# نامه علوم پایه

دوفصلنامه تخصصی گروه علوم پایه فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

۱۴

پاییز و زمستان ۱۴۰۳

ISSN 2783-3666

بسم الله الرحمن الرحیم

# نامه علوم پایه

فصلنامه تخصصی گروه علوم پایه فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

شماره چهاردهم، پاییز و زمستان ۱۴۰۳

**صاحب امتیاز**: فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

**مدیر مسئول**: مهدی زارع

**سردبیر**: علی فرازمند

**هیئت تحریریه**: مسعود آرین‌نژاد، مهدی زارع، احمد شیخی، احمد شعبانی، علی فرازمند

**ویراستار**: علی فرازمند

**کارشناس**: هانیه ستوده

**مسئول پشتیبانی سایت**: آتنا فرّخ

**گرافیک و صفحه‌آرایی**: یلدا آرین نمازی

**چاپ و صحافی**: عارف آریافر

فصلنامه «*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 سرمشق‌هایی باشد که برای گسترش دانش و معرفت علمی جامعه نقش بنیادی دارند.

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

**کد پستی**: ۱۵۳۸۶۳۳۱۱۱ **صندوق پستی**: ۱۹۳۹۵-۵۳۱۸ **تلفن و دورنگار**: ۸۸۶۴۵۵۹۵

**تارنما**: www.ias.ac.ir **رایانامه**: basic@ias.ac.ir

«مسئولیت صحت مطالب بر عهده نویسندگان است»

شاپا ۲۷۸۳-۳۶۶۶

۱۵۰ 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، دربارهٔ 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 زمینهٔ 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 یکپارچهٔ 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 صفحهٔ 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 حداکثر۲۵۰ 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 متن با ٔ درطول خود متن به شماره‌گذاری پیاپی آورده شوند. منابع اینترنتی صرفا شکل پانوشت درصفحهٔ مرتبط بیاید.

۱۰. نسخهٔ 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، شمارهٔ آن و شمارهٔ صفحات بیاید. درمورد کتاب، نام نویسنده/نویسندگان، سال انتشار و سپس نام ناشر و بعد صفحات ارجاع می‌آید.

# فهرست

**سخن سردبیر** ..... ۵

نویسنده و ریاضیدان صبور پارسی ..... ۷
**اسماعیل اسدی**

نگاهی به تاریخ ریاضی و تاثیر آن بر تمدن: گذری بر معنا ..... ۲۳
**خسرو تاج‌بخش، سید محمدباقر کاشانی**

خمینه‌ها و کیهان ..... ۳۱
**علی کمالی نژاد**

تقریبات آشکوبه‌ای ..... ۳۷
**مهدی رجبعلی‌پور، پویا کریمی**

شرح نگاه پس نگرانه ژن‌ها توسط ریچارد داوکینز ..... ۴۹
**محمود کرمی**

دگرگونی نقش مطالعات تکوین (نمو جنینی) در زیست‌شناسی تکاملی ..... ۶۲
**عطا کالیراد**

از مقاومت تا تحمل: مرزبندی دو مفهوم کلیدی در واکنش گیاهان به علف‌کش‌ها ..... ۶۷
**روزبه زنگوئی نژاد، اسکندر زند**

علوم پایه و کنترل آفات گیاهی: مدل ریاضی با الهام فیزیکی ..... ۷۹
**محمود سوف باف سرجمعی**

فلسفه کاهش دوره‌های تحصیلی در آموزش عالی: تحلیلی نظام‌مند از ابعاد آموزشی، اقتصادی و سیاستی ..... ۹۵
**احمد شعبانی**

درک وضعیت انسانی کاربران هوش مصنوعی در خوانش نگرش‌های ..... ۱۰۱
هانا آرنت، خورخه لوئیس بورخس، مارکوس گابریل و عهد عتیق
**عباس پورخصالیان**

نقش راهبردی سرمایه‌گذاری کشورهای جنوب خلیج فارس در هوش مصنوعی ..... ۱۰۳
و جایگاه نامعلوم جمهوری اسلامی ایران در نظم تکنولوژیک جدید
**عباس پورخصالیان**

حکیم عمرخیام نیشابوری شکوه یکپارچگی نخبگی و پختگی در علم، ادب، فلسفه ..... ۱۰۷
**علی فرازمند**

# سخن سردبیر

سخنرانِ نشستِ ششم «سلسله سخنرانی‌های آزاد حکمی و فلسفی» کمیسیون تاریخ علم فرهنگستان علوم در سیزدهم اردیبهشت ماه، استاد یوسف ثبوتی بودند. عنوان سخنرانی ایشان «تقوای علوم تجربی» بسیار برانگیزنده و هوشمندانه انتخاب شده بود، و گرد آمدنِ هر دو دسته از علاقه‌مندان علوم انسانی و علوم پایه (تجربی) در این سخنرانی شاید به خاطر نکته نهفته در همین عنوان بود. تقوا را در ساده‌ترین شکل می‌توان «پرهیز آگاهانه» از افتادن در ورطهٔ کارهای نادرست تعریف کرد که خود جزئی از سلوک و اخلاق زندگی [و نیز کارِ علمی] شمُرده می‌شود. پرسش و بحثی که در پی سخنرانی شکل گرفت ناظر بر اهمیت علم و کار علمی و کاربرد آن در جوامع انسانی است که علوم انسانی و علوم تجربی، با تفاوت در روش و دیدگاه‌هایی متفاوت، تا امروز نتوانسته‌اند نگرش متحدانه‌ای (امری ظاهرا بعید ولی بسیار با اهمیت برای توسعه جوامع) پیشه کنند. عنوان سخنرانی استاد ثبوتی دعوتی به فهمِ درست، و راه و رسمِ درست جهت رسیدن بدان به حساب می‌آید. پرهیز از اشتباه در علوم تجربی، دوری از اتخاذ روشِ نادرست در کار علمی، و پایبندی به روشِ درست در پژوهش و کاربردِ یافته‌های علمی است. علوم تجربی هرچند در تاریخ جهانی علم پایوران بی‌مثالی داشته، از جمله ابوریحان و رازی خودمان، ولی با تعریف «روش علمی»[1] مبتنی بر مشاهده، آزمایش و تحلیل برپایه داده‌ها در سده‌های اخیر نه تنها برای دانشمندان علوم تجربی، بلکه برای هر دانشجوی تحصیلات تکمیلی، سنتی ناگزیر و ناگریز قلمداد می‌شود. پس محکِ کار علم تجربی اینک امری معلوم و تعریف شده است که برآوردِ عالی و شایسته آن تقوی پیشگی می‌خواهد و سرپیچی از آن هم به کمک همین روش علمی [گاهی خیلی زود] آشکار شده، مرتکبِ آن رسوا می‌شود. در عمل به تقوی یا اِعراض، آگاهانه و ناآگاه، از آن است که علم تجربی خود کارِ خطیری به مَثَل تیغ دو دَم می‌شود که یک دَمِ آن اعتبار و دَمِ دیگر بی‌اعتباری است. با پیشرفت‌های فنی امروزه در پژوهش‌های تجربی، ناپرهیزی از نبایدهای کار علمی از ندرت خارج شده، رواجِ هشدارآمیزی دارد. اگر زمانی مشکلاتِ علمی‌مان در برابر اطلاعات درست، عمدتا اطلاعات کَژ[2] بود امروزه با اطلاعات دُژ[3] بیشتر مواجهیم که اولی به اشتباه و از روی ناآگاهی و دومی کاملا آگاهانه، درواقع به شکل داده سازی‌های عمدی با ظاهر درست، صورت می‌پذیرد[4]. بنابراین پیشرفت‌های علم و فناوری، بویژه در دسترس بودن آسان و آزاد به داده‌ها، کار علمی و داده پردازی را برای هر دو دسته پرهیزگاران و ناپرهیزگاران دنیای علم آسان‌تر ساخته است. و همه می‌دانند که انتشار بی‌رویه مقالاتی که پیش از محتوی شمارشان هدف می‌شود یکی از ناپرهیزی‌های دنیای علمی امروزه است.

اما بحث‌هایی که در پی سخنرانی «تقوای علوم تجربی» پیش آمد، در نهان مُلهِم از مقایسه و مقابله نگرش‌ها در کار و کاربستِ یافته‌ها و داده‌ها میان اندیشمندان علوم انسانی و علوم پایه بود. اگر علوم تجربی دست بستهٔ «روش علمی» است، پس گِرَوندگان درستکارِ آن جز پیمودن راه تقوای علمی، پرهیز از کار و اندیشه نادرست، گزیری ندارند – و طریق آزمونِ درست و نادرستِ آنها نیز همان مشاهده، آزمایش و تجزیه و تحلیل دستاوردهای تجربی است. هرچند با مسامحه می‌توان گفت در علوم انسانی نیز، حداقل در برخی قلمروها که با حیات روزمره انسان سروکار دارند، روش علمی مرسوم علوم تجربی بنوعی می‌تواند کارآمد باشد، ولی در عمل با مشکلاتی بسی پیچیده روبرو هستیم، زیرا هرجا که با انسان و زندگی جوامع انسانی سروکار داریم پیدا کردن قاعده و اصولِ برخوردِ یکسان و همگانی ممکن به نظر نمی‌رسد. انسان‌ها در جوامع گوناگون حتی در ساده‌ترین امور مانند عادات غذائی، رسم و رسوم زندگی روزمره گرفته تا مسائل دیرین و پیچیده‌ای چون باورها، دین و مذهب و آئین‌هائی گاه بسیار کهن از هم دور می‌شوند و راه خود می‌روند. بنابراین، در اقتصاد، جامعه شناسی، روان شناسی، هنر، مطالعات فرهنگی و ... به خاطر همین گوناگونی گسترده و پیچیدگی روابط اجتماعی متفاوت، فرمول‌بندی‌های کلی و همگانی بی‌تردید کارساز نیستند. اگر ادعای ساده انگارانه در کاربستِ روش علمی در علوم انسانی، حتی با قید «مسامحه»، از سوی اصحاب علوم انسانی پذیرفتنی نباشد ولی رویای خوب به کسی آسیب نمی‌زند! باز با احتیاط و درکِ قیود پنهان و آشکار در پژوهش‌های علوم انسانی خاطرنشان می‌شود گرچه عالِمانِ علوم انسانی برای مشاهده و تحلیل، اغلب به آزمایشگاه و کارگاه و ابزار علمی مرسوم علوم تجربی اتکا ندارند، خروارها آزمایش [انجام یافته] و آزمایشگاهی به گسترهٔ تاریخ و پهنهٔ کرهٔ زمین در اختیار دارند که با تحلیل غیرسوگیرانهٔ مستنداتِ ثبت شده، یا هر آنچه که زنده در جریان است می‌توانند به نتایجی تا حدودی درست و یا حداقل کاملا سودمند برسند. در فضای اندیشه‌ای که «تقوای علمی» فراخوان می‌دهد پیمودن راه و رسم درستِ مبتنی بر سلوک تقوی در علوم انسانی و اجتماعی سفارشی مشفقانه است هرچند که سنگین جلوه کند. اینکه گروندگانِ قلمروهای علوم انسانی در تمام ادوارِ تاریخ و امروز نمی‌توانند پایبندِ روش علمی تعریف شده متناظرِعلوم تجربی باشند در یک نگاه به گوناگونی و پیچیدگی‌های جوامع و روابط انسانی و در نگاه بعدی به کنار نیامدن آنها با موضوع اندیشه باز و پافشاری در سوگیری‌های پیش ساختهٔ ذهنی سلب کننده تقوای علمی مربوط می‌شود. مثال‌های تقابل اندیشه‌های این دو قلمرو در تاریخ علم زیاد و مواردِ توافق بسیار کمترند که یکی از برجسته‌ترین آنها به انقیاد کشیدن گالیله برای پس گرفتن نظریه علمی درستش در مورد گردش زمین بود که در سخنرانی استاد ثبوتی بدان اشاره شد. عدم تعهد به تقوای علمی و نادرست

---

1. Scientific Method
2. Misinformation
3. Disinformation

۴. برابرنهاده‌های فارسی «کَژاطلاعات» و «دُژاطلاعات» از پیشنهادهای دکتر رضا عطاریان پژوهشگر ارشد، و مصوب گروه اطلاع رسانی، فرهنگستان زبان و ادبِ فارسی است. کَژ در لغت به معنای کج و دُژ به معنی بد، بدکار و خلاف است.

دانستن هرآنچه با دریافت ذهنی مخالفان گالیله جور نبود فقط یک مثال از شواهدی است که مانع درست اندیشی و ناممکن دیدنِ کار بست روش علمی در علوم غیرتجربی می‌شود.

اما اتحاد و یکپارچگی اندیشمندان دو قلمرو جداشده علوم تجربی و انسانی می‌تواند، اگر نه همه ولی بسیاری از، مشکلات جامعه را تا حدود قابل توجهی حل کند. مدیر علمی فرهنگستان علوم انگلستان در جریان جهانگیری بیماری کرونا در سال ۲۰۱۹ در نوشته‌ای که تحت عنوان «علم به تنهائی کافی نیست» [به خاطر اهمیت آن ترجمه‌اش در یکی از شماره‌های پیشین همین مجله منتشر شد][1] از اینکه اندیشمندان علوم انسانی به تعداد کافی در کمیسیون‌های مرتبط با مدیریت کرونا حضور ندارند و جمع ایشان محدود به متخصصین زیست شناسی و علوم بالینی و یا پایه است ایراد جدی می‌بینند. با این اشاره می‌بینیم که شکاف فکری و اجتماعی بین این دو قلمرو اندیشه مسئله‌ای جهانی بوده و هست. در شماره نخست این مجله نگارنده خلاصه‌ای از یک کتاب کوتاه ولی پرنکته و نزدیک به موضوع سخن حاضر را برای بهره مندی جامعه علمی منتشر کرد[2]. نویسنده کتاب، چارلز پرسی اسنو[3] (۱۹۸۰–۱۹۰۵)، فیزیکدانی نخبه و اندیشمندی است که از دنیای پیرامون هم غافل نیست. نام اثرِ اسنو «دوفرهنگ» است که در آن قریب هفتاد سال پیش به مشکل جدائی غیرقابل دفاع دو قلمرو علوم انسانی و پایه و اندیشمندان این دو می‌پردازد و شرط توسعه درستِ جوامع را آشتی و همکاری یکپارچه این دو نحلهٔ فکری معرفی می‌کند. او در اندیشه‌ای بس فراتر به حکمرانان دنیای صنعتی وقت، انگلستان و امریکا، هشدار می‌دهد که علم و پیشرفت علمی را مقوله‌ای جهانی بدانند و در گسترش و سهم قائل شدن برای کشورهای رو به توسعه غفلت نورزند که در غیر این صورت زمانی فرا می‌رسد که خود را در چنبره‌ای از دول متخاصم گرفتار ببینند. باز اسنو پیشنهاد می‌کند که باید «فرهنگ سومی» پیدا کرد تا آموزش و درک علمی را برای مردم نیز فراهم کند، و منظورش آموزش و آماده ساختنِ کسانی است که بتوانند علم را به شکلی درست و قابل فهم به غیر متخصصین بیاموزند. چیزی که امروزه تحتِ یک دیسیپلین متمایز و پُراهمیت و فعال تحت عنوان «ارتباط علمی»[4] در بسیاری از دانشگاه‌ها و کشورها، برنامه‌دار دنبال می‌شود. در همین مجله در مناسبت‌های متعدد به مدیریت فرهنگستان علوم پیشنهاد داده شده که به هر دو جنبه یادشده از دغدغه‌های اسنو، یعنی یکپارچه سازی فعالیت‌های گروه‌های علوم انسانی و علوم پایه و توسعه برنامه‌هائی برای آموزش عمومی و نهادینه کردن درک علمی در ارکان جامعه بها دهند چرا که اینها از فعالیت‌های تصریح شده در اساسنامه فرهنگستان علوم است[5]. فرهنگستان می‌تواند با تدوین یک برنامه کاری موثر و ارائه‌آن به نهادهای سیاست‌گذار آموزشی و پژوهشی کشور، از جدائی‌ها در آموزشِ مفاهیم و مقولاتِ این قلمروها در نهادهای آموزشی و پژوهشی و مخاطبین آنها بکاهد و تا آنجا که مقدمات برانگیختن تفکر در هر دو جنبه ایجاب می‌کند دروسی از هر دو قلمرو متقابلا برای مخاطبان دیگری در سطوح مختلف آموزش داده شود تا دانش‌آموز، دانشجو و نیز دانشمند علوم تجربی و انسانی همه در درک و حل مسائل به هم نزدیک‌تر شده، باب مفاهمه‌ای حداقل مقدور در بین آنها فراهم آید.

برنامه «سلسله سخنرانی‌های آزاد حکمی و فلسفی» در فرهنگستان که هدایت آن را استاد اعوانی برعهده دارند از رخدادهای خوبی است که می‌تواند بستری برای همکاری جدی اصحاب قلمروهای علمی فرهنگستان فراهم کند و بسیار بجاست که اندیشمندان تمام گروه‌های علمی متنوع به شرط عرضهٔ موضوعات و مسائل کلان علمی و فرهنگی [ و نه بحث‌های تخصصی مرسوم در گروه ها] در این سلسله سخنرانی‌ها شرکت داده شوند. نباید فراموش شود که اهداف این نهاد نه امتداد کاردانشگاهی، بلکه وظیفهٔ خطیر هدایت اهداف عالی تمام ارکان جامعه، از جمله هدایت امر آموزش و پژوهش در نهادهای مرتبط، و ارائهٔ برنامه‌های کلان برای توسعهٔ علمی، اجتماعی و فرهنگی کشور است. این وظیفه نیز جز از راه نگرش‌های بین رشته‌ای و ترارشته‌ای و یکپارچه کردن دیدگاه‌ها برای حل مسائل پیچیدهٔ رویاروی جامعه انجام پذیر نیست.

در پایان تاکید می‌شود که مضامین و دیدگاه‌هایی که در هر شماره به عنوان سخن سردبیر تقدیم می‌شود، نه کلام آخر بلکه برای دامن زدن به گفتگو در باب مسائلی است که هرروزه در فرهنگستان و غیرِ آن با آنها مواجه هستیم. نامه علوم پایه آماده انتشار مقالات از سوی اندیشمندان تمام قلمروهای علمی است که به طرح مسائل کلان و بحث‌های بین رشته‌ای و ترارشته‌ای علاقه مند هستند. در سخنرانی‌هائی که در فرهنگستان برپا می‌شود هرگاه نویسنده این سخن حاضر بوده، از سخنرانان و شرکت کنندگان دیگر در خواست کرده است تا دیدگاه و اندیشه‌هایشان را در شکل مقاله، با خوانندگان نامه علوم پایه به اشتراک بگذارند.

علی فرازمند

---

۱. علی فرازمند، دیدگاه جهانی بهبودی از کووید۱۹، علم به تنهائی کافی نیست. نامه علوم پایه، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰. صفحات ۱۵–۱۳.
۲. علی فرازمند، دو فرهنگِ چارلز پرسی اسنو. نامه علوم پایه، شماره ۱، بهار ۱۴۰۰، صفحات ۲۹–۹.

3. Charles Percy Snow
4. Science communication

۵. علی فرازمند، اتاق فکر و کارکردهای آن. نامه علوم پایه، شماره ۷ و ۸، پائیز و زمستان ۱۴۰۱. صفحات ۱۵۷–۱۵۲.

# نویسنده و ریاضیدان صبور پارسی

**اسماعیل اسدی**
**دانشگاه تحصیلا ت تکمیلی علوم پایه، گاوازنگ، زنجان و دانشگاه براک، سن کاترین، کانادا**
**easadi@iasbs.ac.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

«باید میوه‌های شاخه‌های پایین درختان جنگل را نادیده گرفت، نباید گذاشت که این میوه‌ها ما را فریب دهند و از شاخه‌های بالاتر غافلمان کنند.» به راستی چه سرزمینی است که ظاهر و باطن میوه‌های درختان جنگلش را باید بر اساس «نیستی و هستی» یا «فراز و پستی» آنها طبقه بندی کرد و برای رسیدن به میوه‌های رسیده، هست شده، شاخه‌های «فراز» درختانش، از میوه‌های شاخه‌های «پستی» مستانه صرف نظر کرد. این متن کنکاشی است بر علم ورزی نویسنده و ریاضیدان پارسی معاصر مریم میرزاخانی و البته نیم نگاهی بر شواهد مشابهی که مشاهیر علمی و ادبی من جمله خیام، خوارزمی، مولانا، حافظ و البته معاصرین می‌توانسته‌اند مصداق سربه سر شدن هفت‌هزارسالگان با آن داشته باشند.

**کلید واژگان:** خیام، مریم میرزاخانی، معادله کی دی وی، حیرانی لحظه‌ای، حیرانی تاریخی

## ۱. میوه‌های درختان جنگل خوارزم

"باید میوه‌های شاخه‌های پایین درختان جنگل را نادیده گرفت، نباید گذاشت که این میوه‌ها ما را فریب دهند و از شاخه‌های بالاتر غافلمان کنند".

این جملات در مصاحبه‌ای [۳۱] در سال ۲۰۰۷ که ریاضی دان پارسی با ترنس تائو استاد برجسته ریاضیات دانشگاه استنفورد و فیلدز مدالیست داشت بیان شده است. در تاریخ ایران و ادبیات فارس نشانه‌ها و شواهدی برای یافتن ریشه این نگاه دینامیکی قابل مشاهده است. یکی از این نشانه‌ها را عمر خیام فیلسوف، نویسنده و ریاضیدان در قرن دهم میلادی سروده است:

من ظاهر نیستی و هستی دانم
من باطن هر فراز و پستی دانم
با این همه از دانش خود شرمم باد
گر مرتبه‌ای ورای مستی دانم

به راستی چه سرزمینی است که ظاهر و باطن میوه‌های درختان جنگل را باید بر اساس «نیست و هستی» یا «فراز و پستی» آنها طبقه بندی کرد و برای رسیدن به میوه‌های رسیده، هست شده، شاخه‌های «فراز» درختانش، از میوه‌های شاخه‌های «پستی» مستانه صرف نظر کرد و از این که حتی بعد از رسیدن به آن فراز، میوه‌ای یافت نشود، نیست شده، ناامید نشد و به دنبال درخت دیگر شاید در جنگلی دیگر بود.

نشان دیگر را مولانا جلال الدین در *فیه ما فیه* درقرن دوازدهم میلادی به زیبایی و بگونه‌ای دیگر آدرس می‌دهد، آن هم چه

### فرهنگ واژگان

**معادله کی‌دی‌وی (Korteweg-De Vries (KDV)):** یک معادله دیفرانسیل غیرخطی مشهور است که برای حرکت امواجی را نشان می‌دهد که بدون تغییر شکل یا از دست دادن انرژی، مسافت‌های طولانی را طی می‌کنند (که به آن‌ها سولیتون می‌گویند). قدرت اصلی این معادله در ایجاد تعادل بین دو پدیده متضاد غیرخطی بودن (که باعث تیز شدن موج می‌شود) و پاشندگی (که باعث پخش شدن موج می‌شود).

**ناوردا (Invariant):** ویژگی یا کمیتی از یک شکل یا فضا گفته می‌شود که با وجود اِعمال یک سری تبدیلات (مثل چرخش، انتقال، مقیاس‌گذاری یا حتی خم کردن)، بدون تغییر باقی می‌مانند.

**امواج سالیتوتی (Soliton Waves):** امواجی هستند که بدون تغییر شکل یا از دست دادن انرژی، مسافت‌های طولانی را طی می‌کنند.

**موج تنها (Solitary Wave):** نوعی موج ویژه است که برخلاف امواج معمولی، هنگام حرکت شکل و سرعت خود را حفظ می‌کند و حتی پس از برخورد با موجی دیگر، بدون تغییر از آن عبور می‌کند.

**موج انتقالی (Translatory Wave):** که گاهی به آن «موج جابه‌جایی» نیز می‌گویند، نوعی حرکت موجی در سیالات (مثل آب) است که در آن ذرات سیال به همراه موج در مسیر حرکت جابه‌جا می‌شوند.

آدرسی، آدرس شهر ابوجعفر محمد بن موسی خوارزمی ریاضی‌دان مشهور زیسته در قرن هشتم. این که:

*شخصی گفت در خوارزم شاهدان بسیارند چون شاهدی ببینند و دل برو بندند بعد ازو، ازو بهتر بینند؛ آن بر دل ایشان سرد شود. فرمود اگر بر شاهدان خوارزم عاشق نشوند آخر بر خوارزم عاشق باید شدن که درو شاهدان بی‌حدند.*

در این ادبیات و تاریخ البته شاید نشانه‌ها و شواهدی برای عدم

تایید آن هم زیاد باشد و بر نشستن ایستاگونه و نه دینامیکی و تماشای صرف حرکت جهان [۱] تاکید کند، چنانکه مثلا حضرت حافظ می‌فرماید:

*بنشین بر لب جوی و گذر عمر ببین*
*کاین اشارت ز جهان گذران، ما را بس*

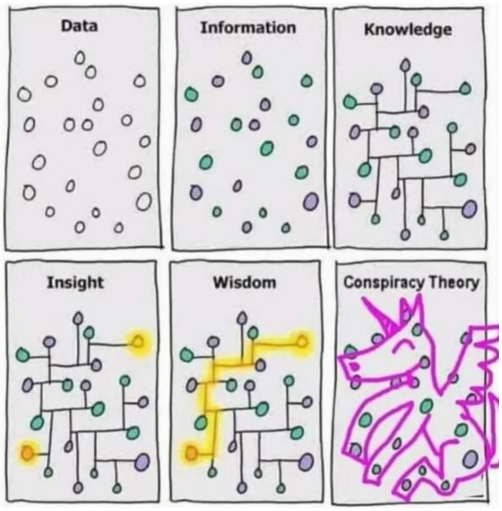
*نقد بازار جهان بنگر و آزار جهان*
*گر شما را نه بس این سود و زیان ما را بس*

*یار با ماست، چه حاجت که زیادت طلبیم؟*
*دولت صحبت آن مونس جان ما را بس*

با این حال حافظ لسان الغیب شاید در این نشستن و نگریستن بعدی را آگاهانه پنهان می‌دارد، غیب می‌دارد، بعد زمان، زمان خوانش. تو گویی در فلسفه حافظ، همه چیز درهم هست، خود فالت ببین، الان می‌خواهی سخت کوزه گری کن و فردا بنشین، کوزه می در دست، حیران به تماشای نقد جهان. به واقع شاید این نشستن و نگریستن نه در این مرحله تلاش و زیاده خواستن و قانع نشدن به چیدن میوه‌های پایین درخت، بلکه در مرحله کمون، به تعبیر ریاضیدان معاصر هادامارد[1] (۱۹۶۳–۱۸۶۵) هست که معنادار می‌شود. حال سوال این است: آیا چنان نگاه دینامیکی به کشف و شناخت‌شناسی و علم‌ورزی، نشان، سابقه‌ای و ریشه‌ای تاریخی، تاریخ علم گذشته یا معاصر و مدرنی دارد؟

در تاریخ علم، تالس با سفرهای خود به مصر و بین‌النهرین و در بازگشت به یونان در واقع اساس علم ریاضیات را بنا نهاد. او در واقع با مشاهده دقیق و برداشت مجرد از فعالیت‌های عملی مصریان و ترکیب آن با تفکر استدلالی یونانیان انقلابی در تفکر بشر بوجود آورد. به واقع قانع نبودن به میوه‌های شاخه‌های پایین درختان جنگل و فعالیت‌های عملی که منفعت آن مشخص باشد و پرداختن به کاری سخت‌تر با دستاوردهایی نامطمئن خود می‌تواند شاهدی تاریخی بر تفکر شناختی مصاحبه شونده باشد [۷].

در تاریخ معاصر هم شاید اولین کسی که شناخت‌شناسی علمی را به لحاظ روان شناسی مورد بحث قرار داد و مخصوصا در حوزه ریاضی، هادامارد بود. به واقع در اینکه میوه‌های درختان جنگل خوارزم در چهارگانه پاییز و زمستان و بهار و تابستان رشد و نمو و گل و بازیابی می‌شوند، می‌تواند برای درک ایده هادامارد مفید باشد. هادامارد، در کتابش [۸] "*روانشناسی ابداع در علوم ریاضی*"با استفاده از تجربه شناخت شناس پوانکاره روند ابداع را به چهار قسمت تقسیم کرد: آماده سازی[2]، دوره کمون[3]، الهام[4] و تصدیق[5]. می‌توان فصول سال را با ترتیب نامعمول پاییز–زمستان–بهار–تابستان را با دوره‌های بالا (آماده سازی، دوره کمون، الهام، تصدیق) با همین ترتیب، یکسان سازی کرد. به زبان داده پردازی، این مراحل را می‌توان چنین دید. مرحله اول آماده سازی را شاید تا شکل چهارم در تصویر زیر در نظر گرفت:




یعنی جمع آوری داده‌ها، اطلاعات و دانسته‌های مورد نظر و البته بینش‌های عمیق از مسئله. مرحله سوم، الهام، درواقع یافتن ترکیب مناسب از پل‌های قابل ارزیابی برای رفتن از تصویر چهار به پنج است در تصویر. شاید بتوان گفت تالس هم سه مرحله اول شکل بالا یعنی جمع‌اوری داده‌ها، اطلاعات و دانسته‌های مورد نظر را از مصریان فرا گرفت و با بینش عمیق از آنها که ناشی از تفکر یونانی بود ترکیب کرد و با هوشمندی به آن شکل علمی بخشید و الخ.

هادامارد می‌گوید که ترکیبات مختلف و پراکنده در ذهن مانع از دیدن راه حل مسئله می‌شود. این موانع شاید بر اثر کار زیاد و آماده‌سازی زیاد باشد. با کنار گذاشتن موقت و استراحت (کمون)، آن ترکیبات ناخودآگاهانه تقلیل پیدا می‌کنند به چند ترکیب ساده که همان‌هایی است که به حل منجر می‌شود (اثبات). شاید فرایند سودایی که مولانا در دیوان شمس از آن دم می‌زند، همین ترکیبات بی در و پیکر و بی‌نظمی باشد که در فرایند حل مسئله وجود دارد و برای رهایی از آن مرحله کمون لازم می‌شود تا گرد و غبارها فرو نشیند و آب‌ها از آسیاب بیفتد. در واقع فرایند سودایی و مصرانه برای رسیدن به حقیقت زیبا (اثبات)،چه دانم‌های بسیار و چالش‌های روبرو و امواج متعدد است که ذهن را پراکنده یا دهان را بسته نگه می‌دارد:

*چه دانستم که این سودا مرا زین سان کند مجنون*
*دلم را دوزخی سازد دو چشمم را کند جیحون*

*چه دانستم که سیلابی مرا ناگاه برباید*
*چو کشتی‌ام دراندازد میان قُلْزُم پرخون*

1. Jacques Hadamard
2. Preperation
3. Incubation
4. Illumination
5. Verification

*زند موجی بر آن کشتی که تخته‌تخته بشکافد*
*که هر تخته فروریزد ز گردش‌های گوناگون*

*نهنگی هم برآرد سر، خورد آن آب دریا را*
*چنان دریای بی‌پایان، شود بی‌آب چون هامون*

*شکافد نیز آن هامون، نهنگ بحرفرسا را*
*کشد در قعر ناگاهان به دست قهر چون قارون*

*چو این تبدیل‌ها آمد نه هامون ماند و نه دریا*
*چه دانم من دگر چون شد که چون غرق است در بی‌چون*

*چه دانم‌های بسیار است لیکن من نمی‌دانم*
*که خوردم از دهان‌بندی در آن دریا کفی افیون*

سلسله سیلاب و کشتی و موج و نهنگ و آب هامون و الخ می‌توانند مثال‌هایی باشند از خیال‌های متعددی که همدیگر را می‌خورند چنانکه مولانا جای دیگر می‌گوید:

*هر خیالی را خیالی می‌خورد*
*فکر آن فکر دگر را می‌چرد*
*تو نتانی کز خیالی وا رهی*
*یا بخسپی که از آن بیرون جهی*

تو گویی مولانا هم خیال حل مسئله‌ای را داشته است و ضمنی می‌دانسته است که مرحله کمون چیست و الخ.

همان طوری که قبلا بیان شد، اگر زوم اوت کنیم و بعد زمان را هم در اشعار حضرت حافظ در نظر بگیریم، می‌شد این مرحله کمون را در اشعار او هم یافت، در اینکه گاهی زیادت نطلبیم، یار با ماست، کافیست بنشینیم بر لب جوی و می در دست و یار در بر گذر عمر کنیم. به تعبیری، حضرت حافظ هم تو گویی بعد از تلاش بسیار، ره به جایی نبرد و نتوانست مسئله را حل کند، خیال کرد که لختی فرو بگذارد سخت جهان را و فقط غنیمت بشمارد صحبت مونس جان را:

*خواهی که سخت و سست جهان بر تو بگذرد*
*بگذر ز عهدِ سست و سخن‌هایِ سختِ خویش*

خیلی بی‌راه نیست که پوانکاره بزرگ[1] (۱۹۱۲–۱۸۵۴)، اسکر دایجسترا[2] (۲۰۰۲–۱۹۳۰) و دیگران تجربه مشابهی داشتند. پوانکاره [۱۹، ۸]، ریاضیدان معروف و بزرگ معاصر، همچون حافظ هم به نقد بازار جهان به سفر تفریحی رفت و هم صحبت مونس جان شد که:

*«من می‌خواستم این توابع را به صورت خارج قسمت دو سری نمایش دهم؛ این ایده کاملاً آگاهانه و عمدی بود؛ قیاس با توابع بیضوی راهنمای من بود. از خودم پرسیدم اگر این سری‌ها وجود داشته باشند، چه خواصی باید داشته باشند و بدون مشکل در تشکیل سری‌هایی که تتافوخسی نامیده‌ام، موفق شدم. در این زمان، من کان را ترک کردم، جایی که در آن زندگی می‌کردم، تا به یک سفر زمین‌شناسی تحت نظارت مدرسه معادن بروم. حوادث سفر باعث شد کار ریاضی خود را فراموش کنم. پس از رسیدن به کوتانس، سوار اتوبوسی شدیم تا به جایی برویم. در لحظه‌ای که پایم را روی پله گذاشتم، این ایده به ذهنم خطور کرد، بدون اینکه هیچ چیز در افکار قبلی‌ام راهی برای آن هموار کرده باشد، که تبدیلاتی که برای تعریف توابع فوخسی استفاده کرده بودم با تبدیلات هندسه غیر اقلیدسی یکسان بودند. من این ایده را تایید نکردم؛ زیرا وقتی روی صندلی اتوبوس نشستم، به ادامه مکالمه‌ای که قبلاً شروع شده بود، پرداختم. اما یک اطمینان کامل داشتم. پس از بازگشت به کان، نتیجه را با آرامش تصدیق کردم.»*

در سال ۱۹۵۶، اسکر دایجسترا ریاضیدان، علوم کامپیوترسیتی (برنده جایزه تورین در سال ۱۹۷۲) که رشته‌اش از فیزیک نظری به توصیه فان وانگاردن[3] (۱۹۸۷–۱۹۱۹) که در آن زمان رئیس دانشکده محاسبات مرکز ریاضیات در آمستردام بود به آن تغییر داده بود [۱۷]، الگوریتمی کلاسیک مسیریابی ابداع کرد در حالی که در کافه‌ای در آمستردام هم صحبت مونس جان بود. بد نیست بدانیم الگوریتم دایجسترا چه نقش مهمی در نقشه گوگل و از اینجا در تکنولوژی‌های مرتبط بازی میکند. باز جالب است بدانیم که همه الگوریتم یک جا در ذهنش نقش بست. خودش می‌گوید:

*«بدون کاغذ و مداد، احتمالا مجبور می‌شوید از همه پیچیدگی‌های اجتناب پذیر اجتناب کنید!»*

هادامارد توضیح می‌دهد که الهام بعد از مرحله کمون چگونه در ضمیر ناخودآگاه انسان شکل می‌گیرد. مولانا به چه زیبایی این هر دو مرحله را در یکجا در لابلای قصه پیل در تاریکی بیان می‌کند

*خود چه جای حد بیداریست و خواب*
*دم مزن والله أعلم بالصواب*
*دم مزن تا بشنوی از دم‌زنان*
*آنچ نامد در زبان و در بیان*
*دم مزن تا بشنوی زان آفتاب*
*آنچ نامد در کتاب و در خطاب*
*دم مزن تا دم زند بهر تو روح*
*آشنا بگذار در کشتی نوح*

با این لحن مولانا، استر دایجسترا هم در واقع می‌گوید دم کاغذ و مداد را نبین، دستی که به مغز شلوغ متصل است، ممکن هست در آن لحظه خاص آدرس غلط بدهد، آن دم را بگذار کنار آن چیزی که قرار است بشنوی با کاغذ و مداد و بیان نا آمدنیست.

1. Edsger Wybe Dijkstra
2. Jules Henri Poincaré
3. A. van Wijngaarden

**مرحله تصدیق** یا فصل تابستان را می‌شود بیان دقیق و منطقی آنچه الهام شده است دید و متاع خویش نوشت تا که قبول افتد و که در نظر آید. در واقع بعد از مرحله الهام، تو گویی شمعی تازه روشن شده است که می‌شود جواب را یا راه حل را نوشت و با اطمینان بیشتری مسیر بیان آن را به دیگران نمایاند:

*از نظرگه گفتشان شد مختلف*
*آن یکی دالش لقب داد این الف*

*در کف هر کس اگر شمعی بدی*
*اختلاف از گفتشان بیرون شدی*

طی طریق چهارگانه هادامارد همیشه تکرار می‌شود، همچنان که فصول سال. با این حال مسئله، چشیدن و فهم میوه‌های همه درختان یک جنگل یا چند جنگل نیاز به شهود و دریافت ذره‌بینی دارد. ارسولا هامناستات[1] (۱۹۶۱-) [۲۸، ۲۹] می‌گوید که ریاضیدان پارسی ما می‌توانست در جهت‌های مختلف زوم این کند و زوم اوت[2]، طی طریق می‌کرد، می‌توانست از نقطه‌ای از جنگل برود به نقطه‌ای دیگر و بعد به طریقی چنان بالا برود که کل جنگل را ببیند.

شاید قبل از این که این بحث را ببندیم، جا دارد که تاملی کنیم در این دو مفهوم. ظاهرا هیچ ترجمه فارسی معناداری از این دو مفهوم مدرن زوم این و زوم اوت در دسترس نیست یا حداقل نویسنده بی‌خبر است. می‌شود با نزدیک نمایی یا بزرگنمایی دوربین‌های عکاسی یکی گرفت. از نگاه تفکر ریاضی مدرن شاید نزدیک‌ترین مفهوم به این دو، ویژه سازی و تعمیم[3] باشد [۱۸]. صرف نظر از واژه یابی برای این دو، با این حال در کلام مولانا می‌توان نشانی از این شناخت شناسی سراغ گرفت آنجا که در مثال معروف پیل در تاریکی از این دو به چشم حس و چشم دریا یاد می‌کند.

*عرضه را آورده بودندش هُنود*
*پیل اندر خانه تاریک بود*

*از برای دیدنش مَردم بسی*
*اندر آن ظلمت همی‌شد هر کسی*

*دیدنش با چشم چون ممکن نبود*
*اندر آن تاریکیش کف می‌بِسود*

*همچنین هر یک به جزوی که رسید*
*فهم آن می‌کرد هر جا می‌شنید*

*چشم حس همچون کف دستست و بس*
*نیست کف را بر همه او دسترس*

*چشم دریا دیگرست و کف دگر*
*کف بهل وز دیده دریا نگر*

به یک معنا، علم ورزی و آموزش علم شاید حرکتی هموار از چشم حس یافتن به چشم دریا نگریستن باشد. طی طریقی باید باشد از چشم حس به دست دادن تا چشم دریا پیدا کردن. مولانا شاید فقط نمی‌دانست حرکت دینامیکی هموار چیست. ایده و برنامه معروف کلاین [۳۹، ۳۸] در یکی دیدن همه هندسه‌های اقلیدسی و نااقلیدسی با استفاده از مفهوم تقارن در واقع چشم دریا پیدا کردن از تمام چشم حس‌هایی است که می‌شد به هر نوع هندسه خاص کرد که از دوره اقلیدس شروع شد و با گاوس-ریمان و لباچفسکی و بولای ادامه پیدا کرد.

مثال معروف فریمن دایسون[4] درباره قورباغه یا کبوتر [۳۷] که درباره نوع کار ریاضیدان‌ها یا فیزیکدان‌ها است هم شاید در همین راستا بشود تعبیر کرد. تعبیر مولانا به طور ضمنی مستلزم وجود حرکت هموار فردیست بین چشم حس و چشم دریا، درحالی که به طور ضمنی قورباغه کبوتر شدنی نیست و برعکس. فریمن دایسون خود می‌گوید من قورباغه طور هستم و البته شانسی داشتم که بستوویچ روسی قورباغه طور را که استادم بود و بعد هرمن ویل را در پرینستون دیدم که کبوتر طور بود. بودن همزمان هر دو نوع در یک گروه شاید خوشبختی بزرگیست برای آن گروه تحقیقاتی. در واقع وجود حرکت هموار بین دو تیپ در یک گروه مهم‌تر است تا به واسطه تیپ فردی. چشم‌های حس و چشم‌های دریا و حرکت هموار بین اینها و وجود آنها در کنار هم مشخصه دوران مدرن است. در دوران مدرن چشم حس را نمی‌توان کف بهل کرد.

زوم اوت و زوم این کردن (چشم حس و چشم دریا) هم درجاتی دارد در بین پرندگان. به واقع نمی‌توان تصور ساده‌ای در مثلا پرنده شدن داشت و صرف داشتن اراده پرنده شدن، آن را شدنی فرض کرد. پرندگان همیشه منبع مناسبی برای شناخت شناسی انسانی داشته‌اند همچنان که فریمن دایسون متذکر شده است. مولانا باز در جای دیگری نگاه معناداری به این تشبیه پرندگانی و درجات آن دارد، شاید اگر فریمن دایسون از این اشعار مولانا خبر داشت، مقاله دیگری می‌نوشت در تعمیق مطلب قبلی‌اش:

*منطق‌الطیر سلیمانی بیا*
*بانگ هر مرغی که آید می‌سرا*

*چون به مرغانت فرستادست حق*
*لحن هر مرغی بدادستت سبق*

*مرغ جبری را زبان جبر گو*
*مرغ پر اشکسته را از صبر گو*

*مرغ صابر را تو خوش دار و معاف*
*مرغ عنقا را بخوان اوصاف قاف*

1. Hamenstadt, Ursula
2. Zoom in and Zoom out
3. Specialization and generalization
4. Freeman John Dyson

*مر کبوتر را حذر فرما ز باز*
*باز را از حلم گو و احتراز*

*وان خفاشی را که ماند او بی‌نوا*
*می‌کنش با نور جفت و آشنا*

*کبک جنگی را بیاموزان تو صلح*
*مر خروسان را نما اشراط صبح*

*هم‌چنان می‌رو ز هدهد تا عقاب*
*ره نما والله اعلم بالصواب*

در غزل ورزی و ادبیات عزل، اما شاید مسیر حرکت برعکس باشد از چشم دریا به چشم حس با انحنا و تابی غیر صفر. اینکه چرا قصه‌ای که با خنده و چشم دریا و باغچه و سیب شروع می‌شود ولی مجنون قصه در نهایت از اینکه باغچه کوچکشان سیب نداشت:

*تو به من خندیدی و نمی‌دانستی*
...
*و من اندیشه‌کنان غرق در این پندارم*
*که چرا باغچه کوچک ما سیب نداشت*
*شاکیست به همین حقیقت برمیگردد.*

جالب این است که این فقط مجنون نیست که شاکیست، لیلی هم شاکیست و با پرسش‌های دیگری دنبال فهم دلیل غیر صفر بودن خمیدگی مسیر حرکت چشم دریا به چشم حس است:

من به تو خندیدم
چون که می‌دانستم
...
و من اندیشه‌کنان غرق در این پندارم
که چه می‌شد اگر باغچه خانه ما سیب نداشت

اینکه شمعی در دست باشد یا نباشد، اینکه ذره بینی باشد که زوم این کنیم و زوم اوت، اینکه تلسکوپی باشد که کهکشان ببینیم یا هیچ کدام در دسترس نباشد اما با قوانین ریاضیات و با زوم این و زوم اوت کردن بفهمیم که کجا چه خبر است یا چه خبر می‌تواند بدهد جای بسی تامل و تفکر دارد اینکه برهمکنش امواج چشم سر، چشم حس و چشم دریا و گستره نمود اینها دقیقا چیست یا قابل اندازه گیری است یا نه می‌تواند موضوع جالبی باشد.

