌های آن‌ها مشتق شده‌اند، فهرست شوند. چنین رویکردی می‌تواند به افزایش دیده شدن علمی مجموعه‌های تاریخ طبیعی، تقویت همکاری‌های پژوهشی و حمایت پایدار از فرایندهای تصدی‌گری علمی کمک کند.

در نهایت، امید می‌رود که این امر از تعطیلی‌های بیشتر مجموعه‌های تاریخ طبیعی جلوگیری کند و آگاهی نسبت به اهمیت آموزش و جذب تاکسونومیست‌های سطح بالا را برای گردآوری بیشتر مواد در میدان و مدیریت و تصدی‌گری مجموعه‌های تاریخ طبیعی افزایش دهد؛ همان‌گونه که پیش‌تر نیز توسط دیگران مورد تأکید قرار گرفته است [۲۸].

۸- نتیجه‌گیری

هرباریوم‌ها در قرن بیست و یکم از حالت سنتی خود خارج شده و به عنوان گره‌های حیاتی در شبکه جهانی اطلاعات زیستی ایفای نقش می‌کنند. همان‌طور که در پژوهش‌های پیشین بر اهمیت تاریخی و مبانی این نهادها تأکید شد [۵]، مقاله حاضر نشان داد که ارزش افزوده هرباریوم‌های مدرن در قابلیت تبدیل شدن نمونه فیزیکی به داده دیجیتال نهفته است. هر نمونه هرباریومی سندی است که به ما اجازه می‌دهد گذشته را بازسازی، حال را پایش و آینده تنوع زیستی را در برابر تهدیداتی چون تغییر اقلیم پیش‌بینی کنیم. برای هرباریوم‌های ایران، حرکت به سمت استانداردسازی داده‌ها، دیجیتال‌سازی گسترده و پیوستن به کنسرسیوم‌های جهانی، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت ملی برای صیانت از میراث طبیعی و علمی کشور است. خلاصه‌ای از انواع داده‌ها، فناوری‌ها و کاربردهای پژوهشی هرباریوم‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

طراحی تمامی تصاویر مقاله با بهره‌گیری از ابزار هوش مصنوعی Gemini انجام شده است.

جدول ۱. تحول کارکرد هرباریوم‌ها از مجموعه‌های گیاهی تا زیرساخت داده‌ای

خروجی و کاربرد پژوهش	فناوری/روش مرتبط	نوع داده مورد استفاده	حوزه کاربرد هرباریوم
شناسایی و توصیف گونه‌های جدید	میکروسکوپی، کلیدهای شناسایی، پایگاه‌های تاکسونومیک	داده‌های ریخت‌شناسی، نمونه‌های تیپ	رده‌بندی و تاکسونومی
بازسازی روابط تکاملی گیاهان	DNA Barcoding, NGS, Herbarium Genomics	توالی‌های ژنتیکی	فیلوژنی و ژنومیک
پیش‌بینی تغییر پراکنش گونه‌ها	تحلیل کل‌داده، GIS، SDM، داده‌های مکانی و زمانی نمونه‌ها	داده‌های پراکنش و اقلیمی	پایش تغییر اقلیم
بررسی تغییر زمان گلدهی در اثر گرمایش زمین	تحلیل سری زمانی، هوش مصنوعی	داده‌های فنولوژیک تاریخی	تغییر اقلیم
تعیین مناطق حفاظتی و گونه‌های در معرض خطر	مدل‌سازی توزیع گونه‌ها	داده‌های مکانی و حضور گونه‌ها	حفاظت و مدیریت
شناسایی ژن‌های مقاوم به تنش	ژنومیک تطبیقی	توالی‌های ژنومی	اصلاح نباتات و تنش‌های محیطی
حفظ دانش بومی و کشف ترکیبات دارویی	مستندسازی دیجیتال، آرشیو داده	تصاویر اسکن شده با وضوح 600dpi، داده‌های OCR	قوم‌گیاه‌شناسی و طب سنتی
شناسایی خودکار گونه‌ها و استخراج فراداده	مدیریت هوشمند هرباریوم	داده‌های روی برچسب‌ها	دیجیتال‌سازی مجموعه‌ها
گیاه‌باستان‌شناسی	میکروسکوپی، تصویربرداری پیشرفته	نمونه‌های هرباریومی قدیمی	مطالعه فلورهای گذشته

منابع

- Heberling, J.M. (2021). Herbaria as big data sources of plant traits. *International Journal of Plant Sciences*, 183(2). <https://doi.org/10.1086/717623>.
- King, L., Stark, J.F. & Cooke, P. (2016). Experiencing the digital world: The cultural value of digital engagement with heritage. *Heritage & Society*, 9(1), 76-101. <https://doi.org/10.1080/2159032X.2016.1246156>.
- Bakker F.T. (2017). Herbarium genomics: skimming and plastomics from archival specimens. *Webbia*, 72(1), 35-45. <https://doi.org/10.1080.00837792.2017/1313383>.
- Nithaniyal S., Asir B. & Sarkar K. (2025). Recovery of DNA signatures from historical herbarium specimens using chloroplast and nuclear barcodes. *Ecological Genetics and Genomics*, 100356, 35. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2025.100356>.
۱. قهرمانی‌نژاد، ف.، نظری، ح.، خواجه‌پیری، م.، و حسینی، ا. (۱۴۰۴). هرباریوم؛ حافظه‌ای سبز از تنوع زیستی زمین. *مجله زیست‌شناسی ایران*، ۸ (۱۶)، ۲۴۲-۲۱۸.
- Daru, B.H. & Rodriguez, J. (2023). Mass production of unvouchered records fails to represent global biodiversity patterns. *Nature Ecology & Evolution*, 7, 816-831.
- Greve, M., Lykke, A.M., Fagg, C.W., Gereau, R.E., Lewis, G.P., Marchant, R., Marshall, A.R., Ndayishimiye, J., Bogaert, J., Svenning, J.C. (2016). Realising the potential of herbarium records for conservation biology, *South African Journal of Botany*, 105, 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2016.03.017>.
- Klopper, R.R., Steyn, H.M., Baider, C., Bytebier, B., Dayaram, A., Florens, F.B.V., Rakotonirina, N., Raimondo, D., Sosef, M. & le Roux M.M. (2025). Digitisation of herbarium specimens to the benefit of research: An African perspective focusing on South Africa and Western Indian Ocean Island states. *Plants, People, Planet*, 1-15. <https://doi.org/10.1002/ppp3.70117>.
- Solakis-Tena, A., Casimiro-Soriguer Solanas, F. & Hidalgo-Triana, N. (2025). Retrospective phenology in western Mediterranean plants: revealing climate change patterns through herbarium specimens. *AoB Plants*, 17(6), plaf064. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plaf064>.
- Burbano H.A. & Gutaker R.M. (2023). Ancient DNA genomics and the renaissance of herbaria. *Science*, 382(6666), 59-63. <https://doi.org/10.1126/science.adi1180>.

11. Wandeler, P., Hoeck, P.E.A. & Keller, L.F. 2007. Back to the future: Museum specimens in population genetics. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(12), 634–642. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.08.017>
12. Staats, M., Erkens, R.H.J., Van de Vossen, B., Wieringa, J.J., Kraaijeveld, K., Stielow, B., Geml, J., Richardson, J.E. & Bakker, F.T. (2013). Genomic treasure troves: Complete genome sequencing of herbarium and insect museum specimens. *PLoS One*, 8(7), e69189. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069189>
13. Suchan, T., Pitteloud, C., Gerasimova, N. S., Kostikova, A., Schmid, S., Arrigo, N., Pajkovic, M., Ronikier, M., Alvarez, N. (2016). Hybridization capture using RAD probes (hyRAD), a new tool for performing genomic analyses on collection specimens. *PLoS One*, 11(3), e0151651. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0151651>
14. Zedane, L., Hong-Wa, C., Murienne, J., Jeziorski, C., Baldwin, B.G. & Besnard G. (2016). Museomics illuminate the history of an extinct, paleoendemic plant lineage (*Hesperelaea*, *Oleaceae*) known from an 1875 collection from Guadalupe Island, Mexico. *Biological Journal of the Linnean Society*, 117, 44–57.
15. Silva, C., Besnard, G., Piot, A., Razanatsoa, J., Oliveira, R.P. & Vorontsova, M.S. (2017). Museomics resolve the systematics of an endangered grass lineage endemic to north-western Madagascar. *Annals of Botany* (Oxford), 119, 339–351. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw208>
16. Viveiros-Moniz, M., García-Muñoz, A., Matias, L., Abdelaziz, M. & Muñoz-Pajares, A.J. (2025). Monitoring biodiversity in the global change era: The importance of herbaria and genetic diversity. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 67, 125862. <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2025.125862>.
17. James, S.A., Soltis, P.S., Belbin, L., Chapman, A.D., Nelson, G., Paul, D.L., Collins, M. (2018). Herbarium data: global biodiversity and societal botanical needs for novel research. *Applications in Plant Sciences*, 6(2), e1024. doi: 10.1002/aps3.1024.
18. Kane, E.K. (1856). *Arctic explorations*. Philadelphia: Childs & Peterson.
19. Lange, J. (1890). *Conspectus Florae Groenlandicae*. Meddelelser om Grønland.
20. Gilman, A.V. (2025). Botany of the 1860 Chadbourne expedition from Williams and Bowdoin Colleges to Labrador and Greenland. Part 1: Greenland. *Journal of the Botanical Research Institute of Texas* 19(2)107–128 <https://doi.org/10.17348/jbrit.v19.i2.1403>
21. Fredskild, B. (1996). A phytogeographical study of the vascular plants of West Greenland. *Meddelelser om Grønland*.
22. Thiers, B. M. (2026) (updated continuously). Index Herbariorum. <https://sweetgum.nybg.org/science/ih/>
23. Davis, C.C. (2023). The herbarium of the future. *Trends in Ecology & Evolution*, 38(5), 412–423. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.11.015>.
24. Bridson, D. & Forman, L. (1992). *The herbarium handbook*. Royal Botanic Gardens, Kew.
25. Paton, A., Antonelli, A., Carine, M., Forzza, R.C., Davies, N., Demissew, S., Dröge, G., Fulcher, T., Grall, A., Holstein, N., Jones, M., Liu, U., Miller, J., Moat, J., Nicolson, N., Ryan, M., Sharrock, S., Smith, D., Thiers, B., Victor, J., Wilkinson, T., Dickie, J. (2020). Plant and fungal collections: current status, future perspectives. *Plants, People, Planet*, 2, 499–514.
26. Willis, C.G., Ellwood, E.R., Primack, R.B., Davis, C.C., Pearson, K.D., Gallinat, A.S., Yost, J.M., Nelson, G., Mazer, S.J., Rossington, N.L., Sparks, T.H. & Soltis, P.S. (2017). Old plants, new tricks: Phenological research using herbarium specimens. *Trends in Ecology & Evolution*, 32(7), 531–546. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2017.03.015>
27. Pearson, K.D., Nelson, G., Aronson, M.F.J., Bonnet, P., Brenskelle, L., Davis, C.C., Denny, E.G., Ellwood, E.R., Goëau, H., Heberling, J.M., Joly, A., Lorieul, T., Mazer, S.J., Meineke, E.K., Stucky, B.J., Sweeney, P., White, A.E. & Soltis, P.S. (2020). Machine learning using digitized herbarium specimens to advance phenological research. *Bioscience*, 70(6), 610–620. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa044>.
28. Ferreira, C., Ríos-Saldaña, C.A. & Delibes-Mateos, M. (2016). Hail local fieldwork, not just global models. *Nature*, 326, 534. <https://doi.org/10.1038/534326b>