### ۲. حیرانی لحظه‌ای یا تاریخی

ریاضی‌دان پارسی ما در مصاحبه‌ای دیگر با موسسه کلی، در پاسخ به این سوال که به نظر شما در علم‌ورزی چه چیزی رضایت بخش‌تر و سازنده‌تر است، پاسخ می‌دهد که:

*« به نظر من آن لحظه که می‌گویی «آها!» و هیجان حل، کشف و درک چیزی جدید را حس می‌کنی؛ درست مثل این است که به بالای تپه برسی و منظره پایین را به خوبی ببینی. ولی بیشتر به کوهنوردی طولانی می‌ماند که اصلاً قله‌ای برایش به چشم نمی‌خورد.»*

به عبارت دیگر، هیجان رسیدن به لحظات درک حقایق نامنتظر یا به تعبیر خود او «لحظات آها،» [۳۱] همانی است که حیرانی می‌آفریند و سوخت می‌دهد برای دیدن شاهد زیبای دیگر و چنین بی‌نهایت ادامه می‌یابد. و به نظر او، برای رسیدن به آن انگاری دو چیز لازم است: یکی اینکه از چیدن میوه‌های شاخه‌های پایین باید صرف نظر کرد و دیگر اینکه برای رسیدن به میوه‌های شاخه‌های بالاتر باید صبور بود همچنان که در جایی می‌گوید:

*ریاضیات زیبایی خود را به کسانی نشان می‌دهد که صبور باشند.*

در مرحله کمون غیر از نشستن با یار و می کنار کانال‌های آمستردام، شاید صبر هم عنصر تعیین کننده‌ای داشته باشد. چنان که به وفور در این مورد در ادبیات فارسی یافت می‌شود و شاید از این زاویه کمتر بدان پرداخت شده است. اینکه صبر باعث می‌شود راهی پنهان رو نماید که به ذهن خود آگاه قبلا نیامده است. مولانا می‌فرماید:

*هله نومید نباشی که تو را یار براند*
*گرت امروز براند نه که فردات بخواند؟*

*در اگر بر تو ببندد مرو و صبر کن آن جا*
*ز پس صبر، تو را او به سر صدر نشاند*

*و اگر بر تو ببندد همه ره‌ها و گذرها*
*ره پنهان بنماید که کس آن راه نداند*

فیلسوف معاصر آلن بدیو[1] (۱۹۳۷–) در کتاب در ستایش ریاضیات [۹] معتقد است برای تفهیم ریاضیات به جامعه در درگیر کردن بیشتر آن، لازم است که دو چیز مد نظر قرار گیرد: اول ایجاد شگفتی و حیرانی در دیدن حقایق و زیبایی‌های نامنتظر و دوم بیان مداوم تاریخ علم و خاص در ریاضیات. در واقع در اینجا علم ورزی و به طور خاص ریاضی‌ورزی نه فقط موضوعی خاص و اداری طور برای تعلیم و تعلم در مدرسه، بلکه طی طریق هست برای اکتشاف یا ماجراجویی جادویی و حیرت آور که به فرد کمک می‌کند رازهای جهان هستی را بگشاید [۳].

منظور از تاریخ علم هم در اینجا سیر تحول مفاهیم نیست به تنهایی، بلکه سیر تحول حاملان آن مفاهیم و افکار است در زمانه‌ای که شرایط اجتماعی، سیاسی و زیستی آنها چنان و چنین بوده است. برای رسیدن به درک پیوستگی تاریخی در انتقال مفاهیم و چیستی‌ها، بدیهی است که داشتن آزادی اندیشه و بیان

1. Alain Badiou

نقش به سزایی دارد. فراز و فرودهای تناظر بین آزادی اندیشه و درک پیوستگی تاریخی، یا وزش بادهای سمی و گسستگی پیشرفت فکری بشر موضوع مهمی به لحاظ تاریخی می‌تواند باشد که از حوصله این متن می‌باشد [۱].

بین بیان تاریخ علم و ایجاد زمینه‌های شگفتی و حیرانی، دو روش دیگر هم وجود دارد که اولی به تاریخ علم منتهی می‌شود و دومی به روانشناسی حیرانی. محسن هشترودی (۱۹۷۶–۱۹۰۷)[1] ریاضیدان، شاعر و تاریخ‌دان معاصر در کتاب *سیر اندیشه بشر* [۱۰]، فصل دو، این دو عامل را تجربه علمی می‌نامد و تجربه احساسی. اینها بیشتر نگاه تجربی ارشمیدسی و زیبایی شناسی افلاطونی را تبلیغ می‌کنند.

برای این دو اندرز آلن بدیو، باز شواهد تاریخی و ادبی متناسبی می‌تواند ردیف کرد. یک وجه از یکی از دوبیتی‌های شاعر و ریاضی‌دان پارسی ما خیام شاید به قسمت اول این اندرز مربوط می‌شود:

این چرخ و فلک که ما در او حیرانیم
فانوس خیال از او مثالی دانیم
خورشید چراغدان و عالم فانوس
ما چون صوریم کاندرو گردانیم

و شاید حیرانی و نمود آن در مستی همانی است که در رباعی دیگر سرود:

من ظاهر نیستی و هستی دانم
من باطن هر فراز و پستی دانم
با این همه از دانش خود شرمم باد
گر مرتبه‌ای ورای مستی دانم

ادیبانی قائلند به اینکه خیام اینگونه ابراز درک نادانی خویش کرده است [۱۲]. شاید نمی‌توان به طور قطع این نکته درویش گونه را رد کرد، با این حال می‌شود جور دیگری هم دید. این رباعی می‌تواند بیشتر بازتاب اندیشه و درک ریاضیاتی و هندسی او و حیرت او از دیدن زیبای حقیقت نامنتظر هم باشد، چنان که از مطالعه درک ریاضیاتی و الگوریتمی حل معادلات جبری با روش هندسی و یا درک نجومی که در تنظیم تقویم جلالی می‌توان حدس زد. در کلام دیگر شاعران هم حیرت و حیرانی نقش بسزایی دارد و حیرت هر کس را به قدر بینش او می‌سنجند و لذا هر چه بیناتر حیران‌تر ، برای مثال صائب تبریزی می‌فرماید:

*حیرت هرکس درین عالم به قدر بینش است*
*هرکه بیناتر درین هنگامه، حیران بیشتر*

به هر حال، حقیقت نامنتظر در حل هندسی خیام را چند ده سال بعد می‌توان دید [۲۰]. نکته‌ای که اخیرا در اینجا به آن پرداخته شده است این است که ریاضی‌دان ایرانی گمنام شرف‌الدین طوسی(۱۲۱۳–۱۱۳۵)[2] که بعد از خیام می‌زیست پی برد که با استفاده از ابزار جبری و هندسی می‌توان تا حدی به مفهوم مشتق و حسابان نزدیک شد، ایده‌ای که ۵۰۰ سال بعدتر توسط نیوتن و لایب نیتس تئوریزه شد. در واقع می‌توان گفت که طوسی بر تکنیک مربع‌ها و مستطیل‌ها که در کتاب دوم اقلیدس آمده است تسلط عمیقی داشت؛ همچنین بر طبقه بندی الگوریتمیک چندجمله‌ای‌های درجه سوم و جواب‌های هندسی و شهودی آنها که توسط خیام انجام شد (او چهار سال پس از وفات خیام متولد شده است). طوسی توانست ایده‌های اقلیدس و خیام را به صورت خلاقانه‌ای ترکیب کرده و ماکزیمم چند جمله‌ای‌های درجه سه را به دست آورد و از آن برای پیدا کردن جواب‌های مثبت چندجمله‌ای‌های درجه سه استفاده کند، تو گویی بدون اینکه بداند و اسم ببرد از مفهوم مشتق و نقطه بحرانی استفاده می‌کرده است، در حالی که این مفاهیم قرن‌ها بعد به واسطه استفاده از مفهوم حرکت و کمی کردن آن با حسابان به وجود آمده، گسترش یافتند. توجه به این نکته که مفهوم حرکت در فلسفه یونانی و هندسه اقلیدسی بسیار غریب بود [۷] ، ایده شرف‌الدین را شگفت آور می‌سازد.

حقیقت نامنتظر در حل هندسی خیام برای معادلات جبری باز بیشتر نمود پیدا می‌کند؛ اگر ببینیم که ۷۰۰ سال بعد از خیام، گالوای جوان با ایده گروهای تقارنی اختصاص داده شده به هر معادله جبری توانست انقلابی به وجود آورد در اینکه چه معادله جبری اصولا قابل حل است یا نیست، بنا بر اینکه آن گروه حل‌پذیر باشد یا نه. نتیجه فلسفی شاید این باشد که انتخاب و فهم ابزار خاص برای حل مسایل بسیار مهم است، گاهی با ابزار و گفتمانی خاص یا به سادگی به تناقض گفتمانی منجر می‌شود یا تا ابدالدهر مجبور می‌شوید برای ارضای خودخواهی خود، آب در هاون بکوبید. یا ببینیم که سوفی لی[3] بعد از گالوا و خیام توانست ایده حل نه معادلات جبری، بلکه معادلات دیفرانسیل را با استفاده از هندسه گروه‌های تقارنی نامتناهی البعد تعمیم دهد.

قضیه امی نوتر (۱۹۳۵–۱۸۸۲)[4] در ساختن پلی بین گروه‌های ناورداهای هندسی با وجود قوانین بقای پدیده‌های طبیعی و فیزیک این حقیقت نامنتظر را بیشتر دیدنی‌تر می‌کند. در واقع قضیه نوتر [۳] می‌گوید که اگر سیستمی به اندازه کافی دارای «درجه آزادی» و «حق انتخابی» باشد، در آن صورت می‌توان «وجود» قوانین بقا انرژی‌های طبیعت را انتظار داشت. لذا می‌توان حق داد که چرا خیام باید حیران باشد از دیدن حقایق نامنتظر.

مثال‌های متنوع دیگری درسطوح مختلف می‌تواند مطرح باشد: این حقیقت که در ساختارهای متناهی گروه‌های تقارنی، تعداد اعضای

1. Alain Badiou
2. Amalie Emmy Noether
3. Sofya Vasilyevna Kovalevskaya
4. Amalie Emmy Noether

زیر ساختار تعداد اعضای ساختار را عادی می‌کند. این به قضیه لاگرانژ (۱۸۱۳–۱۷۳۶)[1] معروف است. چگونه تناهی و ساختار منجر به نتیجه‌ای در نظریه اعداد می‌شود؟ برای هر کس می‌تواند حیرت آور باشد. یا اینکه عمود منصف‌ها، ارتفاع‌ها و میانه‌های یک مثلث همگی از یک نقطه عبور می‌کنند و جالب‌تر اینکه هر سه این نقاط در یک راستا هستند که به آن خط اویلر می‌گوییم. اینها می‌تواند نتایج نامنتظر و حیرت آور ساختارهای باشد که انسان‌ها خلق کردن برای دیدن حقایق و زیبایی‌های جهان هستی. تاثیر نامنتظر ریاضیات در فیزیک و برعکس هم یا به عبارتی زیبایی و حقیقت، همیشه بحث برانگیز و نابدیهی بوده است.

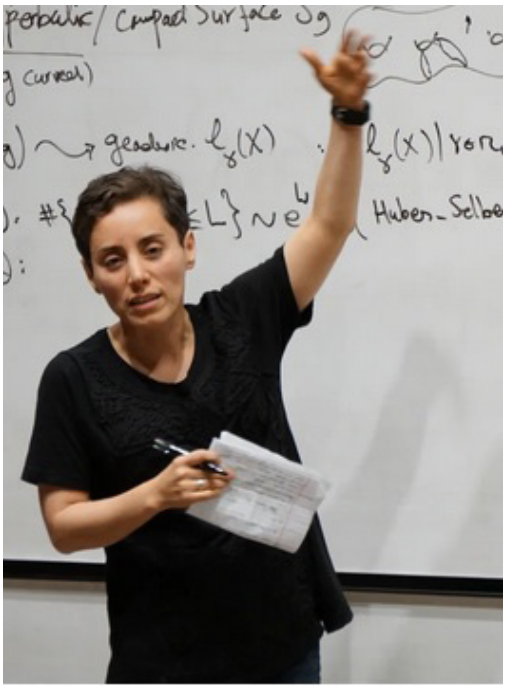
شاید تاثیر شناخت شناسی عامل حیرانی در آموزش علم ورزی آن چنان مورد توجه قرار نگرفته است. مخصوصا اینکه به لحاظ روان شناختی می‌تواند دینامیک هم باشد! همچنان که فرد ۱۰ ساله برداشتی و فهمی از غزلیات حافظ و رباعیات خیام دارد که با برداشت انسان ۴۰ ساله متفاوت است. آن چیزی و آن آموزشی که فرد ۲۰،۱۵،۱۰،۵ دارد از حیران شدن، با هم متفاوت است. ابزاری که می‌توان به کاربرد برای رسیدن به آن حیرانی هم متفاوت است. امروزه شاید با شهود کامپیوتری یا علم ورزی تجربی، بتواند حیرانی دیدن زیبایی هندسه اقلیدسی، یا نظریه اعداد، یا جهان‌های هندسی غیر اقلیدسی، یا حسابان شهودی، حتی شهود اقتصادی را به فرد ۱۲ ساله چشاند.

روش‌های دیگری نیز برای رسیدن به حیرانی در سطوح مختلف وجود دارد. با توجه به پیشرفت علم و مخصوصا هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، شاید تقویت این شگفتی شکلی متفاوتی هم داشته باشد. ریاضیات تجربی در اینجا نقش مهمی دارد. این اصلاح شاید با ریاضیات تجربی که ارشمیدس مبدع آن هست اشتراکی داشته باشد. گاهی برای بررسی یا راست‌آزمایی حدسیات ریاضی می‌توان از این روش استفاده کرد. مخصوصا با آشنایی نسل جدید با ابزار هوش مصنوعی، می‌تواند نقش مهمی در تغییر سیستم آموزشی هم تلقی شود و مورد بازنگری بیشتری قرار بگیرد.

بحث تاریخ علم ورزی(نه فقط تاریخ علم خاص) که پیشنهاد دوم آلن بدیو بود شاید ملموس‌تر باشد. نگاه فلسفی تنیده شده با شرایط اجتماعی به وضوح در سطح علم ورزی موثر است. به عنوان مثال فلسفه نسبی گرایی شاید باعث شد که مفهوم مختصاتی دکارت و به طبع مختصات‌های دیگر و از اینجا مفاهیم فضا و چنبره و توپولوژی (فضای بی مختصات!) به وجود بیاید. شاید اعجاب آور و حیرت انگیز باشد که خیام بدون این ابزار و ۴۰۰ سال قبل از دکارت چنان مفهوم فضا و معادلات جبری را به هم ربط داده و مهمتر در سطحی مناسب طبقه بندی کند.

## ۳. چرا زیبایی حقیقت هست؟

آنچه گذشت و آنچه خواهد آمد، درواقع تلاشی بود برای اضافه کردن فصلی خاص به کتاب چرا زیبایی حقیقت است [۲۱] نوشته یان استوارت (۲۰۱۷–۱۹۴۵)[2]. در واقع جمع بندی شخصی از این کتاب، از جمله فصولی است که مربوط به خیام، گالوا، لی و ادوارد ویتن (–۱۹۵۱)[3] بود و اینکه چه قسمت‌هایی از کارهای شخصیت اصلی ما می‌توانست در این مسیر قرار گیرد. برای این کار لازم بود تاریخچه‌ای از معادله‌ای خاص و نحوه به وجود آمدن آن و کارکردهای آن مورد توجه قرار بگیرد. ضمن اینکه سعی شد از همان استایل ادبیاتی نویسنده کتاب پیروی کنیم تا حدی که توانستم. درباره این شخصیت، یعنی مریم میرزاخانی، مقالات متعددی به فارسی، از جمله [۴،۵،۶،۷] نوشته شده است.



شاید بد نباشد برای اینکه بفهمیم که چرا زیبایی حقیقت است، شاهدی بیاوریم از کارهای مریم میرزاخانی و اینکه چگونه نتایج نامنتظر و دور به هم مرتبط شده‌اند تا قطعه ادبی–علمی آفریده شود. مقاله سنایی [۶]، به مانند مقاله شکری، نگاهی تاریخی و کمتر فنی به ریشه‌های علمی کارهای مریم میرزاخانی دارد. اینکه چگونه مسائل متعدد باعث پیدایش پل‌های زیبا می‌شود که سرزمین‌های حقایق به ظاهر دور را به هم متصل می‌کند. اینکه چگونه هایزنبرگ (۱۹۷۶–۱۹۰۱)[4] از فیزیک الکترون پلی می‌زند به ریاضیات جبر و ساختار ماتریس‌ها. اینکه چگونه اویلر (۱۷۸۳–۱۷۰۷)[5] از مسئله کونیزبرگ و پل‌های ارتباطی بین محله‌های مختلف شهر از ریاضیات به شهود تجربی و توپولوژی می‌رسد.

1. Joseph-Louis Lagrange
2. Ian Nicholas Stewart
3. Edward Witten
4. Werner Karl Heisenberg
5. Leonhard Euler

بالاخره مریم میرزاخانی چگونه از شهود تجربی به شهود هندسی می‌رسد. مقاله شکری [۷] درباره دستاوردهای مریم میرزاخانی هم با تاریخ علم شروع می‌شود، به واسطه قضیه کلاسیک بزو[1] به نظریه انقطاع ورود پیدا می‌کنند و بحثی تاریخی جالبی در نظریه ریسمان و ارتباط آن با فضاهای پیمانه‌ای دارند. افتخاری در [۴] از حدس اپنهایم شروع می‌کند که درباره شرط لازم و کافی برای داشتن تصویر چگال $Z^n$ تحت نگاشت یک فرم مربعی ناتباهیده است. او این را ربط می‌دهد به مسئله بیلیارد چند ضلعی با زوایای گویا و اینکه رفتار مجانبی تعداد مسیرهای متناوب با طول حداکثر $l$ به $l^2$ ربط دارد با ضرایب ثابت. در ادامه نشان می‌دهد که چگونه این ضریب ثابت توسط میرزاخانی و محمدی به صورت میانگین انتگرالی نوشته می‌شود. حال اگر به جای بیلیارد و مسیرهای متناوب، دیسک پوانکاره بنشانیم و ژئودزی‌های متناظر، میرزاخانی نشان داد که باز می‌شود درباره رفتار مجانتی آنها نتایج مشابهی داشت. زیبایی وقتی خود را نشان می‌دهد که زوم اوت کنیم و ببینیم که اگر همه ساختارهای هذلولوی‌ها را جمع کنیم و همه مسیرهای ژئودزی را، آنگاه آن ضرایب متناظر مجبورند متغیر باشند و تابع قوانین فیزیک! آن قانون چیزی نیست جز معادله کی دی وی که امواج سالیتونی را توصیف می‌کنند که در طول حرکت شکل و سرعت آن تغییر نمی‌کند و در برهمکنش غیر خطی آنها با هم در واقع شبیه برهمکنش ذرات بنیادی دیگر مانند الکترون می‌شود، به همین دلیل آن امواج را سالیتون نامیدند. در بخش بعد به تفصیل به تاریخچه معادله کی دی وی در صد و پنجاه سال اخیر می‌پردازیم. تاریخچه‌ای که از مشاهده ساده امواج آب رودخانه شروع شده، در مهندسی در ساخت کشتی‌هایی که خطوط تلگراف اروپا را به آمریکا متصل می‌کرد به کار رفته، مدل بندی شده، به ریاضیات منحنی‌های بیضوی رفته، به مطالعه تقارن‌های نامتناهی البعد و جبرهای سوفی لی رفته، به پدیده ذرات بنیادی کشیده شده و آزمایش عددی فرمی‌کشیده شده، به پدیده اینترنت کشیده و در ادامه به کار عمیق مریم میرزاخانی.

جهت راحتی خواننده، یادآوری می‌کنیم که قسمتی از بخش بعد می‌تواند تکنیکی باشد و می‌توان از آن گذر کرد. با این حال به جهت تکمیل بحث اینجا آورده شده است. شاید برای دانشجویان کارشناسی تمرین خوبی باشد یا اینکه بتوانند با پیگیری‌های بیشتر ترغیب شوند که بحث تکنیکی را با منابع بهتری مثل کتاب معتبر و ساده و قابل فهم [۲۴] ادامه دهند.

## ۴. تلگراف بین مدل زیبای نامنتظر و حقیقت

قصه معروف جان اسکات راسل (۱۸۸۲–۱۸۰۸)[2] تقریبا در تمام کتاب‌هایی که به امواج سالیتونی اختصاص دارد آمده است [۲۳,۲۴]. جان اسکات راسل در سال ۱۸۰۸ در اسکاتلند به دنیا آمد. پدرش کشیش بود و دوست داشت که پسرش نیز در کلیسا حرفه‌اش را ادامه دهد. اما به دلیل علاقه و استعداد او در مهندسی و علوم، به او اجازه داد به دانشگاه برود و در سن ۱۶ سالگی مدرک خود را اخذ کند. در سن ۲۴ سالگی، راسل به عنوان یک استاد موقت در دانشگاه ادینبورگ منصوب شده بود. در همین زمان، به هدف طراحی کشتی‌های بهتر، شروع به مطالعه امواج کرد تا از این طریق درک بهتری از برهمکنش‌های بین بدنه کشتی و آب به دست آورد. ماه آگوست سال ۱۸۳۴، جان اسکات راسل در کنار کانال یونیون نزدیک ادینبورگ بر روی اسب خود نشسته بود و به آب نگاه می‌کرد که چیزی را دید که زندگی‌اش را تغییر داد [۲۲]:

*«من به حرکت قایقی که توسط یک جفت اسب به سرعت در کانالی باریک کشیده می‌شد، توجه می‌کردم. ناگهان قایق متوقف شد، اما جرم آب در کانال که در حرکت قرار گرفته بود، متوقف نشد؛ آب در قسمت جلوی قایق به شدت در حال آشفتگی جمع شد و سپس ناگهان از آن جدا شده و با سرعت بالا به صورت یک برآمدگی بزرگ و تنها، یک توده گرد و صاف و دقیق از آب، جلو می‌رفت. این توده آب، به نظر می‌رسید بدون تغییر شکل یا کاهش سرعت، در طول کانال به جلو حرکت می‌کند. من در پی آن روی اسب ادامه دادم و هنوز در سرعتی حدود هشت یا نه مایل در ساعت جلو می‌رفت و شکل اصلی خود را حفظ می‌کرد. ارتفاع آن به تدریج کاهش یافت و پس از یک یا دو مایل، در پیچ و خم‌های کانال، دیگر ندیدمش.»*

به عبارت دیگر، او یک برآمد آب را که توسط قایق در کانال ایجاد شده بود، مشاهده کرد و آن را چند مایل دنبال کرد. بدون شک، افراد دیگری قبل از او موج‌های مشابهی را دیده بودند، زیرا شرایط ایجاد آن‌ها بسیار غیر عادی نبود. اما ممکن است هیچ کس قبل از او به این اندازه به آن توجه دقیقی نکرده باشد. مهم این است که موجی که او دیده بود، همان کاری را نکرد که شما انتظار دارید. از تجربیات ما با موج‌ها در حوضچه‌ی حمام یا ساحل، ممکن است انتظار داشته باشید یک برآمد حرکتی از آب، نهایتا به دو شکل زیر درآید:

شکل ۱) عرض آن افزایش می‌یابد و کم‌عمق‌تر می‌شود و به سرعت به موجک‌های ریز و کوچکی تبدیل می‌شود که همانند موجی است که شما ممکن است با دست خود در یک استخر شنا ایجاد کنید و به سرعت ناپدید می‌شود.
شکل ۲) مانند موج‌های ساحلی شکسته می‌شود، طوری که قله آن تیز می‌شود و جلوی بقیه‌ی موج را می‌گیرد تا زمانی که دیگر تکیه‌گاهی برای آن نماند و به زور بر زمین می‌افتد.

بنابراین، با پیش‌آگاهی از این دو نوع شکل از امواج، مشاهده آن امواج خاص برای راسل واجد اهمیت زیادی بود ، امواجی که هیچ

1. Bézout›s identity

2. John Scott Russel

یک از این کارها را انجام نمی‌داد، بلکه اصولا شکل و سرعت خود را حفظ می‌کرد و بدون تغییر در طول کانال مسافت زیادی را طی می‌کرد. او حتماً فکر می‌کرد: «واو، آن اسب‌ها و قایق فقط یک تکانه کوچک به این موج دادند و این موج بدان صورت بلافاصله حرکت کرد –چه جالب می‌شد اگر می‌توانستم قایقی بسازیم که چنان بکند.»

راسل از عبارت «موج تنهایی» و «موج انتقالی» برای توصیف پدیده‌ای استفاده کرد که در آن روز مشاهده کرده بود. او با عبارت «موج تنهایی» به واقعیتی اشاره می‌کرد که این موج فقط یک قوز دارد و با الگوی متناوب بیشتر و شناخته شده سینوسی که انسان ممکن است ابتدا به ذهنش برسد همخوانی ندارد. درباره «موج انتقالی» ممکن است او به این پرسش اشاره کند که آیا تک مولکول‌های آب همراه با قوز حرکت می‌کنند یا فقط بالا و پایین می‌روند، اما اینها نحوه استفاده امروزی از این اصطلاح در نظریه سولیتون نیست. برای ما، «انتقال» به واقعیتی اشاره دارد که پروفایل موج – شکلی که آن را از روبرو مشاهده می‌کنیم – در طول زمان ثابت می‌ماند. برای مطالعه موج‌های تنهایی خود، راسل یک مخزن موج به طول ۳۰ فوت در باغ پشتی خود ساخت. او متوجه شد که می‌تواند به طور قابل اعتمادی آن‌ها را در مخزن خود تولید کند و به صورت تجربی بررسی کند. بین جالب‌ترین چیزهایی که کشف کرد، وجود یک رابطه ریاضی بین ارتفاع موج k، عمق آب در حالت ایستا h و سرعت حرکت موج c بود. او باور داشت که این پدیده اهمیت بالایی دارد و به همین دلیل آن را به انجمن بریتانیایی پیشرفت علم [۲۲] گزارش داد. اگرچه می‌توانیم با دید حال حاضر بگوییم که انتظار او بجا بود از اینکه آینده درخشانی برای امواج تنها قائل بود، اما ایده‌های او توسط نهاد علمی آن زمانه به خوبی پذیرفته نشدند. به خصوص، دو پژوهشگر بزرگ ریاضی و فیزیک، جورج بیدل ایری[1] (۱۸۹۲–۱۸۰۱) و جورج گابریل استوکس[2] (۱۹۰۳–۱۸۱۹)، هر کدام ادعا کردند که نظریه موج راسل به طور کامل نادرست است. شاید مشکل واقعی راسل این بود که اگرچه بی‌شک متفکری بزرگ بود، اما تخصص کمی در ریاضیات داشت. به جز رابطه بین ارتفاع موج و سرعتی که به آن اشاره کردیم، او هیچ تحلیل ریاضی جدی از این پدیده انجام نداد. اما استوکس و ایری، به عنوان متخصصان در استفاده از معادلات دیفرانسیل برای مدل سازی پدیده‌های موج، بودند. و متاسفانه، هر دو به طور اشتباه باور داشتند که تحلیل‌هایشان نشان داده است که نظریه راسل نادرست است. ایری در مقاله «جزر و مد» در سال ۱۸۴۵، فرمولی متفاوت برای سرعت موج ارائه می‌دهد. او اعتقاد داشت که این فرمول با نظریه راسل در تناقض است و می‌نویسد:

ما نمی‌خواهیم این نوع امواج تنها را واجد عنوان «شایسته بزرگ» یا «اصلی» بپذیریم.

استوکس در سال ۱۸۴۷ مقاله‌ای به نام «درباره نظریه امواج نوسانی» در مورد امواج با نمودار متناوب (مانند موج‌های سینوسی) می‌نویسد و فرمولی برای چنین موجی که دارای تعداد بی‌نهایت قوز هست ارائه می‌دهد، و ادعا می‌کند که «تنها نوعی از امواج است که ویژگی انتشار با سرعت ثابت و بدون تغییر شکل را داراست – لذا یک موج تنها به این شکل قابل انتشار نیست. بنابراین، موج تنها که توسط راسل مشاهده شده است فرسایشی خواهد شد.``

الان دیگر آسان است درک کنیم که چرا برای ایری و استوکس سخت بود مشاهدات راسل را باور کنند. درواقع می‌توان جواب‌هایی برای معادلات دیفرانسیل پیدا کرد که شکل یک موج تنها با یک قوز را با سرعت ثابت نشان دهد. با این حال، این جواب‌ها برای یک معادله دیفرانسیل خطی بود. یکی از نتایج این خطی بودن این است که می‌توان جواب را در عدد ثابت ۲ (به این ترتیب دو برابر کردن ارتفاع) ضرب کرد و هنوز هم یک جواب داشت طوری که سرعت آن هم تغییر نکند. واقعیت این است که راسل ادعا کرد که سرعت موج او به ارتفاع آن بستگی دارد که به وضوح نشان می‌دهد یک مدل ریاضی از این وضعیت ضرورتا غیرخطی خواهد بود و در این صورت انتظار داشتن جوابی شکسته شده منطقی خواهد بود. علاوه بر این، تجربه‌های قبلی باید به آنها تفهیم می‌کرد که پراکندگی یک عامل مهم در پویایی امواج آب باشد، در این صورت چیزی شبیه به «آشفتگی» همزمان نیز رخ می‌دهد. بین «شکستگی» و «پراکندگی»، دشوار است که ببینیم چگونه یک جواب تنها با شکل زیبا، به وجود آمده و با یک قوز می‌تواند وجود داشته باشد، و این چیزی است که آن‌ها سعی کردند به طور دقیق در تحلیل ریاضی خود درک کنند. چنین بینشی دست کم تا حدی صحیح است. شکستگی و پراکندگی که آن‌ها انتظار آن را داشتند، هر دو وجود دارند. با این حال، نتیجه آن‌ها که این موضوع امکان وجود یک موج تنها را حذف خواهد کرد، نادرست بود. در واقع، ترکیب مناسب این دو موجب تولید چندین نتیجه غافلگیرکننده و غیرمنتظره می‌شود. متاسفانه، این دو ریاضی‌دان بزرگ به غلط نظریه راسل را رد کردند. بی‌شک، این موضوع برای راسل ناراحتی کننده بود. به نظر می‌رسید که علاقه او به امواج تنها یا در جای نادرستی مطرح شده بود یا اصولا نادیده گرفته می‌شد. با این حال، در بین طراحان کشتی، او به خاطر تعیین سرعت طبیعی حرکت کشتی برای یک عمق مشخص (نتیجه‌ای که به طور مستقیم از تحقیقاتش در مورد امواج تنها به وجود آمده بود) و برای کار او بر روی بزرگترین کشتی ساخته شده توسط انسان تا آن زمان به یاد می‌ماند. جالب است بدانیم که این کشتی در سال ۱۸۶۵ برای نصب کابل تلگرافی ترنس آتلانتیک به طول ۴۲۰۰ کیلومتر بین ایرلند و نیوفاوندلند استفاده شد. این کابل اولین سیستم ارتباطی الکترونیکی بین اروپا و آمریکا بود. این سیستم روابط شخصی،

1. Sir George Biddell Airy

2. Sir George Gabriel Stokes

تجاری و سیاسی بین مردم در سراسر اقیانوس آتلانتیک را تغییر داد، چنان که سیستم پیشرفته‌تر امروزی در قالب امواج نوری و اینترنت، ایمیل‌های مردم را بدون تغییر محتوا، شکل و آدرس به هر جای دنیا که بخواهند می‌فرستد.

## داستان معادله کرتوخ-دو فریس(کی دی وی)

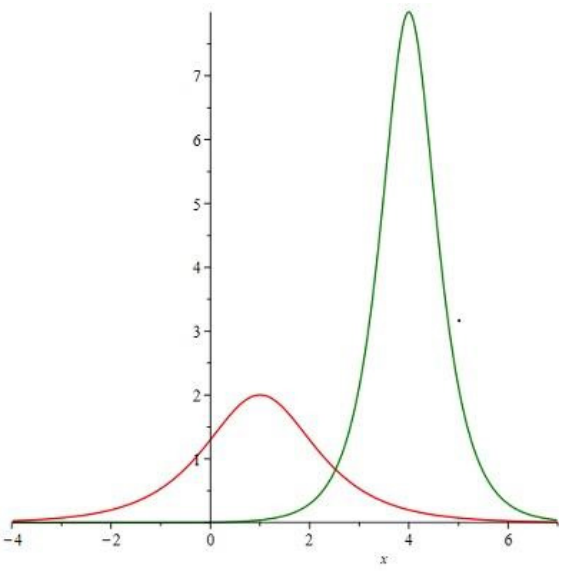
تا سال ۱۸۹۵، راسل و ایری در گذشته بودند و جورج گابریل استوکس در واقع بازنشسته شده بود. بنابراین، اختلاف نظر درباره موج تنهای راسل کمترین تأثیر حسی را داشت، هر چند به طور کامل فراموش نشده بود. در همان زمان، ریاضیدان معروف هلندی به نام دیدریک کرتوخ[1](۱۹۴۱-۱۸۴۸) و دانشجویش گوستاف دو فریس[2] (۱۹۳۴-۱۸۶۶) تصمیم گرفتند موج‌های آب کانال را با استفاده از معادلات دیفرانسیل مدل سازی کنند. (شاید آن‌ها از این واقعیت الهام گرفته بودند که کشور محل سکونت آن‌ها، هلند، دارای تعداد زیادی کانال است!). آنها با شروع از معادلات بسیار دقیق ولی پیچیده ناویر-استوکس، برای ساده‌سازی فرضیاتی را روی آن معادله اعمال کردند. این فرضیات شامل وجود یک بدنه آب بسیار باریک به گونه‌ای که موج را تنها با یک متغیر فضایی و ثابت توصیف کند، همچنین عمق آن باریکه کم و ثابتی است که در کانال‌ها یافت می‌شود. با ترکیب همه این موارد، آن‌ها به معادله زیر رسیدند:

$$u_t = \frac{3}{2} u_{xxx} + \frac{1}{4} uu_x$$

به دلیل حروف ابتدایی آن‌ها، این معادله مشهور به «معادله KdV» شناخته می‌شود. ممکن است پیشرفت ریاضی در درک موج تنهای راسل به این دلیل به تاخیر افتاده باشدکه تکنیک‌های ریاضی مناسب در دسترس قرار بگیرد. مطالعه منحنی‌های بیضوی در دهه‌های پس از مشاهده اولیه راسل به نظر نمی‌رسید که کاربردهایی در مطالعه امواج آب داشته باشد. با این حال، با استفاده از نتایج این حوزه از «ریاضیات محض»، کورتوگ و دو فریس توانستند خانواده بزرگی از جوابهای معادله KdV را به دست آورند که در طول حرکت و شکل خود را حفظ می‌کنند، به دست آورند. در این میان، به عنوان مثال توابع هذلولی شکل

$$k_f(x,t) = 2k^2 \mathrm{sech}(kx - k^3 t)$$

که برای هر مقدار ثابت k، در معادله KdV صدق می‌کنند قرار دارند. این فرمول، یک موج تنهایی متحرک مانند موج راسل را ارائه می‌دهد که با سرعت $k^2$ حرکت می‌کند و ارتفاع آن $2k^2$ است. به عنوان مثال، در شکل زیر جوابهای $f_1$ و $f_2$ در کنار هم مقایسه شده‌اند. توجه کنید که در هر حالت، ارتفاع موج دو برابر سرعت آن است.




دو مورد در اینجا باید شگفت‌انگیز باشد: آن‌ها فرمولی دقیق برای بسیاری از جواب‌های یک معادله با مشتقات جزیی غیرخطی پیدا کرده‌اند و به نظر می‌رسد که این جواب‌ها قادر به جلوگیری از شکستگی و پراکندگی است، علیرغم اینکه شهود استوکس معکوس آن را پیش‌بینی کرده است. به عنوان مثال، در نظر بگیرید که معادله KdV معادله‌ای تکاملی است که شبیه به ترکیبی از دو معادله است، یکی

$$u_t = \frac{3}{2} u_{xxx}$$

که دارای جواب‌هایی است که باعث جدایی اجزای امواج با فرکانس‌های مختلف یک پروفایل اولیه «تک‌قوس» می‌شد که نتیجه آن تلف شدن آن بود. مهم‌تر، معادله غیرخطی

$$u_t = \frac{1}{4} uu_x$$

به نام معادله برخر[3] (۱۹۸۱-۱۸۹۵) است که برای آن جوابی دارد که خیلی زود هر پروفایل اولیه «تک‌قوس» را از بین می‌برد. با این حال، به طریقی، ترکیب این دو عبارت به نظر می‌رسد که هر دوی این جلو چنان مشکلاتی را می‌گیرد.

ممکن است این شگفتی‌ها را به عنوان اتفاقاتی ساده بشود نادیده گرفت، که شاید ارزش بررسی بیشتری نداشته باشد. به طور خاص، این حقیقت که جواب‌ها می‌توانند به صورت صریح نوشته شوند، نتیجه‌ای از یک اتفاق است که معادله KdV شباهتی با یک معادله مرتبط با منحنی‌های بیضوی دارد و ممکن است بتوانیم بگوییم که در اینجا اتفاقی است که تأثیر تغییر شکل (از عبارت $u_{xx}$) و پراکنش (از عبارت $u_{xxx}$) به طور کامل تعادل دارد و باعث از بین رفتن آن‌ها می‌شود. با این حال، طولی می‌کشد تا هر کسی درک

1. Diederik Korteweg
2. Gustav de Vries
3. Johannes Martinus Burgers

کند که این‌ها تنها اتفاق و تصادف نیستند. در واقع، بسیاری از جواب‌های معادله KdV می‌توانند به صورت صریح نوشته شوند و منشأ هندسی دارند و «تعادل کامل» که امکان وجود یک جواب موج تنهایی به یک معادله غیرخطی را فراهم می‌کند، به اندازه‌ای کمتر نیست که فکر می‌کنیم.

برگردیم به داستان امواج سالیتونی و ایده کورتوگ و شاگردش. در واقع آنها با استفاده و تقلیل هوشمندانه از معادله ناویر–استوکس و انتخاب ترکیبی مناسب از تعادل پیش گفته و دانش وتکنولوژی منحنی‌های بیضوی به جواب‌های موجی تنهایی که راسل به طور شهودی و آزمایشگاهی به آن رسیده بود رسیدند. چنین چینشی از ترکیبات ایده‌های ریاضیاتی نزدیک و ترکیبیاتی تاریخی ناشی از پیشرفت علوم ریاضی و فیزیک و بعدا کامپیوتر منجر به کشفیاتی شد که پدیده‌های فیزیکی یا ریاضیاتی دور را به هم ربط می‌داد. با این حال نکته بسیار مهم و کلیدی اینجاست که ارتباط معادله کی دی وی با هندسه جبری، جبرهای لی و فیزیک، بیشتر از آنجا ناشی می‌شود که معادله کی دی وی نه فقط یک معادله تکی، بلکه بخشی از یک سلسله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. یعنی در آن سلسله در واقع بینهایت معادله دیفرانسیل وجود دارد که معادله کی دی وی یکی از آنهاست. این نکته مرزی هست که فرق نگاه ریاضیات کاربردی طور و محضی طور را تمیز می‌بخشد. می‌توان ثابت کرد که معادله KdV دارای بینهایت تقارن هست از نوع لی و این معادله دارای دو ساختار هامیلتونی–همتافتی سازگار با هم هست. شاید این تمثیل جالب باشد که می‌شود تقارن‌های بینهایت کی دی وی را از روی نمودار معروف به لنارد–مگری [۳۳] دید با داشتن دو همیلتونی. در واقع همان طور که می‌شود برای پیدا کردن جواب‌های چندجمله‌ای‌ها از تمثیل برج‌های مثل برج بابلی، برج کاردانو یا آبل دید، می‌شود تقارن‌های لی برای معادله کی دی وی را با برج‌های دوقلوی لنارد–مگری بیان کرد [۲,۲۱].

## ۵. جواب‌های هندسی به مدل‌بندی‌های جهان فیزیکی و حقیقی

همچنان که در بالا در تاریخچه معادله کی دی وی اشاره شد، بسیاری از پدیده‌های فیزیکی را می‌توان صورت معادله دیفرانسیل بیان کرد. با این حال ارتباط این معادلات دیفرانسیل با فضاهای هندسی شفاف و بدیهی نیست. شعبده زیر [۲۴] می‌تواند به درک این مطلب کمک کند تا بدون وارد شدن به مطالب تکنیکی بتوان درکی شهودی به دست داد. تصور کنید ثابت‌های $c_1$, $c_2$ و $c_3$ را می‌خواهیم چنان پیدا کنیم که معادله دیفرانسیل غیرخطی

$$u_{xx}{}^2 + u_{yyy}{}^2 + u_{zzzz}{}^2 = 1$$

دارای جواب

$$u(x, y, z) = \frac{c_1}{2}x^2 + \frac{c_2}{3!}x^3 + \frac{c_3}{4!}x^4$$

باشد. با کمی محاسبه می‌توان فهمید که آن ضرایب باید در معادله جبری آشنای

$$c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1$$

صدق کنند. به عبارتی فضای هندسی جواب معادله غیرخطی مذکور متناظر است با کره واحد.

پیدا کردن چنین شهودی برای معادله کی دی وی ساده نبوده است. در ادامه خواهیم دید که برای معادله کی دی وی می‌توان فضای جواب را گراسمنین‌ها دید، یعنی مجموعه زیر فضاهای دو بعدی در فضای اقلیدسی چهار بعدی. در دهه ۶۰ میلادی کروسکال و لکس و محققین دیگر متوجه شدند که معادله کی دی وی دارای بینهایت قانون بقای انرژی و ماده است. برای فهم این قضیه بهتر است به جای تک معادله م کی دی وی، سلسله کی دی وی را در نظر بگیریم. قضیه گلفند دیکی [۳۴] می‌گوید که اگر عملگر لکس

$$L = \partial_x^2 + 2u(t_1, t_2, \cdots)$$

را در نظر بگیریم، آنگاه این سلسله به شکل زیر است:

$$L_{t_k} = [A_k, L], \qquad A_k = \frac{1}{(2k+1)!!}(L^{\frac{(2k+1)}{2}}) +$$

که در این جا متغیرهای مستقل $t_0, t_1, \ldots$ را با مصالحه متغیرهای زمان می‌نامیم. چند معادله اول آن به این شکل است ($x=t_0$).

$$u_{t_1} = u_x\,,\ u_{t_2} = \frac{3}{2}u_{xxx} + \frac{1}{4}uu_x\,,\ u_{t_3} = u_{xxxxx} + \cdots$$

معادله دوم همان معادله کی دی وی (۱) هست. همه این معادلات با هم جابجا می‌شوند و به نوعی تشکیل جبر لی نامتناهی‌البعد می‌دهند.