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی ساختار، عملکرد و زیان‌های جانبی

نگار کازری، سید محمد هادی علوی*

دانشکده زیست‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
hadi.alavi@ut.ac.ir

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

چکیده

پس از جداسازی و کشف ساختار شیمیایی تستوسترون در ۱۹۳۵، ترکیب‌های فراوانی از این هورمون از جمله استروئیدهای آنابولیک آندروژنی ساخته شدند. تغییر ساختاری در تستوسترون، خواص آنابولیک آن را افزایش داده که با ساخت پروتئین مرتبط است. ویژگی آنابولیکی استروئیدهای آنابولیک آندروژنی سبب استفاده گسترده از آن‌ها در پزشکی برای درمان بیماری‌هایی مانند کم‌خونی، بیماری‌های مزمن کلیوی و پوکی استخوان شده‌است. علاوه بر ارزش درمانی، سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک در جوانان، ورزشکاران و بدنسازان به منظور افزایش قدرت بدنی، عضله‌سازی و زیبایی، به‌طور گسترده رایج است. همانند آندروژن‌های درون‌زاد، عملکرد استروئیدهای آنابولیکی بواسطه گیرنده آندروژن است. با توجه به بیان گسترده گیرنده آندروژن در بافت‌ها و اندام‌های گوناگون بدن، سوءاستفاده از این داروها با ایجاد زیان‌های جانبی همراه است. شدت این زیان‌ها به نوع و غلظت دارو، زمان مصرف و جنسیت فرد سوءاستفاده‌کننده بستگی داشته و ممکن است اندام‌های حیاتی بدن از جمله مغز و قلب را شامل شود. این مقاله مروری به تاریخچه کشف، ساختار، عملکرد و زیان‌های جانبی ناشی از سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی بر دستگاه‌های مختلف بدن پرداخته است.

واژگان کلیدی: تستوسترون، دی‌هیدروتستوسترون، استرادیول، ناباوروری، دوپینگ

مقدمه

آندروژن‌ها و استروژن‌ها تنظیم‌کننده‌های کلیدی تولیدمثل در جنس نر و ماده هستند که از پیش‌ماده کلسترول در مسیر استروئیدسازی تولید می‌شوند. در جنس نر آندروژن‌ها هورمون‌های استروئیدی ضروری برای عملکرد دستگاه تولیدمثلی هستند که بواسطه گیرنده آندروژن عمل می‌کنند. تستوسترون آندروژن اصلی در جنس نر بوده که در پاسخ به ترشح هورمون لوتئیناز^۱ از هیپوفیز، در سلول‌های لیدیگ بیضه تولید می‌شود. هورمون تستوسترون تکوین و تمایز جنس نر، تولید اسپرم و رفتارهای جنسی را کنترل می‌کند (۱). تستوسترون توسط آنزیم ۵ α -ردوکتاز^۲ به طور برگشت‌ناپذیر به دی‌هیدروتستوسترون^۳ تبدیل می‌شود که برای تکوین و عملکرد دستگاه تولیدمثلی جنس نر ضروری است (۲). در جنس ماده، استرادیول هورمون استروئیدی کلیدی است که با فعالیت آنزیم آروماتاز^۴ از تستوسترون در مسیر استروئیدسازی تولید می‌شود. استرادیول در بروز ویژگی‌های ظاهری جنس ماده، تنظیم چرخه تولیدمثل و تخمک‌گذاری نقش دارد (۳). در جنس نر نیز، استرادیول برای تکوین و عملکرد دستگاه تولیدمثل ضروری بوده و در خودنوازی^۵ سلول‌های بنیادی جنسی و بلوغ سلول‌های جنسی نقش دارد (۴).

تستوسترون دارای ویژگی‌های آنابولیک و آندروژنی است که با

ساخت پروتئین‌ها و خصوصیات ثانویه جنسی مرتبط می‌باشد. پس از جداسازی و تولید تستوسترون، مشتقات فراوانی از آن ساخته شده که شامل استروئیدهای آنابولیک آندروژنی^۶ است که ویژگی آنابولیک بیشتری را نسبت به تستوسترون از خود نشان می‌دهند؛ این ویژگی در ارتباط با ساخت پروتئین و عضله‌سازی است (۵). فعالیت آنابولیکی تستوسترون و ترکیب‌های مشتق‌شده از آن، سبب افزایش حجم عضله و قدرت بدنی می‌شود که این موضوع همراه با اثرهای تحریکی آندروژن‌ها بر مغز و ایجاد احساس سرخوشی، افزایش خشونت و رفتارهای تهاجمی است (۶).

در دهه ۱۹۵۰ سوء مصرف استروئیدهای آنابولیک آندروژنی به طور گسترده در میان ورزشکاران و بدنسازان به منظور افزایش قدرت و زیبایی رواج یافت، بطوریکه در سال ۱۹۷۴، مصرف این مواد توسط کمیته پزشکی بین‌المللی المپیک ممنوع اعلام شد (۷). با این حال، مصرف استروئیدهای آنابولیک در طی سال‌های اخیر روبه افزایش بوده و مطابق گزارش سازمان جهانی مبارزه با دوپینگ^۷ در سال ۲۰۲۲، استروئیدهای آنابولیک با ۴۲٪ در صدر جدول ترکیباتی است که توسط ورزشکاران مورد سوءاستفاده قرار می‌گیرد. به طور کلی ۳۶/۲٪ ورزشکاران ایرانی از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی سوءاستفاده می‌کنند که ورزشکاران مرد و بدنسازان درصد مصرف

1. Luteinizing hormone, LH
2. 5 α -reductase
3. Dihydrotestosterone, DHT
4. Aromatase

5. Self-renewal
6. Anabolic androgenic steroid, AAS
7. World Anti-Doping Agency, WADA
Strychnine

بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند (۸).

عملکرد استروئیدهای آنابولیک بواسطه گیرنده آندروژن است که با توجه به پراکنش فراوان این گیرنده در بدن، سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی می‌تواند بسیاری از اندام‌ها و دستگاه‌های بدن را درگیر کند. این زیان‌ها به نوع و غلظت دارو، زمان مصرف و جنسیت فرد سوءمصرف‌کننده بستگی دارد (۹).

با توجه به گسترش سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی در میان ورزشکاران و افراد غیرورزشکار به‌منظور عضله‌سازی، افزایش توان فیزیکی بدن و جنبه‌های زیبایی مقاله حاضر به توصیف تاریخچه مختصری از کشف و سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیکی، ساختار و شیوه عملکرد آنها می‌پردازد. در پایان مقاله نیز، زیان‌های جانبی و ناخواسته این داروها بر دستگاه‌ها و بافت‌های حیاتی بدن جهت آگاهی‌بخشی بیشتر آورده شده‌است.

تاریخچه کشف، توصیف و سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی

استفاده دارویی از ترکیب‌های فعال برای بهبود فعالیت‌های کاری و ورزشی به قرن‌ها پیش بازمی‌گردد، اما با معرفی استروئیدهای آنابولیک آندروژنی این استفاده افزایش یافت. مفهوم اولیه دوپینگ به قرن‌ها پیش از میلاد مسیح بازمی‌گردد، زمانی که ورزشکاران یونانی با توجه به رشته ورزشی خود نوع خاصی از گوشت یا نان آغشته به تریاک، قارچ و استریکنین^۱ را در رژیم غذایی خود مصرف می‌کردند. همچنین جویدن برگ کوکا پیش از کارهای فیزیکی سنگین یا مصرف قارچ‌های موسکارین توسط سربازان پیش از جنگ گزارش شده‌است (۱۰). در دهه ۱۸۷۰ پزشکی با نام Charles Edouard Brown-Séquard مجموعه آزمایش‌هایی انجام داد که در آن‌ها عصاره بیضه خوکچه هندی جوان را به سگ پیر تزریق می‌کرد تا اثر جوان‌سازی را بررسی کند. اگرچه فقط یکی از این آزمایش‌ها تا حدی موفقیت‌آمیز بود. در نهایت، این پزشک ۷۲ ساله شش غلظت از فرآورده بیضه سگ و خوکچه هندی را به مدت دو هفته به صورت زیرپوستی به خود تزریق کرد و افزایش توان بدنی و اثرات جوان‌ساز آن را گزارش داد (۱۱).

کلمه دوپینگ اولین بار در سال ۱۸۸۹ در لغت‌نامه زبان انگلیسی اشاره شد که در ابتدا توصیف‌کننده دارویی حاوی تریاک به نام "Dope" بود که در مسابقات اسبدوانی در ورزش‌های چمنی به اسب‌ها داده می‌شد. واژه "DOPE" یا "DOOP" به نوشیدنی تهیه شده از انگور، مورد استفاده به عنوان محرک در طول مبارزه‌ها و مراسم مذهبی، اطلاق می‌شد؛ بعدها این مفهوم گسترش پیدا کرد و شامل سایر نوشیدنی‌های محرک نیز شد. در سال ۱۸۸۹ این اصطلاح به طور رسمی وارد لغت‌نامه انگلیسی شد و به طور ویژه

به تزریق غیرقانونی مواد به اسب‌های مسابقه اشاره داشت. در طول جنگ جهانی دوم نیز برای مقابله با خستگی و افزایش هوشیاری سربازان از آمفتامین استفاده می‌شد (۱۰) (۱۲).

تستوسترون اولین بار در سال ۱۹۳۵ توسط شیمی‌دان‌های آلمانی و هلندی با نام‌های Laquer، David، Dingemanse و Freud جداسازی شد. کمی پس از آن در همان سال، Butenandt و Hanisch، Ružička و Wettstein روش‌های تولید تستوسترون را به ترتیب در آلمان و سوئیس ارائه کردند. Butenandt و Ružička در سال ۱۹۳۹ جایزه نوبل شیمی را برای اکتشافات خود در زمینه جداسازی و ارائه روش ساخت تستوسترون دریافت کردند. جداسازی و تولید تستوسترون، با تولید تعداد زیادی از مشتقات آن از جمله استروئیدهای آنابولیک آندروژنی دنبال شد که در سال ۱۹۴۰ توصیف شدند. تا سال ۱۹۵۶ بیش از ۲۰۰ نوع استروئید آنابولیک معرفی شدند. همزمان، کاربردهای پزشکی استروئیدهای آنابولیک در دهه ۱۹۴۰ گزارش شد که برای درمان بیماری‌ها و اختلال‌هایی نظیر کم‌کاری غدد جنسی، کم‌خونی و پوکی استخوان مورد استفاده قرار می‌گرفتند (۱۳).

اگرچه اثر آنابولیک این استروئیدها توسط Kochakian در سال ۱۹۳۷ نشان داده شد، ولی استفاده از این داروها برای اهداف ورزشی و افزایش حجم عضله در دهه‌های بعد اتفاق افتاد. اولین استفاده مستند از استروئیدهای آنابولیک در ورزش، در سال ۱۹۵۲ توسط یک قایقران آلمانی به منظور افزایش قدرت بدنی و پایداری در انجام تمرین‌های سخت ورزشی و یک وزنه‌بردار روسی در سال ۱۹۵۴ با هدف افزایش توان بدنی در مسابقات قهرمانی وین ثبت شد. مصرف این داروها به سرعت در میان ورزشکاران گسترش پیدا کرد به طوری که جامعه بدن‌سازان آمریکایی در دهه ۱۹۶۰-۱۹۵۰ شروع به سوءاستفاده از این داروها کردند (۱۴).