از دل توسعه غیرخطی فوریه برای حل معادله کی دی وی، روش مستقیمی توسط مکتب کیوتو ژاپن برای پیدا کردن جواب‌های سالیتونی پیدا شد که منجر به ایده مفهوم تابع تاو برای معادله کی دی وی شد. تصور کنیم که دنبال تابع $\tau(x,t)$ می‌گردیم که با آن تابع جدید

$$u(x,t) = (\log\tau)_{xx}$$

جواب معادله کی دی وی باشد. در آن صورت تابع تاو باید در معادله پی دی ای، به نام معادله هیروتای معادله کی دی وی زیر صدق کند:

$$3\tau_{xx}{}^2 + 4\tau_t\tau_x - 4\tau\tau_{xt} - 4\tau_x\tau_{xxx} + 4\tau\tau_{xxxx} = 0$$

این معادله را می‌توان همگن گرفت اگر وزن مشتق نسبت به متغیر فضا را یک و وزن مشتق نسبت به متغیر زمان را (۳) بگیریم. تابع

مولد زیر، به نام تابع به خوبی وزن دار شده، یک تابع تاو هست:

$$\phi_{\lambda}^{(n)} = \frac{\partial^n}{\partial z^n} \exp(zx + z^3 t)_{z=\lambda}.$$

حال اگر رونسکین دو به دوی $\omega_ij$ از چهار تابع نوع بالا را در نظر بگیریم و ترکیب خطی

$$\tau = \sum c_{ij}\, \omega_{ij}$$

را بسازیم، در آن صورت این تابع تاو است اگر و تنها اگر رابطه پلوکر یعنی

$$c_{12}c_{34} - c_{13}c_{24} + c_{14}c_{23} = 0$$

برقرار باشد. به عبارتی فضای جواب معادله هیروتا فضای گراسمنین است. این نتیجه نامنتظر الهام بخش هندسه جبری‌دانان بوده است برای مطالعه ارتباط بین معادلات انتگرال پذیر مثل کی دی وی، غیرخطی شرودینگر با هندسه جبری.

در واقع بعدها معادلات انتگرال پذیر بیشتری کشف شدند، از جمله معادله شرودینگر: معادله غیرخطی شرودینگر هم انتگرال پذیر است دقیقا به همان معنایی که معادله کی دی وی هست. فرم دقیقا آن به صورت

$$iu_t = u_{xx} \times u^2 u$$

هست که در آن $u(x,t)$ یک تابع مختلط است.

شاید بد نباشد اگر دسته‌ای منحنی که به صورت خاصی حرکت می‌کنند، شبیه گردباد، با دود سیگاری که به شکل حلقه‌ای بیرون داده می‌شود، را درنظر بگیریم در آن صورت چگونه می‌توانستیم این حرکت موج طور هندسی را مطالعه کنیم، آیا انتظار داریم که از الگوی فیزیکی تبعیت کند؟ این دسته از منحنی‌ها را لوی چیویتا[1](۱۹۴۱–۱۸۷۳) و شاگردش دو ریوس[2] [۳۶] طراحی کردند

$$\gamma_t = \gamma_x \times \gamma_{xx} = \kappa B$$

بعدتر هاشیموتو [۳۵] ثابت کرد که اگر ناورداهای هندسی این منحنی یعنی تاب $\tau$ و خمیدگی $\kappa$ را در نظر بگیرید که به زمان هم الان وابسته‌اند غیر از طول قوس،انگاه با ساختن هنرمندانه تابعی از این دو

$$u = \kappa \exp(i \int \tau + dx)$$

نشان داده می‌شود که آن تابع مختلط در معادله شرودینگر بالا صدق می‌کند. چنین پلی از حرکت دینامیکی ساختارهای هندسی و ارتباط آن به حرکت امواج یا معادلات انتگرال پذیر می‌تواندکمک زیادی در هردو جهت، ریاضیات محض و فیزیک بکند.

مثال بالا در ارتباط معادلات پی دی ای از جمله کی دی وی و ساختارهای هندسی از جمله پرمایش فضاهای هندسی کره و گراسمنین می‌تواند مدخلی باشد در فهم قسمتی از کار مریم میرزاخانی. در واقع می‌توان گفت که مجموعه ساختارهای هذلولوی بر روی رویه‌های ریمان یا فضای پیمانه‌ای روی رویه‌های ریمان را می‌توان با سلسله کی دی وی بیان کرد. معادله شرودینگر هم انتگرال پذیر است و دارای تابع مولد یا همان تابع تاو. خدا چه می‌داند شاید حجم فضای پیمانه‌ای فضایی را بشود با سلسله معادله غیرخطی شرودینگر بیان کرد!

ارتباط بین معادله کی دی وی و رویه‌های ریمان مثل کره، چنبره و ... شاید آنقدر واضح نباشد. با این حال با درنظر گرفتن جوابهای موجی متحرک مثل

$$u(x,t) = f(x-ct)$$

می‌توان این ارتباط را مشاهده کرد. در واقع با قرار دادن این جواب خاص به معادله به یک معادله با مشتقات معمولی(از نوع خاص پنلووه)

$$-\frac{c}{2} f^2 + Af + B = \frac{3}{4}(f')^2 + \frac{1}{16} f^3$$

یا معادله

$$x-ct = \int \frac{1}{\sqrt{-\frac{1}{4} f^3 - \frac{2c}{3} f^2 + Af + B}}$$

می‌رسیم که معادل با چنبره مختلط یا منحنی بیضوی بر $C^2$ منجر می‌شود [۵]. درواقع کمالی و ستایش، مقاله‌شان را از اینجا به بعد شروع می‌کنند و بیشتر به صورت ملموس، ریاضی طورو قابل فهم برای دانشجویان ریاضی بر روی فضاهای پیمانه‌ای بحث کرده‌اند. با این حال ورودی به معادله کی دی وی و تاریخچه آن نداشته‌اند

سلسله معادله کی دی وی را می‌توان با عملگر بازگشتی هم که ترکیب یک عملگر هامیلتونی و معکوس یک عملگر همتافت هست هم بیان کرد. در واقع نردبان دو قلوی لنارد–مگری (مشابه نردبان‌های تک قلوی آبل، کاردانو و تارتالیا) را می‌توان بیان کننده آن عملگر بازگشتی دانست. حکم دقیقی نیست ولی این کار می‌تواند مابه ازی قضیه مریم میرزاخانی دانست که حجم فضای پرمایش تایشمولر[3] (۱۹۴۳–۱۹۱۳) را که توسط یک فرم دو خطی همتافت تعریف شده است را به صورت بازگشتی به دست آورده است [۴].

و بالاخره حدس معروف ویتن جواب خاصی از سلسله کی دی وی را به تابع افراز گرانش دو بعدی کوانتومی ربط می‌دهد. متغیرهای زمانی $t_0,t_1,\ldots$ با ثابت‌های کوپل شده مرتبط با مشاهده‌گرهای $\tau=0,1,\tau_1,\tau_2$ نظریه کوانتومی وابسته می‌شوند. بنابراین همبستگی کوانتومی گرانش کوانتومی دو بعدی را می‌شود بر حسب مشتق

1. Tullio Levi-Civita
2. De Rios
3. Paul Julius Oswald Teichmüller

لگاریتمی تابع تاو نوشت:

$$< \tau_{k_1}\tau_{k_2}\dots\tau_{k_n} >= \frac{\partial^n log\ \tau(t_0, t_1, \dots.)}{\partial t_{k_1}\partial t_{k_2}\dots\partial t_{k_n}}\Bigg|_{t_0=t_1=\dots=0}$$

قضیه کانتسویچ میگوید که عبارت بالا با

$$< \tau_{k_1}\tau_{k_2}\dots\tau_{k_n} >= \int_{\underline{M_{g,n}}} {\psi_1}^{k_1}{\psi_2}^{k_2}\dots{\psi_n}^{k_n}$$

برابر است که در آن ψ_iها کلاس‌های کوهومولوژی روی فضای پرمایش $M_{g,n}$ است و تابع مولد آن در روابط بازگشتی صدق می‌کند که منطقا بنا بر مشتق لگاریتمی (۳) منتج از سلسله کی دی وی است.

شاید ایده در نظر گرفتن سلسله تمام معادلات که با هم جابجا می‌شوند به جای در نظر گرفتن یک معادله در آن (کی دی وی) شبیه ایده در نظر گرفتن فضای پیمانه‌ای از منحنی‌هاست به جای در نظر گرفتن یک منحنی خاص! مثال عمیق تاریخی از زوم این و زوم اوت کردن.

### ۶. نویسنده و ریاضی‌دان پارسی

سال ۱۳۷۶ مریم که در آن زمان دانشجویی کارشناسی بود در سمینار دانشجوی اهواز با هیجان و تسلط وصف ناشدنی سمیناری داد درباره نقطه ثابت براور (۱۸۸۱–۱۹۶۱)، دانشجوی دکترای کرتوخ که معادله کی دی وی KdV به نام او و شاگرد دیگرش د فریز است. قضیه نقطه ثابت براور (۱۹۶۶–۱۸۸۱) یک نتیجه در توپولوژی است که می‌گوید مهم نیست چقدر یک دیسک را بکشید، بپیچانید، تغییر شکل دهید یا دفرمه کنید (تا زمانی که آن را پاره نکنید)، همیشه یک نقطه وجود دارد که در مکان اصلی خود باقی می‌ماند.

بعدها هم این هیجان و تسلط در نگاه دیگران هم دیدنی بوده است. همکلاسی‌های او در هاروارد [۲۸] می‌گویند که شیوه سخنرانی مریم فراموش‌نشدنی بوده است. او گاهی اوقات از فرط هیجان از خودش جلو می‌افتاد و سیل کلمات با حرکات دایره‌ای بزرگ دست‌هایش همراه می‌شد.

در ۱۴ سالگی آرزو داشت که نویسنده و ناولیست شود. با آن توصیف که کلمات و تخیل چگونه با سرعت‌های متفاوت در سخنرانی‌های او جاری می‌شد، کار سختی است حدس زدن به اینکه او چگونه نویسنده‌ای می‌شد. عنوان و چکیده یکی از مقالات او در ۱۸ سالگی به این صورت است: *اثبات ساده‌ای بر قضیه‌ای از شور*

در سال ۱۹۰۵، آ. شور ثابت کرد که حداکثر تعداد ماتریس‌های مختلط دو به دو مستقلا خطی از مرتبه n برابر است با $1 + [\frac{n^2}{4}]$.

چهل سال بعد، جیکوبسن قضیه شور را با روش ساده‌تری ساخت و آن را از میدان‌های بسته جبری به میدان‌های دلخواه تعمیم داد. ما اثبات ساده‌تری برای این قضیه می‌آوریم.

با تقلید از کتاب ایرج پزشکزاد، به نام *حافظ ناشنیده پند* [۱۴]: عمر در حالی که نسخه اولیه مقاله مریم را می‌خواند به او گفت: جان مریم، عنوان و چکیده خوبی نوشتی، اگر درست فهمیده باشم، درواقع می‌خواهی بگویی: شور کوزه‌گر چنان کرد، جیکوبسن استاد چهل سال بعد چنان پروراند و من ساده‌تر به شمایان چنین و چنان می‌گویم. البته اینگونه هم می‌توانی بگویی:

در کارگه کوزه‌گری کردم رای
در پایه چرخ دیدم استاد بپای
میکرد دلیر کوزه را دسته و سر
از کله پادشاه و از دست گدای

حتما کوزه‌گر بینوا خودآگاه نبود و خبر نداشت که آن دسته و سر کوزه‌اش، در واقع دسته و سر و کله گدا و پادشاهی بوده است که در زمانه بیدار شدن اصحاب کهف می‌زیسته‌اند و برو بیایی داشتند. شاید فقط از ریاضی‌دانی خیام برمی‌آمد که انتزاعی تصور کند و رای کند و نگاه کند به آن کارگه و به ذهنش برسد که آن چرخ با چرخیدن آن منحنی، کله‌ای و دستی می‌سازد و رویه‌ای می‌شود و آنگاه با آن منجم دانی‌اش حدس بزند که این کله و سر برای پادشاهی بوده است و گدایی در فلان قرن قبل! تو گویی کوزه گر با چشم حس کوزه گری می‌کند و عمر خیام که شاید چشم حس کوزه گری نداشته باشد اما با چشم دریایی رباعی می‌سراید که آن کوزه و آن استاد چه و چه بوده است.

با این دست فرمان، سوالی که به ذهن می‌رسید این است که اگر او به واقع نویسنده یا داستان نویس می‌شد، چه سبکی می‌داشت؟ چه سبک نویی را در رمان نویسی می‌توانست ابداع کند. شاید رمانی مثل پختستان می‌نوشت [۱۵] شاید هم همان سبک را ادامه می‌داد و کتاب شکل فضا [۳۰] را می‌نوشت و از روی آن بازی‌های کامپیوتری بسیار درست می‌کرد. مثلا بازی درست می‌کرد که مردم بر روی میز عجیب غریب که ساختار هذلولی دارد، بیلیارد بازی کنند، مگر دینامیک توپ بیلیارد را بر روی چنان فضایی را کشف نکرد، پس دور از انتظار نیست که چنان کند. این‌چنین باعث حیرانی و مستی مردم هم می‌شود که هزاران سال بر روی میز مستطیلی شکل ساده اقلیدسی بیلیارد بازی می‌کردند. شاید هم رمانی مثل *حیرانی و مستی* می‌نوشت [۱۶] که شخصیت اصلی آن خیام هست!

در سال ۱۳۹۵، در مقاله‌ای که با الکس اسکین [۲۷] نوشت، ثابت کرد که اگر تمام فضاهای پیمانه‌ای منحنی‌ها را در نظر بگیریم، شبیه میز بیلیارد، در آن صورت نقطه‌ای (شبیه وجود نقطه ثابت

براور که دهه‌ها قبلتر در ۲۱ سالگی در سمینار دانشجویی از آن سخن راند) وجود دارد بر روی آن که اگر شمع یا فانوسی را بر ان بگذاریم، با انعکاس‌های متوالی می‌تواند همه آن میز را روشن کند. برگردیم به رباعی خیام ریاضی‌دان و شاعر:

این چرخ و فلک که ما در او حیرانیم
فانوس خیال از او مثالی دانیم
خورشید چراغ دان و عالم فانوس[1]
ما چون صوریم کاندرو گردانیم

این رباعی به واقع شبه‌نمایش مشهور افلاطون درباره سایه‌ها بر دیوار غار را یاد آوری می‌کند. به نوعی توصیفی عالیست از جهانی پیمانه‌ای از انحناها و توانایی‌های انسان. عمرخیام و مریم میرزاخانی روایتگر با استعداد هر دو بودند در زمانه خود.

### ۶. گفتار پایانی

در این مقاله، سعی شده است که شواهدی تاریخی بر نوع شناخت شناسی مریم میرزاخانی ارائه شود. با این حال شاید واقعا نشود به طور کامل چنین شواهد و یکسان سازی‌هایی را عین هم دانست یا تطبیق داد، چنان که مولانا می‌گوید:

دل من گرد جهان گشت و نیابید مثالش
به که ماند؟ به که ماند؟ به که ماند؟ به که ماند؟
هله خاموش که بی‌گفت از این می همگان را
بچشاند بچشاند بچشاند بچشاند.

همچنین این مطلب نه یک مقاله علمی در علوم پایه خاصه ریاضیات، نه مقاله‌ای در ادبیات که نویسنده بهره‌ای از تخصص در آن نبرده است نه مقاله‌ای در تاریخ علم است که باز، نویسنده، بی‌تخصص در تاریخ علم محسوب می‌شود. با این تفاسیر، از دیدگاه نویسنده، این متن فقط ادای دینی بود به همدرس و هم وطن با ذهن زیبایی که حقیقت و حیرتی زیبا را روشن کرد و به زیبایی نوشت و خود خاموش شد.

**تشکر:** با سپاس از دکتر غلامرضا رکنی که در مراحل مختلف و البته طولانی مدت نگارش این متن مشوق و راهنمای بسیار با محبت نویسنده بودند. همچنین با تشکر از دوست نازنینم دکتر فرید بهروزی که گپ‌های حضوری و مجازی با او همیشه مفید، دلگرم کننده و انگیزه بخش بود. همچنین از زینب عبادی عزیز جهت تطبیق و تبدیل نسخه لاتکس و پی دی اف به نسخه مایکروسافت ورد ممنونم.

### منابع

۱. رضا منصوری، *سندرم دوره نقل، حاشیه‌ای بر معماری علم*، انتشارات دیباییه، ۱۴۰۱.
۲. فرید بهروزی، *چرا زیبایی حقیقت هست*، در حال آماده سازی برای چاپ،
۳. *معماهایی برای رازگشایی از عالم*، کامران وفا، با ترجمه حسام الدین ارفع، فرهنگ نشر نو، ۱۴۰۲.
۴. ایمان افتخاری، مروری بر پژوهش‌های ریاضی مریم میرزاخانی، مجله *اخبار پژوهش‌های دانش‌های بنیادی*، شماره ۷۳ (۱۳۹۳)- صص. ۲۷– ۱۷
۵. ایمان ستایش، عل کمال نژاد، آشنایی با فضای پرمایش، مجله *اخبار پژوهش‌های دانش‌های بنیادی*، شماره ۷۳ (۱۳۹۳)- صص. ۳۷–۳۰
۶. احسان سنایی، در هزارتوی بردبار خمینه‌ها و خطوط، از مریم میرزاخان چه در خاطرتاریخ علم خواهد ماند؟، خبرنامه انجمن ریاضی ایران، شماره ۵۲
۷. خسرو منصف شکری، مریم میرزاخانی، چشم‌اندازی تاریخی برای دو دستاورد او، مجله *نامه علوم پایه*، شماره پنجم، بهار ۱۴۰۱
۸. هادامارد، *روان شناس ابداع در علوم ریاضی*، ترجمه عباس مخبر، نشر نیو، ۱۳۹۸.
۹. الن بدیو، *در ستایش ریاضیات*، با ترجمه علی حسن زاده، نشر نگاه، ۱۴۰۴.
۱۰. محسن هشترودی، *سیر اندیشه بشر*، انتشارات آزاده، ۱۳۶۲.
۱۱. محسن هشترودی، *جهان اندیشه، دانش و هنر*، نشر دهخدا، ۱۳۵۰.
۱۲. قدمعلی سرام و پروین رضایی، بازتاب حیرت و حیران خیام در ادبیات فارسی، *متن شناسی ادب فارسی*، ۶، ۱، ۴۰۰–۲۵، ۱۳۹۳.
۱۳. خبرنامه انجمن ریاضی ایران، شهریور ۱۴۰۲
۱۴. ایرج پزشکزاد، *حافظ ناشنیده پند*، انتشارات قطره، ۱۴۰۴
۱۵. ادوین ابوت، *پختستان*، انتشارات کارنامه، ترجمه منوچهر انور، نشر کارنامه، ۱۴۰۴.
۱۶. هارولد لمب *حیران و مست* با ترجمه فریدون زاهدی، نشر پردیس دانش، ۱۳۹۵.
17. Dijkstra (2001), in an interview with Philip L. Frana. (OH 330; Communications of the ACM 53(8), 41-47
18. Stacey, Kaye, L. Burton, and J. Mason. *Thinking mathematically*. London:Addison-Wesley, 1982.
19. Poincare, 1904, The Foundations of Science: *Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method*

۱. فانوس خیال هندی استوانه‌ای نقاشی‌شده بود که با گرمای شمع می‌چرخید و سایه‌های متحرکی را بر روی دیوار سبب می شد، شبیه پرده‌های نمایش امروزی.

20. Kalantari, Bahman, and Rahim Zaare-Nahandi. ”On Tusi’s Classification of Cubic Equations and its Connections to Cardano’s Formula and Khayyam’s Geometric Solution.” arXiv preprint arXiv:2201.13282 (2022).
21. Stewart, Ian. *Why beauty is truth: a history of symmetry*. Basic Books, 2008.
22. J.S. Russell, “Report on Waves”, (14th Meeting of the British Association for the Advancement of Science, 1844)
23. Palais, Richard. ”The symmetries of solitons.” Bulletin of the *American Mathematical Society* , 34.4(1997) 339-403
24. Kasman, Alex. Glimpses of soliton theory: the algebra and geometry of nonlinear PDEs. Vol. 100. *American Mathematical Society*, 2023.
25. Magri, Franco. ”A simple model of the integrable Hamiltonian equation.” *Journal of Mathematical Physics* 19.5 (1978) 1156-1162.
26. Mirzakhani, Maryam. ”Weil-Petersson volumes and intersection theory on the moduli space of curves.” *Journal of the American Mathematical Society* 20.1 (2007) 1-23 .
27. Eskin, Alex, and Maryam Mirzakhani. ”Invariant and stationary measures for the action on moduli space.” *Publications Mathématiques de l’IHÉS* 127 (2018): 95324.
28. Maryam Mirzakhani 1977-2017, Notice of the AMS, 1221. Page 2.
29. Hamenstadt, Ursula. ”Zooming in and out: the work of Maryam Mirzakhani from the eyes of a geometer.” (2018).
30. Weeks, Jeffrey R. The shape of space. CRC press, 2001.
31. Interview with Research Fellow Maryam Mirzakhani, Clay Mathematics Institute Report, 2008,
32. Bertola, Marco, Boris Dubrovin, and Di Yang. ”Correlation functions of the KdV hierarchy and applications to intersection numbers over M¯g,n, .” Physica D: Nonlinear Phenomena 327 (2016): 30-57.
33. Magri, Franco. ”A simple model of the integrable Hamiltonian equation.” *Journal of Mathematical Physics* 19.5 (1978) 1156-1162.
34. Gel’fand, I.M., Dikii, L.A.(1975).AsymptoticbehaviouroftheresolventofSturmLiouville equations and the algebra of the Korteweg-de Vries equations. *Russian Mathematical Surveys*, 30(5): 77.
35. Hasimoto, Hidenori (1972),”A soliton on a vortex filament”, *Journal of Fluid Mechanics*, 51(3): 477-485.
36. Ricca, Renzo L.”Rediscovery of da Rios equations.” *Nature*. 352.6336 (1991): 561-265.
37. Dyson, Freeman. ”Birds and frogs.” Notices of the AMS 56.2 (2009): 212-223.
38. Millman, Richard S. ”Kleinian transformation geometry.” *The American Mathematical Monthly* 84.5 (1977) 338-349.
39. Klein, Felix. ”A comparative review of recent researches in geometry.” *Bulletin of the American Mathematical Society* 2.10 (1893): 215-249.

# نگاهی به تاریخ ریاضی و تاثیر آن بر تمدن: گذری بر معنا

**خسرو تاج‌بخش، سید محمدباقر کاشانی**
**دانشکده علوم ریاضی- دانشگاه تربیت مدرس**
**khtajbakhsh@modares.ac.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

در این مقاله نگاهی گذرا بر معنی ریاضی، تاریخ، جایگاه و تاثیر آن بر تمدن بشر داریم. سرگذشت، روند پیشرفت و تاثیر مستقیم و غیرمستقیم شگرف ریاضی در پرورش فکری انسان‌ها، پیشرفت دیگر دانش‌ها و فن‌آوری با مرور تمدن‌های باستانی، تمدن یونان و رم، تمدن اسلامی و تمدن نوین از قرن ۱۷ میلادی تاکنون، بسیار کوتاه بررسی می‌شود. در مقاله گفته می‌شود جامع‌ترین معنی(تعریف) ریاضی چنین است: ریاضی هر آن چیزی است که ریاضی دانان مطالعه می‌کنند. در اهمیت ریاضی برای فرهنگ عمومی جامعه بیان می‌شود که این دانش انسان را اندیشمند، پرسش‌گر، برهان جو (استدلالی)، خلاق، نقاد، منظم، منطقی و با توان حل مسئله پرورش می‌دهد. در این بررسی از جمله دیده می‌شود تمدن اسلامی با جذب تمدن‌های پیش از خود و تکامل بخشیدن آنها و نیز آفرینش‌های زیاد به ویژه در ریاضی و انتقال آنها به غرب سهمی درخشان از تمدن کنونی دارد. در پایان به جایگاه ریاضی در جهان، از قرن هفدهم به بعد، بسیار کوتاه مرور شده است.

**کلید واژگان:** ریاضی، تمدن‌های باستانی، تمدن ایرانی، تمدن یونانی، اروپای مدرن، انقلاب فکری، انگاره‌ها

## ۱. پیش گفتار

ریاضی به عنوان دانشی که زاییده نیاز و فرآورده اندیشه انسان است، پیشینیه و جایگاهی همسنگ (بلکه بالاتر از) خط و زبان دارد. گرچه سرچشمه این دانش[1] از آغاز تاکنون نیازهای بشر و برگرفته از طبیعت بوده و می‌باشد، ولی بشر با توانایی اندیشیدن خود «مفهوم‌ها، ساختارها و مدل‌های مجرد ویژه‌ای» آفریده و می‌آفریند و با آن‌ها کار می‌کند. به این فعالیت فکری ریاضی گویند. البته آنچه بشر در این زمینه در ذهن خود می‌آفریند با تقریب در عالم طبیعت به کار می‌رود و این کاربرد، سودمندی شگفتی‌آور و ضرورت بی‌جایگزین آن را تضمین کرده و می‌کند. ریاضی بخشی از دانش است که به موضوع‌هایی می‌پردازد که آن موضوع‌ها با عددها، فرمول‌ها، ساختارهای مرتبط‌شان، «شکل‌ها»، «مدل‌ها» و فضاهایی که این «مفهوم (شیء)ها» در آن‌ها هستند و نیز «کمیت‌ها» و تغییرهایشان، سر و کار دارند. به بیان کلی دیگر ریاضی عبارتست از مطالعه مجموعه‌ها[2] همراه با ساختارهایی بر آن‌ها و نیز رابطه بین آن‌ها. البته باید گفت در بین ریاضی‌دانان درباره چیستی (ماهیت) ریاضی اتفاق نظر وجود ندارد. برخی می‌گویند ریاضی هر آن چیزی است که ریاضی‌دانان مطالعه می‌کنند. ریاضی مدرن، امروزه در بردارنده بخش‌های آمار و احتمال، آنالیز و جبر (هر دو در پیوند با دیگر بخش‌های ریاضی و دانش) هندسه، توپولوژی، دستگاه‌های دینامیکی، نظریه اعداد، منطق ریاضی، دانش رایانه، فیزیک ریاضی، ریاضی گسسته ، ... و آنچه زیر عنوان ریاضی کاربردی می‌آید، می‌باشد.

در دنیای کنونی، ریاضی در دانش‌های طبیعی (فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی، زمین‌شناسی و جز آن)، هندسی، پزشکی، حوزه (بخش) مالی و پولی و فناوری اطلاعات (داده‌ها) و دانش رایانه (و کاربرد آن) به ویژه هوش مصنوعی و حتی علوم انسانی و هنر به کار می‌رود و دارای نقش بنیادین بی‌جایگزین است. ریاضی در واقع زبان، ابزار و پیش‌ران (البته هم‌زمان متأثر از) دانش است. اگر چه ریاضی به صورت گسترده برای مدل کردن پدیده‌های عالم به کار می‌رود ولی حقیقت‌های بنیادی ریاضی از هر آزمایش عملی مستقل (نابسته) است. نیز ریاضی دانشی یقینی است که برخلاف دانش‌های تجربی نقض نمی‌شود، بلکه تکامل می‌یابد (مانند انتگرال لبگ که گسترش (تعمیم‌یافته) انتگرال ریمان است)، این ویژگی‌های ریاضی از آن روست که این دانش بر پایه تعریف‌ها و اصل‌هایی که مبانی نامیده می‌شوند استوار است و گزاره‌های ریاضی از آن مبانی بر پایه منطق (ریاضی) به دست می‌آید. ریاضی،

1. Knowledge
2. Sets

دانشی است که انسان را اندیشمند، پرسشگر، برهان‌جو (استدلالی) خلاق، نقاد، منظم، منطقی و با توان حل مسئله پرورش می‌دهد. (بخش‌های زیادی از) دانش تجربی و حتی علوم انسانی (به ویژه اقتصاد) و اجتماعی تنها به کمک ریاضی می‌تواند صورت‌بندی[1]، مدل‌سازی و بیان شود. برای نمونه ریاضیات مهندسی که از بخش‌های چندی از ریاضی(مانند جبر خطی، حسابان، معادله‌های دیفرانسیل و همچنین بخش‌های گوناگون ریاضی کاربردی) بهره می‌برد، مهم‌ترین ابزار نظری تبیین، شناخت و پیش بینی پدیده‌های مهندسی و نیز تولیدهای فناورانه مهندسی است. نیز امروزه بسیاری از پدیده های اجتماعی به کمک آمار و نظریه‌های بازی و احتمال، تبیین و پیش بینی می‌شود همچنین در حوزه مالی، ریاضی مالی ابزاری سودمند و کلیدی برای فعالیت در این بخش است. یک نمونه مستقیم کاربرد دیگر عبارت است از مکانیک آماری، کاربرد بسیار جدید و زیبای دیگر عبارت است از علوم اجتماعی رقومی[2] (روندها و اندرکنش‌های اجتماعی را با به‌کاربردن ابزارهای پژوهشی رقومی مانند استخراج داده شبکه[3]، کاوش متن[4]، آنالیز شبکه[5] و شبیه‌سازی اجتماعی[6] مطالعه می‌کند). چون ریاضی داده‌های تجربی را مجرد[7] و گسترش‌یافته[8] می‌کند، پژوهشگر تجربی را به پیش‌بینی‌ها و پیش‌گویی‌های علمی درست (ولی هنوز آزمایش نشده) رهنمون می‌شود و این فرآیند دانش تجربی را فراتر از آزمایش‌ها به پیش می‌برد. یک نمونه بسیار مهم حدس نظری وجود سیاهچاله[9] در کیهان توسط فیزیک‌دانان به کمک ریاضی است (دوره زمانی ۱۹۱۶ تا ۱۹۷۰) که چهار دهه پس از آن اخترفیزیک‌دانان شواهد تجربی بر وجود آن‌ها یافتند و نمونه اخیر و زیبای دیگر این فرآیند حدس ریاضی وجود ذره‌ای بنیادی توسط فیزیک‌دان نظری پیتر هیگز (برنده جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۳) در دهه ۱۹۶۰ است که اکنون به نام بوزون هیگز یا ذره خدا نامیده می‌شود و در سال ۲۰۱۲ در آزمایشگاه سرن وجود تجربی آن ثابت شد. در مدل استاندارد ذره‌های بنیادی در فیزیک، بوزون‌های هیگز توضیح می‌دهند که چرا هر ذره، جرم ویژه خود را دارد.

در این مقاله، نگاهی گذرا به پیشینه ریاضی از دوره باستان تاکنون داریم و تأثیر شگرف آن را بر جریان‌های فکری و دانش می‌بینیم. این مقاله بر پایه بازبردهای(مراجع) [۱]–[۱۲]نوشته شده است.

## ۲. تمدن‌ها و ریاضی

تمدن‌های باستانی ریاضی پیشینه‌ای کهن دارد. بشر دست‌کم از زمان یکجانشینی که به دامداری و کشاورزی و پس از آن به داد و ستد پرداخت، برای شمارش دام‌ها و ... و ساخت سرپناه و در کشاورزی برای اندازه‌گیری زمین‌های زیر کشت، مصون ماندن آن‌ها از تاثیرهای مخرب جزر و مد ،طغیان رودخانه‌ها و نیز (مسیر، «زمان» و اندازه) آبیاری ، برداشت محصول و دیگر نیازهای زندگی ... مفهوم‌های شمارش (عدد) و کارکردن با آن‌ها، حساب و هندسه را (آن‌چنان که نیاز داشت) در ابتدایی‌ترین صورت ابداع نمود و به کاربرد. با گذشت زمان، ریاضی‌ای که بشر نیاز داشت در تمدن‌های چین (در کنار رودهای یانگ تسه و زرد – از حدود ۵۰۰۰ سال پیش از میلاد)، میان‌رودان (بین‌النهرین) (بخش‌های بین دو رود دجله و فرات، در بردارنده کشورهای عراق، ایران، سوریه و ترکیه، حدود ۳۱۰۰ – ۵۳۹ پیش از میلاد)، مصر (در شمال شرقی آفریقا در دره رود نیل، حدود ۳۰۰۰ سال پیش از میلاد تا تسخیر آن به دست اسکندر مقدونی، ۳۳۰ پیش از میلاد)، هند (در بخش رود سند، ۳۰۰۰– ۱۸۰۰ پیش از میلاد)، و پارس (امپراطوری پهناور پارس، شاهنشاهی هخامنشی، حدود ۵۵۰–۳۳۰ پیش از میلاد) شکل گرفت. برای نمونه ساخت دیوار چین (یکی از عجائب هفت‌گانه جهان)، آبراه بزرگ چین و جاده ابریشم (شاهکارهای مهندسی)، اهرام مصر، تخت جمشید و اداره امپراتوری عظیم هخامنشی با توجه به گستردگی و گوناگونی سرزمینی و اقوام، از نظر سامانه‌های ارتباطی (راه و ...)، سامانه پیچیده و حیرت‌انگیز آبرسانی و کشاورزی و نیز تنظیم امور مالی و ... نیازمند پیشرفت شگفت‌آور (نسبت به گذشته) در ریاضی کاربردی و کاربرد ریاضی بوده است.

به بیان مشروح‌تر، ریاضی در **تمدن میان رودان (بین النحرین)** از جمله شامل ابداع یک دستگاه شمارش بر پایه عدد ۶۰ بوده که بسیار کارا بوده است (تقسیم یک ساعت به ۶۰ دقیقه، یک دقیقه به ۶۰ ثانیه و نیز تقسیم محیط دایره به ۳۶۰=۶۰*۶ درجه همه بر پایه این دستگاه شمارشی است) نیز کار کردن با کسرها و حل برخی معادله‌های درجه دو و سه و ابداع‌های دیگر در ریاضی تمدن میان رودان بوده است.

در **تمدن‌های چین و هند**، ریاضی شامل گسترش یک دستگاه شمارش بر مبنای ۱۰، معرفی مفهوم ضرب عدد (به صورتی که امروزه به کار می‌بریم)، آشنایی ساده با عددهای منفی و ناگویا، ساختن برخی جدول‌های مثلثاتی و یافتن فرمول محاسبه مساحت برخی شکل‌ها بویژه مثلث بوده است.

در **تمدن پارس**، ریاضی به مفهوم واقعی کاربردی بوده است که در ساختن جاده، ساختمان، ابزارها، سازه‌های آبی، نقشه برداری، اندازه‌گیری زمین‌ها و ابداع واحدهای اندازه گیری به کار می‌رفته است.

1. formulated, formalized
2. digital social science
3. Web scraping
4. Text mining
5. Network analysis
6. Social simulation
7. abstract
8. generalized, extended

۹. سیاهچاله بخشی از کیهان است با گرانشی بسیار نیرومند که هیچ چیز حتی ذره‌ها و تابش‌های الکترومغناطیسی مانند نور نمی‌توانند از میدان گرانش آن بگریزند.

**تمدن یونان و رم** در تمدن یونان (حدود سده هشتم تا ششم پیش از میلاد) و رم (در شبه‌جزیره ایتالیا و در کنار دریای مدیترانه، حدود سده هشتم پیش از میلاد تا سده دوم میلادی) که به دوره باستان یا کلاسیک نیز شناخته می‌شود، بسیاری از پایه‌های فرهنگ غربی بنا نهاده شد که بر سیاست، فلسفه، هنر، معماری و دیگر جنبه‌های زندگی بشر تاثیری شگرف داشته و دارد. در این تمدن با بهره گرفتن از تمدن‌های پیشین، ریاضی نسبت به گذشته پیشرفت چشمگیری نمود و به‌صورت دانش مدون بر پایه اثبات استنتاجی به جای اثبات استقرایی که در تمدن‌های پیشین به کار می‌رفت، درآمد. یونانی‌ها منطق و ریاضی دقیق را برای اثبات قضیه‌ها بر پایه تعریف‌ها و اصل‌های موضوع به کار می‌بردند. در این تمدن، ریاضی نسبت به تمدن‌های پیشین بسیار عمیق‌تر شد. برخی از کشف‌های هندسی و موضوع‌های ریاضی شامل مطالعه مقاطع (برش‌های) مخروطی (دایره، سهمی، ابربریک (هذلولی) و بیضی)، با به کار بردن تنها خط کش نامدرج و پرگار، دو برابر ساختن مکعب (ساختن مکعبی که حجمش دو برابر حجم یک مکعب داده شده باشد)، تثلیث زاویه یعنی ساختن زاویه‌ای با اندازه یک سوم زاویه داده شده، تربیع دایره یعنی ساختن مربعی با مساحت برابر مساحت یک دایره داده شده در تعدادی گام با پایان. اکنون می‌دانیم هیچ یک از این سه مسله با به کار بدن ابزارهای گفته شده حل شدنی نیست. برخی نام‌های ماندگار ریاضی از آن دوران عبارتند از: تالس، ارشمیدس، اقلیدوس، فیثاغورث (او می‌گفت همه‌چیز عدد است، و برتراند راسل درباره او می‌نویسد هیچ‌کس را نمی‌شناسم که در عالم اندیشه به اندازه فیثاغورث تأثیرگذار بوده باشد)، بطلمیوس و آپولو نیوس (هندسه‌دان بزرگ آن دوران) و ... (خواننده علاقه‌مند برای آگاهی بیشتر از این تمدن می تواند بازبرد [۳] را ببیند). نقش‌آفرینی این تمدن در ریاضی تا به آنجاست که حتی در ریاضی نوین امروزی بخشی از هندسه به افتخار اقلیدس – هندسه اقلیدسی[1] نامیده می‌شود. گفتنی است هیلبرت (۱۸۶۲–۱۹۴۳) هندسه تدوین‌شده به زبان روزگار تمدن یونان توسط اقلیدس را به زبان امروزی در کتاب اصول هندسه بازبیان (تالیف) کرده است.

**تمدن اسلامی** پس از این تمدن به تمدن اسلامی (سده ۸–۱۳ میلادی) می‌رسیم. حوزه جغرافیایی این تمدن دربردارنده شبه جزیره ایبری (شامل کشورهای اسپانیا و پرتغال امروزی) تا شمال آفریقا و خاورمیانه، آسیای مرکزی، افغانستان، ایران و حتی بخش‌هایی از هند بوده است. این تمدن گردایه‌ای رنگارنگ، زیبا و غنی از فرهنگ‌ها و دستاوردهای بزرگ بوده که بر بسیاری از جنبه‌های زندگی بشر شامل دانش (به ویژه ریاضی)، فناوری و ... تاثیر بسزایی داشته است. در تمدن اسلامی، هم تمدن‌های پیشین (به ویژه تمدن یونان و رم) (از جمله دانش ریاضی) کشف، زنده (احیا)، نگه‌داری و بهره‌برداری شد، هم نوآوری‌های بسیار به‌ویژه در ریاضی بر آن‌ها افزوده شد. برای نمونه دستگاه عددنویسی کنونی (بر مبنای ده (۱۰))، میراث تمدن هند و هندسه و مثلثات (هر دو به ابتدایی‌ترین صورت آن‌ها)، میراث تمدن یونان است که توسط تمدن اسلامی، فرا گرفته، تکامل‌یافته و به کار برده شد. همچنین ابداع شاخه جبر[2] در ریاضی (در ابتدایی‌ترین صورت آن) و حل برخی معادله‌های چندجمله‌ای و نیز پایه‌گذاری بنیان‌های حساب از نوآوری‌های ریاضی‌دانان در تمدن اسلامی است که در دوران رنسانس دستگاه عددنویسی، و دیگر نوآوری‌های ریاضی‌دانان سرزمین‌های اسلامی از طریق تمدن اسلامی به اروپا منتقل شد و پس از آن گسترش جهانی یافت. این‌ها تنها نمونه‌هایی از خدمت تمدن اسلامی به تمدن کنونی است، بجاست نام برخی از نام‌دارترین ریاضی‌دانان بزرگ تمدن اسلامی و گوشه‌ای از کارهایشان در اینجا آورده شود:

**محمد بن موسی خوارزمی (۱۸۵– ۲۳۳ ه.ق)** بنیان‌گذار (ابتدایی‌ترین صورت) جبر نوین و حل‌کننده معادله‌های درجه ۲، ترجمه کتاب الجبر و المقابله از او توسط رابرت چستر در سال ۱۱۴۵ م انجام شد و تا سده ۱۶ م کتاب درسی دانشگاه‌های اروپا بود. کتاب حساب الهند از او چندین بار به لاتین ترجمه شد. عددنویسی و حساب خوارزمی حدود چهار سده پس از او توسط فیبوناتچی به اروپا معرفی شد. واژه انگلیسی algebra از واژه عربی الجبر (بخشی از نام کتاب خوارزمی) و واژه algorithm انگلیسی‌شده نام او، الخوارزمی است.

**ابوریحان بیرونی (۳۶۲– ۴۴۲ ه. ق)** از بزرگ‌ترین دانشمندان مسلمان و یکی از بزرگ‌ترین دانشمندان ایرانی در همه زمان‌ها و ریاضی‌دان، بلکه همه‌چیزدان زمان خود بود. مهم‌ترین اثر او التنجیم به زبان فارسی برای مطالعه نجوم به کمک ریاضی است؛ این کتاب چند سده کتاب درسی برای تعلیم ریاضی و نجوم بوده است.

**عمرخیام نیشابوری (۴۴۰–۵۱۷ ه. ق)** دارای پژوهش‌های تاثیرگذار در جبر و نجوم به‌ویژه پژوهش درباره معادله‌های جبری و حل هندسی برخی معادله‌های درجه سومبه کمک مقاطع (برش‌های) مخروطی و انجام محاسبه‌ها و تدوین گاه‌شماری (تقویم) ایران با دقتی بسیار بیشتر از گاه‌شماری میلادی.

**خواجه نصیرالدین طوسی (۵۷۹–۶۵۳ ه.ق)** از بنیان‌گذاران مثلثات به عنوان یک شاخه علمی و به‌کاربرنده ریاضی در نورشناسی (اپتیک)، نجوم و تدوین زیج[3] ایلخانی. زیج ایلخانی سده‌ها از اعتبار ویژه‌ای در بسیاری از سرزمین‌های آن زمان از جمله چین برخوردار بوده است و در سال ۱۳۵۶ میلادی (سیصد

۳. دربردارنده داده هایی از گاه شناسی، طول و عرض جغرافیایی، عملیات مثلثاتی، عملیات نجوم کروی و غیره بوده است.

1. Euclidean Geometry
2. Algebra

سال پس از درگذشت طوسی) ترجمه و در اروپا منتشر شد.

**غیاث‌الدین جمشید کاشانی (۸۰۸-۷۵۸ ه.ق)** دارای پژوهش‌هایی مهم در مثلثات، عددهای کسری، یافتن تقریب برای عدد $\pi$ و یافتن ریشه nام یک عدد).