در دهه ۱۹۶۰، سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک برای بهبود عملکرد فیزیکی و عضله‌سازی بین ورزشکاران حرفه‌ای و غیرحرفه‌ای افزایش یافت. از دهه ۱۹۸۰ استفاده از استروئیدهای آنابولیک عمومیت پیدا کرد و فقط مختص به ورزشکاران نبود و در سال ۱۹۸۸ اولین مدال المپیک از Ben Johnson ورزشکار دوی ۱۰۰ متر به دلیل استفاده از استانوزولول که از انواع استروئیدهای آنابولیکی است پس گرفته شد (۱۱).

تشخیص سوءمصرف داروها در ورزش برای اولین بار توسط کمیته بین‌المللی المپیک^۲ در دهه ۱۹۶۰ صورت گرفت و در سال ۱۹۶۴ ممنوعیت دوپینگ برای ورزشکاران اعلام شد، سپس در المپیک مونیخ در سال ۱۹۷۲ آزمایش‌های ضد دوپینگ انجام شد. کمیته بین‌المللی پزشکی المپیک مصرف استروئیدهای آنابولیک را در سال ۱۹۷۴ به طور رسمی ممنوع اعلام کرد و در سال ۱۹۸۳ روش

کارآمد برای شناسایی تستوسترون‌های خارجی با آزمایش ادرار و سنجش نسبت مقدار تستوسترون به مقدار اپی‌تستوسترون ارائه گردید. در ابتدا کمیته بین‌المللی المپیک و با پایه‌گذاری سازمان

جهانی مبارزه با دوپینگ در سال ۱۹۹۹، این سازمان مسئول ارائه مواد ممنوعه در زمینه دوپینگ است که لیست این مواد به‌طور سالانه به‌روز می‌شود (۱۲) (شکل ۱).



©Negar Kazori

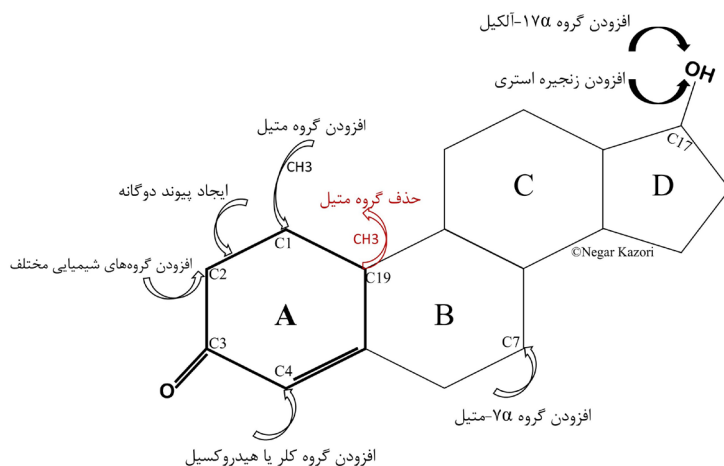
اکنون

سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی به عنوان مشکل جهانی شناخته شده است که ده‌ها میلیون نفر شامل ورزشکاران و اغلب افراد غیرورزشکار را دربرمی‌گیرد.

شکل ۱. تاریخچه کشف ساختار شیمیایی تستوسترون و ساخت استروئیدهای آنابولیک آندروژنی

ساختار استروئیدهای آنابولیک آندروژنی

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی، آنالوگ‌های شیمیایی و ساختاری تستوسترون هستند که به منظور افزایش ویژگی‌های آنابولیکی تستوسترون نسبت به خواص آندروژنی آن طراحی شده‌اند. به همین سبب استفاده نادرست از استروئیدهای آنابولیک به منظور بهبود و افزایش عملکرد ورزشی و زیبایی در ورزشکاران مشاهده می‌شود. تغییرهای ساختاری تستوسترون که باعث افزایش ویژگی‌های آنابولیک آن می‌شود، اغلب در ساختار حلقه‌ی A



شکل ۲. تغییرات ساختاری تستوسترون برای تولید استروئیدهای آنابولیک آندروژنی. استروئیدهای آنابولیک آندروژنی آنالوگ‌های ساختاری هورمون تستوسترون هستند. این استروئیدها در مقایسه با تستوسترون ویژگی آنابولیک بیشتری داشته که با تغییرات ساختاری در این هورمون تولید می‌شوند. تغییرات ساختاری که در حلقه‌های کربنی A، B و C تستوسترون اتفاق می‌افتد سبب متابولیسم آهسته دارو، افزایش تمایل به گیرنده آندروژن، مقاومت در برابر آنزیم آروماتاز و کاهش اتصال متابولیت‌های حاصل از اثر آنزیم ۵α-ردوکتاز به گیرنده آندروژن می‌شود.

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی می‌توانند به شکل خوراکی یا تزریقی مورد استفاده قرار گیرند. اکسی متولون^۱، اگزاندربولون^۲، فلوکسی مسترون^۳، مسترولون^۴ و اتیل استرنول^۵ از رایج‌ترین استروئیدهای آنابولیک خوراکی و ناندربولون دکانات^۶، استانوزولول^۷، بولدنون^۸، ترنبولون^۹ و تستوسترون پروپیونات^{۱۰} جزو شایع‌ترین استروئیدهای آنابولیک تزریقی هستند. استانوزولول نیز هم به شیوه خوراکی و هم تزریقی قابل استفاده است (۱۸). ساختار استروئیدهای آنابولیکی خوراکی باید به صورتی باشد که تحت اثر عبور اول^{۱۱} قرار نگرفته تا غیرفعال نشوند. از سوی دیگر، استروئیدهای آنابولیکی تزریقی پس از ورود به گردش خون با استراهای خون وارد واکنش می‌شوند تا به ترکیب‌های فعال تبدیل شوند، زمان فعالیت این ترکیب‌ها وابسته به نرخ جذب در محل تزریق می‌باشد و به‌طور کلی هرچه طول زنجیره استری بلندتر باشد، ترکیب‌ها آهسته‌تر وارد گردش خون شده، پس زمان عملکرد طولانی‌تر خواهد بود (۱۹).

تستوسترون به سرعت در کبد تجزیه می‌شود. برای پایداری و جلوگیری از تجزیه آن، بیش از هزار ترکیب مشتق شده از آن تولید شده است که در سه گروه دسته‌بندی می‌شوند. گروه یک شامل استروئیدهایی است که به کربن شماره ۱۷ تستوسترون گروه استر افزوده شده است که در چربی حلالیت زیادی دارند و به شکل داخل عضلانی استفاده می‌شوند. گروه دو شامل استروئیدهایی است که کربن شماره ۱۹ تستوسترون گروه متیل خود را از دست داده و ممکن است به کربن شماره ۱۷ نیز گروه استر افزوده شده باشد. استروئیدهای آنابولیک گروه سه دارای گروه الکیل در حلقه A، B یا C در ساختمان اصلی هورمون تستوسترون هستند که گروه الکیل بیش‌تر در کربن شماره ۱۷ اضافه می‌شود؛ این استروئیدها در برابر تجزیه کبدی پایدار بوده و به‌شکل خوراکی استفاده می‌شوند. گروه دو و سه استروئیدهای آنابولیکی به دلیل مصرف خوراکی سمیت کبدی ایجاد می‌کنند (۱۶) (۱۷).

1. Oxymetholone
2. Oxandrolone
3. Fluoxymesterone
4. Mesterolone
5. Ethylestrenol
6. Nandrolone decanoate

7. Stanozolol
8. Boldenone
9. Trenbolone
10. Testosterone propionate
11. First pass effect

در نتیجه کاهش شکست پروتئین‌ها، و با افزایش هورمون رشد و فاکتور رشد شبه‌انسولینی^۳ تولید شده در کبد، عضله‌سازی و تولید پروتئین اتفاق می‌افتد (۲۳).

تمام استروئیدهای آنابولیک با تمایل^۴ متفاوت به گیرنده آندروژن متصل می‌شوند. زمانی که از غلظت‌های بالاتر از سطح فیزیولوژیک دارو استفاده شده باشد و تمامی گیرنده‌های آندروژن اشباع باشند، اثر فرعی ایجاد می‌شود. این اثرهای فرعی شامل اتصال دارو به گیرنده کورتیزول و ممانعت از اثر فروگشت^۵ هورمون کورتیزول، تولید استرادیول از استروئید تزریق شده و عملکرد بواسطه گیرنده استروژن می‌باشند. استرون و استرادیول تولید شده بر مغز، تمایز جنسی، افزایش توده عضلانی و استخوان، بلوغ و عملکرد جنسی تاثیر می‌گذارد (۱۲). غلظت‌های بالا استروئیدهای آنابولیک ممکن است اثر ضد استروژن داشته باشد بطوریکه سبب کاهش بیان گیرنده آندروژن شده و استروئید آنابولیک برای اتصال به گیرنده استروژن با استروژن درون‌زاد وارد رقابت می‌شود (۵). در شرایط طبیعی، تستوسترون با اتصال به گیرنده آندروژن سبب اشباع گیرنده شده و برخی از نتایج استفاده از استروئیدهای آنابولیک ممکن است بواسطه یک یا چند سازوکار دیگر باشد (۲۰).

سازوکار عمل استروئیدهای آنابولیک شامل تنظیم بیان گیرنده آندروژن از راه مسیرهای داخل سلولی، اتصال به گیرنده آندروژن و برهم‌کنش با فعال‌کننده‌ها و مهارکننده‌های رونویسی، همچنین تداخل با گیرنده گلوکوکورتیکوئید و ایجاد خصوصیت ضد فروگشتی می‌باشد (۲۴). استروئیدهای آنابولیک با رقابت با گلوکوکورتیکوئیدها برای اتصال به گیرنده گلوکوکورتیکوئید سبب جلوگیری از شکست پروتئین‌ها در عضله شده که این موضوع معمولاً در ورزش‌های سنگین اتفاق می‌افتد. تستوسترون با اتصال به گیرنده آندروژن سبب افزایش ترشح هورمون رشد و تولید فاکتور رشد شبه‌انسولینی از کبد می‌شود. هورمون رشد با اثرهای آنابولیک و تولید پروتئین و فاکتور رشد شبه‌انسولینی سبب ایجاد سلول‌های عضلانی جدید می‌شود. همچنین استروئیدهای آنابولیک با اثر بر استئوبلاست‌ها باعث تکثیر و تمایز آن‌ها شده و باعث رشد می‌شود (۲۵).

زیان‌های جانبی سوءاستعمال استروئیدهای آنابولیک آندروژنی

زیان‌های جانبی استروئیدهای آنابولیکی به دلیل پراکنش گسترده گیرنده آندروژن در بسیاری از بافت‌ها، اندام‌ها و عملکرد بدن مشاهده می‌شود. تولید گونه‌های فعال اکسیژن و ایجاد استرس اکسیداتیو، آسیب به ماده ژنتیکی، مرگ سلولی برنامه‌ریزی شده^۶ و تغییر در تولید پروتئین‌ها از سازوکارهای رایج آسیب‌های ناشی از سوءاستفاده استروئیدهای آنابولیک آندروژنی هستند که می‌تواند

ویژگی آنابولیکی این داروها سبب استفاده گسترده از آن‌ها برای اهداف درمانی شده‌است. درمان بیماری‌های مزمن کلیوی، پوکی استخوان، بیماری‌های مرتبط با تعادل منفی نیتروژن از جمله کاربردهای استروئیدهای آنابولیک آندروژنی در زمینه پزشکی و درمان است (۲۰).

عملکرد استروئیدهای آنابولیک آندروژنی

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی به دلیل افزایش قدرت بدنی و عضله‌سازی از راه تولید پروتئین و کاهش چربی بدن مورد توجه بدن‌سازان، ورزشکاران حرفه‌ای و غیرحرفه‌ای هستند. همچنین احساس خستگی ناشی از تمرین‌های سخت و فشرده ورزشی را کم کرده و زمان بازگشت به تمرین را تسریع می‌کنند (۲۱). استروئیدهای آنابولیکی از نظر عملکرد مشابه هورمون تستوسترون هستند و سبب افزایش توان ورزشی، کاهش چربی بدن و افزایش رشد عضله می‌شوند. تستوسترون و ترکیب‌های مشتق‌شده از آن با اثرهای آندروژنی و آنابولیکی، بافت‌های تولیدمثلی و غیرتولیدمثلی را هدف قرار می‌دهند. عملکرد استروئیدهای آنابولیک آندروژنی وابسته به گیرنده آندروژن پراکنده در بافت‌ها است. دارو می‌تواند به‌طور مستقیم به گیرنده آندروژن متصل شود یا پس از اثر آنزیم ۵ α -ردوکتاز و تولید دی‌هیدروتستوسترون به گیرنده متصل شود (۲۰). اثرهای آندروژنی در ارتباط با رشد دستگاه تولیدمثل جنس نر و تکوین ویژگی‌های جنسی نر است در حالی که اثرهای آنابولیکی باعث تعادل مثبت نیتروژن و پروتئین‌سازی می‌شود (۱۸).

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی در بیشتر اوقات به‌شکل گروهی^۱ یا هرمی^۲ مورد سوءاستفاده قرار می‌گیرند. در شکل گروهی از دو یا بیش از دو استروئیدهای آنابولیکی به‌طور باهم یا خوراکی-تزریقی استفاده می‌شود در حالی که در شیوه هرمی در ابتدا از غلظت پایین دارو استفاده می‌شود و به تدریج غلظت دارو در مدت ۱۲-۶ هفته افزایش می‌یابد و در ادامه دارو از غلظت بالا به غلظت صفر کاهش می‌یابد. سوءاستفاده‌گرها معتقدند که شیوه هرمی سبب تنظیم بدن با غلظت بالا دارو شده و در ادامه فرصتی را برای بازگرداندن دستگاه هورمونی بدن به حالت ابتدایی خود فراهم می‌کند (۱۶).

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی با ایجاد تعادل مثبت نیتروژن سبب تولید پروتئین و کاهش دفع آن و در نتیجه عضله‌سازی می‌شوند. همچنین پروتئین‌سازی در سلول‌های عضله اسکلتی که نتیجه اتصال استروئید آنابولیکی به گیرنده آندروژن، انتقال و اتصال به کروماتین، رونویسی و تحریک تولید RNA پیام‌رسان، ترجمه و تولید پروتئین است (۲۲). از سوی دیگر، این استروئیدها با اتصال به گیرنده گلوکوکورتیکوئیدها باعث برداشته شدن اثر مهارگری گلوکوکورتیکوئید بر محور هورمونی کنترل‌کننده رشد شده،

1. Stacking
2. Pyramiding
3. Insulin-like growth factor

4. Receptor binding affinity
5. Catabolic effect
6. Apoptosis

منجر به اثرهای جدی، غیرقابل جبران و آسیب به اندام شود (۱۸) (شکل ۳).

دستگاه عصبی و خلق و خو

استروئیدهای آنابولیک آندروژنی با اثرگذاری در تولید، تجزیه و متابولیسم انتقال‌دهنده‌های عصبی، ایجاد استرس اکسیداتیو و مرگ سلولی برنامه‌ریزی‌شده باعث آسیب‌های مغزی و تغییر خلق‌و‌خو می‌شوند که این زیان‌ها شامل زوال و آسیب‌های عصبی، کاهش عملکردهای شناختی و اشکال در یادگیری و حافظه است. اثرهای مخرب مرتبط با خلق‌و‌خو و رفتار شامل اختلال‌های روانی، نوسان خلق و خو، رفتارهای تهاجمی و پرخاشگری، افسردگی، اختلال‌های وابستگی و اعتیاد است (۲۱).

اختلال در عملکرد تنظیمی میکروRNAها ممکن است در آسیب‌های مغزی مرتبط با استروئیدهای آنابولیک نقش داشته باشد. همچنین آسیب‌های مغزی با توجه به ارتباط میان استرس اکسیداتیو و مسیر پیام‌رسانی NF-Kb به ویژه در نواحی هیپوکامپ، جسم مخطط و قشر پیشانی متصور است. استروئیدهای آنابولیکی در غلظت‌های بالا سبب رهایی کورتیکوتروفین‌ها در اثر مهار بیشتر سلول‌های عصبی رهاکننده گابا از آمیگدال مرکزی به نوار انتهایی^۱ و ایجاد رفتارهای شبه اضطرابی می‌شوند (۲۰).

تصوربرداری عصبی نشان‌دهنده ماده خاکستری کوچک‌تر، حجم پوتامن کمتر و لایه قشری نازک‌تر در ورزشکارانی است که از استروئیدهای آنابولیکی سوءاستفاده می‌کنند. استفاده مزمن از استروئیدهای آنابولیکی سبب تغییر در بیان انتقال‌دهنده‌های عصبی کنترل‌کننده خشم و پرخاشگری می‌شود (۲۰). استفاده طولانی‌مدت از استروئیدهای آنابولیک بر مسیرهای عصبی دوپامین، سرتونین و اویپوئیدها اثر گذاشته و در افراد سوءاستفاده‌گر از این داروهای استروئیدی احتمال وابستگی و اعتیاد به سایر داروها و الکل بیشتر است (۲۷)(۲۸).

دستگاه گردش خون

آسیب دستگاه قلبی-عروقی و تغییر شاخص‌های خونی جزء شایع‌ترین عوارض استفاده از استروئیدهای آنابولیکی می‌باشد. پژوهش‌های کلینیکی و آزمایشگاهی نشان‌دهنده افزایش فعالیت سیستم رنین-آنژیوتانسین-آلدوسترون در اثر سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی است. فعالیت بیش از اندازه این سیستم حیاتی کنترل‌کننده فشار خون، منجر به تغییر و اختلال در عملکرد دستگاه قلبی-عروقی می‌شود (۱۷).

استروئیدهای برون‌زاد^۲ با تولید رادیکال‌های آزاد اکسیژن (استرس اکسیداتیو) و فعالیت‌های متابولیک باعث ایجاد بیماری‌های ماهیچه قلب، ایجاد آسیب و تغییرهای غیرقابل بازگشت در لایه میوکارد قلب نظیر هایپرتروفی^۳ بطن چپ، ضربان قلب متغیر^۴، حمله قلبی و سکت^۵ می‌شوند (۱۷). علاوه بر این، فرآیند التهاب نیز ممکن است در ایجاد آسیب‌های قلبی نقش داشته باشد. پژوهش‌های انسانی و حیوانی نشان‌دهنده اختلال در رپاریزاسیون قلبی به دنبال سوءاستفاده از تستوسترون است. سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیکی شانس زیان‌های جبران‌ناپذیر در دستگاه گردش خون نظیر ایست قلبی و مرگ ناگهانی را بالا می‌برد. سکت^۵ قلبی، تغییرهای ساختاری و اشکال در رپاریزاسیون قلبی از سازکارهای پیش‌فرض برای این موضوع است (۱۶).

آسیب‌های رگی، کاهش لیپوپروتئین با چگالی بالا^۵، افزایش لیپوپروتئین با چگالی پایین^۶ در نتیجه کاهش نسبت لیپوپروتئین با چگالی بالا به لیپوپروتئین با چگالی پایین باعث افزایش خطر گرفتگی شریان‌ها و بیماری‌های قلبی می‌شود (۹). پیش از معرفی اریتروپویتین نو ترکیب انسانی از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی برای درمان کم‌خونی استفاده می‌شد. استروئیدهای آنابولیکی با افزایش تولید اریتروپویتین کلیوی و افزایش تمایز سلول‌های بنیادی خون‌ساز سبب افزایش تعداد گلبول‌های قرمز و در نتیجه افزایش هموگلوبین و هماتوکریت خون می‌شود (۲۶). افزایش فشار خون، افزایش تعداد گلبول‌های سفید، افزایش تعداد پلاکت‌ها و ایجاد اختلال در انعقاد خون از پیامدهای سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیکی هستند (۱۶).

دستگاه گوارش

دستگاه گوارش و بخصوص کبد نیز با مصرف استروئیدهای آنابولیک آندروژنی آسیب می‌بینند. افزایش آنزیم‌های آلکالین فسفاتاز^۷، اسپاراتات آمینوترانسفراز^۸، آلانین آمینوترانسفراز^۹ و لاکتات دهیدروژناز^{۱۰} کبد، سمیت کبدی ناشی از استرس اکسیداتیو، تومورهای خوش‌خیم و بدخیم کبد از رایج‌ترین زیان‌های جانبی استروئیدهای آنابولیک در ورزشکاران است (۱۸). سوءاستفاده از ناندربولون دکانوات به مدت پنج هفته سبب افزایش نشانگرهای مرگ سلولی در پلاسما، افزایش رسوب کلاژن در پارانشیم کبدی، فضای پورت و سیاهرگ مرکز لوبولی شده‌است. رسوب کلاژن ممکن است در اثر افزایش تعداد و فعالیت سلول‌های کوپفر باشد که این خود موجب تولید سیتوکین‌های التهابی مرتبط با فیبروز کبدی می‌شود. سنگ کیسه صفرا، درد معده، اسهال و استفراغ از جمله شایع‌ترین عوارض مصرف این داروها هستند (۲۰).

1. Stria terminalis
2. Exogenous steroids
3. Hypertrophy
4. Arrhythmia
5. High Density Lipoprotein (HDL)

6. Low Density Lipoprotein (LDL)
7. Alkaline phosphatase
8. Aspartate aminotransferase
9. Alanine aminotransferase
10. Lactate dehydrogenase

دستگاه ادراری

مصرف استروئیدهای آنابولیک بر سلامت کلیه‌ها و دستگاه ادراری نیز اثر می‌گذارد. فعال شدن گیرنده آندروژن در بافت کلیه منجر به رشد سلولی و هایپرتروفی کلیه می‌شود. در موش‌های کوچک آزمایشگاهی، ناندربولون دکانوات سبب هایپرتروفی لوله پیچ‌خورده نزدیک و دور شد. علاوه بر این، تستوسترون و ناندربولون دکانوات با فعال کردن گیرنده آندروژن در ایجاد فیبروز کلیوی نیز نقش داشتند (۲۰). سوءاستفاده طولانی‌مدت از استروئیدهای آنابولیک با ایجاد استرس اکسیداتیو، افزایش لیپید پراکسیدازها و کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان سبب آسیب بافتی شده‌اند. سه ماه پس از تزریق داخل عضلانی آندروژن‌ها تغییرهای بافتی نظیر آتروفی گلوبمرول، از بین رفتن بافت پوششی لوله پیچ‌خورده نزدیک، افزایش ضخامت تیغه پایه در لوله پیچ‌خورده دور و مرگ سلولی در کلیه مشاهده شد. افزایش مقدار کراتینین در سرم در نتیجه افزایش حجم توده عضلانی، افزایش اوریک‌اسید و نیتروژن اوره خون، تولید سنگ کلیه، آسیب حاد کلیه^۱ و دفع غیرطبیعی ادرار از دیگر زبان‌های سوءاستفاده از این داروها هستند (۱۸).