تمدن نوین- رنسانس می‌توان گفت تمدن نوین با رنسانس آغاز می‌شود. رنسانس[1] (واژه فرانسوی به معنی نوزایی (تجدید حیات)) جنبش فرهنگی بسیار مهمی بود که آغازگر دورانی از انقلاب علمی، اصلاح(های) مذهبی و پیشرفت‌های هنری در اروپا شد. این نهضت در سده‌های ۱۴-۱۷ میلادی از شمال ایتالیا (به ویژه شهر فلورانس) آغاز شد و در طی سه سده به سراسر اروپا گسترش و نیز تکامل یافت و منجر به رخدادهای عظیم عصر روشنگری[2] (میانه سده ۱۷ تا پایان سده ۱۸ میلادی)، با راهبری فیلسوفانی چون فرانسیس بِیکن[3]، دیدرو، ولتر، مونتسکیو و کانت، و انقلاب صنعتی در انگلستان (دومین دگرگونی بزرگ دنیا) (۱۷۶۰-۱۸۴۰م) (به دلیل فراهم بودن شرایط این انقلاب در آن سرزمین و در آن زمان از هر نظر) شد که با این روشنگری و انقلاب صنعتی، دانش و فناوری آغاز به رشد روزافزون (غیرقابل سنجش با گذشته) نمود. این انقلاب پس از انگلستان سراسر اروپا، سپس جهان را فرا گرفت و دنیای امروزی بشر را چنان که می‌بینیم ساخته است. بیشتر پیشگامان و رهبران نهضت رنسانس و پی‌آمد آن عصر روشنگری، متفکران (شامل ریاضی‌دانان، فیلسوفان، دانشمندان علوم طبیعی)، نویسندگان و هنرمندان بوده‌اند. گفتنی است ریاضی در رنسانس هم علت بوده است هم معلول، یعنی هم در بین رهبران بزرگ رنسانس ریاضی‌دانان نامدار بوده‌اند، هم در اثر این نهضت، ریاضی‌دان و فیزیک‌دان بزرگ (همه زمان‌ها) همچون نیوتن پرورش یافته است

## ۳. انقلاب‌های فکری و ریاضی

در اینجا تنها نگاهی گذرا به تأثیر (و تأثر) رنسانس بر (از) دانش (به ویژه ریاضی) داریم. به تعبیری دوره رنسانس دوره خردگرایی، ریاضی، منطق و انسان‌مداری است. در این دوران دگرگونی‌های فکری گوناگون و زیادی رخ داد که باید آن‌ها را پایه‌های بنیادین رنسانس و پی‌آمدهای آن دانست. خواننده برای آگاهی بیشتر از نقش ریاضی در تمدن نوین می‌تواند بازبرد ۶ رابببیند. برخی از مهم‌ترین دگرگونی‌های فکری رنسانس (که همگی متأثر از( مرتبط با) ریاضی است) عبارتست از:

### انقلاب فکری کوپرنیک

نیکلاس کوپرنیک (۱۴۷۳-۱۵۴۳م) ریاضی‌دان و ستاره‌شناس آلمانی که با مشاهده‌ها و مطالعه‌های خود (به ویژه در ریاضی و متأثر از فیثاغورثیان) نظریه خورشید مرکزی منظومه شمسی را ارائه و گسترش داد و بر نجوم بطلمیوسی که حدود دو هزار سال نظریه پذیرفته شده توسط دانشمندان، عوام و به ویژه کلیسا بود، خط بطلان کشید. نظریه انقلابی کوپرنیک یکی از درخشان‌ترین تراوش‌های فکری و تجربی دوره رنسانس است که نه تنها آغازگر ستاره‌شناسی نوین بود، بلکه دیدگاه بشر را درباره جهان هستی دگرگون کرد، زیرا آموزه‌های کلیسا درباره جهان را به چالش کشید

شاخص‌ترین متفکر رنسانس، گالیله ایتالیایی (۱۵۶۴-۱۶۴۲م، ستاره‌شناس، فیزیک‌دان، ریاضی‌دان، همه‌چیزدان) است. گالیله با بازبیان و تکامل بخشیدن به نظریه خورشید مرکزی کوپرنیک می‌گفت: «حقیقت طبیعت همواره در برابر چشم‌های ماست. برای فهم این حقیقت باید با زبان ریاضی آشنا بود. زبان این حقیقت شکل‌های هندسی است». گالیله با اندیشه‌ها و آموزه‌های خود بنیان‌های نادرست آموزشی تا زمان خود را متزلزل و دانش فیزیک را از سیطره کلیسا بیرون آورد و آن را بر پایه‌های ریاضی استوار ساخت. گالیله که استاد ریاضی در دانشگاه پیزا بود با کشف قانون آونگ، آغازگر دانش دینامیک نوین بود. او با کشف قانون سقوط آزاد یا اصل هم‌ارزی بنیان فیزیک مدرن را بنا نهاد. گالیله همچنین موفق به ساختن اولین تلسکوپ در جهان شد و به کمک آن مشاهده‌های علمی سودمند زیادی در ستاره‌شناسی انجام داد.

### انقلاب فکری دکارت

سومین انقلاب فکری را رِنِه دکارت فرانسوی (۱۵۹۶-۱۶۵۰م، ریاضی‌دان، دانشمند و فیلسوف) به راه انداخت. او خرد آدمی («می‌اندیشم، پس هستم») را به جای کتاب مقدس، سنت پاپ‌ها، کلیسا و فرمانروا نشاند که دگرگونی فکری بزرگی در پی آورد. روش دکارت برای فهم طبیعت، قیاسی و استنتاجی بود. او کتاب «گفتار در روش» را به چاپ رساند. وی با کشف رابطه بین جبر و هندسه و ابداع مفهوم دستگاه مختصات[4] انقلابی بزرگ در ریاضی پدید آورد و روشی پایه‌گذاری کرد که امروزه به هندسه تحلیلی معروف است.

اکنون به مهم‌ترین شخصیت پایان دوره رنسانس و آغاز عصر روشنگری می‌رسیم. ایزاک (اسحاق) نیوتن (۱۶۴۲-۱۷۲۷م، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان) اهل انگلستان بود و به عنوان یکی از مؤثرترین دانشمندان سراسر تاریخ و شخصیتی کلیدی در انقلاب علمی شناخته می‌شود. دوره رنسانس علمی با انتشار کتاب «اصول ریاضی فلسفه طبیعی» او (چاپ شده در سال ۱۶۸۷) به اوج خود رسید. در این کتاب فرمول‌های قانون‌های حرکت[5] و گرانش[6] بیان شده بود که به کمک آن‌ها یکپارچگی کیهان‌شناسی نوین نیز پدید

1. Renaissance
2. Enlightenment
3. Bacon
4. Coordinates system
5. motion rules
6. gravity

آمد. قانون‌های حرکت نیوتن (موسوم به مکانیک نیوتنی) دیدگاه غالب علمی، تا پیش از ارائه نظریه نسبیت عام[۱] اینشتین بود. او (نیوتن) که استاد ریاضی دانشگاه کمبریج بود، با ابداع حسابان[۲] (حساب دیفرانسیل و انتگرال) اثری ماندگار در ریاضی نوین پدید آورد. لایب‌نیتز هم ناوابسته از نیوتن، این حساب را ابداع نموده است.

حیف است که در بحث رنسانس نام لئوناردو داوینچی (۱۴۵۲–۱۵۱۹م، ایتالیایی) آورده نشود. او شگفت‌انگیزترین شخصیت این دوران، دانشمند، نقاش، مجسمه‌ساز، معمار، موسیقی‌دان، مهندس، مخترع، آناتومیست، گیاه‌شناس و نویسنده بود. نبوغی که او در کارهایش از خود نشان داد، بیش از هر چیز دیگری مورد توجه نسل‌های آینده خود قرار گرفته است. نیز او را یکی از بزرگ‌ترین نقاشان تاریخ دانسته‌اند. مشهورترین تابلوهای نقاشی دنیا به نام «شام آخر» و «مونالیزا» از جمله کارهای اوست. او درباره ریاضی می‌گوید: «هیچ دانشی نمی‌توان یافت که بنا بر قانون‌های ریاضی پایه‌گذاری نشده باشد، و جایی هم نیست که نتوان از این قانون‌ها بهره برد.» او با افتخار سخن افلاطون را تکرار می‌کرد که: «باشد که هرکس ریاضی نخوانده است، به نوشته‌های من نگاه نکند.»

## ۴. ریاضیات مدرن

ریاضی از قرن هفدهم تاکنون پیشرفت‌های ریاضی در این سده‌ها را گزارش نموده و نیز نگاهی به دست آورده‌های برخی از مشهورترین ریاضی دانان این دوران داریم.

سده هفدهم میلادی یکی از مهمترین سده‌ها در تاریخ ریاضی است، زیرا میدان گسترده پژوهش در ریاضی در این سده برای بشریت فراهم شد. در این سده پیشرفت ریاضی چنان گسترده و گوناگون است که تنها می‌توان برخی از آنها را گزارش کرد. در بین دیگر پیشرفت‌ها می‌توان کشف لگاریتم، تدوین کاربرد درست فرمول نویسی و نمادهای کنونی در جبر، کشف هندسه‌های تحلیلی و افکنشی، پیشرفت بسیار زیاد در نظریه اعداد و تولد نظریه احتمال و ابداع حسابان (مشتق و انتگرال) را نام برد. سه تن از برجسته‌ترین ریاضی دانان این سده عبارتند از پاسکال، نپر و فرما[۳]. سده هجدهم میلادی سده کاربرد حسابان است. پیشرفت عمده در نظریه احتمال، ابداع معادله‌های دیفرانسیل عادی و پاره‌ای و تولد هندسه دیفرانسیل در این سده رخ داد. سده‌های نوزدهم و بیستم شاهد تولد و / یا بسیار زیاد ریاضی جدید بویژه توپولوژی عمومی، جبری و دیفرانسیل و نیز هنده در گسترده‌ترین معنی یعنی هندسه گسسته، محاسباتی، جبری و دیفرانسیل، دستگاه‌های دینامیکی، نظریه اعداد، منطق ریاضی، علوم نظری رایانه، فیزیک ریاضی و ریاضی گسسته بوده است. برخی از بزرگترین ریاضی دانان سده هجدهم شامل گاوس، دالامبر، لاگرانژ، لاپلاس، مونژ، فوریه و کوشی می‌باشد که با پژوهش های بنیادین و ماندگارشان در فیزیک و ریاضی مرزهای این دو دانش را هرچه بیشتر به جلو بردند.

سده‌های ۱۸–۲۱ (که همچنان ادامه دارد) شاهد پیدایش ریاضی‌دانان بسیار بزرگی بوده است که پژوهش‌هایشان دانش ریاضی و فیزیک را ورای تصور به پیش برده، در نتیجه فناوری هم به تبع آن پیشرفت شگفت‌انگیز نموده است. برخی از نام‌دارترین این ریاضی‌فیزیک‌دانان عبارتند از:

**گاوس** (۱۷۷۷–۱۸۵۵م، ریاضی‌دان، ستاره‌شناس و فیزیک‌دان) که پژوهش‌های مهمی در بخش‌های زیادی از ریاضی و فیزیک انجام داده است. او را برای تأثیر زیادش بر ریاضی «شاهزاده ریاضی»[۴] نامیده‌اند. از جمله کارهای ماندگار او مطالعه رویه‌ها (خمینه‌های دو بعدی) و ابداع خمیدگی گاوسی (نگاشت حقیقی هموار بر رویه که به صورت شهودی شکل رویه را مشخص می‌کند. این مفهوم، ریمان را به کشف و ابداع میدان تانسوری خمیدگی ریمانی که همین نقش را در خمینه‌های هموار با بعد دلخواه ایفا می‌کند، رهنمون شد) و کشف هندسه نااقلیدسی (به همراه لباچفسکی و بولای).

**ریمان:** ریمان (۱۸۲۶–۱۸۶۶م)، دارای پژوهش‌های عمیق در آنالیز، نظریه اعداد و هندسه دیفرانسیل، مبدع نظریه‌های انتگرال ریمان، رویه‌های ریمان (خمینه‌های مختلط یک بعدی) و هندسه ریمانی که با این هندسه بنیان‌های ریاضی نسبیت عام، بنا شد. او همچنین فرض (گمانه) نگاشت زتای ریمان[۵] را مطرح کرده است که همچنان مسأله‌ای باز است. فرض زتای ریمان در سال ۱۸۵۹ در مقاله‌اش با عنوان» تعداد عددهای اول کمتر از یک عدد داده شده» مطرح شد. این فرض عمیقا به توزیع عددهای اول مربوط است و پیامدی بنیادین در نظریه اعداد دارد.

---

۱. نسبیت عام، نظریه هندسی گرانش و توصیف پذیرفته شده کنونی از گرانش در فیزیک مدرن است. این نظریه قانون نیوتن از گرانش جهانی را پالوده می‌کند(refine) و توصیفی یکدست(unified) از گرانش به عنوان ویژگی‌های هندسی فضا و زمان یا فضا زمان ۴- بعدی به دست می‌دهد. به ویژه خمیدگی(curvature) فضا زمان با انرژی و شتاب آهنگ (momentum) ماده و تابشگری(radiation) موجود در جهان مستقیماً در رابطه است. این نظریه چارچوب مدرن (نو) کیهان شناسی را فراهم آورده و منجر به کشف مه بانگ (انفجار بزرگ) (Big Bang) (نظریه‌ای کیهان شناسی که وجود جهان مشاهده پذیر را از ابتدایی‌ترین دوران شناخته شده توضیح می‌دهد. این مدل توصیف می‌کند که چگونه جهان از یک وضعیت نخستین با دما و چگالی بسیار زیاد در گذر زمان انبساط یافته است.) شده است.

2. Calculus

۳. پاسکال بیشتر برای مثلث ضریب های دوجمله‌ای‌اش شناخته می‌شود. نپر بیشتر به خاطر کشف انتگرال مشهور است. فرما برای پژوهش‌هایش در نظریه اعداد و حساب بینهایت کوچک‌ها شناخته شده است.

4. Prince of Math

5. Riemann Zeta Function hypothesis

فرض بیانگر این است که ریشه‌های نگاشت زتای ریمان تنها عددهای درست منفی (ریشه‌های بدیهی) یا عددهای مختلط برخط بحرانی $X=\frac{1}{2}$ در صفحه مختلط هستند. نگاشت زتای ریمان چنین است:

$$\zeta(s)=\acute{O}\left\{\frac{1}{n^s}\right\} \quad =\frac{1}{1^s}+\frac{1}{2^s}+\dots$$

**هیلبرت:** هیلبرت (۱۸۶۲–۱۹۴۳م)، از بانفوذترین ریاضی‌دانان سده‌های ۱۹ و ۲۰. او نظریه‌های بنیادی زیادی از جمله نظریه ناورداها، حساب ورزشی، جبر جابه‌جایی، نظریه جبری اعداد، بنیان‌های هندسه[۱]، نظریه طیفی عملگرها و کاربردش در معادله‌های انتگرال، ریاضی فیزیک و مبانی ریاضی (به ویژه نظریه اثبات) را مطرح و تکامل بخشیده است. وی از اثرگذارترین ریاضی‌دانان در پیدایش و گسترش مکانیک کوانتومی و نظریه نسبیت بوده است. گفتنی است هیلبرت با معرفی ۲۳ مسئله باز ریاضی در کنگره بین المللی ریاضی دانان در سال ۱۹۰۰ نقشی بنیادی در جهت دهی پژوهش‌های ریاضی در قرن بیستم و پس از آن داشته است.

**پوآنکاره** پوآنکاره (۱۸۵۴–۱۹۱۲م، ریاضی‌دان، فیزیک‌دان نظری، مهندس و فیلسوف علم) پژوهش‌های اصیل عمیق زیادی در ریاضی محض و کاربردی (به ویژه در توپولوژی و دستگاه‌های دینامیکی[۲]) و فیزیک ریاضی و مکانیک آسمانی انجام داده است. یکی از یادگارهای ماندگار او انگاره پوآنکاره است که در سال ۱۹۰۴ مطرح نمود. این انگاره می‌گوید «هر خمینه توپولوژیک n بعدی بسته ساده همبند که گروه‌های مانستگی‌اش با مانستگی های کره n بعدی $S^n$ یکریخت باشد با $S^n$ همسانریخت[۳] است.» این انگاره از زمان بیانش توسط پوآنکاره تا زمان حلش برای حالت n=3 توسط پرلمان در سال‌های ۲۰۰۲–۲۰۰۶ (پرلمان در واقع انگاره کلی‌تر هندسی‌سازی خمینه‌های ۳ بعدی از ترستن را ثابت کرد و برنده جایزه فیلدز ریاضی شد ولی از دریافت آن خودداری ورزید) پژوهش‌های ریاضی عمیق بسیاری در خلال قرن بیستم میلادی در پی آورده است. این انگاره در حالت n=2 مسأله‌ای نه چندان سخت در توپولوژی است، حالت $n \le 5$ توسط اسمیل[۴] (ریاضی‌دان بزرگ آمریکایی و برنده جایزه فیلدز که کارهای ماندگاری در شاخه دستگاه‌های دینامیکی انجام داده است) در دهه ۱۹۶۰ و حالت n=4 توسط فریدمن (دیگر ریاضی‌دان بزرگ آمریکایی که برای کارهایش در زمینه خمینه‌های ۴ بعدی برنده جایزه فیلدز شده است) در دهه ۱۹۸۰ به اثبات رسید.

در پایان این معرفی کوتاه از پوآنکاره باید گفت او و کولموگروف (۱۹۰۳–۱۹۸۷م، دارای دستاوردهای برجسته در احتمال، توپولوژی، نظریه آشوب، مکانیک کلاسیک، منطق شهودی، نظریه الگوریتمی اطلاعات و نظریه پیچیدگی محاسباتی است) را بنیان‌گذاران اصلی توپولوژی (جبری) و دستگاه‌های دینامیکی می‌دانند.

**گودل** گودل (۱۹۰۶–۱۹۷۸م)، منطق‌دان (او را همچون ارسطو، بزرگ‌ترین منطق‌دان همه زمان‌ها دانسته‌اند)، ریاضی‌دان و فیلسوف مبدع و اثبات‌کننده اصل (قضیه) بسیار بنیادی ناتمامیت گودل[۵] است که به زبان فنی می‌گوید:

۱) هیچ الگوریتمی یافت نمی‌شود که درباره درستی یا نادرستی همه گزاره‌های ریاضی تصمیم‌گیری کند.
۲) دستگاه ریاضی کنونی مبتنی بر اصل‌هایی است که نمی‌توان ثابت کرد سازگارند.

بیان ساده اصل ناتمامیت این است که: هیچ الگوریتمی یافت نمی‌شود که همه مسأله‌های ریاضی را بتواند حل کند. به بیان عامیانه «ریاضی دانشی تمام‌ناشدنی است.»

**کانتور** کانتور (۱۸۴۵–۱۹۱۸م)، مبدع نظریه مجموعه‌ها، که نظریه‌هایش درباره مجموعه‌ها و مفهوم بینهایت[۶] انقلابی در ریاضی و جنجالی در فلسفه به پا کرد. با پژوهش‌های ایشان و دیگر ریاضی‌دانان این سده‌ها فیزیک نظری و ریاضی نوین شکل علمی کنونی یافته است و دانش فیزیک ریاضی و کیهان‌شناسی به بالاترین درجه تکامل خود (تاکنون) رسیده است. در اینجا خوب است افزوده شود که هیلبرت با ارائه لیستی از ۲۳ مسأله ریاضی باز چالشی در کنفرانس بین‌المللی ریاضی‌دانان در سال ۱۹۰۰ پیشران پژوهش‌های ریاضی در سده بیستم میلادی و پس از آن شده است

در سده بیستم و بیست و یکم میلادی (تاکنون) شاخه‌های گوناگون ریاضی[۷] مانند دیگر دانش‌ها پیشرفت روزافزون، انفجاری

---

۱. هندسه (واژه یونانی آن به معنی اندازه‌گیری زمین) شاخه‌ای از ریاضی است که با ویژگی‌هایی از فضا (در مفهوم گسترده، فضای هندسی مجموعه‌ای است با یک ساختار ریاضی که بر آن هندسه‌ای (مطالعه همه ناورداهای گروه نگهدارنده ساختار) بنا می‌شود)، مانند فاصله، شکل، اندازه و وضعیت نسبی شکل‌ها سر و کار دارد. هندسه و حساب قدیمی‌ترین شاخه‌های ریاضی است. تا سده ۱۹ هندسه تقریباً عبارت بود از هندسه \lr{Euclidean\}، در سده ۱۹ (و پس از آن) گستره هندسه بسیار گسترش یافت. در سده ۱۹، هندسه‌های نااقلیدسی پدیدار شد که زمینه بیان نسبیت عمومی در فیزیک را فراهم ساخت. امروزه هندسه دارای زیرشاخه‌های گوناگون: هندسه دیفرانسیل، هندسه جبری، هندسه محاسباتی، توپولوژی هندسی، هندسه گسسته (\lr{combinatorial geometry\}) و ... است و تقریباً در همه دانش‌ها و نیز در هنر و معماری و بخش‌های دیگر ریاضی به کار می‌رود.

۲. امروزه دستگاه‌های دینامیکی برای بیان و توصیف ریاضی بسیاری از پدیده‌ها در طبیعت و حتی جامعه به کار می‌رود.

3. Homeomorphic

4. Smale

5. Godel incompleteness theorem

6. infinity

۷. به ویژه دستگاه‌های دینامیکی، فیزیک ریاضی، هندسه و توپولوژی، نظریه اعداد، کاربرد ریاضی در رایانه، ریاضی گسسته (ریاضی گسسته شاخه‌ای از ریاضی است که با گردایه‌های گسسته سروکار دارد. ریاضی گسسته به ویژه به دلیل کاربردهای زیاد در دانش‌های رایانه اهمیت ویژه یافته است. در این زمینه ریاضی گسسته برای آفرینش و مطالعه الگوریتم‌ها و زبان‌های برنامه نویسی به کار می‌رود. برخی از زیرشاخه‌های ریاضی گسسته عبارت است از: ترکیبیات، نظریه گراف، هندسه و توپولوژی دیجیتال (رقومی)، نظریه اطلاعات (داده‌ها) و ...).

و بیش از همه دوران‌های پیشین نموده است و این روند با سرعتی پرشتاب ادامه دارد. برخی از نام‌دارترین ریاضی‌دانان اخیر (برندگان جایزه‌های فیلدز و ...) که در پیشرفت ریاضی نوین و در نتیجه دانش به مفهوم گسترده آن نقشی ماندگار داشته‌اند عبارتند از:

**مایکل اتیا (عطیه)** (هندسه‌دان، بیان و اثبات‌کننده قضیه اندیس عطیه–سینگر و از بنیان‌گذاران نظریه K – توپولوژیک[1])، گروتندیک[2] (بنیان‌گذار اصلی هندسه جبری نوین)، اسمیل (دارای پژوهش‌های عمیق و ماندگار در توپولوژی، دستگاه‌های دینامیکی و اقتصاد ریاضی)، گروموف (دارای پژوهش‌های بنیادی در هندسه، آنالیز و نظریه گروه‌های هندسی)، ترستن (توپولوژی و هندسه‌دان برجسته، ارائه‌کننده انگاره هندسی‌سازی ۳ خمینه‌ها)، چرن (توپولوژی و هندسه‌دان مبدع رده‌های چرن در توپولوژی جبری، او را پدر هندسه دیفرانسیل نوین می‌نامند)، دنالدسون و فریدمن (دارای پژوهش‌های عمیق و ماندگار به ویژه درباره خمینه‌های ۴ بعدی، یکی از نتیجه‌های پژوهشی شگفت‌انگیز آنان در این باره این است که: بر $R^4$ بی‌شمار ساختار هموارناهم‌ارز (موسوم به ساختارهای عجیب[3]) یافت می‌شود!! و مجموعه این ساختارها در تناظر دوسویی با $R^2$ است!)، ادوارد وتین (ریاضی‌دان و فیزیک‌دان نظری که پژوهش‌های عمیقی در نظریه ریسمان، گرانش کوانتومی، نظریه‌های میدان کوانتومی ابر متقارن و دیگر بخش‌های فیزیک ریاضی انجام داده است)، پرلمان دارای پژوهش‌های بنیادی ماندگار در آنالیز هندسی، هندسه ریمانی و توپولوژی هندسی که سرانجام در سال ۲۰۰۶ موفق به اثبات انگاره پوآنکاره و حالت کلی‌تر آن انگاره هندسی‌سازی ترستن شد.

سرانجام باید نام آلبرت اینشتین (۱۸۷۹–۱۹۵۵) فیزیک‌دان نظری را جداگانه آورد که نظریه نسبیت او در کنار مکانیک کوانتومی[4] (شاخه‌ای بنیادی از فیزیک نظری که با پدیده‌های فیزیکی در اندازه میکروسکوپی (بسیار کوچک) سر و کار دارد) دو ستون فیزیک مدرن به شمار می‌رود. دو فیزیک‌دان نظری (بنیان‌گذاران اصلی) مکانیک کوانتومی عبارتند از: هایزنبرگ (مبدع اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، که می‌گوید قطعیت اندازه‌گیری هم‌زمان سرعت و مکان ره، رابطه معکوس دارند) و شرودینگر (مبدع معادله شرودینگر، معادله‌ای که چگونگی تغییر حالت کوانتومی یک سامانه فیزیکی با زمان را توصیف می‌کند، $i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t}=\hat{H}\psi$ که $\psi$ نگاشت موج دستگاه کوانتومی، ثابت کاهیده پلانک و $H$ عملگر همیلتونی است که انرژی کل برای هر نگاشت موج داده شده را به دست می‌دهد)

## ۵. انگاره‌ها

پایان‌بخش مقاله مسأله‌های ریاضی باز هزاره است. این مسأله‌ها پیشران پژوهش‌های ریاضی عمیق کنونی است.

در سده بیست و یکم میلادی و به تقلید از لیست مسأله‌های باز هیلبرت که پیش از این گفته شد، موسسه ریاضی کلی[5]، لیستی از مسأله‌های ریاضی باز چالشی را با عنوان مسأله‌های جایزه‌دار هزاره[6] در سال ۲۰۰۲ ارائه داده و برای حل هر کدام یک میلیون دلار جایزه پیشنهاد نموده است، این مسأله‌ها بخش‌های کاملاً متفاوتی از ریاضی محض و کاربردی را در بر می‌گیرد. مسأله‌های جایزه‌دار هزاره عبارت است از:

۱– P در برابر NP (P versus NP) (نظریه محاسبه)
۲– انگاره هاج (Hodge conjecture) (هندسه جبری)
۳– انگاره پوآنکاره (هندسه و توپولوژی) (اکنون حل شده است)
۴– فرض (گمانه) ریمان (Riemann hypothesis) (نظریه اعداد)
۵– مسأله یانگ–میلز و شکاف جرم (Mass Gap) (فیزیک نظری
۶– مسأله ناویر–استوکس (مکانیک سیالات و PDEs)
۷– انگاره B و D-S (هندسه جبری و حسابی)

اکنون مسئله‌های هزاره بسیار کوتاه توضیح داده می‌شود. امید است در مقاله‌های پی‌آیند، به تشریح این مسأله‌ها بپردازیم.

### چند جمله‌ای در برابر غیرچندجمله‌ای[7]

این مسئله می‌گوید: آیا برای همه مسئله‌هایی که برای آنها الگوریتمی بتواند یک حل داده شده آن مسئله‌ها را سریع (در زمان چند جمله‌ای) بررسی کند، الگوریتمی می‌تواند آن حل را سریع بیابد؟ چون عبارت اول رده مسئله‌هایی به نام NP را توصیف می‌کند، در حالی که عبارت دوم مسئله‌های با نام P را بیان می‌کند، مسئله هم ارز است با این پرسش که آیا همه مسئله‌ها در NP در P نیز هستند؟ این مسئله در ریاضی و دانش نظری رایانه از مهم‌ترین مسئله‌هاست زیرا پاسخ آن نتیجه‌هایی ..... برای مسئله‌هایی دیگر در ریاضی، زیست شناسی، فلسفه و رمزنگاری دارد. بیشتر ریاضی دانان و دانشمندان رایانه انتظار دارند P≠NP ولی این نابرابری هنوز ثابت نشده است.

### انگاره هاج

بیان جدید انگاره هاج چنین است: بر هر چندگونای افکنشی مختلط ناتکین رسته همانستگی هر چرخه هاج بر آن چندگونا ترکیبی

1. Topological K-Theory

۲. سر (Serre) دوست و همکار قدیمی او می‌گوید: گروتندیک به مدت دوازده سال، دوازده ساعت در روز، هفت روز هفته و دوازده ماه سال را ریاضی کار می‌کرد و علی رغم این همه سخت کار کردن، از ریاضی خسته نمی‌شد.

3. exotic structures
4. Quantum Mechanics
5. Clay Math. Institute
6. Millenium Prize Problems
7. Polynomial versus Non-Polynomial (P vs. NP)

خطی با ضریب‌های گویا از رده‌های همانستگی زیر چندگوناهای مختلط آن چند گونا است.

**مسأله یانگ-میلز و شکاف جرم**

مسئله یانگ- میلز چنین است: ثابت کنید برای هر گروه پیمانه‌ای فشرده ساده G یک نظریه کوانتومی یانگ - میلز نابدیهی بر فضای اقلیدسی چهاربعدی یافت می‌شود که دارای شکاف جرم مثبت باشد.

گفتنی است در نظریه میدان کوانتومی، شکاف جرم تفاضل انرژی بین خلا و پایین‌ترین حالت انرژی بعدی می‌باشد. انرژی خلا بنابر تعریف صفر است و فرض می‌شود همه حالت‌های انرژی می‌تواند به عنوان ذره‌هایی در موج‌های مسطح در نظر گرفته شود، شکاف جرم، جرم سبک‌ترین ذره است. نظریه کوانتومی یانگ-میلز گسترشی از نظریه ماکسول برای الکترومغناطیس است که در آن میدان کرومو- الکترومغناطیس دارای بار است.

**مسأله ناویر-استوکس**

وجود، همواری و ویژگی‌های جواب‌های معادله ناویر- استوکس (دستگاهی از معادله‌های دیفرانسیل پاره‌ای که حرکت یک سیال در فضا را توصیف می‌کند).

بیان دقیق مسئله: ثابت کنید یا نمونه نقض ارائه دهید که: در فضای سه بعدی و زمان، برای میدان سرعت آغازین داده شده سرعت برداری هموار و میدان عددی فشار هموار که هردو سراسرس تعریف شده‌اند یافت می‌شود که حل معادله‌های ناویر- استوکس با شرط آغازین داده شده می‌باشند.

**انگاره B و D-S (هندسه جبری و حسابی)**

اگر خم بیضی گون E دارای رتبه جبری r باشد آنگاه L-نگاشت L(E,s) وابسته به خم در s=۱ دارای ریشه با چندگانگی (رتبه تحلیلی) r است. L(E,s) نگاشت برخه ریخت بر صفحه اعداد مختلط است که بر حسب تعداد نقطه‌های چندگونا (خم بیضی گون) پس از فروکاهش به هنگ هر عدد اول تعریف می‌شود و حاصل ضرب اویلر نگاشت‌های زتای موضعی می‌باشد.

**۶. نتیجه‌گیری**

پیشینه ریاضی آغاز تمدن بشری است، هرجا تمدنی پدیدار شده است ریاضی علت و معلول آن بوده است، یعنی هم ریاضی از پایه‌های پیدایش و بالندگی آن تمدن بوده است، هم بر آن تمدن ریاضی رشد و شکوفایی یافته است. ریاضی دانشی است نظری و کاربردی که بشر پیوسته آن را می‌آفریند و با موفقیت و بسیار به کار می‌برد. ریاضی در تربیت و رشد فکری فرد و جامعه تاثیر مثبت بسیار دارد. ریاضی افزون بر کاربرد بی‌واسطه‌اش در همه زمان‌ها بویژه اکنون، موتور محرکه بلکه قلب تپنده برای دیگر دانش‌ها بوده و می‌باشد. به بیان جامع ریاضی پایه استوار و بخش سترگ تمدن بزرگ و بلند بشری است.

**منابع**


1. J. Carlson, A. Ja_e, A. Wiles, The Millennium Prize Problems, Clay Math. Inst.
2. R. Cooke, *The History of Math. A Brief Course*, 2nd ed., 2011.
3. M. Gagarin, Ancient Greece and Rome, The Oxford Encyclopedia, Oxford univ. Press, 2010.
4. B. Grechuk, Landscape of 21st Century Math., Springer, 2021.
5. D. Hilbert, *the foundations of Geometry*, translated by E. J. Townsend, credited by J.
6. Hutchinson,., Revised by R. Tonsing, 2005, Project Gutenberg.
7. V.J. Katz, ed. *The Mathematics of Egypt, Mesopotamia, China, India, and Islam: A Sourcebook*.
8. Princeton University Press, 2007.
9. J. Mark, D. Ancient Persia, World History Encyclopedia, 2019.
10. D. Mackenzie, L. Sloman, What is Happening in the Mathematical Sciences, vol. 13, AMS,2024.
11. V.R. Remmert, , M.R. Schneider, and H.K. S_rensen, eds. *Historiography of Mathematics in the 19th and 20th Centuries*. Springer International Publishing, 2016.
12. A.H. Siddiqi et al. (editors), *Math. Science and Technology*, World Scientific, 2011.
13. H.R. Turner, *Science in Medieval Islam*, University of Texas Press, 1997.
14. N. Yelland, Math. for the 21st Century, Cambridge University Press, 2014.

# خمینه‌ها و کیهان

**علی کمالی‌نژاد**
**گروه ریاضی محض، دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران.**
**پژوهشکده ریاضیات، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران، ایران.**
**Kamalinejad.a@ut.ac.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

فضای اقلیدسی ۳–بعدی یکی از ساده‌ترین مثال‌ها از فضاهای (خمینه‌های) ۳–بعدی است. همچنین یک مدل (البته نه تنها مدل) برای کیهان ۳–بعدی است. با وجود آن که همهٔ خمینه‌های ۳–بعدی به صورت موضعی «شبیه» فضای اقلیدسی ۳–بعدی هستند، اما به صورت سراسری، چنین نیستند. بنابراین لزومی ندارد که مدل ۳–بعدی کیهان، فضای اقلیدسی ۳–بعدی باشد. لذا می‌توان این پرسش را مطرح کرد که ویژگی‌های (توپولوژیکی) سراسری کیهان چگونه هستند؟ در متن حاضر نخست مقدماتی ریاضی از جمله مطالبی در مورد ۳–خمینه‌ها را مرور خواهیم کرد که به کمک آن‌ها می‌توان به صورت‌بندی دقیق‌تر از پرسش فوق رسید. سپس مقدماتی فیزیکی از جمله معادلهٔ فریدمن، قانون هابل و موضوع انبساط کیهان را به اختصار مرور خواهیم کرد که راهی به دست می‌دهند تا به صورت تجربی، پاسخ‌های احتمالی پرسش‌هایی در مورد توپولوژی و هندسهٔ کیهان را مطالعه کنیم

## پیش‌گفتار

در این متن کوتاه تلاش خواهیم کرد تا به اختصار به برخی جنبه‌های موضوع زیر بپردازیم.

ویژگی‌های توپولوژیکی سراسری کیهان و خواص هندسی موضعی آن چگونه هستند؟

پیش از پرداختن به موضوع فوق، در نظر داشته باشید که این متن کوتاه، بخشی از دانسته‌های موجود را مرور خواهد کرد. در این متن، از مدل‌های «پذیرفته شدهٔ» فیزیکی و داده‌های «قابل اتکای» موجود تا زمان نگارش، استفاده خواهد شد. همچنین تلاش خواهد شد که بدون از دست رفتن اصل موضوع، از برخی جزئیات فنی اجتناب شود.

در متن حاضر، نخست به معرفی خمینه‌ها و مطالعهٔ مختصر ارتباط توپولوژی و هندسهٔ خمینه‌ها در ابعاد پایین خواهیم پرداخت. پس از آن مثال‌هایی از ۳–خمینه‌ها را مرور خواهیم کرد تا با بخشی از تنوع هندسی و توپولوژیکی آن‌ها آشنا شویم. سپس به موضوع انبساط کیهان و ارتباط آن با اصل کیهان‌شناسی خواهیم پرداخت. در ادامه، ارتباط میان هندسه و توپولوژی ۳–خمینه‌ها، چگالی ماده و انرژی در کیهان و ثابت هابل را بررسی خواهیم کرد و در پایان به اختصار به برخی مسیرهای پیش رو، نگاهی خواهیم کرد.

## خمینه‌ها

اگر با خمینه‌ها آشنایی دارید می‌توانید تعریف زیر را از یک n–خمینه در نظر گرفته و مستقیم به بخش بعدی بروید.

## تعریف

یک خمینه توپولوژیک n–بعدی یا به اختصار یک n–خمینه، یک فضای توپولوژیک هاسدورف و شمارای دوم است که موضعاً اقلیدسی از بعد n است.

اما اگر با خمینه‌ها آشنایی ندارید، ممکن است مطالعه باقی این بخش، خالی از فایده نباشد!

خمینه‌ها تعمیم خم‌ها و رویه‌ها به ابعاد بالاتر هستند. هر خمینه با یک عدد صحیح نامنفی همراه است که بعد آن خمینه نامیده می‌شود. این عدد بعد، به بیان نه چندان دقیق، تعداد پارامترهای لازم برای مشخص کردن یک نقطه روی خمینه را به دست می‌دهد. اولین مثال یک n–خمینه، فضای اقلیدسی n–بعدی $R^n$ است که در آن هر نقطه به معنای واقعی کلمه با یک n–تایی مرتب از اعداد حقیقی مشخص می‌شود.

یک n–خمینه، شیءای است که به صورت موضعی روی $R^n$ مدل شده است. به این معنا که برای مشخص کردن یک نقطه روی آن دقیقاً به n عدد نیاز است، حداقل تا زمانی که از نقطهٔ آغاز مشخص شده، خیلی دور نشده باشیم. به بیان یک فیزیک‌خوان یک n–خمینه شیءای با n درجه آزادی است.

خمینه‌های با بعد ۱ همان خط‌ها و خم‌ها هستند. مثال‌هایی از ۱–خمینه‌ها عبارت‌اند از:

- خط حقیقی،
- خم‌های پیوسته داخل صفحهٔ $R^2$ مانند دایره،

• نمودار هر تابع پیوستهٔ $f:R\longrightarrow R$ با ضابطهٔ $y=f(x)$،
• خم‌های فضایی (خم‌های پیوستهٔ داخل $R^3$) که معمولاً به صورت پارامتری $\alpha(t)=(f(t),g(t),h(t$)) برای تابع‌های پیوستهٔ f، g و h توصیف می‌شوند.

در همهٔ مثال‌های فوق، یک نقطه روی ۱–خمینه با عددی حقیقی مشخص می‌شود:

• یک نقطه روی خط حقیقی، با یک عدد حقیقی مشخص می‌شود
• یک نقطه روی دایره، با زاویهٔ آن نقطه مشخص می‌شود،
• یک نقطه روی نمودار f، با مختص x آن مشخص می‌شود،
• یک نقطه روی یک خم پارامتری در $R^3$ با پارامتر t مشخص می‌شود.

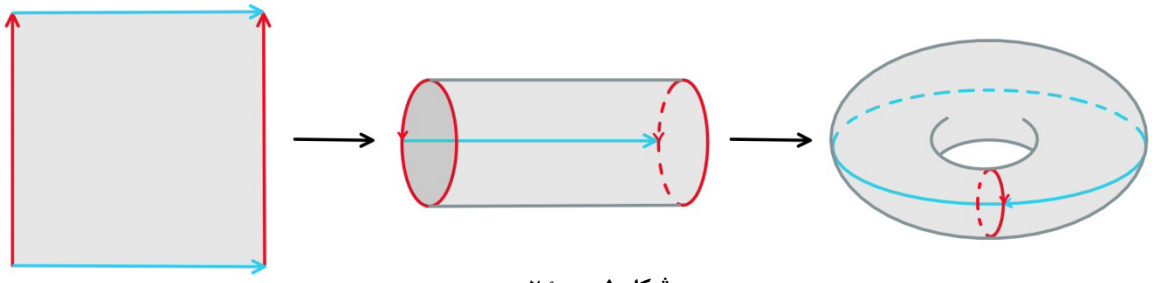
در نظر داشته باشید که اگرچه مقدار یک پارامتر، یک نقطه را تعیین می‌کند، اما مقدارهای متفاوت آن پارامتر می‌توانند یک تک نقطه را مشخص کنند، مانند زاویه‌های روی دایره. بنابراین این تناظر، دوسویی (به خصوص یک به یک)، نیست. اما در همه موارد، تا زمانی که به نقطه اولیه نزدیک باشیم، تناظری یک به یک بین اعداد حقیقی نزدیک به عدد حقیقی که نقطهٔ اولیه را مشخص می‌کند و نقطه‌های نزدیک به نقطهٔ اولیه روی خط یا خم وجود دارد.

خمینه‌ها با بعد ۲ رویه‌ها هستند. مثال‌هایی از ۲–خمینه‌ها عبارت‌اند از:

• صفحه‌های ۲–بعدی در $R^n$ $(2\leq n)$،
• نمودار هر تابع پیوستهٔ $f: R^2 \longrightarrow R$ با ضابطهٔ $z=f(x,y)$،
• کرهٔ ۲–بعدی،
• چنبرهٔ ۲–بعدی.

در مثال‌های فوق، یک نقطه روی ۲–خمینه توسط زوجی مرتب از عددهای حقیقی مشخص می‌شود:

• یک نقطه روی صفحهٔ (۲–بعدی) با زوج مرتبی مانند $(x,y)$ از عددهای حقیقی مشخص می‌شود (پس از انتخاب یک پایه، تناظری دوسویی بین نقاط صفحه و زوج‌های مرتب از عددهای حقیقی برقرار می‌شود)،
• یک نقطه روی نمودار f با مختص $(x,y)$ آن مشخص می‌شود،
• یک نقطه روی کرهٔ ۲–بعدی با طول و عرض جغرافیایی‌اش مشخص می‌شود،
• یک نقطه روی چنبرهٔ ۲–بعدی با دو زاویه مشخص می‌شود.



**شکل ۱.** چنبرهٔ ۲–بعدی

مثالی غیر بدیهی در بعدهای بالاتر کرهٔ واحد n–بعدی $\mathbb{S}^n$ است.

$$\mathbb{S}^n = \{(x_1, x_2, \cdots, x_n, x_{n+1}) \in \mathbb{R}^{n+1} :$$

$$x_1{}^2 + x_2{}^2 + \cdots + x_n{}^2 + x_{n+1}{}^2 = 1\}$$

یک نقطه روی $\mathbb{S}^n$ را می‌توان با یک n–تایی مرتب از اعداد حقیقی مشخص کرد. به عنوان مثال اگر در نزدیکی $(x_{n+1}>0)$ قطب شمال $(0,1,\cdots,0,0)$ باشیم، آنگاه

$$x_{n+1} = 1 - \sqrt{x_1{}^2 + x_2{}^2 + \cdots + x_n{}^2}$$

بنابراین $n$–تایی $(x_n,\cdots,x_2,x_1)$ با $x_1{}^2 + x_2{}^2 + \cdots + x_n{}^2 < 1$، نقطه‌ای روی $\mathbb{S}^n$ را مشخص می‌کند. با وجود آن که اگر از نزدیکی قطب شمال دور شویم این مشاهده دیگر دقیقاً به همین صورت برقرار نخواهد بود، اما برای هر نقطه‌ای روی $\mathbb{S}^n$ مشاهدهٔ مشابهی، با معادلاتی مشابه برقرار خواهد بود.

ویژگی مشترک همهٔ مثال‌های فوق این است که یک $n$–خمینه به صورت موضعی شبیه فضای اقلیدسی $\mathbb{R}^n$ است. هر چند می‌توان به صورت سراسری کاملاً متفاوت باشد. برای آن که شبیه بودن به $\mathbb{R}^n$ را کمی دقیق‌تر کنیم، نخست به شبیه بودن بازهای در $\mathbb{R}^n$ می‌پردازیم. فرض کنید $U\subset\mathbb{R}^n$ و $V\subset\mathbb{R}^n$. نگاشت $\phi:U \longrightarrow V$ را یک همسان‌ریختی می‌نامیم هرگاه تناظری دوسویی (یک به یک و پوشا) باشد، همچنین $\phi$ و $\phi^{-1}$ پیوسته باشند. $M\subset\mathbb{R}^K$ را موضعاً اقلیدسی از بعد $n$ می‌نامیم، هرگاه هر نقطهٔ $M$ همسایگی در $M$ داشته باشد که همسان‌ریخت یک گوی در $\mathbb{R}^n$ باشد.

## ارتباط میان توپولوژی و هندسهٔ خمینه‌ها

هرچند خاصیت‌های هندسی مانند فاصله بین نقاط یا خمیدگی فضا تحت همسان‌ریختی‌ها (ناورداهای توپولوژیک) ناوردا نمی‌مانند، اما میان توپولوژی خمینه‌های بسته (فشرده و بدون مرز) با بعد پایین (۲ و ۳) و هندسهٔ آن‌ها ارتباطی برقرار است. نخست و به دلیل سادگی بیشتر، رویه‌های (۲–خمینه‌های) بستهٔ جهت‌پذیر و همبند

را در نظر بگیرید. با توجه به قضیهٔ طبقه‌بندی رویه‌ها، این خمینه‌ها با گونای‌شان (شاخص اویلرشان) طبقه‌بندی می‌شوند. در این حالت (رویه‌های بستهٔ جهت‌پذیر و همبند) توپولوژی (شاخص اویلر) و هندسه (انتگرال خمیدگی گاوسی)، ارتباط روشنی دارند.
به عبارت دقیق‌تر و با توجه به قضیهٔ گاس–بونه داریم:

$$\int_S K\, dA = 2\pi\, \chi(S)$$

که در آن $S$ رویهٔ مورد نظر، $K$ خمیدگی گاوسی، $dA$ عنصر سطح و $\chi(S)$ شاخص اویلر $S$ است. با وجود آنکه به صورت موضعی می‌توان با اثر دادن یک همسان‌ریختی، هندسه را تغییر داد، اما این قضیه نشان می‌دهد که به صورت سراسری، هندسه و توپولوژی $S$ به یکدیگر مربوط هستند.

به این ترتیب وجود هندسه کروی (خمیدگی ثابت $K>0$) روی کره، هندسه تخت روی چنبره (خمیدگی ثابت $K=0$) و هندسه هذلولوی (خمیدگی ثابت $K<0$) روی رویه‌های با گونای $\geq 2$ با قضیهٔ گاوس–بونه سازگار به نظر می‌رسد.

اما قضیه یکنواخت‌سازی تضمین می‌کند که چنین هندسه‌هایی به واقع روی این رویه‌ها موجودند. به این ترتیب هندسه ذاتی کره، چنبره، و رویه‌های با گونای $\geq 2$ به ترتیب کروی، تخت و هذلولوی است.

نظریهٔ مشابهی (هرچند با پیچیدگی بیشتر) در مورد ۳–خمینه‌های بسته و همبند وجود دارد که بخشی از آن در غالب قضیهٔ هندسی‌سازی پرلمن–ترسن صورت‌بندی می‌شود. به این ترتیب، میان توپولوژی ۳–خمینه‌های بسته و همبند و هندسهٔ ذاتی آنها (در این خانواده از خمینه‌ها و به صورت مشخص‌تر، پس از تجزیهٔ JSJ ۳–خمینه‌های اول بستهٔ جهت‌پذیر و در نظر گرفتن هندسهٔ بخش‌های حاصل) ارتباطی جدی برقرار است. به جای پرداختن به جزئیات فنی توپولوژی خمینه‌های ۳–بعدی و قضیهٔ هندسی‌سازی ۳–خمینه‌ها که از حوصله این متن خارج است، در بخش بعدی تلاش خواهیم کرد تا با ذکر مثال‌هایی از ۳–خمینه‌ها، بخشی از تنوع توپولوژیک آنها را مرور کنیم.

## مثال‌هایی از ۳–خمینه‌ها

**فضای اقلیدسی ۳–بعدی $\mathbf{E^3}$.** آشناترین مثال خمینهٔ ۳–بعدی، $R^3$ است که به متریک اقلیدسی مجهز شده است. برای $R^3$ و $R^3$ مجهز به متریک اقلیدسی، دومی را با نماد $E^3$ نمایش می‌دهیم. به همین ترتیب فضای اقلیدسی n–بعدی را با $E^n$ نمایش می‌دهیم. هندسهٔ $E^3$ (همچنین همهٔ $E^n$ها) تخت است.

**کرهٔ ۳–بعدی $\mathbf{S^3}$.** به صورت توپولوژیک می‌توان $\mathbb{S}^3$ را به صورت دو گوی توپر ۳–بعدی در نظر گرفت که از طریق کره‌های ۲–بعدی مرزی به یکدیگر چسبانده شده‌اند. هندسهٔ $\mathbb{S}^3$ کروی است.

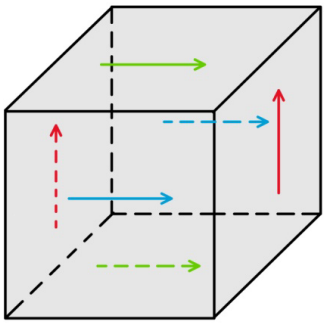
**فضای هذلولوی ۳–بعدی $\mathbf{H^3}$.** مجموعهٔ $\{x,y,z\in\mathbb{R}^3:\ 0<z\}$ که به متریک $\frac{dz^2+dy^2+dx^2}{z^2}$ مجهز شده است، مدلی برای فضای هذلولوی ۳–بعدی است. هندسهٔ $\mathbb{H}^3$ هذلولوی است.

**چنبرهٔ ۳–بعدی $\mathbf{\mathbb{T}^3}$.** مکعب ۳–بعدی توپر را در نظر بگیرید و وجه‌های آن را به صورت زیر با هم یکی کنید. حاصل $\mathbb{T}^3$ است. همچنین $\mathbb{T}^3$ از نظر توپولوژیکی $\mathbb{S}^1\times\mathbb{S}^1\times\mathbb{S}^1$ است. هندسه $\mathbb{T}^3$ تخت است.

**فضای تصویری (حقیقی) ۳–بعدی $\mathbf{P^3}$.** روی $\mathbb{R}^4$-{0} رابطهٔ هم‌ارزی $x\sim\lambda x$ را برای هر $\lambda$ حقیقی ناصفر در نظر بگیرید. در این صورت $P^3=R^4$-{0}/$\sim$ همسان‌ریخت (همچنین همواریخت) گروه SO (۳) (گروه همه دوران‌های $\mathbb{R}^3$ حول مبدأ) است. هندسهٔ $P^3$ کروی است.

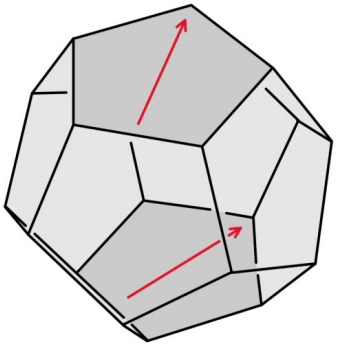
$E^1\times T^2$. فرض کنید $T^2$ چنبرهٔ ۲–بعدی باشد. در این صورت ۳–خمینهٔ $E^1\times T^2$ یک ۳–خمینهٔ باز است. هندسهٔ $E^1\times T^1$ تخت است.

$E^2\times S^1$ هندسهٔ $E^1\times S^1$ تخت است.



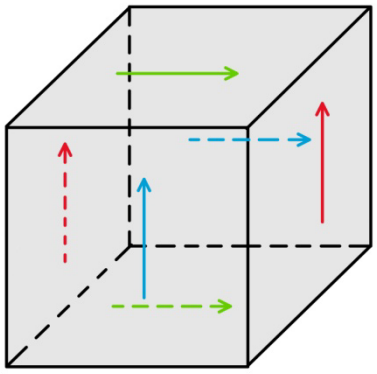
**شکل ۲.** چنبرهٔ ۳–بعدی $T^3$

**فضای ۱۲–وجهی پوانکاره.** یک ۱۲–وجهی منتظم توپر را در نظر بگیرید. هر وجه این ۱۲–وجهی را پس از یک چرخش به اندازهٔ $\frac{1}{10}$ یک دوران کامل در جهت عقربه‌های ساعت، با وجه مقابل آن یکی کنید. فضای حاصل یک ۳–خمینه بسته است. هندسهٔ فضای ۱۲–وجهی پوانکاره کروی است.



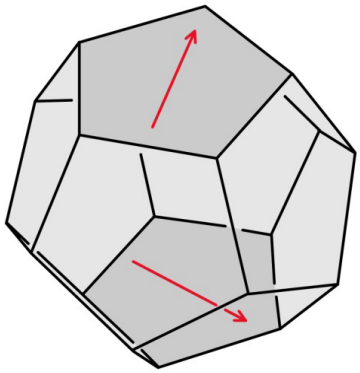
**شکل ۳.** فضای ۱۲–وجهی پوانکاره

**فضای $\frac{۱}{۴}$–چرخش.** مکعب ۳–بعدی توپر را در نظر بگیرید و وجه‌های آن را به صورت زیر با هم یکی کنید. حاصل فضای $\frac{۱}{۴}$–چرخش است. هندسهٔ فضای $\frac{۱}{۴}$–چرخش تخت است.



**شکل ۴.** فضای $\frac{۱}{۴}$ - چرخش

فضای سایفرت–وبر. یک ۱۲–وجهی منتظم توپر را در نظر بگیرید. هر وجه این ۱۲–وجهی را پس از یک چرخش به اندازهٔ $\frac{۳}{۱۰}$ یک دوران کامل در جهت عقربه‌های ساعت، با وجه مقابل آن یکی کنید. فضای حاصل یک ۳–خمینه بسته است. هندسهٔ فضای سایفرت–وبر هذلولوی است.



**شکل ۵.** فضای سایفرت–وبر

## انبساط کیهان

یافته‌های تجربی نشان می‌دهند که کهکشان‌ها در حال دور شدن از یکدیگر هستند. این دور شدن به دلیل حرکت کهکشان‌ها نسبت به هم نیست! بلکه این دور شدن نتیجه انبساط کل کیهان است. با توجه به داده‌ها، کیهان با نرخ ۷ درصد در هر یک میلیارد سال در حال انبساط است. به عبارت دیگر اگر کیهان به انبساط خود با نرخ کنونی ادامه دهد، پس از یک میلیارد سال، همهٔ فاصله‌های میان‌کهکشانی به اندازه ۷ درصد کشیده می‌شوند. این نرخ به ثابت هابل شهرت دارد.

اما انبساط کیهان به چه معناست؟ بیایید با آنچه که به آن معنا نیست شروع کنیم. انبساط کیهان به آن معنا نیست که بدن شما به تدریج با گذشت زمان بزرگتر می‌شود و همچنین به آن معنا نیست که مدار زمین از خورشید دورتر می‌شود. حتی به این معنا نیست که ستارگان درون کهکشان ما با گذشت زمان از هم دورتر می‌شوند. اما به این معناست که کهکشان‌های دور از هم دورتر می‌شوند.

اما تفاوت در مثال‌های فوق در چیست؟ تفاوت در چگالی ماده و اثر گرانش است. اتم‌های بدن با گذشت زمان از یکدیگر دور نمی‌شوند؛ جدایی آنها توسط قدرت پیوندهای شیمیایی تعیین می‌شود و گرانش نقش مهمی ایفا نمی‌کند. بنابراین ساختارهای مولکولی تحت تأثیر انبساط قرار نخواهند گرفت. به همین ترتیب، حرکت زمین در مدار خود کاملاً تحت سلطه جاذبه گرانشی خورشید است (با سهم جزئی از سایر سیارات). و حتی ستارگان در کهکشان ما در چاه پتانسیل گرانشی مشترکی که خودشان ایجاد می‌کنند، در حال چرخش هستند و نسبت به یکدیگر از هم دور نمی‌شوند. ویژگی مشترک این محیط‌ها این است که چگالی زیادی (بیش از حد معینی) دارند، که با توزیع هموار ماده (که با تسامح از فرض‌هایی است که مدل‌های کیهان‌شناسی بر آن اساس به دست می‌آیند)، بسیار متفاوت است. اما اگر به مقیاس‌های به اندازه کافی بزرگ، در عمل ده‌ها مگاپارسک ، برویم، کیهان عملاً همگن و ایزوتروپیک می‌شود و کهکشان‌ها از یکدیگر دور می‌شوند. در کیهان‌شناسی و بر اساس یافته‌های تجربی [۴ و ۵] اعتقاد بر این است که کیهان در مقیاس بزرگ دارای دو ویژگی مهم است: همگن و ایزوتروپیک است. همگنی به این معنی است که کیهان در هر نقطه یکسان به نظر می‌رسد، در حالی که ایزوتروپی بیان می‌کند که کیهان در همه جهات یکسان به نظر می‌رسد. در این مقیاس‌های بزرگ (ده‌ها مگاپارسک) است که انبساط کیهان احساس می‌شود و اصل کیهان‌شناسی (کیهان همگن و ایزوتروپیک است.) در مورد آن اعمال می‌شود.

## کیهان و ۳–خمینه‌ها

اصل کیهان‌شناسی در کنار معادله‌های نسبیت عام به معادلهٔ فریدمن [۱ و ۲] منجر می‌شود. (البته جالب است که از نظریهٔ گرانشی نیوتون نیز می‌توان معادلهٔ فریدمن را به دست آورد.) صورت متعارف معادلهٔ فریدمن عبارت است از

$$(\frac{\dot{a}}{a})^2 = \frac{8\,\pi\,G}{3}\rho - \frac{k\,c^2}{a^2}$$

که در آن، $a=a(t)$ یک تابع اسکالر است که تنها به زمان بستگی دارد و معمولاً عامل اسکالر کیهان نامیده می‌شود، $G$ ثابت گرانش، $\rho$ چگالی ماده، $k$ خمیدگی کیهان و $c$ سرعت نور است. معادلهٔ فوق بر اساس فرض‌های همگنی و ایزوتروپی به دست می‌آید. برای آن که ماهیت $a$ کمی بیشتر روشن شود فرض کنید که در کیهان فاصلهٔ ویژه را با $\vec{r}$ و فاصله همراه را با $\vec{x}$ نمایش دهیم، آنگاه رابطهٔ بین این دو برقرار است. ویژگی همگنی تضمین می‌کند که $a$ تنها تابعی از زمان است. در کیهان‌شناسی معمول است که چگالی

$$\vec{r} = a(t)\vec{x}$$

ماده ρ و چگالی انرژی e را به صورت قابل تبدیل به یکدیگر در نظر گیرند. این دو به کمک معادلهٔ معروف انیشتین $e=\rho c^2$ به یکدیگر قابل تبدیل هستند و اگر ثابت c را یک (یکای طبیعی) در نظر بگیریم (که در معادله‌های کیهان‌شناسی غیرمعمول نیست.) آنگاه ρ و e برابر می‌شوند. اگر چنین کنیم معادلهٔ فریدمن به معادلهٔ

$$(\frac{\dot{a}}{a})^2 = \frac{8\,\pi\,G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}$$

تبدیل می‌شود که در آن $\rho$ چگالی ماده و انرژی است.
معادلهٔ فریدمن اجازه می‌دهد که قانون هابل مبنی بر این که سرعت دور شدن کهکشان‌ها متناسب با فاصله آنهاست را توضیح دهیم. سرعت دور شدن $v=drdt$ در جهت $r$ است و داریم:

$$\vec{v} = \frac{|\dot{\vec{r}}|}{|\vec{r}|}\vec{r} = \frac{\dot{a}}{a}\vec{r}$$

با توجه به قانون هابل داریم:

$$\vec{v} = H\vec{r}$$

بنابراین

$$H = \frac{\dot{a}}{a}$$

با توجه به معادلهٔ فریدمن داریم:

$$H^2 = \frac{8\,\pi\,G}{3}\rho - \frac{k}{a^2}$$

در نظر داشته باشید که کروی، هذلولوی یا تخت بودن کیهان، به ترتیب، معادل مثبت، منفی یا صفر شدن k است و با توجه به معادلهٔ فوق، مثبت، منفی یا صفر شدن k، معادل بزرگ‌تر، کوچک‌تر یا برابر شدن ρ با

$$\frac{3}{8\,\pi\,G}H^2$$

است.

همچنین عبارت ثابت هابل کمی گمراه‌کننده است. اگرچه به دلیل اصل کیهان‌شناسی H=H(t) در فضا ثابت است، اما دلیلی وجود ندارد که در زمان نیز ثابت باشد.

با توجه به مطالب فوق، حال به اختصار می‌توان به پاسخ این پرسش پرداخت که کیهان چه توپولوژی دارد؟ پاسخ خلاصه چنین است: زمانی که نظریهٔ نسبیت عام را به کیهان در حال انبساط اعمال کنیم به رابطه‌ای میان چگالی ماده و انرژی، نرخ انبساط و خمیدگی کیهان دست می‌یابیم. در کیهان با هندسهٔ کروی میانگین چگالی ماده و انرژی ρ، باید بیشتر از مقداری بحرانی باشد که توسط نامساوی زیر داده می‌شود.

$$\rho > \frac{3}{8\,\pi\,G}\,H^2$$

که در آن، همان گونه که پیش‌تر توضیح داده شد، H ثابت هابل و G ثابتی است که در قانون گرانش نیوتون

$$F = \frac{G\,m_1 m_2}{r^2}$$

ظاهر می‌شود. $S^3$، $P^3$ و فضای ۱۲-وجهی پوانکاره مثال‌هایی از ۳-خمینه‌هایی با هندسهٔ کروی هستند. در کیهانی با هندسهٔ هذلولوی میانگین چگالی ماده و انرژی ρ باید کمتر از مقدار بحرانی باشد.

$$\rho < \frac{3}{8\,\pi\,G}\,H^2$$

فضای سایفرت-وبر، $H^3$ و اکثر ۳-خمینه‌های بسته (با توجه به قضیهٔ هذلولوی‌سازی ترسن و قضیهٔ هندسی‌سازی پرلمن-ترستن) مثال‌هایی از ۳-خمینه‌هایی با هندسهٔ هذلولوی هستند. در کیهان تخت، ρ باید برابر مقدار بحرانی باشد.

$$\rho = \frac{3}{8\,\pi\,G}\,H^2$$

$E^3$، فضای $\frac{1}{4}$-چرخش، $E^1 \times T^2$، $S^1 \times E^2$ و $T^3$ مثال‌هایی از ۳-خمینه‌های با هندسه تخت هستند. از آنجا که چگالی و ثابت هابل به صورت تجربی قابل اندازه‌گیری هستند، لذا می‌توان خمیدگی کیهان را بر اساس یافته‌های تجربی مطالعه کرد. همچنین هندسهٔ کیهان (با توجه به هندسی‌سازی) با توپولوژی آن در ارتباط است. اندازه‌گیری‌های پیشین (تا نزدیک به اواخر قرن بیستم) نشان می‌دادند که چگالی ماده در حدود ۳۰ درصد مقدار بحرانی است که نتیجه می‌داد کیهان هذلولوی است. در سال ۱۹۹۸ محاسبه‌ها و اندازه‌گیری‌های جدیدتر نشان دادند [۳] که کیهان قابل رویت، هذلولوی نبوده، بلکه تخت (به تقریبی) است. این موضوع با فرمول فوق تناقضی ندارد! زیرا اندازه‌گیری‌های جدیدتر که در آن «انرژی خلأ» نیز وارد شده است (توجه کنید که ρ چگالی ماده و انرژی است)، نشان می‌دهند که با احتساب انرژی خلأ، ρ تقریباً برابر مقدار بحرانی است که تخت بودن (تقریبی) هندسهٔ کیهان را نتیجه می‌دهد.

هر چند این نتایج و اندازه‌گیری‌ها نسبتاً اخیر هستند اما مطالعه‌ها و اندازه‌گیری‌ها همچنان ادامه دارند و ممکن است نتایج جدیدی در قرن بیست و یکم، مدل‌ها و درک ما از کیهان را دگرگون کنند

**گفتار پایانی**

در ادامهٔ مسیری که در بخش‌های قبلی مرور شد، همچنان کارهای

زیادی باقی مانده است. در قسمت نظریهٔ ریاضی با وجود آن که برهان پرلمن برای حدس هندسی‌سازی ترستن مسئله طبقه‌بندی خمینه‌های ۳–بعدی را به سرانجام می‌رساند اما پاسخ‌گوی همه پرسش‌ها در مورد توپولوژی خمینه‌های ۳–بعدی نیست. بنابراین پژوهش‌ها برای درک بهتر و روشن‌تر توپولوژی ۳–خمینه‌ها کاملاً به پایان نرسیده و همچنان در جریان است. در قسمت نظریهٔ فیزیکی نیز با وجود آنکه معادلهٔ فریدمن که بخشی از استدلال‌های بخش‌های قبل بر اساس آن صورت گرفت، معادله‌ای پذیرفته شده است، اما نحوهٔ معنا دادن به چگالی ماده و انرژی و وارد کردن و یا نکردن انرژی خلأ به آن بسیار سرنوشت ساز است. در حال حاضر، اصطلاح «انرژی خلأ» برچسبی است برای اشاره به مفهومی که در مورد آن چیز زیادی نمی‌دانیم. اما این مفهوم با توسعه درک ما از کیهان مرتبط به نظر می‌رسد. در قسمت اندازه‌گیری‌های تجربی نیز همچنان فعالیت‌ها ادامه دارند. به عنوان مثال، برآورد دقیق ثابت هابل به دلیل در دست نبودن دقیق فاصله کهکشان‌ها از یکدیگر، تاکنون امکان‌پذیر نبوده است. هرچند برای سادگی، در این متن، آن را ۷ درصد در هر یک میلیارد سال در نظر گرفتیم اما یافته‌های تجربی متفاوت [۶ و ۷ و ۸]، عددی بین ۵ تا ۸ درصد را پیشنهاد می‌دهند. روشن است که ثابت هابل، نقشی اساسی در مطالعه هندسه و توپولوژی کیهان ایفا می‌کند.

در پایان، اگر نظریه‌های ریاضی و فیزیکی، همچنین روش‌های اندازه‌گیری به حدی پیشرفت کنند که مدلی بسیار رضایت‌بخش از هندسه و توپولوژی کیهان و همچنین انبساط آن ارائه دهند که خمیدگی کیهان را با دقت و اطمینان بالایی به دست دهد (که در حال حاضر چنین نیست.) همچنان پرسش‌های بی‌پاسخی باقی می‌ماند. به عنوان مثال، یکی از این پرسش‌ها می‌تواند چنین باشد: فرض کنید بپذیریم که کیهان تخت است. اما در این صورت با کدام ۳–خمینهٔ تخت مواجه هستیم؟ زیرا فضای اقلیدوسی ۳–بعدی تنها ۳–خمینه با هندسهٔ تخت نیست. فضای $\frac{1}{4}$ـ چرخش، $E^1 \times T^2$، $S^1 \times E^2$ و $T^3$ همگی ۳–خمینه‌هایی با هندسه تخت هستند که همسان‌ریخت $E^3$ نیستند. بنابراین حتی پس از یافتن خمیدگی کیهان، با پرسشی بی‌پاسخی مواجه هستیم. خوشبختانه همچنان راه‌هایی مبتنی بر مدل‌های ریاضی–فیزیکی و اندازه‌گیری، برای یافتن پاسخ وجود دارد. احتمالاً تلاش برای یافتن پاسخ چنین پرسش‌هایی بخشی از فعالیت‌های ریاضی و کیهان‌شناسی قرن بیست و یکم خواهند بود.

## منابع


1. Friedman, A (1922). «Über die Krümmung des Raumes». Z. Phys. (in German). 10(1), 377-386. (English translation: Friedman, A (1999). «On the Curvature of Space». *General Relativity and Gravitation*.,31(12), 1991-2000.
2. Friedmann, A (1924). «Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes». Z. Phys. (in German). 21(1), 326-332. (English translation: Friedmann, A (1999). «On the Possibility of a World with Constant Negative Curvature of Space». *General Relativity and Gravitation*. 31(12), 2001-2008.
3. Garnavich, P. M., Jha, S., Challis, P., Clocchiatti, A., Diercks, A., Filippenko, A. V., Gilliland, R. L., Hogan, C. J., Kirshner, R. P., Leibundgut, B., Phillips, M. M., Reiss, D., Riess, A. G., Schmidt, B. P., Schummer, R. A., Chris Smith, R., Spyromilio, J., Stubbs, C., Suntzeff, N. B., ... Carroll, S. M. (1998). Supernova limits on the cosmic equation of state. *Astrophysical Journal*, 509(1PART I), 74-79.
4. Hu, Wayne; Dodelson, Scott (September 2002). «Cosmic Microwave Background Anisotropies». Annual Review of *Astronomy and Astrophysics*. 40(1), 171-216.
5. The Planck Collaboration (2020), «Planck 2018 results V. CMB power spectra and likelihoods», *Astronomy and Astrophysics*, 641:A5.
6. di Valentino, Eleonora; et al. (2021). «In the realm of the Hubble tension—a review of solutions». *Classical and Quantum Gravity*. 38(15), 153001.
7. Riess, Adam G.; Anand, Gagandeep S.; Yuan, Wenlong; Casertano, Stefano; Dolphin, Andrew; Macri, Lucas M.; Breuval, Louise; Scolnic, Dan; Perrin, Marshall; Anderson, Richard I. (2023-10-01). «Crowded No More: The Accuracy of the Hubble Constant Tested with High-resolution Observations of Cepheids by JWST». *The Astrophysical Journal* Letters. 956(1):L18.
8. Verde, Licia; Schöneberg, Nils; Gil-Marín, Héctor (2024-09-13). «A Tale of Many H₀». Annual Review of *Astronomy and Astrophysics*. 62, 287-331.

# تقریبات آشکوبه‌ای

**مهدی رجبعلی‌پور[1] و پویا کریمی[2]**
**۱. فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران، تهران، ایران؛ و گروه پژوهشی فناوری و ریاضیات کاربردی پردیس، کرمان، ایران**
**۲. بخش آموزش ریاضی، دانشکده ریاضی و کامپیوتر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران؛**
**و گروه پژوهشی آموزش ریاضی، پژوهشکده ریاضی ماهانی، پژوهشگاه افضلی پور، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران**
**radjabalipour@ias.ac.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

تقریبات مرحله‌به‌مرحله ای که در این مقاله با عنوان «تقریبات آشکوبه‌ای» معرفی می‌شوند، گونه‌ای از روش‌های علمی‌اند که در آنها هر مرحله جدید، بدون حذف یا تغییر اطلاعات مراحل پیشین، صرفاً با افزودن جزئیات بیشتر، بر دقت تقریب می‌افزاید. نمونه‌های متعددی از این ساختار در تاریخ علم و ریاضیات به چشم می‌خورد: از بسط‌های دودویی، شصت‌شصتی و ده‌دهی کسرها در تمدن‌های باستان، تا اصلاح مسیر سیارات با مدل‌های فلک‌برفلک در نجوم بطلمیوسی، و از بسط‌های تیلور و مک‌لوران در تقریب پیچ‌وتاب موضعی خم‌ها و رویه‌ها، تا تحلیل فوریه و پردازش چندریزه‌سازی موج‌ها در علوم معاصر. هر یک از این روش‌ها بر پایه ساختاری طبقه‌مند و افزایشی بنا شده‌اند که بدون بازنویسی تقریبات قبلی، تنها با افزودن لایه‌های جدید، به هدف نهایی نزدیک‌تر می‌شوند. در اینجا با رویکردی تاریخی و تحلیلی، مسیر تحول این نگرش آشکوبه‌ای را در ریاضیات، نجوم و پردازش سیگنال بررسی شده و نشان می‌دهیم که چگونه این منطق مرحله‌ای، از دل مشاهدات تجربی باستانی تا مدل‌سازی‌های دقیق امروزی در نظریه موجک‌ها و پردازش پیام، گسترش یافته است. در نهایت، حتی مفاهیم به‌ظاهر ساده‌ای چون تقریب نیز می‌توانند از بنیان‌های تاریخی، فلسفی و فناورانه‌ای ژرف برخوردار باشند و همچنان الهام‌بخش تأملات علمی نوین قرار گیرند.

**کلیدواژگان:** تقریب آشکوبه‌ای، بسط سری‌های ریاضی، کسرهای دودویی، موجک‌ها، تاریخ ریاضیات

## مقدمه

شبح تجزیه متوالی یک تابع دلخواه به تابع‌های ساده‌تر، در کارهای منجمان قدیم بابلی و یونانی مشاهده شده و البته نظیر آن در مورد اعداد حقیقی مثبت نیز پیشینه‌ای بس طولانی‌تر داشته است. تجزیه کسرها به کسرهای دودوئی توسط مصریان، شصت‌شصتی توسط سومری‌ها و دهدهی توسط هندی‌ها از زمان‌های دور انجام می‌شده است [۱]. در فرضیه زمین‌مرکزی نیز یونانیان مسیر سیاره را نخست دایره‌ای به مرکز زمین یا نزدیک زمین گرفته و به مرور که متوجه انحراف سیاره از مسیر تخمینی می‌شدند، یک دایره هم بر آن دایره سوار می‌کردند تا انحراف‌های جزئی توجیه شود. دانشمندان غرب و شرق تا سقوط فرضیه زمین‌مرکزی، این کار دایره‌بردایره نهادن را به امید یافتن مسیر دقیق تا قرن‌ها ادامه دادند. در مورد تشبیه پیچ و تاب‌های موضعی یک منحنی نیز، ریاضی‌دانان قرن هیجدهم اروپا نخست منحنی را با مقدار آن، سپس با مقدار مشتق آن و همینطور مشتقات بعدی آن مشخص می‌کردند که مبحث سری‌های تیلور و مک‌لورن[1] را به وجود آوردند. قرن نوزدهم با سری‌های فوریه[2] شروع شد که وضع کلی تابع را بررسی می‌کرد و در هر مرحله با وارد کردن سینوس‌ها و کسینوس‌های با فرکانس بیشتر، به شکل واقعی تابع نزدیک‌تر می‌شد. در تمام مثال‌هائی که برشمردیم، عمل تقریب از روندی آشکوبه‌ای (طبقاتی) برخوردار است: از یک طبقه پایه شروع می‌شود و با اضافه شدن هر طبقه، جزئیات بیشتر تقریب آشکار می‌گردد. مثلا در تقریبات دهدهی، معمولا جزء صحیح عدد را پایه تقریب می‌گیرند و رقم اول بعد از ممیز آشکوبه بعدی است و ...؛ در نظام فلکی، همان فلک اول را پایه می‌گیرند و فلک بعدی روی فلک اول سوار می‌شود و ...؛ در بسط تیلور مقدار موضعی تابع را پایه می‌گیرند و مشتق اول را مشخصه بعدی و ...؛ در سری فوریه مقدار متوسط تابع را پایه می‌گیرند و در طبقه بعدی میزان سینوس و طبقه بعدی میزان کسینوس موجود در تابع (موج) را تعیین می‌کنند؛ و سایر مثال‌ها هم به همین ترتیب. گرچه محاسبه انتگرال لبگ[3] هم طبیعت آشکوبه‌ای دارد ولی چون نتیجه هر مرحله یک عدد خواهد بود کلیه اطلاعات مرحله‌ای در همان عدد خلاصه می‌شود و ساختاری برجا نمی‌ماند. در بخش‌های بعدی مثال‌هائی را که یادآور شدیم با جزئیات بیشتری مطالعه می‌کنیم.

1. Taylor & Maclaurin series
2. Fourier series
3. Lebesgue integral

## فرهنگ واژگان

**تقریب آشکوبه‌ای:** فرایندی همانند تقریب دهدهی یک کمیت که مرحله به مرحله انجام می‌شود و هرجا متوقف شویم، جواب نهائی کلیه جواب‌های مرحله‌های قبل را نمایش می‌دهد.

**فلک گردش سیاره:** در فرضیه زمین مرکزی (یعنی فرض گردش جهان به دور زمین)، نخست تصور می‌شد خورشید و هر یک از سیارات دیگر بر دایره‌ای به نام فلک اول آن سیاره در گردش است. با افزایش دقت رصدها متوجه شدند که سیاره از محیط فلک اول دور و نزدیک می‌شود و لذا فرض شد که سیاره بر فلک دومی می‌چرخد که مرکزش روی فلک اول می‌لغزد و به همین ترتیب فلک‌های سوم و چهارم و غیره را تعریف می‌کردند.

**سری عددی:** مجموع صوری بینهایت عدد که ممکن است مانند سری $1+\frac{1}{2}+\frac{1}{3}+\frac{1}{4}+\cdots$ بی‌معنی یا واگرا باشد و یا مثل سری $1+\frac{1}{2}+\frac{1}{4}+\frac{1}{8}+\frac{1}{16}+\cdots$ با معنا یا همگرا باشد:

**سری تابعی:** همانند سری عددی است، جز این که در آن به جای «عدد»، «تابع عدد مقدار» بگذارند.

**بسط تابع:** نوشتن یک تابع به صورت یک سری تابعی همگرا (معنادار). برحسب شرایط تابع، بسط‌های گوناگونی مانند «بسط تیلور»، «بسط مک لورن»، «بسط فوریه»، یا غیره را می‌توان برایش نوشت. در سری‌های تیلور یا مک‌لورن، جمله nام آن به صورت $a_n(x-a)^n$ و در سری فوریه به صورت $a_n\sin n(x-a) + b_n\sin n(x-a)$ است.

**انتگرال ریمان:** تابع نامنفی و کراندار f را با دامنه تعریف [a,b] در نظر بگیرید. هر شکل حاصل از اجتماع تعدادی متناهی از مستطیل‌های تباهیده یا ناتباهیده را در نظر بگیرید که قاعده‌های پائین شان دامنه را بپوشانند و قاعده‌های بالایشان بالای (متناظراً پائین) منحنی نمایش f باشند؛ مساحت شکل حاصل را یک زبرجمع (متناظرا یک زیرجمع) ریمانی تابع f بنامید. بدیهی است که هر زبرجمع ریمانی بزرگتر از یا مساوی با هر زیرجمع ریمانی است و در نتیجه دست کم یک عدد I وجود دارد که کوچکتر از یا مساوی با همه زبرجمع‌ها و بزرگتر از یا مساوی با همه زیرجمع‌ها باشد. اگر این عدد یکتا باشد، آن را انتگرال ریمانی تابع f نامند و گویند تابع مزبور ریمان انتگرال پذیر است.

**اندازه لبگ:** در فضای یک بعدی، طول هر بازه بسته، باز یا نیم‌باز، تباهیده یا ناتباهیده از a تا b برابر با b-a است؛ حال اگر اجتماعی از چند پاره خط جدا از هم داشته باشیم، مجموع طول‌هایشان را اندازه لبگ آن اجتماع می‌نامیم. با استفاده از سری‌های عددی، می‌شود اندازه لبگ را برای هر تعداد شماره از بازه‌ها تعمیم داد. اندازه لبگ هر تعداد شمارای نقطه هم صفر است و اگر به مجموعه‌ای تعداد شمارائی نقطه کم یا اضافه کنیم تاثیری در اندازه لبگ آن نمی‌کند. (بنابراین، اندازه لبگ مجموعه عددهای گویا صفر است.) نظریه اندازه لبگ کلاس همه مجموعه‌هائی را بررسی می‌کند که به طور معقولی بتوان اندازه لبگ را برایشان تعریف کرد ولو آن که $+\infty$ باشد.

**انتگرال لبگ:** به عنوان مثال، تابع مشخصه مجموعه کلیه عددهای گویای واقع در بازه [۰,۱] را f بنامید. این تابع از بالا به تابع ثابت $g(x)=1$ و از پائین به تابع ثابت $g(x)=0$ مماس است. انتگرال ریمان g مساوی ۱ و انتگرال ریمان h مساوی 0 و در نتیجه

(زبرجمع ریمانی f) ≤ ۱ > 0 ≤ (زیرجمع ریمانی f);

بنابراین تابع f ریمان انتگرال پذیر نیست. اما سایه عمودی f روی [۰,۱] اندازه‌اش برابر ۰ است، پس طبیعتاً (مساحت زیر f) = (قاعده×ارتفاع) = ۱ × ۰ = ۰. این مساحت را انتگرال لبگ تابع f نامند و همانند انتگرال پذیری ریمان به تابع‌های نامنفی تعمیم داده می‌شود. نظریه انتگرال لبگ کلاس همه تابع‌هائی را بررسی می‌کند که به طور معقولی بتوان انتگرال لبگ را برایشان تعریف کرد.

**موجک:** در آنالیز همساز، با استفاده از سری‌های فوریه (و گاهی نیز تبدیل‌های فوریه) یک موج دلخواه را با امواج ساده سینوسی و کسینوسی تقریب زده و در موارد مختلفی از قبیل مخابره صوت، یا ضبط اثر انگشت و غیره استفاده می‌کنند. این تقریبات برای موج‌هائی که ناگهان شدید شده و سپس میرا می‌شوند نامناسب و پرهزینه هستند و لذا سینوس و کسینوس را با تابع‌های مناسب‌تری به نام موجک عوض می‌کنند

**آنالیز چند ریزه سازی:** چارچوبی است برای بررسی سیگنال‌ها و داده‌ها در مقیاس‌های مختلف. در این روش، داده به صورت سلسله مراتبی به بخش‌های نسبتاً کلی و جزئیاتی تقسیم می‌شود تا امکان مشاهده همزمان رفتار کلی و تغییرات سریع را فراهم کند. این آنالیز اساس نظریه موجک‌هاست و در مقایسه با آنالیز فوریه توانائی بیشتری در تحلیل موضعی دارد.

این اصطلاح آشکوبه‌ای را از کتابی [۲] اقتباس کرده‌ایم که مولف آن مدعی ابداع آن نیست؛ ضمنا خواننده را به خواندن صفحات ۱۵ تا ۱۸ همان کتاب تشویق می‌کنیم.
برای عینی‌سازی مفهوم «تقریبات آشکوبه‌ای» و پیوند آن با نمونه‌های تاریخی و کاربردی، در ادامه چند مثال از حوزه‌های مختلف ارائه شده است. برای حظ بصر خواننده، تصویری از نمای یک بنای سنتی با بادگیرها و حیاط میانی (شکل ۱) اضافه کرده‌ایم که در آن هر لایه با یک معماریِ مجزا نقش و اطلاعاتی خاص خود دارد و با افزودن لایه‌های بالاتر، ساختارهای اطلاعاتیِ مراحل قبلی پابرجا هستند.

**شکل ۱.** بنای آشکوبه‌ای خانه آقازاده، واقع در ابرکوه، استان یزد

## ۲. کسرهای دودوئی

بسط‌های دودوئی و دهدهی و شصت‌شصتی که از گذشته دور رایج بوده‌اند، از ساختارهای آشکوبه‌ای مشابهی برخوردارند که ما در این مقاله به بسط دودوئی بسنده می‌کنیم. از ۳۱۰۰ تا ۲۰۰۰ ق.م.، کشاورزان مصری، پنج تا کسر دودوئی (نصف، ربع، یک‌هشتم، ... تا یک‌شصت‌وچهارم) داشتند که در توزین و توزیع روزانه‌شان استفاده می‌شد و یک کسر دوسوم هم داشتند که با کسرهای دودوئی ترکیب می‌شد و در نگهداری حساب سال و ماه به کار می‌رفت. بنابراین اگر ۱۱ نان را به سرکارگری می‌دادند که بین ۵ کارگر توزیع کند، آن کار را در سه مرحله به شرح جدول ۱ انجام می‌داد.

**جدول ۱.** تقسیم ۱۱ نان بین ۵ کارگر در مصر بسیار قدیم

| مرحله | کسر و خارج قسمت | باقیمانده |
|---|---|---|
| *1* | $\frac{11}{5}=\frac{5+5+1}{5}=2$ | $1=5\left(\frac{1}{8}\right)+3\left(\frac{1}{8}\right)$ |
| *2* | $\frac{11}{5}=2+\frac{1}{8}$ | $\frac{3}{8}=5\left(\frac{1}{16}\right)+\left(\frac{1}{16}\right)$ |
| *3* | $\frac{11}{5}=2+\frac{1}{8}+\frac{1}{16}$ | $\frac{1}{16}=4(\frac{1}{64})$ |

ملاحظه کنید که در مرحله اول به هر نفر ۲ قرص نان رسید. یک نان باقیمانده ارزش پنج قسمت شدن را داشت ولی ابزاری برای ایجاد $\frac{1}{5}$ نبود. (امروزه هم اگر از ما بخواهند دایره‌ای را به ۵ قسمت مساوی تقسیم کنیم، بدون نقاله درد سر خواهیم داشت.) لذا نان را نصف کردند که به یمن تقارن دایره، کار مشکلی نبود. دو نیمه نان را نمی‌شد به ۵ نفر داد لذا هر نصفه را نصف کردند، باز هم نشد؛ بار سوم که قطعات حاصل را نصف کردند، ۸ قطعه $\frac{1}{8}$ تولید شد و به هر نفر یک قطعه $\frac{1}{8}$ رسید و سه قطعه $\frac{1}{8}$ هم باقی‌ماند. قطعه‌های باقیمانده را نصف کردند، شش قطعه $\frac{1}{16}$ تولید شد که به هر نفر یک قطعه رسید و ۱ قطعه $\frac{1}{16}$ هم باقی ماند. اگر این قطعه را هم نصف و نصفه‌ها را دوباره نصف می‌کردند، به چهار قطعه $\frac{1}{64}$ می‌رسیدند که نه می‌شد بین ۵ کارگر تقسیم کرد و نه می‌شد نصف کردن را ادامه داد چون به دلائلی کسر $\frac{1}{128}$ در فرهنگ مصری وجود نداشت. لذا تقسیم به همان جا ختم شد و لابد سه قطعه باقیمانده هم به خزانه برگشت! در زمان دودمان یازدهم که صنعت داروسازی پیشرفت کرد و قدرت داروسازان بر کاهنان چربید، با حفظ حرمت

پنج کسر مقدس $\frac{1}{2}$ تا $\frac{1}{64}$، انواع کسرهای دیگر هم به کار گرفته شد. چون پادشاهی به دودمان دوازدهم (۲۰۰۰ ق.م.) رسید، از اهمیت کسرهای دودوئی کاسته شد و همه کسرهای با صورت ۱ به عنوان ابزارهایی تعریف شده وارد زندگی و کار مصری‌ها شدند. توجه کنید که کاهنان و ریاضی‌دانان (دست در دست هم) همه سنگرها را خالی نکردند و مثلا بجز دوسوم که به طور طبیعی خودش را در دل کشاورزان جا کرده بود، هیچ کسر با صورت ۲ یا بیشتر را مجوز ورود به عرصه ریاضیات ندادند. یعنی کسر مجوزداری مانند $\frac{1}{5}$ که قبلا به صورت تقریبی « $\frac{1}{8}$ و $\frac{1}{16}$ » اظهار وجود می‌کرد، حالا خودش مستقیما به عنوان یک کسر تعریف شده، یک سنجه پذیرفته شده عرض اندام می‌کند، اما کسر دوپنجم هنوز حق اظهار وجود ندارد و نمی‌تواند خود را به عنوان دوبرابر یک پنجم معرفی کند. کسر دوپنجم اگر نمی‌خواهد به روش آشکوبه‌ای با کسرهای دودوئی به صورت « $\frac{1}{4}$ و $\frac{1}{8}$ و $\frac{1}{64}$ » تقریب زده شود باید چند تا کسر متفاوت با صورت‌های ۱ پیدا کند که مساوی مجموع آن‌ها شود؛ مثلا $\frac{2}{5}$ می‌بایست به صورتی مانند $\frac{1}{3}+\frac{1}{15}$ اظهار وجود کند. بنابراین، مصری‌ها کسرهای یک‌پنجم، یک‌سوم و یک‌پانزدهم را مستقیما می‌شناختند ولی دوپنجم را مستقیما نمی‌شناختند (یا اجازه نداشتند بشناسند) و می‌بایست آن را به صورت «$\frac{1}{3}$ و $\frac{1}{15}$» ببینند[۳]

کامپیوتر و رایانه دو اصطلاح علمی مترادف با دو معنای متفاوت هستند؛ یکی محاسبه می‌کند و اطلاعات تازه تولید می‌کند، دیگری اطلاعات تازه را برای سهولت دسترسی، طبقه بندی می‌کند. متاسفانه مصری‌ها با معرفی نیم‌بند کسرهای یکین (یک‌چندم‌ها)، از هر دو نعمت محروم شدند؛ نه می‌توانستند عددهایشان را به راحتی طبقه بندی کنند و نه الگوریتم ساده‌ای برای مقایسه و ارزشیابی کسرهایشان داشتند. از آن پس نیز مصر رونق علمی خود را از دست داد و عصر طلائی علمی‌اش به دوران‌هائی از جهانگیری‌های کم دوام و افت و خیزهای سیاسی فرساینده و لاجرم خفقان‌های داخلی مبدل شد.