دستگاه حرکتی و پوست

استروئیدهای آنابولیک با اتصال به گیرنده آندروژن سبب کاهش بیان مایوستاتین^۲ و تمایز سلول‌های بنیادی چندتوان به رده عضلانی می‌شود. این سازوکارها با افزایش تولید پروتئین و کاهش تخریب آن و با ایجاد سلول‌های عضلانی جدید و افزایش تعداد هسته سلول‌های عضله اسکلتی منجر به افزایش حجم عضله، قدرت بدنی و توان ورزشی شده است. غلظت‌های بالاتر از سطح فیزیولوژیک استروئیدهای آنابولیک باعث کاهش فعالیت ماتریکس متالوپروتئیناز^۳ شده که این می‌تواند ذخیره فاکتور رشد رگی در فضای سلولی را کم کند. با کاهش فاکتور رشد رگی، رگ‌زایی و بازسازی دچار اختلال شده و در نهایت سبب آسیب ماهیچه اسکلتی می‌شود. کوتاهی قامت در اثر بسته شدن صفحه رشد در نوجوانان، دردهای استخوانی، آسیب‌های زردپی از دیگر عوارض مصرف این استروئیدها هستند (۲۰).

ایجاد جوش در صورت^۴ در نتیجه تحریک آندروژنی غده‌های چربی پوست^۵، لکه‌های پوستی، پوست چرب و ریزش موقتی مو، الگوی ریزش مو مردانه و ایجاد موهای زائد در خانم‌ها از عوارض مصرف استروئیدهای آنابولیک بر پوست و مو است (۲۱).

دستگاه تولیدمثل

مصرف استروئیدهای آنابولیک آندروژنی سلامت تولیدمثلی و

باروری را نیز در زنان و مردان تهدید می‌کند. ناباروری، اختلال در تولید و ترشح هورمون‌های جنسی و تغییر میل جنسی از شایع‌ترین زبان‌های جانبی ویژه دستگاه تولیدمثل است.

سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیکی در زنان در ابتدا با ایجاد جوش صورت، بم شدن صدا و تغییر میل جنسی همراه است. به دلیل بیان گیرنده آندروژن و هایپرتروفی حنجره، بم شده صدا اتفاق می‌افتد. سوءاستفاده طولانی مدت نه تنها سبب اختلال در چرخه قاعدگی، عدم تخمک‌گذاری، تحلیل رحم و سینه شده بلکه می‌تواند سبب بروز ویژگی‌های مردانه نظیر الگوی ریزش مو مردانه، ایجاد موهای زائد شود که برخی از این اثرها غیرقابل بازگشت هستند (۲۱).

علاوه بر این مقدار زیاد استروئیدهای آنابولیکی در زنان سبب کاهش چربی بدن، رشد بیش از حد موهای بدن، ریزش موی سر و کچلی غیرقابل بازگشت می‌شود که این اختلال‌ها در نتیجه اشکال در محور هورمونی هیپوتالاموس-هیپوفیز-تخمندان است (۲۶).

در مردان سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیکی سبب کاهش ترشح و مقدار هورمون‌های هیپوفیزی لوتئیناز و محرک فولیکولی^۶ شده، در نتیجه تولید تستوسترون درون‌زاد در بیضه کاهش پیدا می‌کند، که در نهایت سبب کم‌کاری غدد جنسی^۷، نداشتن میل جنسی، تحلیل بیضه‌ها، کاهش تولید اسپرم، کاهش حرکت و سرعت اسپرم، تغییرهای کمی و کیفی در ماده منی می‌شود (۲۹). مرگ سلولی برنامه‌ریزی‌شده در نتیجه استرس اکسیداتیو از دیگر عامل‌های موثر بر تعداد سلول‌های جنسی است. علاوه بر این، استروئیدهای آنابولیکی با آسیب به سلول‌های سرتولی ایجاد کننده سد خونی-بیضه‌ای، تولید اسپرم را مختل می‌کنند. استروئیدهای آنابولیک بر تعداد، قطر و ضخامت لوله‌های اسپرم‌ساز نیز اثر می‌گذارند (۲۴). هایپرتروفی و سرطان پروستات، اشکال در تخلیه مثانه از دیگر اثرهای مخرب مرتبط با دستگاه تولیدمثل جنس نر است. همچنین تبدیل محیطی آندروژن‌ها به استرادیول و استرون در مردان ممکن است سبب بزرگ شدن سینه و بروز ویژگی‌های زنانه شود (۱۸).

سایر زبان‌ها

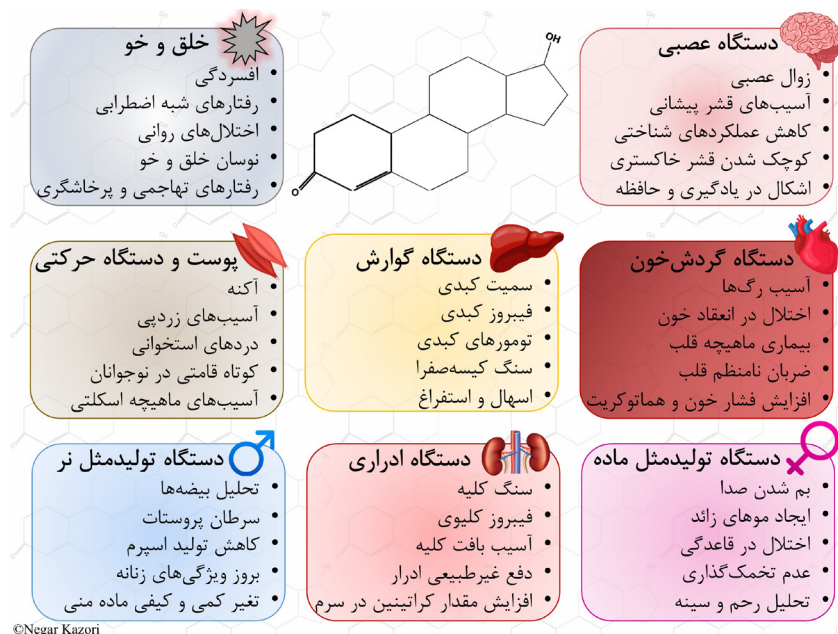
به دلیل بیان گیرنده آندروژن در غده تیروئید سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیکی سبب کاهش مقدار هورمون‌های تیروئیدی تیروکسین^۸ و تری‌یدوتیرونین^۹ شده و مقدار گلوبولین متصل‌شونده به هورمون‌های تیروئیدی نیز کاهش می‌یابد. همچنین، استروئیدهای آنابولیکی سبب افزایش گلوکز خون در نتیجه مقاومت انسولینی و بروز علائم دیابت نوع دو می‌شود (۲۶) در مورد استروئیدهای آنابولیکی غیرخوراکی، تزریق داخل عضلانی

1. Acute renal failure
2. Myostatin
3. Matrix metalloproteinase-2
4. Acne
5. Sebaceous gland

6. Follicle stimulating hormone, FSH
7. Hypogonadotropic hypogonadism
8. Thyroxine, T4
9. Triiodothyronine, T3

در افرادی که از سرنگ‌های مشترک استفاده می‌کردند، گزارش شده‌است (۱۸).

در شرایط بهداشتی نامناسب ممکن است سبب آلودگی‌های باکتریایی و قارچی شود. همچنین هپاتیت B یا C و بیماری ایدز



شکل ۳. زیانهای جانبی استفاده از استروئیدهای آنابولیک آندروژنی. مصرف استروئیدهای آنابولیک آندروژنی عوارض ناخواسته‌ای را ایجاد می‌کند که به دلیل پراکنش بالای گیرنده آندروژن است و تمام اندام‌ها، بافت‌ها و عملکرد بدن را درگیر می‌کند.

این گیرنده در بدن، زیانهای جانبی خطرناک و غیرقابل بازگشت نشان داده شده است. افزایش دانش و آگاهی بخشی در مورد خطر استفاده خودسرانه از این داروها سبب ارتقای سلامت جامعه و ورزش سالم می‌شود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (طرح شماره ۴۰۴۹۵۴۶) انجام شده است.

نتیجه‌گیری

با کشف و معرفی ویژگی‌های شیمیایی هورمون تستوسترون، استروئیدهای آنابولیک آندروژنی با ویژگی آنابولیکی بیشتر تولید شدند. تحریک پروتئین‌سازی و افزایش قدرت بدنی این ترکیب‌ها، توجه جوانان، ورزشکاران و بدن‌سازان به سوءاستفاده از استروئیدهای آنابولیک به منظور تسریع عضله‌سازی و زمان بازگشت به تمرین‌های ورزشی جلب نمود. عملکرد استروئیدهای آنابولیک بواسطه گیرنده آندروژن است و با توجه به بیان گسترده

منابع

1. Smith L. B., Walker W. H. The regulation of spermatogenesis by androgens. 2014. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 30, 2-13.
2. Swerdloff R. S., Dudley R. E., Page S. T., Wang C., Salameh W. A. Dihydrotestosterone: biochemistry, physiology, and clinical implications of elevated blood levels. 2017. *Endocrine Reviews*, 38(3), 220-254
3. Tang Z. R., Zhang R., Lian Z. X., Deng S. L., Yu K. Estrogen-receptor expression and function in female reproductive disease. 2019. *Cells*, 8(10), 1123.
4. Cooke P. S., Nanjappa M. K., Ko C., Prins G. S., Hess R. A. Estrogens in male physiology. 2017. *Physiological Reviews*, 97(3), 995-1043.
5. Kicman A. T. Pharmacology of anabolic steroids. 2008. *British Journal of Pharmacology*, 154(3), 502-521
6. Kicman A. T., Gower D. B. Anabolic steroids in sport: biochemical, clinical and analytical perspectives. 2003. *Annals of Clinical Biochemistry*, 40(4), 321-356
7. Schänzer W., Thevis M. Detection of illegal use of androgens and selective androgen receptor modulators. In: *Testosterone*, Nieschlag E., Behre H. M., editors. Cambridge University Press, 2012, pp. 517-534.
8. Selk-Ghaffari M., Shab-Bidar S., Halabchi F. The prevalence of anabolic-androgenic steroid misuse in Iranian

- athletes: A systematic review and meta-analysis. 2021. *Iranian Journal of Public Health*, 50(6), 1120-1134.
9. Büttner A., Thieme D. Side effects of anabolic androgenic steroids: pathological findings and structure–activity relationships. In: *Doping in Sports: Biochemical Principles, Effects and Analysis*, Thieme D., Hemmersbach P., editors. Springer, 2010, pp. 459-484.
 10. Sanchis-Gomar F., Martinez-Bello V., Pareja-Galeano H., Brioché T., Gomez-Cabrera M. C. An overview of doping in sports. In: *Nutrition and Enhanced Sports Performance*, Bagchi D., Nair S., Sen C. K., editors. Elsevier, 2014, pp. 183-196.
 11. Kanayama G., Pope H. G. Jr. History and epidemiology of anabolic androgens in athletes and non-athletes. 2018. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 464, 4-13.
 12. Sjöqvist F., Garle M., Rane A. Use of doping agents, particularly anabolic steroids, in sports and society. 2008. *Lancet*, 371(9627), 1872-1882.
 13. Stojko M., Nocoń J., Piłat P., Szpila G., Smolarczyk J., Żmudka K., Moll M., Hawranek M. Innovative reports on the effects of anabolic androgenic steroid abuse – How to lose your mind for the love of sport. 2023. *Medicina*, 59(8), 1439.
 14. Nieschlag E., Vorona E. Medical consequences of doping with anabolic androgenic steroids: effects on reproductive functions. 2015. *European Journal of Endocrinology*, 173(2), 47-58.
 15. Gagliano-Jucá T., Basaria, S. Abuse of anabolic steroids: A dangerous indulgence. 2019. *Current Opinion in Endocrine and Metabolic Research*, 9, 96–101.
 16. Amsterdam J. V., Opperhuizen A., Hartgens F. Adverse health effects of anabolic–androgenic steroids. 2010. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 57(1), 117-123.
 17. Patanè F. G., Liberto A., Maria Maglitta A. N., Malandrino P., Esposito M., Amico F., et al. Nandrolone decanoate: use, abuse and side effects. 2020. *Medicina*, 56(11), 606.
 18. Maravelias C., Dona A., Stefanidou M., Spiliopoulou C. Adverse effects of anabolic steroids in athletes: a constant threat. 2005. *Toxicology Letters*, 158(3), 167-175
 19. de Ronde W., Smit, D. L. Anabolic androgenic steroid abuse in young males. 2020. *Endocrine Connections*, 9(4), R-102R111.
 20. Albano G. D., Amico F., Cocimano G., Liberto A., Maglietta F., Esposito M., et al. Adverse effects of anabolic-androgenic steroids: A literature review. 2021. *Healthcare*, 9(1), 97.
 21. García-Manso J. M., Valverde Esteve T. Consequences of the use of anabolic-androgenic steroids for male athletes' fertility. In: *Exercise and human reproduction: induced fertility disorders and possible therapies*, Vaamonde D., du Plessis S. S., Agarwal A., editors. Springer. 2016, 153–165.
 22. Whitaker D. L., Geyer-Kim G., Kim E. D. Anabolic steroid misuse and male infertility: management and strategies to improve patient awareness. 2021. *Expert Review of Endocrinology & Metabolism*, 16(3), 109-122.
 23. Kuhn, C. M. Anabolic steroids. 2002. *Recent Progress in Hormone Research*, 57, 411–434.
 24. Salerno M., Cascio O., Bertozzi G., Sessa F., Messina A., Monda V., et al. Anabolic androgenic steroids and carcinogenicity focusing on Leydig cell: A literature review. 2018. *Oncotarget*, 27(9), 19415.
 25. Mauras, N. Growth hormone therapy in the glucocorticosteroid-dependent child: metabolic and linear growth effects. 2001. *Hormone Research in Paediatrics*, Suppl. 56(1), 13-18.
 26. Casavant M. J., Blake K., Griffith J., Yates A., Copley L. M. Consequences of use of anabolic androgenic steroids. 2007. *Pediatric Clinics of North America*, 54(4), 677-690.
 27. Richardson A., Antonopoulos G. A. Anabolic-androgenic steroids (AAS) users on AAS use: Negative effects, 'code of silence', and implications for forensic and medical professionals. 2019. *Journal of Forensic and Legal Medicine*, 68, 101871
 28. Lumia A. R., McGinnis M. Y. Impact of anabolic androgenic steroids on adolescent males. 2010. *Physiology & Behavior*, 100(3), 199-204.
 29. Karimi S., Kazori N., Alavi S. M. H., Alijanpour S., Siddiqi M. A. A., Zeynali B. Nandrolone decanoate-induced hypogonadism in male rats: Dose- and time-dependent effects on pituitary and testicular hormonal functions. 2024. *Physiological Reports*, 12(19), e70053.

معرفی کتاب «تنوع زیستی ایران در یک نگاه (ویراست دوم)» تنوع زیستی: سرمایه راهبردی برای آینده ایران

فریدون عوفی

عضو هیئت علمی موسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور،
نایب رئیس کمیته ملی استاندارد تنوع زیستی و عضو مرجعیت ملی کنوانسیون تنوع زیستی
sillaginid@hotmail.com
نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴



ژنتیکی گیاهی و جانوری و نقاط داغ زیستی جهان تبدیل کرده است. بدیهی است که حفاظت از این سرمایه و در صورت لزوم بازسازی و احیا ذخایر ارزشمند، بدون آگاهی عمیق و شناخت علمی و دسترسی به اطلاعات و داده‌های به‌روز امکان‌پذیر نمی‌باشد.

در چنین شرایطی، انتشار کتاب «تنوع زیستی ایران در یک نگاه (ویراست دوم)» که به کوشش اسکندر زند، زینب حسین‌نژاد و سعید صوفی‌زاده تدوین شده است، اقدامی ارزشمند در جهت گردآوری، بهنگام‌سازی و و یکپارچه نمودن دانش مرتبط با تنوع زیستی ایران به شمار می‌رود. این اثر که در ۴۳۹ صفحه و در ده فصل تنظیم شده، علاوه بر معرفی وضعیت تنوع زیستی کشور، آخرین تحولات جهانی در حوزه سیاست‌گذاری، حقوق بین‌الملل و چارچوب‌های حفاظت از تنوع زیستی را نیز در بر می‌گیرد.

فصل نخست خواننده را با مفاهیم پایه تنوع زیستی، سطوح مختلف حیات، نقش ژن و DNA، سطوح سه‌گانه تنوع زیستی، خدمات بوم‌سازگاری و همچنین تهدیدات انسانی و مخاطرات طبیعی، و عوامل مؤثر بر تخریب تنوع زیستی آشنا می‌کند. این فصل، بنیان نظری مناسبی برای ورود به مباحث تخصصی‌تر کتاب فراهم می‌آورد.

تنوع زیستی، بنیان حیات بر روی کره زمین و یکی از ارزشمندترین سرمایه‌های طبیعی هر کشور است. همه زیست‌مندان، از ژن‌ها و میکروارگانیسم‌ها تا گیاهان و جانوران و نیز بوم‌سازگان‌های پیچیده، اجزای این سرمایه عظیم را تشکیل می‌دهند. امروزه تنوع زیستی دیگر تنها یک موضوع محیط‌زیستی محسوب نمی‌شود، بلکه در کانون امنیت آب و غذا، بهداشت و سلامت، اقتصاد، تاب‌آوری در برابر تغییر اقلیم و حتی امنیت ملی قرار گرفته است. به طوریکه بر اساس گزارش‌های جهانی، تخریب محیط زیست و از دست رفتن تنوع زیستی پس از تغییر اقلیم، یکی از بزرگ‌ترین تهدیدهای پیش روی بشریت در دهه‌های آینده به شمار می‌رود.

ایران به دلیل قرار گرفتن در محل تلاقی سه قلمرو زیست‌جغرافیایی، تنوع اقلیمی کم‌نظیر، اختلاف ارتفاع بیش از پنج هزار متر، وجود مناطق کوهستانی، ارتفاعات و جنگل‌های هیرکانی، ارسبارانی و زاگرس، نواحی کویری و بیابان‌ها، رودخانه‌ها و تالاب‌ها، گستره زیستگاه‌های ساحلی - دریایی، و دشت‌ها و مراتع گسترده، یکی از غنی‌ترین کشورهای منطقه از نظر تنوع زیستی است. این ویژگی، ایران را به یکی از مهم‌ترین مراکز ذخایر

یعنی «اطلاعات توالی‌های دیجیتال» (DSI) اختصاص داده شده است؛ موضوعی که در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین محورهای مذاکرات «کنوانسیون تنوع زیستی» تبدیل شده و آشنایی پژوهشگران و مدیران کشور با آن ضرورتی انکارناپذیر می‌باشد.

در فصل دهم به «پروتکل ایمنی زیستی» (کارتاهنا)، تاریخچه، مفاد، اجلاس‌های متعاهدین و چالش‌های اجرای آن می‌پردازد. در خاتمه، کتاب با ضمایم ارزشمندی شامل متن «کنوانسیون تنوع زیستی»، «پروتکل ناگویا» و «پروتکل کارتاهنا» تکمیل می‌شود که ارزش مرجع بودن آن را دو چندان کرده است.

در مجموع این کتاب را می‌توان فراتر از یک اثر آموزشی، یک مرجع ملی در حوزه تنوع زیستی دانست. نقطه قوت اصلی آن، تلفیق مباحث علمی، اکولوژیکی، حقوقی، سیاست‌گذاری و مدیریتی در قالبی منسجم و روز آمد است. مؤلفین این کتاب ارزشمند تنها به معرفی گونه‌ها یا بوم‌سازگان‌ها اکتفا نکرده‌اند، بلکه تلاش داشتند ارتباط تنوع زیستی را با امنیت غذایی، توسعه پایدار، تغییر اقلیم، حکمرانی محیط‌زیست و تعهدات بین‌المللی ایران مشخص و تبیین کنند. این رویکرد میان‌رشته‌ای، کتاب را برای طیف گسترده‌ای از بهره‌برداران و مخاطبان، از دانشجویان و پژوهشگران تا مدیران و تصمیم‌گیران، سودمند ساخته است.

از دیگر امتیازات اثر، رمی‌توان به استناد گسترده به منابع معتبر بین‌المللی، بهره‌گیری از آخرین اسناد «کنوانسیون تنوع زیستی» و پوشش دادن موضوعات نوظهوری همچون چارچوب جهانی «کونمینگ-مونترال» و «اطلاعات توالی‌های دیجیتال» اشاره نمود؛ مباحثی که تاکنون کمتر در منابع فارسی به این جامعیت ارائه شده‌اند.

بی‌تردید، انتشار این کتاب رویکردی نوین و گامی ارزشمند در ارتقای ادبیات علمی تنوع زیستی در ایران به شمار می‌رود و می‌تواند به عنوان مرجعی معتبر برای آموزش، پژوهش، سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی در حوزه حفاظت از سرمایه‌های طبیعی کشور مورد استفاده قرار گیرد. بدیهی است در روزگاری که بحران تنوع زیستی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده است، آثاری از این دست می‌توانند نقشی اثرگذار در تعمیق شناخت علمی، ارتقای فرهنگ حفاظت از طبیعت و تقویت حکمرانی محیط‌زیست در کشور ایفا کنند.

در فصل دوم به معرفی ویژگی‌های جغرافیایی، اقلیمی و زیست‌جغرافیایی ایران و تأثیر آن‌ها بر غنای تنوع زیستی کشور اختصاص دارد. در این فصل، جایگاه ایران در میان کشورهای دارای تنوع زیستی بالا، وضعیت حفاظتی گونه‌های گیاهی و جانوری و دلایل شکل‌گیری این غنا بخوبی تشریح شده است.

در فصل سوم، مهم‌ترین مناطق تنوع زیستی جهان و ایران معرفی شده است. کشورهای دارای تنوع زیستی بسیار زیاد، مناطق «داغ تنوع زیستی»، مناطق حفاظت شده و سیر تحول قوانین و مقررات مربوط به حفاظت از این مناطق، محورهای اصلی این فصل را تشکیل می‌دهند.