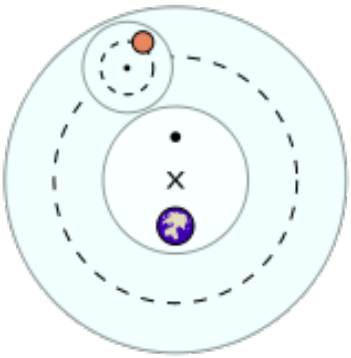
## ۳. نظام فلکی سیارات

منجمان یونانی از چند قرن قبل از میلاد، که فرضیه غلط زمین‌مرکزی را مبنا گرفتند، با برداشتی از مشاهدات ابتدائی خود، همه اجرام آسمانی را بر فلک ثابتی (سقف مقرنس) قرار دادند که در شبانه روز یک بار حول (محور) زمین می‌چرخید و مرکز زمین، مرکز عالم محسوب می‌شد. علاوه بر این، خورشید و سیارات شناخته شده نیز، گردش‌های متفاوتی داشتند که هر کدامشان، به زعم یونانیان اولیه، در فلک جداگانه‌ای حول مرکز زمین می‌چرخیدند. دانشمندان اسلامی، به ویژه ابوریحان بیرونی (۹۷۳ تا ۱۰۴۸م.)، هریک از فلک‌های خورشید یا سیارات را به دایره‌ای خلاصه می‌کردند که همان مسیر سیاره بود [۴]،[۵]. ما نیز، از این به بعد، همین تعریف را برای خورشید و سیارات می‌پذیریم. با دقیق‌تر شدن رصد سیارات، یونانیان پی بردند که مدار سیارات گرد نیست و مثلا عطارد که عین خورشید سالی یک بار دور زمین می‌چرخد، مرکزش روی فلک باقی نمی‌ماند و بالا و پائین می‌شود. ده سال طول می‌کشید تا عطارد به وضعیتی که قبلا رصد شده برگردد و در این مدت ده بار زمین را دور می‌زد. (در شکل ۴ روی یکی از منحنی‌ها حرکت کنید و تعداد دورها را بشمارید تا به نقطه اول برسید؛ این شکل‌ها از ویکی‌پدیا کپی شده است و اعتراف باید کرد که گرچه به عنوان مرجع اعلام نشده است ولی بدون آن نوشتن این مقاله مقدور نبود.) سیاره زهره هم وضع مشابهی داشت و اوضاع سیارات عُلوی مانند مریخ و مشتری به مراتب پیچیده‌تر بود. چون هدف ما نجوم نیست، فقط بر سیارات سُفلی و آن هم، به عنوان مثالی که بیشتر در کانون توجه منجمین اسلامی بوده است، فقط بر عطارد تمرکز می‌کنیم. منجمان یونانی، برای این که مشکل عطارد حل شود یک فلک کوچک برایش اضافه کردند؛ خودش روی پیرامون فلک کوچک می‌چرخید و مرکز این فلک نیز روی فلک اولیه، زمین را دور می‌زد. فیلسوفان یونانی هم بی‌کار نبودند و در ازای هر فلکی که منجم یونانی تعبیه می‌کرد، یک یا دو فلک هم آنان می‌افزودند تا سیاره را به حرکت وادارد. فلک‌های ریاضیدانان و منجمان را کپرنیک[1] (۱۴۷۳ تا ۱۵۴۳م.) و کپلر[2] (۱۵۷۱ تا ۱۶۳۰م.) از گنبد مقرنس پاک کردند و با بیدار کردن زمین از خواب ناز، او را همراه با سایر سیارات در مدارهائی مدور یا بیضوی به گردش دور خورشید وا داشتند. فلک‌های ارسطو و سایر فیلسوفان را هم، نیوتن با قوانین خودش فروریخت و اراده حرکت را به دست نیروی جاذبه سپرد. آنچه در این مقاله مدّ نظر ما خواهد بود، دایره‌های روی هم سوار شده ریاضی‌دانان و منجمان برای نمایش مسیر گردش عطارد است و کاری به عامل حرکت عطارد نداریم. همان طور که گفتیم، برای یافتن مسیر عطارد، آن را در حال چرخش بر دایره‌ای فرض کردند که مرکزش بر دایره دیگری حول زمین می‌چرخید. اگر به جای دایره مثلا بیضی را می‌گذاشتند شاید به جواب مطلوب نزدیک‌تر می‌شدند ولی باور نمی‌کردند که طبیعت آنقدر بدسلیقه باشد که شکل زیبای دایره را رها کند و به جایش شکل قناس بیضی را بگذارد. (وقتی که از افلاطون دلیل بزرگ‌تر بودن مساحت سطح دایره از مساحت هر شکل دیگری با همان اندازه محیط را خواسته بودند، جوابی به این مضمون داده بود که شکلی زیباتر از دایره نیست.)

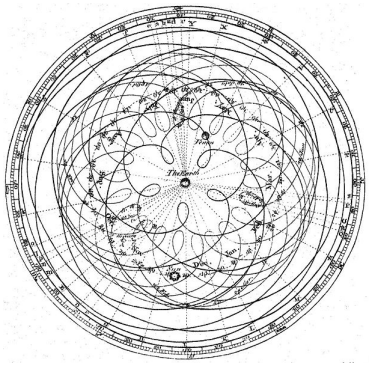
برای رفع تناقضات رو به افزایش مسیر حرکت عطارد، تعداد این دایره‌ها مرتباً افزوده می‌شد؛ به طوری که چون نوبت به قطب‌الدین شیرازی (۱۲۳۶ تا ۱۳۱۱م.) شاگرد برجسته خواجه نصیرالدین توسی (۱۲۰۱ تا ۱۲۷۴م.) رسید، عطارد را ۱۰ فلک بود [۲۰]. به علاوه، بطلمیوس (۹۰ تا ۱۶۸م.) نیز برای توجیه انحراف از استوای

1. Nicolaus Copernicus
2. Johannes Kepler

زمین، مرکز بزرگترین فلک عطارد را کمی جابه‌جا کرد. یک تغییر بنیادی هم خواجه نصیر توسی داده بود که عطارد سه فلک دایره‌ای داشت ولی رونق نگرفت و حتی شاگرد خودش هم راه دیگری پیمود. در الگوی توسی، فلک اول عطارد حول زمین می‌چرخید و مرکز فلک دوم را با خود می‌برد اما وضعیت این دو فلک نسبت به هم ثابت بود. عطارد بر محیط فلک سوم که قطرش مساوی شعاع فلک دوم بود قرار داشت و نسبت به آن فلک ثابت بود اما فلک سوم توی فلک دوم بر محیط آن می‌لغزید و سرعت‌های فلک اول و فلک سوم چنان تنظیم شده بود که مسیر عطارد شبیه منحنی نمایش $y=\sin x$ شده بود که محور xها را روی محیط فلک اول خمانده باشند. ابوالعلاء قوشچی (۱۴۰۳ تا ۱۴۷۴م.) نیز با انتقاد بر فلک‌های بطلمیوسی تعداد وترتیب و مرکزهای افلاک عطارد را تغییر داد که جرج سالیبا[1] [۶] صرفنظر از درست یا غلط بودن فرضیه زمین‌مرکزی، کار ریاضی انجام شده در آن را یک پژوهش اصیل و عمیق می‌داند. طبیعتا این پیچیدگی‌ها، سروصدای عده‌ای را هم بلند می‌کرد و خواستار ترک تفکر دردسرساز زمین‌مرکزی می‌شدند. دانشمندان دوره اسلامی چه موافق چه مخالف، همین الگوهای فلک بر فلک یونانی را به کار می‌بستند و نتیجه‌های خوبی هم می‌گرفتند. خواجه نصیر و ابن‌شاطر (۱۳۰۴ تا ۱۳۷۵م.) گرچه تا پایان عمر بر فرضیه زمین‌مرکزی وفادار ماندند، اما در عمل متوجه اشکالات دست و پاگیر آن شده و روش‌هائی برای رد، تایید یا اصلاح آن در نظر داشتند [۲۱]. بنا به تحقیقات جرج سالیبا، کپرنیک با پی‌گیری کار خواجه و سایر منجمان مراغه، تفکر زمین‌مرکزی را برای همیشه منسوخ و فرضیه خورشیدمرکزی را رواج داد. سالیبا با بررسی استدلال‌های اشتباه و برداشت‌های ناقص کپرنیک از قضیه دودایره خواجه نصیر و کپی برداری‌های ناشیانه از آن، نتیجه می‌گیرد که کپرنیک مسلما به رساله خواجه دسترسی داشته است [۷]. نگارنده اول مقاله حاضر اضافه می‌کند که با توجه به منش و رفتار پاک خانواده کپرنیک در طول عمر پرماجرایشان، سکوت در مورد استفاده از یک ریاضیدان و فقیه مسلمان را باید به حساب ترس او از دادگاه تفتیش عقاید و تکفیر کلیسا دانست چرا که تا صد سال پس از مرگ کپرنیک، دانشمندانی همچون گالیله (۱۵۶۴ تا ۱۶۴۲م.) به جرم طرفداری از نظریه خورشیدمرکزی او، مورد بازجوئی قرار می‌گرفتند و کمترین راه برای گریز از مجازات توبه و اعتراف بود. سهل انگاری کپرنیک نیز که در طلیعه رنسانس، کشف حقیقت را بعید نمی‌دید، باید عمدی دانست. کپرنیک به یمن نفوذ مثبت سیاسی و کمک‌های مالی شاهزادگان حامی، به رصدهائی از خورشید و سایر سیارات توفیق پیدا کرد که هیچ شکی در ذهن او در مورد خورشیدمرکزی باقی نگذاشت و او را مصمم ساخت با افزودن کارهای ریاضیدانان شرقی، تفکر پوسیده زمین مرکزی را ریشه کن کند و گرنه آنچه او به عنوان نتیجه ریاضی اعلام کرد، حکم غلط مدور بودن مسیر سیارات بود که صد سال بعد کپلر با تلفیقی از رصدهای جدید و کشفیات فیزیکی خود، توانست مدور بودن مسیر را رد و بیضی بودن آن را اثبات کند. تنها استفاده کپلر از نظریه کپرنیک، جرأت یافتن او در اعلام فرضیه خورشیدمرکزی بود. به هر حال، کپرنیک با بهره‌گیری از قدرت خود در لهستان، دوری از واتیکان، و احترامی که در خلال ماموریت‌های سیاسی‌اش در واتیکان ذخیره کرده بود، ضربه غافلگیرانه خود را بر تفکر پوسیده زمین مرکزی وارد آورد. گویند کپرنیک علی رغم اصرار دوستان و حامیانش، جرأت انتشار نظریه خود را نداشت و پس از آن که کتاب انقلابی‌اش را به چاپ رساندند و نسخه‌ای از آن را در بستر مرگ روی سینه‌اش گذاشتند، با نگاه رضایت‌آمیزی به جلد آن درگذشت. بعدها کپلر بر مبنای مشاهدات نجومی خود و اعتقاد التقاطی مسیحی–میترائی، نظریه کپرنیک را پذیرفت و همان طور که گفتیم با سعی و خطا آن قدر رصد و محاسبه کرد تا بیضوی بودن مسیر سیارات را به اثبات رساند.



**شکل ۲.** الگوی فلکی عطارد در نظریه زمین‌مرکزی



**شکل ۳.** مسیر یک سیاره با دو فلک

در شکل ۲، مرکز فلک اول عطارد را با × نمایش داده‌اند که طبق الگوی بطلمیوس بالای مرکز عالم (یعنی مرکز زمین) قرار گرفته است؛ دایره‌های خط‌چین، فلک‌های منجمان و ریاضی‌دانان را نمایش می‌دهند که منحنی مسیر عطارد را ترسیم می‌کنند. دایره‌های خط‌پر نیز فلک‌های فیلسوفان را نمایش می‌دهند که تاثیری در معادله مسیر ندارند ولی اگر نباشند عطارد از جایش تکان نمی‌خورد! شکل ۳ نیز احتمالا مسیر عطارد را در طول چند سال نشان می‌دهد که ۱۰ بار باید دور زمین بچرخد تا به همان وضعیت

1. Georg Saliba

اولش برگردد. خواجه نصیر با قضیه ۲–دایره خود الگوئی ساخت که سیاره در یک دور حول زمین، مسیر خودش را قطع نکند و از دید ناظر همواره در حرکت به جلو باشد.

از تفصیل تحولات مربوط به تعداد افلاک چشم می‌پوشیم و با جمع‌بندی همان بحث مسیرهای «دایره بر دایره،» بخش را به پایان می‌رسانیم. منجم عهد عتیق، با برداشت اولیه خود، مسیر عطارد را یک دایره ساده پنداشت. نسل به نسل که رصدها دقیق‌تر می‌شد، دایره‌های کوچکتر و کوچکتری برای تصحیح مسیر قبلی، اضافه می‌گردید. این که آیا به جواب بهتری نزدیک می‌شدند یا نه، محتاج بررسی بیشتری است ولی از آنجا که ناگهان منسوخ شد و کاربردی بر آن مترتب نبود، کسی آن را دنبال نکرد. ما خوشحالیم که بالاخره پس از حدود دوهزار سال، دانشمندان توانستند از قید یک باور غلط خلاص شوند ولی ضررش برای عالم ریاضی این بود که بحث شیرین مربوط به تجزیه توابع را ناگهان متوقف ساخت و تا دو سه قرن بعد که مک‌لورن (۱۶۹۸ تا ۱۷۴۶م.)، تیلور (۱۶۸۵ تا ۱۷۳۱م.) و فوریه[1] (۱۷۶۸ تا ۱۸۳۰م.)، سری‌های خود را کشف کردند، کسی به این نوع مسائل نپرداخت. روند فلک‌برفلک یونانی‌ها نیز به این دلیل از رونق افتاد که انگیزه‌اش بر یک نظریه غلط استوار بود؛ چندین بار فرض‌های اولیه‌اش تغییر کرد و نهایتا هم با شکست نظریه زمین‌مرکزی، از رونق افتاد. البته کشفیات خواجه نصیرالدین توسی و ابوالعلاء قوشچی نتایج جالبی بود که از درون همین مطالب جوشید ولی ابداع روشی منظم و آشکوبه‌ای برای تقریب توابع را به ریاضیدانان پس از خود که از اروپا سردرآوردند واگذاشتند. (به [۷] و مرجع‌های آن مرجعه کنید.)

## ۴. بسط تابع به سری

سری‌های تیلور [۸] و مک‌لورن [۹] به طور طبیعی از تعریف مشتق و خواص چندجمله‌ای‌ها و سری‌های شناخته شده بیرون آمدند. با توجه به این که ضرائب یک چندجمله‌ای به مشتقات آن ارتباط مستقیم دارد، ملاحظه می‌شد که ابتدائی‌ترین تقریب برای یک چندجمله‌ای در حوالی یک نقطه همان خط افقی $y=f(x_0)$ گذران بر آن نقطه است. حال اگر خط را دوران دهیم تا ضریب زاویه‌اش مساوی مشتق تابع گردد، تقریب مناسب‌تر

$$y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$$

به دست می‌آید و همین طور سهمی

$$y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2}f''(x_0)(x - x_0)^2$$

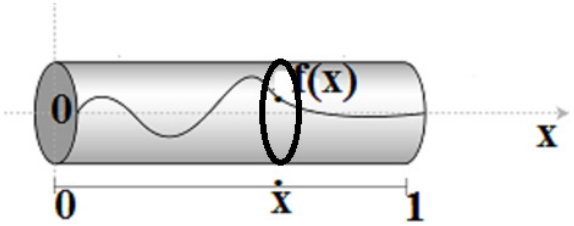
به مراتب تقریب بهتری را ارائه می‌کند و الی آخر در حالت $x_0=0$ سری به مک‌لورن منسوب است. بدون شک سری تیلور تقریبی کاملا موضعی برای تابع بوده و شرط قوی بینهایت بار مشتق‌پذیری را لازم دارد. سری فوریه از میانگین‌ها بهره می‌گیرد و در نتیجه بردی وسیعتر و کاربردی موثرتر دارد که ذیلا به آن می‌پردازیم.

فوریه (شکل ۴) با الهام از حالت‌های ساده معادله با مشتقات جزئی حرارت، جواب کلی آن معادله را به صورت مجموعی از منحنی‌های شناخته شده سینوس nx و کسینوس nx پذیرفت و بدون آن که به جزئیات و دقت عملیات ریاضی توجهی کند ضریب‌ها را چنان تعیین کرد که تابع حاصل در معادله حرارت صدق کند. ریاضیدانان بعدی، شرایطی تعیین کردند که کار فوریه بدون نقص باشد و اثبات‌هایش را راست و ریست کردند. کار مهم فوریه همان گام نخستین بود که برای تجزیه یک تابع دلخواه به تابع‌های سینوسی با فرکانس‌های بیشتر و بیشتر (یا به عبارت معادل دوره تناوب‌های ریزتر و ریزتر) برداشت ودنیای جدیدی در ریاضیات به نام آنالیز همساز (هارمونیک) آفرید که در خدمت مخابرات و کدگذاری و هزاران کاربرد ریز و درشت دیگر قرار گرفت.

فوریه [۱۰]، در مسئله فرضی حرارت، دو قاعده (x=0 و x=1) میله‌ای به طول l=1 را بین دو قالب یخ در حال ذوب قرار داده و بقیه میله را گرم کرد تا درجه حرارت هر مقطع از میله به مقدار از پیش تعیین شده f(x) برسد که در این‌جا x فاصله مقطع از قاعده چپ میله در شکل زیر است. سپس در حالی که دو قاعده را در تمام مدت آزمایش در صفر درجه نگه می‌داشت بقیه میله را به حال خود واگذاشت تا روند آزاد تغییرات دما هر مقطع را در گذر زمان مطالعه کند. معادله با مشتقات جزئی حرارت را هم به صورت

$$u_t = \alpha u_{xx};\ u_t = \frac{\partial u}{\partial t};\ u_{xx} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

فرض کرده بود که در آن u(x,t) دمای مقطع به فاصله x از مبدا در لحظه t بود.




وی فرض کرد یک جواب خصوصی معادله به صورت u(x,t)=X(x)T(t) باشد و آن را به سادگی حل کرد و بینهایت جواب به صورت

$$u_n(x,t) = D_n e^{-\alpha n^2 \pi^2 t} \sin(n\pi x)$$

به دست آورد که در آنها n عددی طبیعی و $D_n$ ضریبی ثابت بود. این جواب‌ها باید در معادله حرارت صدق کنند که می‌کنند (مشتقاتشان را بگیرید و امتحان کنید). اگر x را ۰ یا ۱ بگذارید

1. Joseph Fourier

می‌بینید که درجه حرارت ۰ می‌شود و همین انتظار را هم داشتیم چون دو سر میله دائما به یخ مذاب چسبیده بود. اما یک شرط آن درست نیست و آن دماهای طول میله در لحظه آغازین! یعنی وقتی که میله را به حال خود رها کردیم (در لحظه t=0)، دما در هر نقطه x مساوی

$$u(x,0) = \mathrm{f(x)}$$

بود ولی حالا مساوی $D_n \sin(n\pi x)$ شده است. طبیعت خطی معادله این امید را به ما می‌دهد که شاید با ترکیبات خطی جواب‌های خصوصی، بتوانیم به جواب مطلوب برسیم. فوریه، جهت احتیاط، همه آنها را در یک ترکیب خطی که متخصصان جبر آن را به رسمیت نمی‌شناسند و متخصصان آنالیز هم به حرمت جبری‌ها نامش را سری گذاشته‌اند به کار گرفت و جوابی را به صورت زیر به امتحان گذاشت:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \mathrm{e}^{-\alpha n^2 \pi^2 t} \sin(n\pi x).$$

گوش آنالیزدان کر، این تابع در همه شرط‌های معادله دما صدق کرد مگر شرط

$$u(x,0) = \mathrm{f(x)}$$

که آن هم خوشبختانه با اختیار مناسب ضریب‌ها برقرار شد. برای یافتن ضریب‌های $\mathrm{D_n}$، طرفین معادله

$$\mathrm{f(x)} = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \sin(n\pi x)$$

را در $\sin(\mathrm{m}\pi\mathrm{x})$ ضرب کرد و از حاصل انتگرال گرفت. برای هر یک از ضریب‌ها به رابطه زیر رسید:

$$D_{\mathrm{m}} = 2\int_0^1 f(x)\sin(\mathrm{m}\,\pi x)dx.$$

**شکل ۳.** ژوزف فوریه (۱۷۶۸–۱۸۳۰م.)

فوریه که علاوه بر ریاضیات به سایر کارهای علمی حتی مصرشناسی و محیط زیست‌شناسی هم علاقمند بود فرصتی برای دقت در کارهای ریاضی پیدا نمی‌کرد. مخصوصا که مدت‌ها همراه فرمانده محبوب خود، ناپلئون بناپارت، در کشورگشائی‌های او شرکت می‌جست. (بر خلاف ابوریحان بیرونی که همراه سلطان محمود غزنوی به هند می‌رفت ولی اشتیاقی به کشورگشائی‌های سلطان نشان نمی‌داد.) فوریه مدت‌ها به ساختن دانشگاه فرانسوی مصر و مدیریت آن مشغول بود به فرانسه هم که برمی‌گشت به خواهش ناپلئون سمت‌های بالای اداری را می‌پذیرفت. اما ریاضیدانان کارهای او را با اشتیاق دنبال می‌کردند، اشتباهات او را زیر نظر داشتند و نظریات او را تعمیم می‌دادند. گرچه بسط توابع از یک قرن پیش توسط تیلور و دیگران شروع شده بود ولی اولین بار آنالیزدانان می‌دیدند که فوریه راهی برای تجزیه یک تابع سلندر (بر وزن و معنای قلندر= نتراشیده و نخراشیده) به توابع موزون سینوسی پیدا کرده است. طبیعتا برخی شیفته، برخی منتقد و برخی هم مدعی بودند؛ اما در مجموع، نام فوریه به عنوان بنیان گذار سری‌های فوریه در تاریخ علم به ثبت رسید و حتی تبدیل‌های فوریه را هم که ریاضیدانان پس از مرگ او از تعمیم سری‌های فوریه به دست آوردند به وی نامدار کردند [۱۰]. (مرجع [۱۱] نیز با بحث تاریخی مفیدی از سری‌های فوریه شروع می‌شود.)

فوریه برای آن که ثابت کند هر تابعی را می‌تواند به صورت مجموع بینهایتی از سینوس‌ها بنویسد مثال‌های دیگری هم به نمایش گذاشت. آنالیزدانان متوجه شدند که گرچه تابع f در مسئله فوریه روی بازه [0,1] تعریف شده ولی سری فوریه متناظر آن برای تابع متناوب (فرد) g با دوره تناوب [1,+1] و ضابطه زیر نیز معتبر است

$$g(-x) = -g(x);\ \ g(|x|) = f(|x|); x \in [-1,+1].$$

اما اگر بخواهند تابع‌های زوج و غیره را بسط دهند باید کسینوس‌ها را به میان آورند. نظریه فوریه به سرعت راه خود را در همه علوم دیگر گشود و اصطلاحات علمی جدیدی به عرصه دانش بشری وارد کرد که مهم‌ترین آنها «پردازش پیام» یا «پیام‌پردازی» بود. البته این یک اصطلاح عام است و به هر تابعی که در اصطلاح فیزیکدانان انرژی متناهی داشته باشد اطلاق می‌شود. در پیام‌پردازی، هر زیر فضا از یک فضای هیلبرت جدائی‌پذیر (معمولا $L^2(\mu)$) را یک مجموعه از پیام‌ها نامیده و برخلاف انتظار ریاضی‌دانان ترجیح می‌دهند اسکالرهای مورد استفاده‌شان عددهای مختلط باشند. چیزیکه ریاضی‌دانان هم استقبال می‌کنند و به جای سینوس و کسینوس، ترکیبات زیر را به کار می‌گیرند:

$$\sin x = \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i};\ \cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}.$$

با استفاده از این فرمول‌ها سری فوریه و ضرایب آن برای هر تابع f با دوره تناوب [-1,+1] به شکل زیر درمی‌آید:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \hat{f}(n) e^{in\pi x};\ \hat{f}(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-1}^{+1} f(x) e^{-in\pi x} dx;\ n \in \mathbb{Z}.$$

این عددهای مختلط $\hat{f}(n)$ را ضرایب بسط فوریه می‌نامند و ما از این پس به جای سینوس و کسینوس از تابع‌های نمائی صحبت خواهیم کرد. بعدها که نظریه انتگرال لبگ قدرت

گرفت و همگرائی‌های جورواجور به عالم آنالیز راه پیدا کرد، ریاضیدانان متوجه شدند که اگر بر همگرائی یکنواخت اصرار نورزند و به همگرائی‌های ضعیف‌تری مانند همگرائی در فضای هیلبرت $L^2(-1,+1)$ قانع باشند، سری فوق را برای تابع‌های کلی‌تر می‌توانند بنویسند. از این پس، ما این فرض را به فرضیات پس‌زمینه خود اضافه می‌کنیم و خواننده را هم به رها کردن خود از قید توپولوژی انعطاف‌ناپذیر همگرائی یکنواخت تشویق می‌کنیم. ضمنا مشابه آنچه که برای بازه $[-1,+1]$ گفته شد برای هر بازه $[a,b]$ هم درست است ولی ضرایبی باید کم و اضافه شود که ما ذیلا در مورد بازه $[0,\alpha]$ به کار می‌گیریم.

اگر $f\epsilon L^2(0,\alpha)$ پیام مورد نظر باشد، پردازش آن چیزی نیست مگر قیچی کردن سری فوریه آن که تعداد جملات باقی‌مانده به دقت مورد نیاز و امکانات رایانه‌ای ما بستگی دارد. البته همان طور که امروزه، کارهای نظری مبحث انتگرال را با جمع‌های ریمانی ولی محاسبات عددی‌اش را با قاعده‌های ذوزنقه‌ای و سیمپسون[1] و غیره انجام می‌دهند، در امر پردازش پیام نیز سری‌های فوریه ارزش‌های اقتصادی خود را از دست داده‌اند و به جایشان از چیزهای دیگری با نام عمومی موجک استفاده می‌کنند. به هر حال، چند سال پیش که با تلفن راه دور صحبت می‌کردیم، در هر $\alpha$ ثانیه، نمونه‌ای از صدای ما برداشته می‌شد که همان پیام $f\epsilon L^2(0,\alpha)$ بود. این نمونه، همزمان وارد $2N+1$ دستگاه می‌شد که کار هر کدامشان محاسبه یکی از انتگرال‌های زیر بود:

$$\hat{f}(n)=\frac{1}{\sqrt{\alpha}}\int_0^{\alpha} f(x)e^{-\frac{2in\pi x}{\alpha}}dx; n=0.\pm1.\pm2.\ldots.\pm N$$

این $2N+1$ عدد را مخابرات مبدا به مخابرات مقصد گسیل می‌کرد که در آنجا به همین تعداد دستگاه وارد می‌شدند و جملات سری زیر را می‌ساختند:

$$f_{\#}=\sum_{n=-N}^{N}\hat{f}(n)\frac{1}{\sqrt{\alpha}}e^{\frac{2in\pi x}{\alpha}}.$$

این سری قیچی شده صدائی شبیه صدای گوینده در گوش شنونده طنین انداز می‌کند. صدای اصلی گوینده نیز همین سری بود که بینهایت جمله داشت. اگر $\alpha$ مثلا یک‌صدم ثانیه بود، برای هر یک دقیقه صحبت شما، این زنجیره را ۶۰۰۰ بار تکرار می‌کردند و در هر بار هم $2N+1$ انتگرال می‌گرفتند و به مقصد می‌فرستادند و بازسازی می‌کردند. البته گوش انسان این توانائی را دارد که طیف صداهای تولید شده را با هم ترکیب کند.

همان طور که گفتیم، این روزها پردازش پیام‌ها تغییر کرده است و در آن‌ها به جای سینوس و کسینوس از موجک‌ها استفاده می‌شود. تعریف و توجیه موجک‌ها را به بخش‌های بعدی وامی‌گذاریم و در باقی‌مانده این بخش، به تعمیمی از سری فوریه به نام *تبدیل فوریه* می‌پردازیم.

کاربرد سری فوریه منحصر به بازه‌های کران‌دار است و همه تابع‌های با انرژی متناهی (یعنی $L^2(a,b)$) را پوشش می‌دهد. گاه پیش می‌آید که همزمان، خانواده وسیعی از تابع‌ها را بررسی می‌کنیم که دامنه زندگی متفاوتی دارند و مجبوریم $L^2(\mathbb{R})$ را در نظر بگیریم تا همه پیام‌ها را یک‌جا پوشش دهد. متاسفانه در چنین فضای بی‌کرانی که تابع‌های نمائی برای موجودیت خود نیاز به انرژی بینهایتی دارند، از لحاظ فیزیکی بی‌معنا هستند. از لحاظ ریاضی نیز فقط فضایی مانند $L^{\infty}(\mathbb{R})$ می‌تواند پذیرای عضویتشان باشد. ریاضی‌دانان پس از فوریه، هر موج دلخواه $f$ را که توان‌های اول و دومش انتگرال‌پذیر بود، به یک بازه $[-T+,T]$ تحدید کردند و $f_T$ (تابع تحدید شده) را بر حسب سری فوریه آن به شرح زیر به دست آوردند. عدد طبیعی $N$ را با فرض $T<N$ در نظر بگیرید. آنگاه

$$f_T(x)=lim_{N\to\infty}\sum_{n=-N}^{N}\hat{f}_T(n)\frac{1}{\sqrt{2N}}e^{\frac{2in\pi x}{2N}}$$

$$(z_n=\tfrac{n}{2N}) \qquad =lim_{N\to\infty}\tfrac{1}{2N}\Sigma_{-N}^{N}e^{\frac{2in\pi x}{2N}}\int_{-T}^{T}f_T(y)e^{-\frac{2in\pi y}{2N}}dy$$

$$=lim_{N\to\infty}\frac{1}{2N}\sum_{-N}^{N}e^{2i\pi xz_n}\int_{-T}^{T}f_T(y)e^{-2i\pi yz_n}dy$$

$$=\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-T}^{T}e^{2i\pi xz}f_T(y)e^{-2i\pi yz}dydz.$$

حال اگر $T$ را به بینهایت میل دهیم بنا به قضایای انتگرال لبگ،

$$f(y)=\int_{-\infty}^{\infty}e^{2i\pi xz}\{\int_{-\infty}^{\infty}f(y)e^{-2i\pi yz}dy\}dz=\int_{-\infty}^{\infty}e^{2i\pi xz}\tilde{f}(z)dz,$$

که در آن تابع $\tilde{f}$ را تبدیل فوریه تابع $f$ می‌نامند و مقدارش با انتگرال داخل $\{...\}$ در فرمول اخیر تعریف می‌شود. چون به ندرت اتفاق می‌افتد که هم سری فوریه و هم تبدیل فوریه یک تابع را در یک مسئله حساب کنند، لذا هم سری فوریه و هم تبدیل فوریه را با نماد مشترک $\hat{f}$ نمایش می‌دهند که ما هم رعایت می‌کنیم.

فایده تبدیل فوریه این است که همانند سری فوریه برگشت‌پذیر است یعنی از روی آن می‌شود تابع اصلی را به دست آورد و ثانیا تابع اصلی هر چقدر هم ناپیوسته باشد تبدیل فوریه آن پیوسته است و در بینهایت به صفر میل می‌کند. از این رو اگر بخواهند پیام ناپیوس و نامنظمی را ذخیره کنند بهتر است تبدیل فوریه آن را ذخیره کنند که خطای بازخوانی‌اش کمتر باشد.

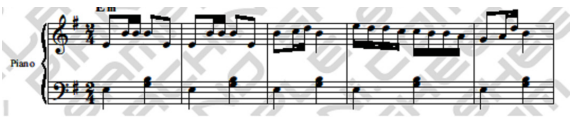
## ۵. تبدیل فوریه پنجره‌ای

سری یا تبدیل فوریه تبیین می‌کند که موج $f$ برایند بینهایت موج

1. Trapezoidal & Simpson's rules

نمائی با فرکانس‌های مختلف f به شدت $\hat{f}(y)$ است. بدیهی است که $\hat{f}(y)$ نمایشگر مقدار متوسط موج با فرکانس y در یک مدت نسبتا طولانی است. گابور (۱۹۰۰ تا ۱۹۷۹م.) علاقمند بود این اطلاعات را موضعی کند [۱۲]. مثال تلفن را که قبلا دیدیم نوعی موضعی کردن بود. اگر ما تمام مکالمه یک دقیقه‌ای را یک موج فرض کنیم و سری فوریه آن را به دست آوریم صدای بازسازی شده به هیچ وجه شباهتی به صدای اولیه نخواهد داشت. لذا زمان را به قطعات بسیار کوتاه تقسیم کردیم و با پردازش هر قطعه از صدا و ارسال بلافاصله آن، علاوه بر حفظ پیوستگی کلام، شباهت صدای بازسازی شده را به صدای اصلی بیشتر کردیم. در حقیقت، ما پیام یک‌دقیقه‌ای f را در تابع مشخصه بازه‌های زمانی $[0,\alpha]$ و $[\alpha,2\alpha]$ و ... و $[(K-1)\ \alpha,K\alpha]$ ضرب کردیم و پیام مربوط به هر بازه را جداگانه گسیل کردیم. (در اینجا $K\alpha=1$ .) این تابع مشخصه همچون پنجره دوربین عکاسی است که هر $\alpha$ ثانیه یک عکس برمی‌دارد و ما آن عکس را تجزیه و تحلیل می‌کنیم. در اصطلاح آنالیز هارمونیک به آن سری فوریه کوته–زمان گفته می‌شود و فرمول کلی آن در حالت $\alpha=1$ به شرح زیر است:

$$f(x)=\sum_{n\in\mathbb{Z}}\sum_{k\in\mathbb{Z}}\hat{f}_k(n)e^{2\pi inx};\ (x\in\mathbb{R});\ f_k(y)=f(y+k);\ 0\le y\le 1.$$

آن چه در بالا آمد مانند نوشتن پیام روی برگه نت‌های موسیقی است. مثلا پنج خط حامل زیر، حدود ۱۰ ثانیه از آهنگ سرود ای ایران را با پیانو نمایش می‌دهد که به پنج «میزان» دو ثانیه‌ای تقسیم شده است. اما میزان در برگه نت موسیقی بسیار بزرگتر از آن است که نقش پنجره را بازی کند و فقط کنترلی است برای نوازنده که وقت خود را تنظیم کند؛ نه عقب بماند، نه جلو بیفتد. از نظر نوازنده یا آهنگساز، زمان کوتاهی که هر نت نواخته می‌شود (و همانطور که در شکل ۵ می‌بینید در پیانو می‌تواند دو نت همزمان دست‌های چپ و راست باشد) پنجره مناسبی است. اما گوش شنونده یا دستگاه تجزیه کننده صوت، می‌تواند پنجره‌های بسیار کوتاه‌تری داشته باشد.

**شکل ۵.** نت موسیقی در پیانو

گابور[1] (شکل ۶) حالت پیوسته را مد نظر داشت یعنی می‌خواست دوربین به طور پیوسته عکس بگیرد و احتمالا از ناهنجاری‌های مرزی دو قاب متوالی هم دلخوش نبود. لذا وی در سال ۱۹۴۶ همزمان با اخذ جایزه نوبل، مقاله‌ای منتشر کرد که در آن از تابع پیوسته متقارنی مانند تابع نرمال گوس، پنجره مطلوب خود را ساخت و از روزنه آن به نظاره خواص موضعی پیام‌ها پرداخت [۱۲].

امروزه ما می‌توانیم هر تابع با انرژی متناهی g را به عنوان پنجره انتخاب کنیم. فرض کنید $g\in L^2(\mathbb{R})$ به عنوان پنجره و $f\in L^2(\mathbb{R})$ به عنوان پیام داده شده باشند. آنگاه

$$f(x)=\frac{1}{||g||_2^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\hat{f}_u(z)g(x-u)e^{2\pi izx}\,dzdu$$

که در آن $f_u(y) = f(y)\ g(y-u)$. البته $g(y-u)e^{2\pi iyx}$ را می‌توان به عنوان میزانی از وجود موج ساده $\hat{f}_u(z)$ در پیام f در لحظه u تعبیر کرد.

**شکل ۶.** دنیس گابور(۱۹۰۰–۱۹۷۹م)

## ۶. مثال هار[2]

تبدیل‌های پیوسته فوریه گرچه ابزار مفیدی برای تقریب بودند ولی به علت ناگسستگی، نظم آشکوبه‌ای سری‌های فوریه، فلک‌برفلک‌های منجمان و یا دستگاه‌های دودوئی و دهدهی و شصت‌شصتی اعداد را نداشتند. همان طور که در سری‌های فوریه ملاحظه می‌کنیم، تقریب یک تابع پیوسته متناوب، از تابع ثابت $c_0\cos(0x)$ شروع می‌شود که $c_0$ میانگین تابع مورد نظر است. سپس عمل تقریب، با سینوس‌ها و کسینوس‌های 2x و 3x و 4x و غیره جلو می‌رود و در هیچ مرحله‌ای، تقریبات و اطلاعات حاصل از مراحل قبل، از بین نمی‌رود.

اولین کار بعد از فوریه در مورد تقریب توابع، توسط هار (۱۸۸۵ تا ۱۹۳۳م.) انجام گرفت که از آشکوبه‌ای دودوئی نیز برخوردار بود. هار که رساله دکتری‌اش را زیر نظر هیلبرت[3] (۱۸۶۲ تا ۱۹۴۳م.) می‌گذراند توابعی ساخت که برای فضای هیلبرت $L^2(\mathbb{R})$ تشکیل یک پایه متعامد یکه می‌دادند[۱۳]. این توابع مثل کسرهای دودوئی مصری ساختار منظمی داشتند. در نظر داشته باشید که هر عدد حقیقی (مثبت) x را بر حسب کسرهای دودوئی به صورت

$$x=\lfloor x\rfloor+\frac{x_1}{2^1}+\frac{x_2}{2^2}+\frac{x_3}{2^3}+\cdots$$

1. Dennis Gabor
2. Alfréd Haar
3. David Hilbert

می‌نویسند که در آن $\lfloor x \rfloor$ نمودار جزء صحیح است و $x^1$ و $x^2$ و $x^3$ و ... یکی از دو رقم ۰ یا ۱ هستند. در مثال هار، نخست فضای $L^2(\mathbb{R})$ را به صورت زیر تجزیه می‌کنند تا نوعی موضعی شدن برقرار گردد:

$$L^2(\mathbb{R}) = \cdots \oplus L^2([-1,0]) \oplus L^2([0,1]) \oplus L^2([1,2]) \oplus L^2([2,3]) \oplus \ldots.$$

حالا کافی است که هم و غم خود را روی $L^2([0,1])$ متمرکز کنیم زیرا هر پایه متعامد یکه‌ای که برای این زیرفضا به دست آید انتقال‌های صحیحش (به چپ و راست) یک پایه متعامد یکه برای کل فضا خواهد شد. نویسنده اول دسترسی به رساله هار نداشت ولی چون هدفش با او فرق می‌کند با دیدگاه دیگری تابع‌های پایه‌ای او را می‌سازد. تابع $f \epsilon L^2([0,1])$ را به دلخواه در نظر بگیرید. اگر عدد می‌بود، جزء صحیحش را به عنوان اولین تقریب در نظر می‌گرفتیم. ولی حالا که تابع است، نظم دودوئی را روی دامنه‌اش پیاده می‌کنیم و تقریبمان را از یک تابع ثابت شروع می‌کنیم. چون در فضای هیلبرت هم هستیم و تقریبات با تصویر کردن به دست می‌آیند پس آن را در بردار یکه $\chi_{[0,1]}$ ضرب داخلی می‌کنیم تا عدد $c_0$ (میانگین تابع در بازه یکه) به دست آید.

پس اولین تقریب برای f به صورت $c_0\chi_{[0,1]}$ به دست می‌آید. تابع باقیمانده یعنی f- $c_0\chi_{[0,1]}$ گاهی بالای محور ایکس‌ها و گاهی زیر آن است. پس فاصله [0,1] را به دو قسمت مساوی تقسیم می‌کنیم و تفاضل دو تابع مشخصه آن‌ها را عضو دوم پایه می‌گیریم که خوشبختانه نرم آن ۱ می‌باشد و بر بردار (تابع) $\chi_{[0,1]}$ عمود است. بدین ترتیب $x_{[0,2^{-1}]}-x_{[0,2^{-1}]}$ به عنوان دومین عضو پایه به دست می‌آید و تابع دلخواه f هم به صورت زیر با آن دو تابع تقریب زده می‌شود:

$$f \approx c_0\chi_{[0,1]} + c_1(\chi_{[0,2^{-1}]} - \chi_{[0,2^{-1}]}).$$

ثابت $c_1$ بسته به علامت جبری خود نمایشگر میزان افت یا خیز تابع از چپ به راست است. حال با استقرا می‌توان هر نصفه بازه را نصف کرد و نصف کردن را ادامه داد و در هر مرحله، تفاضل تابع‌های مشخصه دو بازه حاصل را عضو جدید پایه گرفت. هر عضو جدید بر همه عضوهای هم‌نسل و عضوهای نسل‌های قبلی عمود است، اما نرم آن ممکن است ۱ نباشد که آنهم با ضرب تابع در یک عدد ثابت مناسب، جبران می‌شود. بنابراین، پایه متعامد یکه مطلوب برای $L^2(\mathbb{R})$ به صورت $\cup_{j\geq 0}\mathcal{B}_j$ در آمد که در آن

$$\mathcal{B}_0 = \{v_0(x+k): k \in \mathbb{Z}\};\ v_0 = \chi_{[0,1]};$$

$$\mathcal{B}_j = \{v_j(x + k2^{j-1}): k \in \mathbb{Z}\};$$

$$v_j = \sqrt{2}^{(j-1)}\left(\chi_{[0.2^{-j}]} - \chi_{\left[2^{-j}{}_{9}2^{-j+1}\right]}\right);\ j > 0.$$

در دهه ۱۹۳۰ تابع‌های هار توسط لِوی[1] (۱۸۸۶ تا ۱۹۷۱م.) در مطالعه حرکت براونی مورد استفاده قرار گرفت و نتیجه رضایت‌بخش‌تر از سری‌های فوریه بود [۱۴]. گابور و سایر فیزیک‌دانان، تابع‌های هار را که بعدها نام موجک‌های هار به خود گرفتند در پیش چشم داشتند ولی به دنبال پنجره‌هایی پیوسته و مشتق‌پذیر بودند. اما نظام آشکوبه دودوئی تابع‌های هار مزیتی است که در نظام آشکوبه‌ای سری‌های فوریه موجود نیست و مبحث آنالیز چندریزه‌سازی که در بخش‌های بعدی به آن خواهیم پرداخت تعمیمی از مثال هار بود.