در فصل چهارم بحران‌های جهانی محیط‌زیست، مرزهای سیاره‌ای، تاریخچه شکل‌گیری «کنوانسیون تنوع زیستی»، سایر کنوانسیون‌های مرتبط و چارچوب جهانی جدید تنوع زیستی «کونمینگ-مونترال» می‌پردازد. این فصل، ارتباط میان تحولات علمی و سیاست‌گذاری جهانی را به خوبی تبیین می‌کند.

در فصل پنجم، «برنامه‌های اقدام ملی تنوع زیستی ایران» بررسی و نقاط قوت و ضعف برنامه‌های گذشته تحلیل شده، و در ادامه این فصل ضرورت تدوین برنامه سوم اقدام ملی مورد تأکید قرار گرفته است.

در فصل ششم که به معرفی و تشریح سومین راهبرد و «برنامه عملیاتی ملی تنوع زیستی جمهوری اسلامی ایران» (۲۰۲۴ تا ۲۰۳۰) اختصاص یافته است، یکی از به روزترین بخش‌های کتاب محسوب می‌شود. این فصل برای مدیران، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان اهمیت ویژه‌ای دارد.

در فصل هفتم که یکی از نوآورانه‌ترین فصل‌های کتاب محسوب می‌شود، شاخص‌های ارزیابی و پایش تنوع زیستی بر اساس چارچوب جهانی «کونمینگ-مونترال» معرفی و مورد تحلیل قرار گرفته است. فراهم شدن زمینه‌های بهره‌گیری از شاخص‌های استاندارد بین‌المللی برای ارزیابی و تعیین وضعیت تنوع زیستی کشور از ویژگی‌های کلیدی این فصل می‌باشد.

در فصل هشتم، اهداف، ساختار و الزامات «پروتکل ناگویا»، موضوع دسترسی به منابع ژنتیکی، تقسیم منافع حاصل از بهره‌برداری و مسئله سرقت زیستی با نگاهی کاربردی بررسی شده است.

در فصل نهم به یکی از جدیدترین مباحث حقوقی و علمی جهان

دیدگاه شاخه علوم ریاضی فرهنگستان در مورد کاهش طول دوره تحصیلات تکمیلی

نامه علوم پایه شماره ۱۶، پاییز و زمستان ۱۴۰۴

موضوع کاهش سنوات در دوره تحصیلات تکمیلی، به پیشنهاد وزارت متبوع، از مباحث مورد توجه در دانشگاه‌ها بوده است. در شماره ۱۴ دیدگاه‌های استاد گرامی، عضو پیوسته محترم شاخه شیمی، دکتر احمد شعبانی در این مورد منتشر شد و اینک دیدگاه شاخه ریاضی فرهنگستان علوم در این شماره برای اطلاع منتشر می‌شود. امید است برنامه ریزان درسی وزارتخانه متبوع در اعلام تصمیم نهائی در مورد کاهش طول سنوات تحصیلی به این دیدگاه‌ها توجه کنند.

اهم نظرات اعضای شاخه علوم ریاضی فرهنگستان

تهدیدی جدی برای بنیان‌های علمی کشور محسوب می‌گردد:

- الف - فرسایش کیفیت به جای افزایش کارایی
- ب - آسیب به اعتبار بین‌المللی و رقابت پذیری دانش‌آموختگان
- ج - تحمیل فشار نامعقول بر نظام آموزشی
- د - خلا بررسی الگوهای علمی و تجارب جهانی

شاخه علوم ریاضی فرهنگستان علوم ضمن انعکاس اندیشه‌ها و دغدغه‌های گرانسنگ اعضای خود، بر این باور است که شتاب در اجرای مصوبه کاهش طول دوره‌های تحصیلی در مقاطع کارشناسی کارشناسی ارشد و دکتری صلاح نیست اکیدا پیشنهاد می‌شود که این امر مهم، پیش از اجرا با ژرف نگری بیشتر استماع دیدگاه‌های دانشگاهیان صاحب تجربه و انجمن‌های علمی ذی‌ربط و تدقیق در محاسن و معایب طرح بررسی شود.

شاخه علوم ریاضی فرهنگستان در راستای مسئولیت‌های خویش آمادگی خود را برای مشارکت فعال و همکاری در مطالعه و ارزیابی این موضوع با شورای گسترش وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و نهادهای ذی‌ربط دیگر اعلام می‌دارد. در صورتی که پس از کارشناسی‌های دقیق کاهش بعضی از دوره‌های تحصیلی دانشگاهی مورد تصویب قرار بگیرد، ابتدا به صورت آزمایشی در چند دانشگاه با رتبه‌های مختلف اجرا شود.

شاخه علوم ریاضی فرهنگستان علوم

۱- با توجه به مشکل بیکاری تعداد زیادی از دانش‌آموختگان دوره‌های مختلف دانشگاهی در حال حاضر، به ویژه در علوم پایه و به خصوص در دوره کارشناسی، ورود سریع دانش‌آموختگان دوره‌های کوتاه شده به بازار کار، مشکلات قابل پیش بینی دیگری برای کشور ایجاد خواهد کرد.

۲- مقایسه طول دوره‌های دانشگاهی در ایران با طول این دوره‌ها در کشورهایی مانند انگلستان، اروپا و آمریکا با توجه به امکانات و زیرساخت‌های وسیع آموزشی و پژوهشی در این کشورها، سابقه چند صد ساله آنها در تحصیلات دانشگاهی و استقلال دانشگاه‌ها، مقایسه‌ای منطقی نیست. بخصوص وجود حدود ۲۴ واحد تحت عنوان دروس عمومی در کارشناسی، و نیز ۶ واحد در کارشناسی ارشد در دانشگاه‌های کشور، که بار قابل توجهی بر برنامه درسی دارد.

۳- با توجه به کاهش ساعات تدریس دروس ریاضی در دوره‌های دبیرستانی کشور و افت فاحش سطح ریاضی دانش‌آموزان دانشجویان ورودی دوره‌های کارشناسی، آمادگی و توانایی کافی برای درک مفاهیم عمیق ریاضی ندارند، کاهش طول دوره کارشناسی به هزینه کاهش واحدهای درسی ریاضی، به شدت این مشکل را حادتر خواهد کرد.

شاخه علوم ریاضی فرهنگستان ضمن احترام به اهداف کلان توسعه‌ای اصرار بر اجرای سریع این طرح را بدون مطالعه کافی صلاح نمی‌داند و بر این باور است که عجله در اجرا به دلایل ذیل

Anabolic Androgenic Steroids: Structure, Function and Side Effects

Negar Kazori, Sayyed Mohammad Hadi Alavi*

School of Biology, College of Science, University of Tehran, Tehran14411–14176, Iran.

hadi.alavi@ut.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

Following the discovery and structural characterization of testosterone (T) in 1935, numerous T derivatives, including anabolic-androgenic steroids (AAS), were synthesized. Structural modifications to T enhance its anabolic properties, which are primarily linked to protein biosynthesis. This anabolic activity has enabled the widespread medical use of AAS in treating conditions such as anemia, chronic kidney disease, and osteoporosis. Despite their therapeutic value, AAS are extensively misused by adolescents, athletes, and bodybuilders for performance enhancement and cosmetic purposes. Like endogenous androgens, AAS exert their effects via the androgen receptor. Because this receptor is broadly distributed throughout the body, AAS abuse is associated with a range of adverse effects. The severity of these effects depends on the steroid type, dosage, duration of use, and the individual's sex, and may involve critical organs such as the brain and heart. The present review summarizes the history of AAS discovery, their chemical structure, mechanism of action, and the systemic side effects resulting from their abuse.

Keywords: Testosterone, Dihydrotestosterone, Estradiol, Infertility, Doping

Arsenic in groundwater resources of Iran: a literature review

Ahmad Abbasnejad^{1*}; Behnam Abbasnejad¹

1. Department of Geology, Shahid Bahonar University of Kerman

aabbas@uk.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

Arsenic is a significant toxic element that, despite its ubiquitous presence across all environmental compartments, typically exhibits its highest concentrations within groundwater resources. Given the broad spectrum of diseases it can induce—including several types of cancer—evaluating its concentration and origin in Iranian groundwater resources is of paramount importance. This study aims to review published Persian and English literature concerning arsenic concentrations in Iran's groundwater resources and their corresponding origins. Based on this review, a substantial portion of the evaluated Iranian groundwater bodies exhibits arsenic levels exceeding the permissible limit for drinking water (10 µg/L). The origins of this element are diverse, encompassing multiple pathways such as geothermal activity, sulfide weathering, desorption, reductive dissolution, evaporation, and anthropogenic pollution (particularly from agricultural and mining activities). It is recommended that the concentration of this element be assessed across all groundwater resources in Iran. Furthermore, in cases where drinking water levels exceed the permissible level, appropriate remediation and arsenic-removal techniques should be deployed.

Keywords: Arsenic, Groundwater, Desorption, Geothermal, Sulfide Oxidation

Herbaria as Biodiversity Data Infrastructures: From Plant Collections to Intelligent Databases

Farrokh Ghahremaninejad¹, Hamid Nazari^{*2}, Maryam Khajehpiri³, Ehsan Hosseini¹

Department of Plant Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

² Ph.D. Graduate, Department of Biology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

³Department of Biology, University of Isfahan, Isfahan, Iran

fgh@khu.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

Herbaria, which in the past were primarily known as physical collections of dried plants, have today transformed into massive, data-driven infrastructures for biodiversity monitoring and management. Beyond being mere physical objects, each herbarium specimen serves as a precise record of a species' occurrence across time and space, forming the foundation for diverse studies ranging from taxonomy and molecular systematics to species distribution modeling, climate change monitoring, and archaeological research. In this article, adopting an analytical approach, we first explain the concept of the herbarium as a data system and then describe the life cycle of a specimen, from collection planning to digitization and modern scientific utilization. The main focus of this research is on the role of emerging technologies such as next-generation sequencing, big data, and artificial intelligence in transforming the functions of herbaria. Additionally, international legal and ethical dimensions, including the Nagoya Protocol, are examined in the management of these collections. Finally, by examining the status of reference herbaria, the challenges and future perspectives of these critical infrastructures are analyzed in order to outline a roadmap for the transition from specimen repositories to intelligent databases.

Keywords: Biodiversity, Digitization, DNA Sequencing, Species Distribution Modeling, Nagoya Protocol, Artificial Intelligence

Human-Centered Computational Thinking: The Inner Teacher in Holistic Education

Arta Amir Jamshidi* and Naghi Asadi Lomehdasht

Data Science and Modeling Research Laboratory,
School of Mathematics, Statistics and Computer Science, College of Science, University of Tehran.

arta.jamshidi@ut.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

Holistic education refers to the comprehensive development of individuals across cognitive, social, emotional, moral, and physical dimensions. Unlike reductionist approaches that limit learning to the transmission of cognitive knowledge, this approach emphasizes the dynamic interaction and integration of the various dimensions of human development and views education as an integrated and multidimensional process. Its goal is to cultivate individuals who can function effectively in the real world, engaging in problem-solving with critical and creative thinking.

Therefore, individuals require skills that nurture all dimensions of their being by considering their innate potential talents and discovering their hidden abilities, enabling their growth and advancement. These skills should prepare individuals to enter and interact with the real world, make logical and informed decisions, and solve problems by using their mental capacities along with intelligent computational tools.

Human-centered computational thinking is a fundamental skill for educating individuals toward growth in all dimensions of their existence. This skill plays a crucial role in shaping and realizing holistic education. Human-centered computational thinking, emphasizing the capacities of the mind as an “inner teacher,” supports the development of individuals’ problem-solving abilities through components such as abstraction, analysis, algorithms, automation, debugging, and generalization. By integrating these components into educational programs, it is possible to cultivate individuals who are not only competent in scientific and technical domains but also fully developed in emotional, social, and ethical dimensions.

In this context, teachers as educators, role models, guides, and facilitators of learning provide the foundation for achieving holistic education while supporting the development of human-centered computational thinking. Consequently, the quality of any educational system largely depends on the competence, commitment, and capability of its teachers. At the same time, the use of advanced technologies such as artificial intelligence can further facilitate the path toward holistic education.

The integration of human-centered computational thinking (the inner teacher), the guiding role of teachers (the outer teacher), and the use of artificial intelligence (as a facilitating tool) forms a strategic triangle for realizing holistic education. Through this synergy, nurturing balanced and well-developed human beings becomes entirely achievable.

Keywords: Holistic Education, Human-Centered Computational Thinking, Education, Teacher, Artificial Intelligence.

Atomic, Molecular, and Biological Clocks: Diverse Perspectives on Time

Bahareh Ahmadi¹, Ali A. Moosavi-Movahedi^{1,2*}

1. Institute of Biochemistry and Biophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Fellow of the Academy of Sciences of the Islamic Republic of Iran,

Fellow of The World Academy of Sciences (TWAS), Fellow of the Islamic World Academy of Sciences

moosavi@ut.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)

Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

Time is a fundamental concept in understanding nature. Although it is commonly perceived through the alternation of day and night, seasonal changes, and the motion of celestial bodies, modern science recognizes time as a multidimensional phenomenon that spans scales ranging from subatomic processes to biological systems and evolutionary dynamics. This review adopts an interdisciplinary perspective to examine the historical evolution of the concept of time and the methods of timekeeping, from the earliest instruments based on natural phenomena to the most advanced scientific standards. It first outlines the historical development of temporal units and the progression of timekeeping devices, from sundials, water clocks, and mechanical clocks to quartz and atomic clocks, highlighting their contributions to improving the precision of time measurement. The review then discusses the physical basis of the modern definition of the second, established through the hyperfine transition of the cesium-133 atom, and explores the pivotal role of atomic clocks in time standardization, satellite navigation, telecommunications, and scientific research. The article further examines the concept of time in evolutionary biology through the molecular clock, a method that estimates species divergence times, reconstructs phylogenetic relationships, and investigates the evolutionary history of living organisms based on the accumulation rate of genetic mutations. The assumptions, limitations, and factors influencing the accuracy of molecular clock analyses, including variation in mutation rates among genes and evolutionary lineages, are also discussed. The final section focuses on the biological clock and circadian rhythms, an endogenous timing system that synchronizes the sleep–wake cycle, regulates hormone secretion, metabolism, immune function, and numerous physiological processes, thereby playing a central role in maintaining homeostasis. In addition, the consequences of circadian rhythm disruption and its associations with metabolic, cardiovascular, neurological, and psychological disorders are reviewed.

Overall, this review demonstrates that although time appears as a single, familiar concept in everyday life, it assumes distinct yet complementary meanings and applications across different scientific disciplines. From the quantum oscillations of atoms that provide the most precise standard for time measurement, to the gradual accumulation of genomic changes that reveals the evolutionary history of life, and the biological rhythms that govern the physiology and health of living organisms, these diverse perspectives collectively illustrate that time is not merely a physical quantity but a fundamental framework for understanding the structure, evolution, and dynamic behavior of the natural world.

Keywords: Timekeeping; Cesium-133; Atomic Clock; Second; Molecular Clock; Molecular Evolution; Biological Clock; Circadian Rhythm.

Exploring the Conflict and Interaction between Evolutionary Mechanisms of Survival Struggle and Moral Systems in Human Societies

Mohammad Khanahmadi^{1*}, Maryam Malmir²

1. Department of Clinical Psychology, Faculty of Humanities, Shahed University, Tehran, Iran

2. Iranian Association for Ethics in Science and Technology

mohammad.khanahmadi@shahed.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)

Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

The relationship between biological evolution and human morality represents one of the most significant interdisciplinary issues at the intersection of biological sciences, social sciences, and moral philosophy. While evolutionary theory explains human behavior through natural selection and the struggle for survival, moral systems are founded upon values such as justice, empathy, altruism, responsibility, and the common good. This study examines the tension and interaction between evolutionary mechanisms and moral systems in human societies by exploring the biological, cultural, cognitive, and normative dimensions of morality. Particular attention is devoted to the reinterpretation of the struggle for survival within social contexts, the conflict between survival and morality, the tension between individual interests and collective welfare, the limitations of biological reductionism, the possibility of reconciling evolution and ethics, and the role of culture in shaping moral values.

The findings indicate that although many moral capacities - including cooperation, empathy, fairness, and altruism - have evolutionary foundations, human morality cannot be reduced solely to biological determinants. Moral systems emerge through a complex interaction among biological evolution, cognitive processes, social institutions, and cultural evolution. Furthermore, morality is better understood not as an opposition to evolution but as one of its most sophisticated outcomes, enabling humans to transcend narrow self-interest and establish large-scale forms of cooperation and social cohesion. Therefore, a comprehensive understanding of human morality requires an interdisciplinary approach that integrates biological, cultural, social, and philosophical perspectives on moral behavior.

Keywords: Biological Evolution, Struggle for Survival, Human Morality, Social Cooperation, Altruism, Culture, Gene–Culture Coevolution, Moral Philosophy.

The History of Ethical Considerations in Statistical Practice

Ali Dolati^{1*}

Department of Statistics, Yazd University, Yazd, Iran.

adoalti@yazd.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

Throughout history, statistics has functioned both as a set of quantitative methods and as a field of knowledge with profound social and ethical implications. This article takes a historical approach to examine the evolution of attention to ethical considerations in statistical work. The narrative begins with the historical roots of statistics: from ancient censuses and the German tradition of State Science to Political Arithmetic in England and the linkage of statistics with the eugenics movement. Moving forward through World War II and the inhumane experiments of the Third Reich, the Nuremberg Code is introduced as the first international declaration on research ethics. Subsequently, the Tuskegee Study is analyzed as a turning point in public conscience, followed by an examination of the three fundamental principles of the Belmont Report: respect for persons, beneficence, and justice. The article then turns to the process of institutionalizing ethics in statistics, reviewing the development of the first ethical codes by the American Statistical Association and the International Statistical Institute. Next, the replication crisis in the empirical sciences and the role of misuse of statistical methods are examined, followed by an interpretation of the American Statistical Association's historic statement on statistical significance. Entering the age of big data, the article addresses three fundamental challenges: the crisis of informed consent, algorithmic bias and statistical fairness, and the redefinition of the statistician's responsibility. Finally, turning to the situation in Iran, the article examines the absence of a critical-historical discourse on statistical ethics and emphasizes the necessity of rethinking the relationship between statistics and social responsibility.

Keywords: Statistical Ethics, History of Statistics, Tuskegee Study, Replication Crisis, Algorithmic Fairness

Mathematics Subject Classification: 62 ,6203A01

Science as a Method, or Why Science Is Amoral?

Ata Kalirad

Researcher in Ecology and Evolutionary Biology,
Max Planck Institute for Biology in Tübingen, Germany

ata.kalirad@tuebingen.mpg.de

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

The importance of ethics in science remains as relevant as ever. However, it can be argued that the scientific method, when reduced to its most basic components, does not include nor demand any moral conviction. Historical cases of scientists or systems that generated scientific facts and technological breakthroughs without adherence to any defensible moral principle abound. Precisely because the method itself cannot supply ethical grounding, that grounding must be provided elsewhere in a student's education, not folded into the method itself. Instead of imbuing the teaching of scientific method with an emphasis on ethics, science should be taught as a set of rules, adherence to which enables scientific progress. Additionally, ethics should be treated as a standalone part of the curriculum for a student of any field, including science, to ensure a moral and responsible citizen.

Keywords: Science, Scientific Method, Education, Ethics, Philosophy of Science

Dynamics of Faith versus Science Unfolding The Myths of Math and Artificial Intelligence Part II

Gholam Reza Rokni Lamouki

School of Mathematics, Statistics and Computer Science,
College of Science, University of Tehran

rokni@ut.ac.ir

Nāme-ye-Oloom-e Pāye (Bi-Quarterly Review of Basic Sciences)
Issue 16. Fall and Winter 2026

Abstract

The role of belief and its dynamism in the formation of knowledge, and the position of the concept of faith relative to knowledge, are examined within a reasonable framework. To achieve the main goal of this article, which is to analyze beliefs related to mathematical sciences and artificial intelligence, it is necessary to address the totality of the relationship between belief and knowledge. On the other hand, the ongoing battle between faith and science involves mathematics. Because social and personal structures have deep roots in the expansion of human knowledge, in general, and in mathematics in particular. In this way, by focusing on the concept of mathematical myths, we will examine their multilateral role. The increasing presence of artificial intelligence and data science at the social and academic levels raises new questions about the nature of belief, mathematics, automation, and their application in complex data-based systems, and confronts us with a road of emerging mythologies and reinterpretations of ancient myths, the generativity or inhibition of which depends on us.

Keywords: Faith, Belief, Myth, Superstition, Scientific Beliefs, Scientific Myths, Mathematical Beliefs, Mathematical Myths, Artificial Intelligence

Because of its length, as proposed by the Chief-Editor, this paper is published in two parts. Part 1 in past issue (15) and Part II in this issue (16).

Abstract of Contents

Nāme-ye-Oloom-e Pāye

Bi-Quarterly Review of Basic Sciences

The Academy of Sciences (Islamic Republic of Iran)

Director in Charge: Zare, Mehdi
Editor in Chief: Farazmand, Ali

Editorial Board:

Ariannejad, Masoud. Professor, Mathematics, University of Zanjan, Zanjan, Iran
Farazmand, Ali. Professor (retired), Genetics, University of Tehran, Tehran, Iran
Sheykhi, Ahmad. Professor, Physics, Shiraz University, Shiraz, Iran
Shaabani, Ahmad. Professor, Chemistry, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran
Zare Mehdi. Professor, Geology, International Institute of Earthquake Engineering & Seismology, Tehran, Iran

Editor: Farazmand, Ali
Executive Management: Sotoudeh, Hanieh
Website Management: Farrokh, Atena
Layout & Graphics: Ariannamazi, Yalda

Nāme-ye-Oloom-e Pāye, the Bi-quarterly Journal of Iran's **Academy of Sciences** focuses on publishing articles on fundamental sciences topics, including biology, chemistry, geology, mathematics and physics, with the priority given to studies dealing with main educational and research issues on these fields. The journal aims at promoting the communication between basic science authorities with scholars of other academic fields and the public. Articles with integrative, inter-, multi-, and trans-disciplinary views in science education and research with respect to sustainable development are also considered with primacy. The journal welcomes manuscripts highlighting broad aspects of basic sciences' formal and informal education, concerned with the advancement of scientific knowledge and attitude in the society.

Mailing Address: The Academy of Sciences, Shahid Haqani Highway, Tehran, Iran,
ZIP code: 1538633111, **P O Box:** 19395-5318, **Tele Fax:** 88645595

Website: www.ias.ac.ir

Email: basic@ias.ac.ir

ISSN 2783-3666