## ۷. موجک‌ها

با این که پنجره‌های گابور، اطلاعات زیادی در مورد امواج مرکب به ما می‌دهند، کندی محاسبات و هزینه نگه‌داری اطلاعات، رضایت‌بخش نیست. از سال ۱۹۷۵، که مورلت[2] (۱۹۳۱ تا ۲۰۰۷م.) در حین بررسی میزان ذخیره نفت یک معدن، پنجره‌های ثابت گابور را کارآمد نمی‌دید، به ابتکار خود دریچه گابور را وابسته به زمان کوچک و بزرگ کرد و نتایج رضایت‌بخش‌تری به دست آورد. وی نتایج معدن‌شناسی خود را با همکاری سه نفر دیگر در سال ۱۹۸۲م. منتشر ساخت [۱۵] که در آن‌ها از پنجره‌های متغیر صحبت کرده بود. او در سال‌های ۱۹۸۴ و ۱۹۸۵م. نیز با همکاری گراسمن، تابع‌های جدید را با الهام از اصطلاحی که در کارگاه به کار برده بود با نام موجک معرفی و مطالعه کرد [۱۶]،[۱۷].

از این پس بود که سیل کارهای عملی و نظری روی موجک‌ها به راه افتاد و مخصوصا دوبشی[3] (۱۹۸۸م.) نیز موجک‌هائی برای رفع نیازهای خود در رشته صوت درست کرد که مستقل از پنجره‌های فوریه بودند [۱۱]. تابع موجک که در عمل از حاصل ضرب یک

1. Paul Levy
2. Jean Morlet
3. Ingrid Daubechies

پنجره غیر ثابت در یک تابع هارمونی اختراع شد، در نهایت به صورت یک تابع کلی‌تر $\psi$ به نام موجک مادر تعریف گردید که پنجره‌های متحرک از اتساع و انتقال آن حاصل شدند؛ یعنی

$$\psi_{s\tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{|s|}}\psi\left(\frac{x-\tau}{|s|}\right)$$

که در آن $\tau$ و s به ترتیب میزان‌های انتقال و اتساع پنجره را نمایش می‌دهند و ضریب پشت موجک هم برای یکه کردن آن است. معمولا انرژی موجک مادر را مساوی ۱ فرض می‌کنند و برای آن که پردازش برگشت‌پذیر باشد باید شرط موجکی خاصی هم که بعدا بیان می‌شود برقرار گردد. برای پردازش پیام f، آن را در موجک‌ها ضرب داخلی می‌کنیم؛ یعنی

$$\tilde{f}(s,\tau) = \langle f, \psi_{s\tau}\rangle.$$

(چون نماد $\tilde{f}$ مخصوص سری یا تبدیل فوریه وضع شده است و بسیار اتفاق می‌افتد که هم‌زمان به تبدیل موجکی و یکی از دو تبدیل (گسسته یا پیوسته) فوریه نیاز پیدا کنیم، لذا تبدیل موجکی را با نماد $\tilde{f}$ نمایش می‌دهیم.) برای بازسازی پیام اولیه از پیام پردازش یافته، فرمول برگشتی زیر را به کار می‌بریم:

$$f(x) = \frac{1}{K}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\tilde{f}(s,\tau)\,\psi_{s\tau}(x)\frac{ds d\tau}{s^2},$$

که در آن K و $\psi$ باید در شرط موجکی زیر صدق کنند:

$$K = \int_{-\infty}^{\infty}\frac{|\hat{\psi}(u)|^2}{|u|}du < \infty.$$

موجکی که هم اکنون تعریف شد، به علت شباهتش به تبدیل فوریه، موجک پیوسته نامیده می‌شود و نظیر گسسته آن هم وجود دارد که از نظام آشکوبی دودوئی برخوردار است و انتقال‌ها و اتساع‌های مربوطه‌اش شمارا هستند؛ یعنی

$$\psi_{mn}(x) = \sqrt{2}^{m}\psi\left(\frac{x-n}{2^m}\right).$$

در حالت گسسته نیز با کارهائی مشابه سری‌های فوریه، پردازش و بازسازی یک پیام انجام می‌گیرد. امروزه این گونه پردازش‌ها را چه پیوسته و چه گسسته، به طور عام در مبحث قاب‌ها بررسی می‌کنند. برای اطلاعات بیشتر در مورد موجک‌ها به [۲]، [۱۲] و مرجع‌های آن‌ها ارجاع می‌دهیم.

## ۸. آنالیز چندریزه‌سازی

هدف از آنالیز چندریزه‌سازی، یافتن زنجیره‌ای از زیر فضاهای بسته $\{V_j : j\ Z\}$ در $L^2(\mathbb{R})$ است به طوری که شرایط (نه لزوماً مستقل) زیر برقرار باشد:

*i.* $V_j \subset V_{j+1}; j \in \mathbb{Z}$;
*ii.* $f(x) \in V_j \Rightarrow f\left(x + k2^{1-j}\right) \in V_j; k \in \mathbb{Z};\ j \in \mathbb{Z}$;
*iii.* $f(x) \in V_j \Leftrightarrow f(2x) \in V_{j+1};\ j \in \mathbb{Z}$;
*iv.* $\overline{\cup_{j\geq 0} V_j} = L^2(\mathbb{R})$,
*v.* $\cap_{j\geq 0} V_j = \{0\}$;

vi یک تابع $\varphi \in V_0$ و عددهای مثبت A و B وجود دارند به طوری که برای هر $f(x) \in V_0$:

$$f(x) = \sum_{k\in\mathbb{Z}} c_k \varphi(x+k);$$
$$A||f||^2 \leq \sum_{k\in\mathbb{Z}}|c_k|^2 \leq B||f||^2.$$

هرچه من تلاش کردم که استقلال یا عدم استقلال شرط پنجم را از پنج شرط دیگر به دست آورم، توفیقی به دست نیامد؛ ضمن این که مشتاق دریافت هر گونه اطلاعی در این مورد هستم این سوال را هم دارم که اصولا چه فایده‌ای بر این شرط مترتب است و اگر آن را حذف کنیم چه لطمه‌ای به نظریه وارد می‌آید. تابع $\varphi$ را موجک پدر نام گذارده‌اند؛ اگر تابع $\tau \in V_0$ تصویرعمودی تابع $\varphi(2x) \in V_1$ باشد، آنگاه تابع

$$\psi = \varphi(2x) - \tau$$

با نام موجک مادر دارای این خاصیت است که انتقال‌های صحیحش فضای هیلبرت

$$V_0^{\perp} \cap V_1$$

را تولید می‌کنند و اتساع‌های مولد مزبور هم مولدی برای کل فضا هستند.

به راحتی می‌توان نشان داد که بر اساس پایه هار می‌توان یک آنالیز چندریزه‌سازی تولید کرد. برای این منظور $V_j$ را زیر فضای تولید شده توسط $\cup_{0\leq k\leq j} B_k$ تعریف می‌کنند و $V_{-1}$ را همه توابع $f(\frac{x}{2})$ می‌گیرند که f در $V_0$ باشد؛ این کار را با استقراء روی عددهای صحیح منفی ادامه می‌دهند و هر $V_j$ را از $V_{j+1}$ به دست می‌آورند. پس از آن که نظریه موجک‌ها رونق گرفت، دوبشی [۲] در ۱۹۸۸م. موجکی پیوسته با دامنه تعریف فشرده مثال زد که انتقال‌ها و اتساع‌هایش طبیعت تابع‌های هار را داشتند و این مثال بود که مالات[1] [۱۸] و [۱۹] را به فکر ابداع آنالیز چندریزه‌سازی انداخت و مقالات سال ۱۹۸۹م. را انتشار داد.

1. Mallat

## ۹. سخن پایانی

مسلما مثال‌های بیشتری از ساختارهای آشکوبه‌ای در تقریبات می‌توان پیدا کرد ولی آوردن همه آن‌ها از حوصله یک مقاله عمومی خارج است؛ اما یادآور می‌شویم که گرچه در تعریف انتگرال لبگ، نظام آشکوبی دودوئی به کار گرفته می‌شود ولی در روال این مقاله نمی‌گنجد: آنچه در تقریب انتگرال لبگ در هر مرحله به دست می‌آید، عددی حقیقی (یا مختلط) است که هیچ اطلاعی از مراحل قبلی را در خود نگه نداشته است. (بجز در مورد تابع نامنفی، که نتیجه هر مرحله، بزرگتر یا مساوی نتیجه مرحله قبلی است.)

## منابع


۱. رجبعلی پور، م.، کسرهای مصری. فرهنگ و اندیشه ریاضی. انجمن ریاضی ایران. سال ۲۸، شماره ۱، بهار ۱۳۸۸. صص ۳۸-۱.

2. Resnikoff, H.L. and Wells, Jr., R.O. Wavelet Analysis, *The Scalable Structure of Information*, Springer, New York, 1998

3. Daubechies, I., Orthonormal basis of compactly supported wavelets. Commun. *Pure Appl. Math.*,41(1988), 906-909.

4. Casazza, P.G., The art of frame theory, *Taiwanese Jour. of Math*, 4(2)(2000), 129-201.

5. Mallat, S.G., A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 11(7)(1989), 674-693.

6. Saliba, G., Al-Qushji's reform of the Ptolemaic Model for Mercury, *Arabic Sciences and Philosophy*, 3(1993) 161-203

7. Saliba, G., Flying Goats and Other Obsessions - A Response to Toby Huff›s Reply. Bulletin of the Royal Institute for Inter-Faith Studies, 4(2)(2002).

8. O'Connor, J.J., and Robertson, E.F., "Brook Taylor," MacTutor History of Mathematics, University of St. Andrews. http://www-history.mcs.st-and.ac.uk

9. O'Connor, J.J., and Robertson, E.F., "Colin Maclaurin," MacTutor History of Mathematics, University of St. Andrews. http://www-history.mcs.st-and.ac.uk

10. Fourier, J., (1822) *The analytical theory of heat*. (trans: Freeman A). Cambridge University Press, London, 1878.

11. Bhatia, R., Fourier Series, The Mathematical Association of America (Incorporated), 2005.

12. Gabor, D. Theory of communication. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*–Part III: Radio and Communication Engineering, 93(26)(1946), 429-457.

13. Haar, A., Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme, *Mathematische Annalen* 69(3)(1910), 331-371. doi:10.1007/BF01456326.

14. O'Connor, J.J., and Robertson, E.F., "Paul Pierre Levy," MacTutor History of Mathematics, University of St. Andrews. http://www-history.mcs.st-and.ac.uk

15. Morlet, J., Arens, G., Fourgeau, E. and Giard, D., Wave propagation and sampling theory. *Geophys.*, 47(1982), 203-236.

16. Grossmann, A. and Morlet, J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J. Math.*, 15(1984), 723-736.

17. Grossmann, A. and Morlet, J. Decomposition of functions into wavelets of constant shape and related transforms. In Streit, L. (ed), *Mathematics and physics, lectures on recent results*, World Scientific, River Edge, NJ, 1985.

18. Mallat, S.G., Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2$ (R). *Trans. Amer. Math. Soc.*, 315(1989) , 69-87.

19. Mallat, S.G., A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Trans. on Patt. Anal. Mach. Intell.*, 11(7)(1989) , 674-693.

۲۰. قلندری، ح. ماهیت فیزیکی افلاک: بررسی مفهوم فلک در آثار هیئت. *مجله تاریخ علم*. شماره ۱۰. سال ۱۳۹۰. صص ۱۰۸-۶۷.

۲۱. گمینی، امیر محمد. تعارضی میان فلسفه و نجوم در تمدن اسلامی. همایش بین المللی فلسفه اسلامی و چالش‌های جهان امروز. ۱۹ تا ۲۲ مهرماه ۱۳۸۸، تهران، ایران.

# شرح نگاه پس نگرانه ژن‌ها[1] توسط ریچارد داوکینز

**دکتر محمود کرمی**
**استاد دانشگاه تهران**
**mkarami@ut.ac.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

کوکوها بدون تردید یکی از شگفتی‌های جهان‌اند، زیرا انگل آشیانه (زادگان) گونه‌های دیگر پرندگان‌اند که آنها را با فریب دادن وادار به بزرگ کردن تخم‌های خود می‌کنند. تخم‌های آنها از نظر رنگ و طرح شبیه تخم‌های آشیانهٔ خاصی است که ماده این گونه در آن تخم خود را می‌گذارد. بلافاصله پس از بیرون آمدن از تخم، جوجه تخم بقیه تخم‌های میزبان را یکی پس از دیگری از آشیانه بیرون انداخته و آنها را نابود می‌کند. این راهبرد تولید مثلی پرسش‌های بسیاری را مطرح می‌کند که زیست شناسان تکاملی کوشیده‌اند به آنها پاسخ گویند. مثلاً، چگونه کوکوهای ماده توانسته‌اند شکل، رنگ و تزئینات تخم‌های انواع تخم‌های میزبان را تقلید کنند؛ چرا پرنده میزبان تخم بیگانه را رد نمی‌کند؟ آیا جوجه کوکو می‌داند چه می‌کند؟ چرا پرنده میزبان جوجه انگلی را که جثه‌اش چند برابر اوست تشخیص نمی‌دهد و به او غذا می‌رساند؟ همچنین، پیدایش چنین رفتار فریبکارانه، وحشیانه و غیر اخلاقی در طبیعت که نمادی از هماهنگی و نظم تلقی می‌شود، چگونه توصیف می‌شود؟ این نوشتار پاسخ به این پرسش‌ها از دیدگاه تکاملی مطرح می‌کند.

**کلیدواژگان:** انگل زادگان، تقلید تخم، زیست شناسی تکاملی، مسابقه تسلیحاتی، نقش‌بندی ژنگان

ریچارد داوکینز در دو کتاب معروف خود به نام‌های «*ژن خود خواه*» و «*فنوتیپ گسترش یافته*» تکامل موجودات زنده را از دیدگاه ژن مطرح کرده است. وی، همچنین در فصول ۸ و ۹ کتاب «*ژنتیک مردگان*» پس از تکرار خلاصه‌ای از آنچه در دو کتاب قبلی خود مورد گفتگو قرار داده بود، در فصل ۱۰ به شرح درک خود دربارهٔ آنچه یک ژن در نگاه پس نگر (یعنی گذشته تاریخی تبار خود) می‌بیند، پرداخته است. در این نوشتار قصد دارم مطالب این فصل را به همراه اطلاعاتی که از منابع دیگر به دست آورده‌ام، ارائه کنم. نمونه بسیار جالبی که داوکینز به شرح آن می‌پردازد، پرندهٔ «کوکو» (فاخته) است. ایرانیان این پرنده را با شعر معروف خیام می‌شناسند:

آن قصر که بر چرخ همی زد پهلو / بر درگه او شهان نهادندی رو
دیدیم که بر کنگره‌اش فاخته‌ای/ بنشسته همی گفت که کوکو،کوکو؟

زیست‌شناسان داروین‌گرا، ازجمله داوکینز، بدون تردید کوکو را یکی از شگفت‌آورترین عجایب جهان می‌دانند. این پرنده شاید به چشم پرندگان کوچک میزبان عنصری هولناک باشد، اما زیست‌شناسی و چگونگی زندگی او برای علاقمندان به طبیعت و به ویژه تکامل رفتار آموزنده است.

بسیاری می‌دانند که کوکوها انگل آشیانهٔ پرندگان دیگرند که با فریب گونه‌های دیگر، آنها را به بزرگ کردن جوجهٔ خود وا می‌دارند. در زبان انگلیسی «کوکو در آشیانه» ضرب المثل معروفی است.[2] یکی از داستان‌هایی که در عنوان آن کوکو به صورت یک موتیف (موضوع تکراری) آمده است، رمان تخیلی علمیِ جان ویندهام[3]، *کوکوهای میدِ ویچ*[4]، است. این رمان دربارهٔ بیگانگانی از سیارات دیگر است که بچه‌های خود را بدون اینکه زنان بدانند در رحم آنها می‌کارند. موارد دیگری مانند پرورش جوجه‌های کوکو در آشیانه میزبان بیگانه، زنبورها، زنبورکوکوها، مورچه کوکوها نیز وجود دارند که به شیوه شش پایی خودشان، از غریزه پرورش دادن افراد گونه‌های دیگر حشرات سوءاستفاده می‌کنند. ماهی–کوکو، نوعی گربه ماهی دریاچه تانگانیکا[5] در آفریقاست که تخم‌های خود را به میان تخم‌های ماهیان دیگر رها می‌کند. ماهیان میزبان در این مورد اعضای متعلق به تیره سیکلید (Cichlid) هستند که برای حفاظت از تخم‌ها، آنها را در دهان خود پرورش می‌دهند. تخم‌های ماهی–کوکو و بعد بچه ماهی‌ها به گرمی به درون دهان‌های ماهیان میزبان پذیرفته شده و آنها مثل فرزندان خود از این انگل‌ها مراقبت می‌کنند.

1. The Backward Gene's -Eye View

۱. شاید برای "Cuckoo in the nest" بتوان «مهمان ناخوانده» را به کاربرد. در زبان فارسی ضرب المثل‌های دیگر در باره کوکو یا فاخته وجود دارند:
به فاخته گفتند بیضه‌ات کوچک است، گفت: چشم‌هایم درآمد تا همین را گذاشتم (بختیاری)؛ نتوان فاخته را طوق ز گردن برداشت؛ آدم بیکار مرحم به فلان کوکو می‌گذارد؛ آنچه از فاخته‌ها ماند، همین کوکو ماند (ابراهیمی ۱۳۹۹).

3. John Windham

4. The Midwich Cuckoos= دراین زمینه سریالی بنام «فاخته‌های میدویچ» تهیه شده است

5. Lake Tanganyika

گونه‌های متعددی از پرندگان به طور مستقل شیوهٔ به کار گرفته شده توسط کوکو را تکامل بخشیده‌اند که به طور نمونه از آن میان می‌توان پرندگان گاوی دنیای نو و کوکو–سهره‌های آفریقا را نام برد. در تیره کوکو (کوکوئیان)، از ۱۴۹ گونه ۵۹ گونه انگل آشیانهٔ گونه‌های دیگر می‌شوند؛ شیوه‌ای که سه بار به طور مستقل در افریقا تکامل یافته است. در این نوشتار، به غیر از موارد ذکر شده برای کوتاه کردن سخن، نام «کوکو» برای *Cuculus canorous*، معروف به کوکوی معمولی، به کار برده شده است.

این پرنده در ایران تابستان‌ها فراوان است و به صورت مهاجر عبوری نیز دیده می‌شود (منصوری ۱۳۸۷).[۱] با تاسف باید گفت که این پرنده چندان، حداقل در انگلستان، فراوان نیست. اما، هنوز در اسکاتلند غربی می‌توان بانگ آنرا در سرتاسر روز شنید. یکی از معتبرترین منابع جهان دربارهٔ این پرنده اثر پروفسور نیک دیویس[۲] استاد دانشگاه کمبریج است. کتاب او به نام «*چکوکو*» او ملغمهٔ دلچسبی از تاریخ طبیعی و خاطرات پژوهش‌های میدانی در فیکن فن[۳]، نزدیک کمبریج است. دیوید اتنبورو[۴] او را یکی از بزرگ‌ترین طبیعت شناسان انگلستان می‌داند.

بی‌رحمی (یا به تعبیر شاعران ایرانی بی‌وفائی) کوکو با سر در آوردن جوجه از تخم آغاز می‌شود. جوجه یک فرورفتگی کوچک در زیر گردن دارد که به نظر می‌رسد چیز شرارت باری به نظر نیاید مگر اینکه از استفاده از آن خبردار شوید. جوجهٔ کوکو در آشیانه همهٔ توجه اولیایی را که او را به فرزندی پذیرفته‌اند، طلب می‌کند. اگر دریابد که آشیانه را با تخم‌ها یا جوجه‌های گونهٔ میزبان خود شریک است، جوجه کوکو یکی یکی آنها را درحفرهٔ پشت بدن خود به خوبی قرار می‌دهد و سپس، با جنباندن بدن خود به پشت لبه آشیانه، تخم یا جوجه رقیب را به بیرون از آشیانه پرت می‌کند. البته، دربارهٔ اینکه جوجه کوکو بداند چه می‌کند یا به چه علت آن را انجام می‌دهد و اینکه آیا احساس گناه یا پشیمانی (یا خشنودی ازموفقیت) کند، بی‌خبریم. جریان عادی رفتار مثل کار کردن ساعت ادامه می‌یابد. انتخاب طبیعی در نسل‌های نیاکانی ژن‌هایی را ترجیح داده‌اند که سامانهٔ عصبی را چنان شکل می‌دهد که عمل غریزی کشتن فرزندان اولیایی را که او را به فرزندی پذیرفته‌اند، انجام دهد. آنچه می‌توانیم بگوئیم این است.

همچنین، دلیلی در دست نیست که اولیایی که فریب کوکو را خورده‌اند، بدانند چه می‌کنند. پرندگان آدم‌های کوچک پوشیده از پر نیستند که بتوانند جهان را با لنزی از شناخت هوشمند ببینند. همین قدر روشن است که پرندگان را حداقل سامانه‌ای خودکار با ضمیر ناخوداگاه بدانیم. این به ما کمک می‌کند جهات دیگر رفتار شگفت‌انگیز پدر و مادری که تخم و جوجهٔ کوکو را به فرزندی پذیرفته‌اند، درک کنیم. یکی از پیشگامان فیلمبرداری از نحوهٔ زندگی شرارت بار کوکو ادگار چنس[۵] است که در اوائل قرن نوزدهم می‌زیست و پرنده‌شناسی بسیار مشتاق و علاقمند نیز به شمار می‌رفت. بنا بر گزارش نیک دیویس، فیلم چنس نشان می‌داده است که یک پی پت صحرایی[۶] (*Anthus pratensis*) مادر به شکلی کاملاً بی‌تفاوت نظاره‌گر کشته شدن جوجه ارزشمندش توسط جوجه کوکو در آشیانهٔ اشغال شدهٔ خود بوده است. مادر، سپس برای یافتن غذا می‌رود، گویی هیچ واقعه غیرمنتظره‌ای رخ نداده است. مادر به هنگام بازگشت بی‌حاصل شروع به تغذیه جوجه درحال مردن خود می‌کند که بیرون از آشیانه به زمین افتاده بود. از دیدگاه شناخت انسانی، رفتار مادر هیچ معنایی ندارد: نه مشاهده کشتن فرزند در ابتدا و نه تغذیه بی‌ثمر جوجهٔ بدبخت در حال مرگ. ما بارها با این موضوع در این نوشته روبرو خواهیم شد.

نام «کوکو» از نغمهٔ سادهٔ متشکل از دو نت پرندهٔ نر مشتق شده است. نغمه ساده‌ای که برخی از پرنده شناسان به جای «نغمه» آن را «صدا» خوانده‌اند یا درادبیات فارسی به «ناله» تعبیر شده است. صدای کوکو فرودی از گام سوم مینور توصیف شده است؛ اما بتهوون آن را گام ماژور سوم می‌داند. کوکوی معروف سمفونی پاستورال او از D به F پایین (بمل) تنزل می‌یابد. هرچه باشد، مینور یا ماژور، صدا یا نغمه‌ای ساده است. شاید هم باید چنین باشد، زیرا جنسِ نر این پرنده شانس یاد گرفتن آن را از راه تقلید کردن، نمی‌یابد. کوکو هرگز مادر یا پدر زیستی خود را نمی‌بیند. فقط اولیایی را که او را به فرزندی پذیرفته‌اند، می‌شناسد که می‌توانند از گونه‌های مختلف باشند که هر کدام نغمه خاص خود را دارند و کوکو هم نباید نغمه آنها را یاد بگیرد. بدین ترتیب، نغمه کوکوی نر باید به طور ژنتیکی تعبیه شده و بنا بر نتیجه گیری با عقل سلیم– احتمالاً و نه قطعاً – ساده هم باید باشد.

حال به شرح داستان فوق العادهٔ کوکو که داوکینز آن را برای شرح «نگاه به گذشته در زمان» به کاربرده است، می‌پردازیم. تخم‌های کوکو دارای رنگ و طرح تخم‌های پرندهٔ میزبان در آشیانه‌ای هستند که انگل آن می‌شود. با وجود آنکه گونه‌های بسیار متفاوتی با انواع تخم‌ها، تخم این پرنده انگل را می‌پذیرند، تخم کوکو تقلید بسیار خوبی از تخم‌های میزبان است. درتصویر ۱ دسته‌ای متشکل

۱. از اینکه کوکو در ایران تولیدمثل می‌کند یا نه بی‌خبریم. اما می‌دانیم کوکوی ماده متعلق به یک تبار یا جنز (متن را ببینید) درطی یک فصل زادآوری، با خوردن یا نابود کردن یکی از تخم‌های پرنده میزبان، آنرا به سرعت (ظرف ۱۰ تا ۲۰ ثانیه) با یک تخم خود جایگزین می‌کند. تخم‌های بعد درآشیانه‌های متفاوت گذارده می‌شود. طبیعتا جوجه‌ها پس از بیرون آمدن از تخم نر یا ماده خواهند بود. بدین ترتیب هر کوکوی ماده می‌تواند ۱۰ تا ۲۵ آشیانه گونه میزبان خود را آلوده کند.

2. Nick Davies (2015)
3. Wicken Fen
4. David Attenborough
5. Edgar Chance
6. Meadow pipit

از شش تخم سهرهٔ دمگاه سفید به همراه یک تخم کوکو دیده می‌شود. تنها تفاوتی که می‌توان تشخیص داد، بزرگ‌تر بودن اندک تخم کوکوست.

**شکل ۱.** شش تخم سهره دمگاه سفید به همراه یک تخم کوکو که قدری بزرگ‌تر است.

حال به تصویر۲ که آشیانه انگل زدهٔ تخم‌های پی پت صحرایی را نشان می‌دهد، نگاه کنید.

**شکل۲.** آشیانهٔ انگل زده پی پت صحرائی.

بار دیگر اندازهٔ تخم کوکو آشکار است. اما، آنچه قابل توجه است رنگ تیرهٔ تخم کوکو درتصویر ۲ با لکه‌های سیاه است؛ در حالی که تخم کوکو در تصویر ۱ به رنگ روشن با لکه‌های زنگ زده شبیه تخم‌های سهرهٔ دُمگاه سفید بود. تخم‌های پی پت صحرایی به طور چشمگیری متفاوت از تخم‌های سهره دُمگاه سفیداند. با وجود این، تخم‌های کوکو به تطابق نسبتاً کاملی از نظر رنگ در هر دو آشیانه دست می‌یابند.

همان طور که انواع جانوران مختلف با نقش و نگارهای متفاوت خود را در محیط استتار می‌کنند (مثل پروانه‌ها، افعی‌ها،...) چنانچه کوکوهایی که انگل آشیانهٔ سهره‌هایی دُمگاه سفید می‌شدند گونهٔ متفاوتی از کوکوی انگل پی پت‌های صحرایی بودند، قضیه چندان چشمگیر نمی‌شد. ولی چنین نیست. آنها متعلق به یک گونه هستند. کوکوهای نر بدون اینکه تمایزی قائل شوند با ماده‌هایی که توسط گونهٔ متفاوت میزبان بزرگ شده‌اند، آمیزش می‌کنند؛ در نتیجه کل ژن‌های گونه در طی نسل‌ها آمیخته می‌شود. چنین آمیخته شدنی است که آنها را عضو یک گونه می‌سازد. ماده‌های مختلف همه اعضای یک گونه‌اند و با نرهای یکسانی دمساز شده، انگل دم سرخ‌ها، سینه سرخ‌ها، صعوه‌های جنگلی، الیکایی‌ها، سسک‌های نیزار، سسک‌های بزرگ، دم جنبانک‌های ابلق، و دیگران می‌شوند. اما، هر ماده‌ای تنها انگل یک گونهٔ از میان گونه‌های میزبان می‌شود. و حقیقت چشمگیر آن است که (به غیر از چند استثناء مشهود) تخم‌های هر کوکوی ماده به درستی تخم‌های میزبان ویژه‌ای را که در آشیانه‌اش تخم می‌گذارد، تقلید می‌کنند. بزرگ‌تر بودن جزئی تخم کوکو نسبت به تخم‌های میزبان که آنها را تقلید می‌کند، تنها نشانه از یک خیانت پیشگی مستمر است. با وجود این، برای پرنده‌ای به بزرگی کوکو اندازه تخمش کوچک‌تر از اندازه‌ای است که «باید» باشد. احتمالاً، اگر اعمال فشار (انتخاب طبیعی) برای تقلید ظاهر تخم میزبان، کوکو را به کوچک‌تر کردن اندازه تخم وادار کند، جوجه‌ها باید تاوان آن را از راه‌های دیگر بپردازند. اندازه واقعی تخم کوکو در واقع مصالحه‌ای از فشار برای کوچک شدن تخم برای تقلید تخم‌های میزبان و فشار در جهت مخالف برای اندازه بزرگ‌تر بهینه جثه خود کوکوست.

دربارهٔ فواید تقلید تخم میزبان توسط کوکو نباید تردید داشت. زیرا، اولیای میزبان به سادگی تخم متفاوت را شناسائی کرده و اغلب آن را از آشیانه به بیرون پرتاب می‌کنند. پس، تخم کوکو تنها زمانی در آشیانهٔ میزبان پذیرفته می‌شود که آنقدر شبیه دیگر تخم‌ها باشد که وصله ناجور نشده، به چشم نیاید.

تخم کوکو درآشیانهٔ سهره دُمگاه سفید را ببینید (تصویر۳) و تصور کنید که به آشیانهٔ پی پت صحرایی منتقل شود یا برعکس. پرندگان میزبان بلافاصله آن را بیرون پرت می‌کنند. یا اگر این کار دشوار باشد، اصلا آشیانه را ترک خواهند کرد. با توجه به اینکه چشم پرندگان به طور کامل جزئیات نقش و نگار شب‌پره‌های تقلید کننده طرح گلسنگ‌ها و گربینه‌ها (کاترپیلارها)ی تقلید کننده شاخه درخت را تشخیص می‌دهند، اینکار تعجب برانگیز نیست.

بنابراین، می‌توان انتظار داشت که اولیای میزبان، به طور خودکار یا شناختی، فشار انتخابی (تکاملی) سودمندی بر تخم‌های کوکو وارد می‌کنند تا تقلید زیبای تخم را به نمایش بگذارند. آنها تخم‌هایی را که شبیه تخم خود آنها نیست، از آشیانه بیرون می‌اندازند. اما نکته بسیار جالب آن است که گرچه همه کوکوها افراد یک گونهٔ درون آمیز هستند (که با یکدیگر آمیزش می‌کنند)، می‌توانند تخم

گونه‌های مختلف میزبان را تقلید کنند. برای درک کامل مطلب، مثال دیگری در این زمینه را در تصویر زیر مشاهده می‌کنید: آشیانه سسک نیزار که تخم تقلیدی کوکو با اندازهٔ کمی بزرگ‌تر در آن دیده می‌شود.

**شکل۳**- تخم کوکو در آشیانه سهرهٔ دمگاه سفید.

این نمونه‌های زیبا ما را به پرسش اساسی کل این بحث بازمی‌گرداند. چطور کوکوهای ماده که همه متعلق به یک گونه بوده و در نتیجه آمیزش تصادفی با نرها به وجود آمده‌اند، قادرند گستره‌ای از تخم‌های بسیار متفاوت گونه‌های مختلف میزبان را تقلید کنند؟ آیا کوکوهای ماده با نگاهی به تخم‌های موجود در آشیانه تصمیم می‌گیرند که ساز و کار متفاوت رنگ امیزی تخم در تخمراههٔ خود را به کار اندازند؟ چنین چیزی عملا ناممکن است. بسیاری از زنان مشتاق‌اند که به کمک اراده خود و به دلایل بسیار متفاوت دیگر، رفتار تخمراههٔ خود را کنترل کنند. یعنی، به کمک اراده، حتی با قوی‌ترین آن در دنیا، نمی‌توان چنین کاری را انجام داد.

چگونه می‌توان تنوع مشهود مهارتی کوکوی ماده را به درستی تبیین کرد؟ هیچ کس به درستی نمی‌داند، اما، به کمک شناخت ژنتیک خاص پرندگان می‌توان بهترین گمان را در این زمینه مطرح کرد. همان طور که می‌دانید، درمیان پستانداران، از جمله انسان، جنسیت فرد توسط سامانهٔ کروموزومی XX/XY تعیین می‌شود. هرخانمی در همهٔ یاخته‌های بدنی خود دو کروموزوم X دارد، در نتیجه در همه تخمک‌های او یک کروموزوم X وجود خواهد داشت. هر مردی در همهٔ یاخته‌های بدنی یک کروموزوم X و یک کروموزوم Y دارد. بنابراین، نیمی از نرزامه (اسپرم)های مرد کروموزوم Y خواهند داشت (که در صورت جفت شدن با تخمک دارای کروموزوم X فرزند پسر به وجود خواهد آورد) و نیمی دیگر کروموزوم X خواهند داشت (که در صورت جفت شدن با تخمکی که لزوماً دارای کروموزوم X است، فرزند دختر به بار خواهد آورد). اما همه نمی‌دانند که پرندگان نیز سامانهٔ مشابهی دارند که ظاهرا به طور مستقل شکل گرفته اما وضعیتی معکوس دارد. کروموزوم‌های جنسی در پرندگان به جای اینکه X و Y نامیده شوند، Z و W خوانده می‌شوند. گرچه این نام‌گذاری بدون اهمیت است، مهم آن است که در پرندگان ماده‌ها برخلاف پستانداران دارای کروموزوم‌های ZW و نرها دارای کروموزوم‌های ZZ هستند. با وجود این، هر دو گروه از اصل یکسانی پیروی می‌کنند. درحالی که در پستانداران کروموزوم Y از مسیر پدری به فرزند می‌رسد، در پرندگان کروموزوم W تنها از مسیر مادری گذر می‌کند. بدین ترتیب در طی شمار بی‌انتهایی از نسل‌های ماده می‌رسد. یعنی کروموزوم W از مادر، مادر بزرگ مادری، مادرمادر بزرگ و الی آخر به پرنده ماده می‌رسد.

حال عنوان این نوشتار را به خاطر آورید: «نگاه پس نگر ژن‌ها» که تماماً در بارهٔ چشم‌انداز گذشته ژن‌هاست. تصورکنید که ژنی در روی کروموزوم W یک کوکو هستید که به پیشینهٔ تاریخی خود نگاه می‌کنید. نه تنها امروز بلکه در گذشته نیز شما در پرندهٔ ماده قرارداشته‌اید و هرگز در پرندهٔ نر نبوده‌اید. درست برخلاف ژن‌هایی که روی کروموزوم‌های دیگر (کروموزوم‌های تنی) قرار دارند که درطی عصرهای متوالی به طور مساوی در پیکر افراد نر و ماده بوده‌اند. محیط‌های نیاکانی کروموزوم‌های W محدود به بدن‌های ماده بوده است. اگر ژن‌ها بتوانند بدن‌های حامل خود را به یاد آورند، حافظه‌های کروموزوم‌های W منحصراً متعلق به بدن‌های ماده –و نه نر– است. کروموزوم‌های Z حافظه‌هایی از بدن نرها و ماده‌ها خواهند داشت.

در عین حال، با به یاد داشتن آنچه گفته شد به گفتگو دربارهٔ حافظهٔ مغزی، یعنی تجربهٔ فردی، که آشناتر است می‌پردازیم. واقعیت آن است که کوکوهای ماده نوع آشیانه‌ای را که در آن به دنیا آمده‌اند به خاطر سپرده و آشیانهٔ همان گونهٔ میزبان را برای گذاردن تخم خود انتخاب می‌کنند. برخلاف کنترل ناممکن تخمراهه، به خاطر داشتن تجربه اوائل دوران زندگی دقیقاً همان چیزی است که توانائی انجام آن توسط مغز پرندگان امری شناخته شده است. می‌دانیم وقتی زمان انتخاب جفت برسد، بسیاری از گونه‌های پرندگان به نوعی به تصویر ذهنی از اولیای خود که پس از بیرون آمدن از تخم در حافظه ذخیره کرده‌اند، رجوع می‌کنند. یعنی پدیده «نقش‌بندی» (imprinting) که در آن جوجه غازهای بیرون آمده از تخم در انکوباتور که کنراد لورنس[1] را دیده بودند، بعداً مجذوب او شده و همه جا او را دنبال می‌کردند. همه این پدیده‌ها– به خاطر سپردن لورنس، پروبال اولیا، نغمه پدری، یا آشیانهٔ اولیائی که آنها را به فرزند خواندگی می‌پذیرند – یکسان هستند. گرچه عملکرد سازوکار نقش‌بندی مغز در اسارت (یعنی وقتی غازها در محوطه محصور از تخم‌ها بیرون آمده و انسان را ببینند) خطا می‌کند، در طبیعت کارآمد است.

1. Konrad Lorenz

تصور می‌کنم حدس بزنید که این استدلال به کجا می‌انجامد. آشیانه اولیایی که مادر، مادر بزرگ مادری، و مادر مادر بزرگ مادری و الی آخر در مقام فرزند خوانده در آن بزرگ شده‌اند، در مغز هر کوکوی ماده نقش می‌بندد. در نتیجه، وقتی پرنده بالغ شد و در صدد انتخاب آشیانه برآمد، رفتار نقش بسته در زمان کودکی او را به انتخاب آشیانه‌ای هدایت می‌کند که اعقاب مادری او آن را برگزیده بودند. بدین ترتیب او از یک سنت فرهنگی به ارث رسیده از تبار مادری[1]، پیروی می‌کند. ماده کوکوهای بزرگ شده در آشیانه‌های سینه سرخ، سسک نیزار، پی پت صحرائی، الی آخر از آن جمله بوده‌اند. هر تبار فرهنگی ماده‌ها جنز (gens) و جمع آن جنتز (gentes) خوانده می‌شود. هر کوکوی ماده ممکن است به جنز پی‌پت صحرائی، یا جنز سینه سرخ، یا جنز سسک نیزار، الی آخر تعلق داشته باشد. در حالی که نرها به هیچ جنز تعلق نداشته و از ماده‌های متعلق به همه جنتزها به دنیا آمده و پدر انواع جنتزها هستند.

بالاخره می‌توان این دو خط فکری را با توجه به عنوان این نوشتار به یکدیگر پیوند زد. به استثناء ژن‌های کروموزوم-W، همه ژن‌های بدن کوکوی ماده در نگاه به پشت سر زنجیری از نیاکان متعلق به هر جنز جاری را می‌بینند. به غیر از کروموزوم‌های-W، جنتزها از نظر ژنتیکی مثل نژادهای واقعی جدا از یکدیگر نیستند، زیرا نرها آنها را با هم ترکیب می‌کنند. فقط ژن‌های کروموزوم-W جنز ویژه هستند یعنی تنها کروموزوم‌های-W به نیاکان یک جنز ویژه، بدون توجه به جنزهای دیگر، نگاه می‌کنند. از دو نوع حافظه سخن گفتیم: حافظهٔ ژنتیکی و حافظه مغزی. حال باید دید وقتی ژن‌های کروموزوم-W مورد نظر هستند، چگونه این دو با یکدیگر عمل می‌کنند.

در زمینه کروموزوم-W و فقط این کروموزم، جنتزها نژادهای ژنتیکی جداگانه‌ای هستند. بدین ترتیب، حال خواننده سطور می‌تواند با دانستن اینکه ژن‌های تعیین کننده رنگ و لکه‌های تخم با کروموزوم-W انتقال می‌یابند، استدلال را کامل کرده ومعما را حل کند. یعنی به این پرسش پاسخ دهد که چگونه کوکوهای ماده متعلق به یک گونه می‌توانند تخم‌های انواع متنوعی از گونه‌های میزبان را تقلید کنند. پس، رنگ تخم‌ها را اراده فرد تعیین نمی‌کند کروموزوم‌های-W تعیین کننده آن هستند.

شاید گمان کرده باشید که قضیه به همین سادگی هم نباشد که غالبا در زیست شناسی چنین است. گرچه کوکوهای ماده در زمان تخم گذاری نوع آشیانه‌ای را که خود در آن به دنیا آمده‌اند بسیار ترجیح می‌دهند، گاهی اشتباه کرده و در آشیانهٔ «نادرستی» که متفاوت از آشیانه محل تولد خودشان تخم می‌گذارند. جنتزهای جدید احتمالاً به همین طریق آغاز می‌گردند و همهٔ جنتزها نمی‌توانند به خوبی تخم‌ها را تقلید کنند. مثلاً، تخم‌های صعوهٔ جنگلی (گنجشگ پرچین) رنگ زیبای آبی دارند. اما، تخم‌های کوکو در آشیانهٔ این میزبان آبی رنگ نیستند (عکس ۴ سمت چپ). حتی، می‌توان گفت رنگ متمایل به آبی هم ندارند. تخم کوکو در چنین آشیانه‌ای یک وصله ناجور خواهد بود. آیا این احتمال وجود دارد که کوکوها اساساً قادر به ساختن تخم‌های آبی رنگ نباشند؟ خیر، چنین نیست. همین گونهٔ کوکو (*Cuculus canorus*) در فنلاند توانسته است تخم‌های بسیار زیبای آبی رنگ دم سرخ معمولی (*Phoenicurus phoenicurus*) را تقلید کند (تصویر ۴ سمت راست). این کار چگونه انجام می‌شود؟ پاسخ ساده ولی بسیار شگفتی برانگیز است. صعوه‌های جنگلی از جمله گونه‌هائی هستند که تمایزی بین تخم‌ها قائل نبوده و تخم‌های کوکو را به بیرون از آشیانه پرتاب نمی‌کنند. آنچه به چشم ما کاملاً آشکار است، آنها نمی‌بینند. چطور چنین چیزی ممکن است در حالی که فشار تکاملی بینائی دقیق پرندگان کوچک نغمه خوان دیگر موجب شکل‌گیری جزئیات ظریف رنگ‌امیزی تخم جنتزهای ذی‌ربط کوکوهای انگل آنها می‌شود؟ یا اینکه نگاه تیزبین پرندگان می‌تواند جزئیات تقلید گربینه‌های چوبی caterpillars))، شب‌پره‌های تقلید کننده گلسنگ (lichen-mimicking moths) و موارد مشابه را تکامل بخشد؟

**شکل۴.** تخم کوکو درآشیانهٔ دم سرخ معمولی (راست) و در آشیانه صعوه جنگلی (سمت چپ)

۱. در واقع جنتز همانطور که در متن هم اشاره شده است از مادرها به ارث می‌رسند. کوکوهای ماده در زمینه یک گونه میزبان تخصص می‌یابند و تخم آنها چنان تکامل می‌یابد که تقلیدی از تخم‌های آن میزبان باشند. ویژگی‌های ظاهری چنین تخمی از طریق کوکوی مادر به ارث می‌رسد. اما، کوکوهای نر با ماده‌های متعلق به جنزهای مختلف آمیزش می‌کنند. نرها در تعیین ظاهر تخم، مشارکت نداشته و ژن‌های آنان در انتخاب میزبان بی‌اثرند. تقلید تخم میزبان از راه تبار مادری کنترل می‌شود. جنس جوجه (نر یا ماده بودن آن) مستقل از انتخاب آشیانهٔ میزبان است.

تاثیر منتقدان آثار هنری بر تکامل آنها را می‌توان برای روشن شدن موضوع به عنوان تمثیلی در این مورد به کار برد. نگاه تیزبین منتقد (پرندهٔ میزبان)، با آشکارکردن لایه‌های پنهان اثر (تخم کوکو) –از ترکیب بندی و رنگ تا معنا و بافت– آینه‌ای پیش روی هنرمند (کوکو) می‌گذارد. این نگاه نه برای داوریِ صرف، بلکه برای دقیق‌تر دیدن است؛ و همین دقت هنرمند را به بازاندیشی، پالایش و پرداخت ظریف‌تر اثر فرا می‌خواند. بدین سان، نقدِ ژرف اندیشانه به جای توقف، به تکامل ظرافت‌ها جان می‌بخشد (فرایند انتخاب طبیعی).

کوکوها و میزبانان آنها، شبیه گربینه‌های چوبی و طعمه خواران آنها، درگیر یک «مسابقه تسلیحاتی تکاملی» با یکدیگراند. همان طور که می‌دانید مسابقهٔ تسلیحاتی زیست شناختی در طی زمان تکاملی و به موازات آن مسابقهٔ تسلیحاتی بین کشورها در «زمان تکنولوژیک» و بسیار سریع‌تر صورت می‌گیرد. تعقیب و گریزهای هوائی هواپیماهای جنگی انگلیس و آلمان در جنگ دوم جهانی مثل اسپیت فایرها[1] و مسراشمیت‌ها[2] با تغیر جهت دادن‌ها و جا خالی کردن‌های سریع در زمان حقیقی و طی چند ثانیه به پایان می‌رسید. اما، پشت صحنه در کارخانه‌ها و دفاتر طراحی مهندسی مسابقه‌ای بسیار کندتری برای بهبود موتورها، پروانه‌ها، بال‌ها، دم‌ها، سلاح‌ها و غیره جریان داشت که غالباً در پاسخ به آنچه طرف مقابل آن را انجام می‌داد، صورت می‌گرفت. مسابقهٔ تسلیحاتی از این نوع در ابعاد زمانی که چند ماه یا چند سال طول می‌کشد، ادامه می‌یابد. اما، مسابقهٔ تکاملی بین کوکوها و میزبان‌های متفاوت آنها در طی هزاران سال تداوم داشته است که در آن پیشرفت‌های صورت گرفته در یک طرف، جناح مقابل را وادار به برطرف کردن نواقص و اعمال اصلاحات کرده است.

عمر مسابقه تسلیحاتی برخی جنتزها به نظر نیک دیویس[3] وهمکارش مایکل بروک[4]، هر دو از استادان دانشگاه کمبریج، طولانی‌تر از دیگران است. مسابقهٔ بین کوکو با پی پت صحرائی یا با سسک نیزار نمونه‌هایی در این زمینه است. به همین دلیل است که میزبان و انگل در هر دو مورد یکی بهتر از دیگری عمل کرده و در نتیجه تخم‌های کوکو تقلید بسیار خوبی از تخم‌های میزبان خود هستند. درصورتی که به نظر این پژوهشگران مسابقهٔ تسلیحاتی بین کوکو و صعوه‌های جنگلی به تازگی شروع شده است. یعنی، جنز صعوهٔ کوکوها زمان کافی لازم برای تکامل رنگ مناسب آبی را نداشته است.

اگر وارد شدن کوکوها به آشیانه‌های صعوهٔ جنگلی به تازگی اتفاق افتاده باشد، باید فرض کنیم که این کوکوهای «پیش آهنگ» از گونهٔ میزبان دیگری، احتمالاً با تخم‌های خاکستری با لکه‌ها زنگ زده، «کوچیده»اند. زیرا تخم جنزهای «تازه رسیده» کوکو در آشیانهٔ صعوه جنگلی دارای چنین رنگی است. تصور می‌رود هر جنز تازه‌ای چنین آغاز می‌شود. اما واژه‌های «پیشاهنگ شدن» و «کوچیدن» نباید موجب گمراهی شود. یعنی، عزم یا اشتیاقی برای ترک آشیانه یا برگزیدن زیستگاه تازه در کار نبوده است. چنین کاری بدون تردید اشتباه می‌بوده است. همان طور که گفته شد، کوکوها هر از گاهی به اشتباه در آشیانه‌ای که نباید تخم می‌گذارند؛ آشیانه‌ای که مناسب جنز دیگری است. در چنین وضعی تخم آنها بنا بر ضرب المثل «وصله ناجور» قابل تشخیص خواهد بود. ضرب‌المثل مناسب را خود می‌توانید انتخاب کنید. از این نکته آگاهیم که انتخاب طبیعی معمولاً چنین اشتباهات فاحشی را به سختی جریمه می‌کند. اما، اگر یک میزبان جدید که هنوز مورد «حملهٔ» کوکوها قرار نگرفته باشد، چه؟ طبیعتاً چنین میزبانی فاقد تجربه لازم در رویاروئی با کوکو خواهد بود. زیرا، پیش از این هیچ دلیلی برای بیرون انداختن تخم‌هایی را که با بقیه هم خوانی ندارند، نداشته است. باید دوباره این نکته را یادآور شد پرندگان آدم‌های کوچک پرداری نیستند که از توان قضاوت انسان برخوردار باشند. مسابقهٔ تسلیحاتی باید دوباره به درستی آغاز شود و گونه میزبان لزوماً تا زمانی که مسابقه در جریان است ساده لوح و بی‌تجربه باقی خواهد ماند. اما، این ناپختگی و جوانی تا کی ادامه خواهد داشت؟ همانگونه که نیک دیویس اشاره می‌کند، برای پاسخ به این پرسش شواهد چندانی در دست نداریم. اما چندان هم دستمان خالی نیست

درجستجوی سندی در این زمینه که انسان از چه زمانی به انگل بودن کوکو در آشیانه یک گونه شناخته شده پرنده میزبان واقف بوده است، می‌توان به کتاب‌های جانورشناسی قدیمی و آثار ادبی (فارسی و انگلیسی) رجوع کرد. بررسی ابیات شاعرانی چون عطار (۵۴۰ تا ۶۱۸ هجری)[5]، سعدی (۶۰۶ تا ۶۹۱ هجری)[6] و جامی (۸۱۷ تا ۸۹۸ هجری) گویای آن است که این بزرگان علاوه بر برداشت عرفانی از نغمه‌ها به بی‌مهری کوکو (فاقد محبت مادری بودن، ناله او در دوری از فرزند و «ربی نکردن جوجه» یعنی بزرگ نکردن فرزند) آگاه بوده‌اند. حتی شاید بتوان گفت این بزرگان نسبت به کوکو و زندگی انگلی او شناخت داشته‌اند. برخی بر این باورند که آنها بیانگر آنچه که در فرهنگ عمومی جامعه وجود داشته است بوده‌اند. اما، تلقی عکس از موضوع نیز ممکن است. یعنی، این نوابغ

1. Spitfires
2. Messerschmitts
3. Nick Davies
4. Michael Brooke

۵. عطارنیشابوری (۱۲۲۱–۱۱۴۵ میلادی ) طوقی را که این پرنده برگردن دارد، طوق وفا دانسته او را پرنده‌ای بی‌مهر می‌داند:
مرحبا ای کوکو بگشای لحن تا گهر بر تو فشاند هفت صحن/ چون بود طوق وفا در گردنت زشت باشد بی‌وفایی کردنت ...
۶. سعدی شیرازی (۱۲۹۲–۱۲۱۰ میلادی) درحکایتی (در *گلستان*) صدای کوکو را نشانهٔ نالیدن از دوری و بی‌مهری می‌داند:
«کوکو بر شاخ نالد از فراق گرچه بی‌مهر است، می‌سوزد به داغ» یا «با همه جلوه طاووس و خرامیدن کبک / عیب آن است که بی‌مهرتر از کوکوای.»

بشری با مشاهده دقیق، شناخت و بصیرتی که داشته‌اند توانسته‌اند با بیان منظوم و منثور خود فرهنگ زمان خود را شکل داده باشند.

اما به نظر بعید می‌رسد که در نوشتارهای قدیمی، گونه‌های میزبان کوکوها همان‌هائی باشند که امروز می‌شناسیم. به بیان داوکینز این یک دشواری پرنده شناختی است. چنانکه گاه در زبان فارسی برای «کوکو» از نام فاخته استفاده شده است. مثلاً، داوکینز در زمینه انگل آشیانه شدن کوکو با گذاردن تخم در آشیانه یک گونه مشخص دیگر، نمونه‌ای را از کتاب جفری چاسر به نام «*انجمن پرندگان*» (۱۳۸۲ میلادی) مورد اشاره قرار می‌دهد: «تو قاتل هی سوگ هستی که روی شاخه تو را به دنیا آورد.» نام دیگر صعوه جنگلی «گنجشگ پرچین» یا «هی سوگ (هی سوگه، هی سوکه، ایسوگه)[1] درانگلیسی میانه» بوده است. یعنی، کوکوها در قرن چهاردهم میلادی آفت صعوه‌های جنگلی بوده‌اند که چاسر مورد اشاره قرار داده است. اگر چنین باشد، آیا ۶۵۰ سال که از آن زمان می‌گذرد برای کامل شدن مسابقه تسلیحاتی کافی بوده است؟ شاید با توجه به آنچه دیویس به آن اشاره می‌کند خیر؛ زیرا کوکو فقط ۲ درصد آشیانه‌های صعوه جنگلی را آلوده می‌کند. بدین ترتیب فشار انتخاب آنچنان ضعیف است که مسابقه تسلیحاتی ۶۰۰ ساله واقعاً چندان عمری ندارد و جوان تلقی می‌گردد.

نکته دوم از نظر زیست شناسی جالب‌تر است. اگر با دقت بیشتری درباره موضوع بیاندیشیم، آیا دلیلی هست که برای هر گونهٔ میزبان فقط یک جنز کوکو تصور کنیم؟ شاید جنز کوکوهای صعوه جنگلی چاسر از میان رفته و جنز تازه‌ای از کوکوهای صعوه جنگلی مسابقه تسلیحاتی خود را تازه آغاز کرده باشند. شاید امروز جنتزهای دیگر کوکوهای صعوه وجود دارند که از توانایی کامل تقلید تخم برخوردارند و هنوز پرنده شناسان آنها را نمی‌شناسند. اگر چنین باشد، تبادل ژن بین آنها وجود نخواهد داشت؛ زیرا نرها بدون کروموزوم W هستند.

خانم کلیر اسپاتیسوود[2] و همکارانش مشغول مطالعات موازی دربارهٔ گونهٔ از سهره آفریقای جنوبی هستند که عادت کوکو به طور همگرا در آن تکامل یافته است. سهرهٔ کوکو، *Anomalopspiza imberbis*، تخم‌های خود را در آشیانه‌های سسک واس (گندم‌زار) می‌گذارد. جنتزهای مختلف این سهره تخم‌های گونه‌های متفاوت سسک را تقلید می‌کنند. شواهد ژنتیکی در دست است که نشان می‌دهد آنچه جنتزها را از یکدیگر متمایز می‌کند در واقع کروموزوم W آنهاست؛ که مجدداً تایید کننده همان فرایندی است که در کوکوها می‌گذرد. همان طور که دکتر اسپاتیسوود اشاره می‌کند، این به آن معنی نیست که همه جزئیات تعیین کننده رنگ تخم روی کروموزوم W قرار دارد. در کوکو و سهره‌های کوکو ژن‌های سازندهٔ همه رنگ‌های متفاوت تخم به احتمال زیاد روی کروموزوم‌های غیرجنسی (اتوسوم‌ها)[3] در طی نسل‌ها تعبیه شده و توسط همه جنتزها حمل و نرها و همچنین ماده‌ها آنها را انتقال می‌دهند. کروموزم W فقط باید دارای ژن‌های به راه اندازنده (یا روشن کننده) باشد که وظیفه روشن یا خاموش کردن فعالیت مجموعه ژن‌هایی هستند که توسط اتوسوم‌ها منتقل می‌گردند. و ژن‌های مرتبط واقع در روی کروموزوم‌های اتوسوم توسط نرها و نیز ماده‌ها حمل خواهد شد.

خود جنس هم در واقع به همین منوال تعیین می‌گردد. اگر انسان کروموسوم Y داشته باشد، آلت تناسلی نر خواهد داشت. اگر کروموزوم Y نداشته باشد، به جایش کلیتوریس خواهد داشت. اما، دلیلی نیست که فقط کروموزوم Y تعیین کننده اندازه و شکل آلت تناسلی نر باشد. اصلاً چنین نیست. بسیار محتمل است که ژن‌های تعیین کننده ویژگی‌های اندام تاسلی نر بر روی بسیاری از کروموزوم‌های غیرجنسی (اتوسوم) قرار داشته باشند. تردیدی نیست که انسان ژن‌های اندازه آلت تناسلی را از مادر و نیز پدر به ارث می‌برد. بود یا نبود کروموزوم Y تنها تعیین کننده این است که کدام مجموعه ژن‌های واقع بر روی کروموزوم‌های غیرجنسی به راه انداخته خواهند شد. کافی است چنین تصور کنید که در بیشتر موارد کل کروموزوم Y یک ژن است که مجموعه‌ای از ژن‌های دیگر واقع در مکان‌های دیگر ژنگان را به راه می‌اندازد. شاید ارائهٔ یک توضیح واژگانی در اینجا بی‌مناسبت نباشد: مجموعه ژن‌های کروموزوم‌های غیرجنسی با عنوان «محدود به جنس» (sex-limited) نامیده می‌شوند که متمایز از ژن‌های «پیوسته به جنس» (sex-linked) است. ژن‌های پیوسته به جنس آنهایی هستند که درواقع توسط کروموزوم‌های جنسی حمل می‌شوند.

شاید بهترین گمان برای حل معمای تقلید تخم‌های میزبان توسط کوکو آن باشد که مجموعه‌ای از ژن‌های واقع بر شمار بسیاری از کروموزوم‌ها رنگ و لکه‌های روی تخم را تعیین می‌کنند. وضعیتی مثل «محدود به جنس» که می‌توان آن را «محدود به جنز» خواند. آنها با حضور یا فقدان یک یا چند ژن بر روی کروموزوم W، ژن‌هایی که به تشبیه می‌توانیم آنها را «وابسته به جنز» بخوانیم، به راه انداخته شده یا خاموش می‌گردند. همهٔ اتوسوم‌های کوکو ممکن است مجموعه‌ای از ژن‌های تقلید کننده گنجینه‌ای از تخم‌های میزبان را داشته باشند. کروموزوم‌های W دارای ژن‌های سویچ هستند که معلوم می‌کنند کدام مجموعه ژن‌ها به راه انداخته شوند. و کروموزوم‌های W هستند که مختص هر جنز ماده‌ها هستند. کروموزوم‌های W که به تاریخچه پشت سر خود نگاه کرده و تنها یک گونه را می‌بینند که تخم‌های آنها را بزرگ می‌کند.

---

۱. واژه «Hesugge» نام انگلیسی قدیمی برای پرنده کوچکی است که امروز «Dunnock» با نام علمی *Prunella modularis* نامیده می‌شود.

2.Claire Spottiswoode

3.autosomes

چنین تفسیری از تقلید تخم‌های میزبان توسط کوکو مقدمه‌ای بود برای موضوع نگاه پس نگر ژن‌ها یا نگاه از روی شانه آنها به نیاکان. نمونه مشابه اما پیچیده‌تری مربوط به ماهی‌ها و کروموزوم Y را نیز می‌توان مورد گفتگو قرار داد.

ماهی‌ها تنوع پیچیده‌ای از سامانه‌های تعیین جنسیت را نشان می‌دهند. برخی اصلاً از کروموزوم‌های جنسی استفاده نکرده، براساس سرنخ‌های بیرونی (محیطی) جنسیت را تعیین می‌کنند. برخی از ماهی‌ها شبیه پرندگان هستند و در آنها ماده‌ها XY و نرها XX هستند. دیگران، شبیه پستانداران‌اند: نرها XY و ماده‌ها XXاند. ماهی‌های کوچک سرده Poecilia، شامل مولی‌ها و گاپی‌ها، از آن میان به شمار می‌روند. گونهٔ چند ریختی فوق‌العاده‌ای دارد که تنها بر نرها اثر گذار است. چند ریختی (پلی مورفیسم) یعنی افرادی با رنگ آمیزی متفاوت بدن (در این مورد ۵ الگوی رنگی)، که به طور ژنتیکی تعیین شده و با نسبت ثابت در طی زمان در جمعیت زندگی می‌کنند. در جویبارهای آمریکای جنوبی می‌توان هر ۵ الگو را در حال شنا کنار یکدیگر مشاهده کرد. ماده‌ها فقط یک ریخت (مورف) دارند: همه شبیه یکدیگراند.

چون چند ریختی فقط بر یک جنس موثر است، می‌توانیم آنها را مشابه کوکوها ۵ جنتز بخوانیم با این تفاوت که در این ماهی‌ها تنها نرها هستند که با جنزها از یکدیگر تفکیک می‌گردند. تصویر ۵ پنج ریخت نرها را نشان می‌دهد و شکل ماهی ماده در پایین صفحه دیده می‌شود. سه ریخت از میان نرها دارای دو نوار طولانی شبیه ریل تراموا (مترو) هستند. بین خطوط ریل رنگی است و می‌توان آنها را برحسب رنگ به ترتیب به نام سرخ‌ها، زردها و آبی‌ها خواند. ماهی‌های دارای دو خط موازی را به جهات مختلف می‌توان در یک دسته گنجاند. نوع چهارم دارای خطوط عمودی است. این نوع به طور رسمی "parae" نامیده می‌شود؛ اما این نامی گیج کننده است زیرا برای کل گونه به کار می‌رود. بهتر است آنها «ببرها» نامیده شوند. نوع پنجم، «immaculata» خاکستری ساده بوده شبیه ماده‌ها ولی اندکی کوچکتر است و آنها «خاکستری‌ها» می‌نامیم.

ببرها از همه بزرگترند. دارای رفتار تهاجمی‌اند، نرهای رقیب را دنبال کرده، به زور با ماده‌ها آمیزش می‌کنند. خاکستری‌ها از همه کوچک‌ترند و تنها می‌توانند هر از گاهی دزدکی از فرصت استفاده کرده، با ماده‌ها آمیزش کنند. اگر موفق شوند، شاید از آنجا ناشی شود که نرهای مهاجم آنها را با ماده‌هایی اشتباه گرفته‌اند که واقعا شبیه آنها هستند. خاکستری‌ها با داشتن بزرگترین بیضه‌ها بیشترین نر زامه را تولید می‌کنند تا بتوانند آنها را در فرصت‌های اندکی که به دست می‌آورند مصرف کنند. اشکالی که بین خطوط موازی رنگ‌های سرخ، زرد، و آبی دارند، اندازه متوسط دارند. اینها به جای آمیزش با زور یا دزدکی با ماده‌ها، با رفتاری مودبانه با ماده‌ها عشق ورزی کرده و پهلوهای رنگی خود را به آنها نشان می‌دهند.

در اینجا آنچه وضعیتی مشابه کوکوهاست، اتفاق می‌افتد. شواهد موجود گویای آن است که به ارث رسیدن انواع رنگ کاملاً در مسیر نرها به وقوع می‌پیوندد. درهمهٔ موارد مطالعه شده، پسرها همان رنگ پدر و به همین ترتیب رنگ پدربزرگ پدری، جد پدری و الی آخر را داشته‌اند. مادر، مادربزرگ، جد مادری، ... گرچه متعلق به یک جنز رنگی یا دیگری هستند، تاثیر ژنتیکی در قضیه ندارند. چنین وضعیتی این فرضیه را مطرح می‌کند تفاوت رنگ‌های پنج‌گانه نر بر پایهٔ کروزوم‌های Y اتفاق می‌افتد.

پژوهشگران درحال انجام مطالعات فوق العاده درباره انتخاب جفت در این ماهیان هستند و به زودی به چگونگی حفظ و تداوم چند ریختی در آنها پی خواهند برد. به نظر می‌رسد هر یک از پنج نوع نر دارای یک بسامد تعادلی مطابق با تعریفی باشند که برای چند ریختی حقیقی ارائه می‌شود. اگر بسامد هر یک کمتر از تعادل [جنسیتی] شود ترجیح داده شده، بنابراین در جمعیت بیشتر می‌شود. اگر بسامد آن بسیار زیاد شود، جریمه شده و کاهش می‌یابد. چنین وضعیتی که «انتخاب وابسته به بسامد»[1] نامیده می‌شود راه شناخته شده‌ای برای نگهداری چند ریختی در یک جمعیت است. کارکرد آن در عمل چگونه است؟ گرچه جزئیات قضیه هنوز به درستی معلوم نیست، ولی احتمالا چنین فرایندی اتفاق می‌افتد: خاکستری‌های فرصت طلب از اینکه با ماده‌ها اشتباه شوند، سود می‌برند. اگر تعداد آنها زیاد شود، دست‌شان برای ماده‌ها و ببرهای مهاجم رو خواهد شد. خود ببرها چه؟ اگر آنها فراوان شوند، به جای اینکه زمان را صرف آمیزش کنند، بیهوده آن را برای جنگیدن با یکدیگر تلف می‌کنند. چنین وضعی ممکن است فرصت بیشتری برای آمیزش دزدکی خاکستری‌ها فراهم کند. شواهدی در دست است که ماده‌ها از میان سه ریخت نر دارای خطوط موازی که با آقا منشی و نشان دادن کناره‌های رنگی بدن خود از آنها خواستگاری می‌کنند، انواع کمیاب‌تر را ترجیح می‌دهند. این توصیف گرچه با اندیشه «بسامد تعادلی» سازگار است، معلوم نیست چرا ماده‌ها باید چنین ترجیحی داشته باشند. پژوهش‌های بیشتر لازم در حال انجام است. این اندیشه متعلق به دکتر بن ساندکام[2] است که قبلاً در دانشگاه بریتیش کلمبیا و هم اکنون در دانشگاه کورنل مشغول به کار است.

1. frequency- dependent selection
2. Ben Sandkam

**شکل ۵.** «جنتز» در ماهی نر؟

حال، دوباره فن نگاه پس نگر را که در این نوشتار مشغول گفتگو دربارهٔ آن بودیم، به کار بریم. هر نر *Poecilia parae* می‌تواند تبار طولانی نیاکان نر خود را، که همه آنها متعلق به همان جنز او بوده و همان کروموزوم Y را داشته‌اند، ببیند. این همان چیزی است که علی رغم مشترک بودن نیاکان آنها در تبار مادری، امکان فعال شدن مجموعهٔ ژن‌های تعیین کننده طرح رنگ و رفتار مربوط درجنزهای جداگانهٔ نرها را فراهم می‌کند. نگاه پس نگرانه ژن‌ها، مثل کوکوها، توانائی واقعی خود را نشان می‌دهد. ژن‌های اتوسوم‌ها که تعیین کننده ویژگی‌های غیر از رنگ خاص جنز هستند، نیاکان همه جنزها را می‌بینند.

رجوع به ترفند «نگاه به عقب» کوکوها به ما کمک می‌کند معمای دشوارتر دیگری را حل کنیم. با وجود آنکه بیشتر گونه‌های میزبان می‌توانند به خوبی تخم‌های کوکو را از تخم‌های خودشان تمیز دهند (اگر چنین نبود انتخاب طبیعی چگونه می‌توانست تقلید تخم‌های میزبان را کامل کند؟)، بعداً در تشخیص اینکه جوجهٔ بیرون آمده از تخم رو به رشد کوکو حقه‌ای بیش نیست، به طور تاسف باری شکست می‌خورند. زیرا، جوجه کوکو در بسیاری از اوقات بطور قابل توجهی از خود آنها بزرگ‌تر است. مثلاً، می‌توان فکر کرد که سسک بالغ بسیار کوچک میزبان کاملاً در خطر بلعیده شدن توسط جوجهٔ غول آسای کوکو باشد. اولیائی که جوجه‌های کوکو را به فرزندی می‌پذیرند، از هر گونه‌ای که باشند، در برابر جوجهٔ کوکو آنچنان از نظر اندازه کوچک جثه‌اند که باید به طور پیوسته با فعالیت خستگی‌ناپذیر خود در طی ساعات روز به جوجه انگل غذا برسانند. چگونه جوجه کوکوها می‌توانند با موفقیت از پس چنین فریب آشکار و اغراق‌آمیز برآیند؟ در این زمینه دوباره باید مراقب انسان‌گرائی اندیشه خود باشیم. مطابقت نداشتن رفتار پرنده با یک دیدگاه شناختی انسان‌مانند را نباید مورد سوال دانست. در عوض باید پرسش را بر فشارهای انتخاب (طبیعی) بر ژن‌هایی که تکوین رفتار خودکار را کنترل می‌کنند، متمرکز کرد.

با این حال، داوکینز اذعان می‌کند که توصیف مقدماتی ارائه شده برای معمائی که در تصویر صفحه قبل نشان داده شده است، در مقایسه با آنچه در کتاب‌های دیگرش ارائه می‌کند، به ویژه در مقایسه با شرحی که دربارهٔ تقلید تخم ارائه شد، چندان قانع کننده نیست. اما، می‌توان بهترین توصیف –یا مجموعه‌ای از پاره توصیف‌ها– موجود در این زمینه را بیان کرد. بی‌مناسبت نیست که به موضوع مسابقهٔ تسلیحاتی بازگردیم.

**شکل ۶.** سسک میزبان درحال غذا دادن به کوکو.

جان کربس و ریچارد داوکینز در مقالهٔ مشترک خود در سال ۱۹۷۹ راه‌های رسیدن به «پیروزی» توسط یک طرف در مسابقهٔ تسلیحاتی را مورد بررسی قرار دادند (توجه به نقل قول‌ها که در گیومه‌ها آمده است بسیار مهم است). در آن مقاله دو اصل «سفرهٔ زندگی» (life dinner)[۱] و «دشمن کمیاب» (rare enemy)[۲] شناسائی شد. این دو بی‌ارتباط با یکدیگر نبوده، شاید هم بیانگر جنبه‌های مختلف یک اندیشه باشند.

در یکی از داستان‌های ایزوپ[۳] آمده است که سگی شکاری به دنبال خرگوشی افتاد. خرگوش با تمام توان می‌دوید و جان خود را در خطر می‌دید، اما سگ هر چند قوی‌تر بود، گاه می‌ایستاد و گاه سست می‌دوید. سرانجام خرگوش گریخت. رهگذری که این صحنه را دید به طعنه به سگ گفت: «چگونه شد که تو با آن توان، ازخرگوشی ناتوان‌تر بازماندی؟» سگ پاسخ داد: او برای حفظ جان می‌دوید، و من تنها برای به دست آوردن یک وعده غذا.»

در این حکایت، خرگوش با دشمنی روبروست که فقط یک بار با آن مواجه می‌شود: یعنی «مرگ». در مقابل، سگ شکاری با دشمنی آشنا و همیشگی، یعنی «گرسنگی» روبروست. چون این خطر همیشگی است، سگ نه اضطرار دارد و نه لازم است نیروی خود را به طور کامل بسیج کند.

مثل مسابقهٔ تسلیحاتی، طعمه خواران (صیادان) و طعمه‌ها (صیدها) باید بین بهبود طراحی و منابعی که به آن اختصاص می‌دهند از یک سو و هزینه‌های اقتصادی موازنه ایجاد کنند. هرچه بیشتر بر اجزاء ماشین سرعت و استقامت – عضلات، شش‌ها و قلب– سرمایه گذاری کنند، جنبه‌های حیاتی دیگر مثل تولید تخم‌ها یا شیر، تامین ذخائر چربی برای زمستان، غیره با کمبود بیشتر روبرو خواهد شد. با تعبیر داروین گرایانه، فشار انتخاب طبیعی از نظر سرمایه‌گذاری بیشتر بر مسابقهٔ تسلیحاتی توسط خرگوش‌های آسوپ بیشتر از سگ‌های شکاری بوده است. هزینه شکست نیز برای این دو نیز متقارن نیست– برای یکی از دست دادن جان و برای دیگری دست نیافتن به غذاست. طعمه خوار ناموفق زنده می‌ماند تا صید دیگری را به چنگ آورد. طعمه یا صید شکست خورده از آخرین صیاد خود می‌گریزد. حال ببینیم چگونه می‌توان همین موضوع را به طور عبرت آمیزتری با زبان کتاب *ژنتیک مردگان* بیان کرد. ژن‌های طعمه خوار می‌توانند نیاکانی را ببینند که طعمه‌های بسیاری توانستند از آنها بگریزند. اما، حتی یکی از اجداد طعمه در گریز از صیاد شکست نخورده بود؛ حداقل تا زمانی که ژن‌های خود را به فرزندی انتقال داد. بسیاری از ژن‌های طعمه خوار می‌توانند اجدادی را ببینند که نتوانستند در صید موفق شوند. حتی یک ژن طعمه هم نمی‌تواند درنگاه به عقب جدی را ببیند که مسابقه را به طعمه خوار باخته بود.

همین اصل «سفرهٔ زندگی» را به جوجه کوکو و میزبانش تعمیم دهیم. جوجه کوکو می‌تواند سلسله‌ای از اجداد خود را ببیند که حتی یکی از میزبان‌هایش نتوانست هوشمندانه دست او را بخواند. اگر خوانده بود، نمی‌توانست جد یا نیایی باشد. ژن‌های کوکویی که نتوانند میزبان را بفریبند، هرگز به نسل بعد انتقال نخواهند

۱. همه چیز را نمی‌توان با هم داشت؛ زندگی میدان انتخاب است نه سفره همه چیز.
۲. من از بیگانگان هرگز ننالم که با من هرچه کرد آن آشنا کرد؛ از دشمن آشکار بیم مدار، که آماده‌ای؛ از آن بترس که دیر آید و ناگهانی زند.
3. Aesop’s fables

یافت. اما ژن‌هایی که می‌توانند موجب شکست میزبان در شناسایی کوکو می‌شوند، چطور؟ بسیاری از میزبان‌هایی که فریب می‌خورند می‌توانند زنده مانده، دوباره تولید مثل کنند. گرایش ژنتیکی در میان میزبان‌ها برای گول خوردن می‌تواند به نسل‌های بعد منتقل شود. گرایش‌های ژنتیکی در میان کوکوها در ناتوانی فریب دادن میزبان‌ها هرگز منتقل نمی‌شود. این تحقق اصل «سفرهٔ زندگی» درعمل است.

علاوه بر این، میزبان می‌تواند در نگاه به عقب نیاکانی را ببیند که بسیاری از آنها هرگز کوکویی را در زندگی خود ندیده‌اند. نیک دیویس و مایکل بروکز در مطالعهٔ بلند مدت خود در ویکن فن (انگلستان) دریافتند که تنها ۵ تا ۱۰ درصد آشیانه‌های سسک نیزار معمولی توسط کوکوها انگل زده بودند. اثر «دشمن کمیاب» در اینجا مصداق می‌یابد. کوکوها پرندگانی نسبتاً نادر هستند. بیشتر پرندگان میزبان آنها مثل سسک نیزار، پی پت‌ها، صعوه‌ها و ... احتمالاً بدون روبرو شدن با کوکو زندگی کرده و با موفقیت تولیدمثل می‌کنند. در نگاه به عقب ممکن است نیاکان متعددی باشند که هرگز در زندگی با کوکوئی روبرو نشدند. اما، اجداد پی‌درپی هر کوکوئی توانسته‌اند میزبانی را با موفقیت فریب دهند تا آنها را بزرگ کنند. عدم تقارن فشار تکاملی (Asymmetric selection pressure) می‌تواند به «موفقیت» بیانجامد به طوری که جوجهٔ غول آسای از پس فریب دادن اولیای ناتنی بسیار کوچک خود برآید. فشار انتخاب برای فریب دادن هوشمندانهٔ کوکو توسط میزبان در مقایسه با فشار انتخاب برای چیره شدن کوکو بر میزبان، ضعیف است[۱].

تمثیل مشابه دیگر با حکایت ایزوپ «آبپزکردن قورباغهٔ» یا «قورباغه درآب جوش» است[۲]. اگر قورباغه‌ای به درون آب داغ رها شود، هر چه از دستش برآید خواهد کرد که تا به بیرون بپرد. اما، قورباغهٔ قرار داده شده در آب سردی که به تدریج در حال گرم شدن است، هنگامی متوجه قضیه خواهد شد که بسیار دیر است. به بیان دیگر نادیده گرفتن خطر تدریجی تا زمانی که کار از کار گذشته است. وقتی جوجه کوکو تازه از تخم بیرون می‌آید برای پرنده میزبان قابل تشخیص از جوجه واقعی نیست. در نتیجه بعید است با رشد تدریجی، روزی برسد که تقلبی بودن آن ناگهان برای میزبان آشکار شود. همان طور که هرگز نمی‌توان روزی را تعیین کرد که در آن نوزاد به بچه، بچه به نوجوان یا انسان میانسال به پیر تبدیل می‌شود. زیرا، هر روز شبیه روز پیش است. شاید این امر در فریب دادن میزبان تاثیر داشته باشد. توجه کنید که اثر آب پزکردن قورباغه برای تخم‌ها مناسب نیست. زیرا تخم کوکو ناگهان در آشیانه ظاهر می‌شود و مثل جوجه‌ای نیست که به تدریج خود را جای جوجهٔ میزبان جا بزند.

در مقالات دیگری که قبلاً به آنها اشاره شد، کربس و داوکینز این نظر را مطرح کردند که ارتباطات جانوری را می‌توان به طور کلی نوعی «*دستکاری*» تلقی کرد. مثلاً، در این باره می‌توان به نغمه‌خوانی بلبل اشاره کرد. بدون تردید نغمه بلبل اثر شگفت‌انگیزی حتی بر انسان داشته است. آثار شاعران بزرگی مثل سعدی (۱۲۹۲–۱۲۱۰م)، حافظ (۱۳۹۰–۱۳۱۵م) و جان کیتس (قصیده بلبل ۱۸۱۹)[۳] نمونه‌های گویایی در این زمینه‌اند.

می‌دانیم که نغمه خوانی بلبل نر موجب رشد غدد تناسلی بلبل ماده می‌گردد. به بیان دیگر بلبل نر با نغمه خوانی خود می‌کوشد بلبل ماده را «دستکاری» کرده یا او را به پذیرش خود قانع کند. البته، همیشه به نفع ماده نیست که به سادگی تسلیم یا قانع گردد و همواره بین فرستنده پیام (بلبل نر) و دریافت کننده آن (بلبل ماده) یک کشمکش یا مسابقه تسلیحاتی برقرار می‌شود. در این کشمکش، هر طرف می‌کوشد در پاسخ به طرف مقابل به وضعیت بهتری دست یابد (بلبل نر ماده را اقناع کند و ماده با ایستادگی در برابر او جفت مطلوب‌تری را جلب کند).

جوجه کوکو برای قانع کردن میزبان و چیره شدن بر ایستادگی او، چه ترفندهایی را می‌تواند به کار برد؟ این ترفندها باید چنان موثر باشند که بتوانند از پس تفاوت زیاد اندازهٔ جوجه میزبان و او برآیند

همهٔ جوجه‌های آشیانه–نشین اشتیاق خود به دریافت غذا را با بازکردن کامل دهان و صدا کردن نشان می‌دهند. هر چه جوجه سسک نیزار بلندتر بانگ بزند، احتمال اینکه اولیای خود را متقاعد به دریافت بیشتر غذا در مقایسه با همزادان خود کند، بیشتر است (برای رقابت بین همزادان، حتی آنان که ژن‌های مشترک دارند، می‌توان دلایل داروینی خوبی عرضه کرد). از سوی دیگر بانگ زدن با صدای بلند توسط جوجه یا پرندگان بالغ با مصرف زیاد انرژی حیاتی همراه است. پژوهشی درباره الیکایی‌های آکسفورد با احتیاط به این نتیجه رسید که یک نر تا سر حد مرگ نغمه‌خوانی می‌کرد. میزان نغمه‌خوانی و بلندی آوای جوجهٔ سسک نیزار معمولا در سطح بهینه‌ای تنظیم می‌شود؛ آنقدر که بتواند با همزادان رقابت کرده اما برای خواننده جانکاه نشده یا موجب جلب طعمه خواران نشود. جوجهٔ بزرگ کوکو به غذائی چهار برابر سسک نیزار جوان نیاز دارد. در نتیجه، با بانگ زدن به اندازه یک دستهٔ تخم، و نه

---

۱. هنگام نوشتن این سطور این پرسش مهم برایم مطرح شد که آیا انگل‌ها به طورکلی هوشمند ترازمیزبان های خودهستند؟ برای پاسخ به این سوال نخست باید هوشمندی را تعریف کرد. هوشمندی در برگیرنده یادگیری، حل مساله و قدرت تصمیم گیری با انعطاف است. انگل‌هائی مثل تک یاخگان و کرم‌ها یا اساسا فاقد دستگاه عصبی بوده یا دستگاهی ابتدائی دارند. موفقیت انگل‌ها از راه تکامل و سازگاری بسیار زیاد است و نه از راه تفکر و یادگیری. در نوشتار دیگری به پاسخ جامع‌تر این پرسش خواهم پرداخت.

۲. در سال ۱۳۹۵ مقاله‌ای با عنوان «سناریوی قورباغه آب پز برای تغییر اصالت ایرانی» در جوان آنلاین به چاپ رسیده است. شاید بتوان از «خواب خرگوشی» یا «آب از سر گذشتن» را در این زمینه بکار برد.

3. John Keats: Ode to a Nightingale

یک جوجهٔ سسک پر سرو صدا، از پرنده میزبان خود غذا می‌طلبد.

درمیان آزمایش‌های میدانی مبتکرانه‌ای که نیک دیویس انجام داد، او و همکارش ربکا کیلنریک جوجهٔ توکای سیاه را درآشیانه سسک نیزار قرار دادند. بزرگی توکای جوان به همان اندازهٔ جوجه کوکو بود. سسک نیزار به جوجه کوکو غذا می‌داد ولی با میزانی کمتر از آنچه معمولاً به نوزاد کوکو غذا می‌دهند. سپس، پژوهشگران شاهکار خود را بکار بستند: وقتی جوجه سسک طلب غذا می‌کرد به کمک بلندگوی کوچکی که در کنار آشیانه قرار داده شده بود، شروع به پخش صدای ضبط شده جوجهٔ کوکو می‌کردند. در چنین وضعی، سسک‌های بالغ میزان غذایی را که به جوجه توکا می‌خوراندند تا اندازهٔ مناسب برای جوجهٔ کوکو افزایش می‌دادند؛ مقداری که با غذای داده شده با یک دسته جوجهٔ سسک نیزار برابر بود. در واقع، پخش صدای چهار جوجه سسک همان تاثیر را داشت. به نظر می‌رسد صداهایی که جوجهٔ کوکو ایجاد می‌کند چنان تکامل یافته است که تاثیر یک ابر محرک را داشته باشد. آزمایش‌های انجام شده دربارهٔ رفتار پرندگان اثر چنین محرک‌هائی را تایید کرده است.

بنابر گزارش استاد بزرگ رفتارشناسی، نیکو تینبرگن[1]، اگر به صدف خورها انتخاب داده شود، ترجیح می‌دهند روی تخمی بنشینند (البته مصنوعی) که حجم آن هشت برابر تخم خودشان باشد. او چنین محرکی را «*محرک اَبَرنرمال*» خواند[2]. چنین وضعی در انتهای یک مسابقهٔ تسلیحاتی تکاملی که در آن افزایش تلاش «اقناع کنندگی» کوکو با افزایش «ایستادگی» از سوی اولیای میزبان روبرو باشد، قابل انتظار است.

معادل دیداری چنین محرک اَبَرنرمال شنیداری چیست؟ دهان گشودهٔ جوجه‌ها رنگ روشن زرد، نارنجی یا سرخ دارند. تردیدی نیست که چنین رنگ روشنی اولیا را تشویق به دادن غذا می‌کند؛ هرچه حفره دهان یکی از جوجه‌ها درخشان‌تر باشد والدین آنرا به دهان همزادانش ترجیح می‌دهند. حفره دهانی جوجه‌های سسک نیزار زرد رنگ است. دیویس و همکاران پی بردند که والدین سسک نیزار تلاش خود برای آوردن غذا را برحسب کل مساحت زرد رنگی که در آشیانه از آنها غذا طلب می‌کند، و نیز میزان فریادهای غذا طلبی، تنظیم می‌کنند. حفره دهانی جوجه‌های کوکو سرخ رنگ است. آیا این رنگ محرک قوی‌تری نسبت به رنگ زرد است؟ آزمایش رنگ کردن حفره دهان این فرضیه را تایید نکرد. آیا دهان کوکو بزرگ‌تر از حفره دهانی جوجهٔ سسک نیزار است؟ بله حفره دهانی گشوده جوجه‌های کوکو در مقایسه با جوجه‌های سسک نیزار، بزرگ‌تر است. اما، مساحت آن چهار برابر مساحت مربوط به هر جوجه سسک نیست؛ شاید نزدیک به دو برابر باشد. جوجه‌های کوکو با صدا کردن آن را جبران می‌کنند؛ یعنی صدای آنها در سن دو هفتگی به اندازه یک دسته جوجهٔ سسک نیزار است. ترکیب بزرگ‌تر بودن حفره دهانی جوجه کوکو از دهان یک جوجه سسک به همراه بانگ‌های ابرنرمال طلب غذا، کافی است که سسک‌های بالغ را ترغیب کند که به اندازه غذایی که بطور نرمال برای همهٔ جوجه‌های خود به آشیانه می‌آورند، به دهان جوجه کوکو غذا پمپ کنند. دوباره، مشاهده می‌کنیم که بانگ اَبَرنرمال غذا طلبی محصول نهایی مسابقهٔ تسلیحاتی فزاینده بین هنر اقناع و ایستادگی در برابر آن است.

**شکل ۷.** کاردینال درحال غذا دادن به ماهی سرخ.

پرندگان به حفره‌های دهانی بزرگ گشوده، حتی حفره دهان موجود دیگری مثل ماهی، حساسیت نشان می‌دهند. غذا دادن یک پرنده آمریکائی به نام کاردینال که مرتباً به دهان گشودهٔ ماهی قرمز غذا می‌دهد، تایید کننده این حساسیت است (تصویر ۷). وقتی با نگاه انسانی به موضوع بنگریم و دربارهٔ آن بیاندیشیم، به نظر عجیب آمده، خواهیم پرسید چگونه پرنده می‌تواند این قدر احمق باشد؟ اما، دیدن صدف خوری که بر روی تخم غول آسائی می‌نشیند، هشداری است که انسان نباید فقط به چشمان خود اعتماد کرده و با سرزنش به موضوع برخورد کند. پرندگان، انسان‌های کوچک نیستند که از نظر شناختی به کاری که انجام می‌دهند و چرایی آن واقف باشند. گذشته از همه اینها، مردها با یک تصویر دو بعدی کاریکاتوری غیر نرمال از ماده جنس خود، حتی با وجود آنکه به خوبی می‌دانند یک نقاشی دو بعدی روی کاغذ با ویژگی‌های اغراق شده و با مقیاسی بسیار کوچک‌تر از اندازه طبیعی است، از نظر جنسی تحریک می‌گردند.

جوجه کوکو هنگامی که تخم‌های پرندهٔ میزبان را به بیرون از آشیانه پرتاب می‌کند، نمی‌داند چه می‌کند. آن را برنامه‌ای تصور

1. Niko Tinbergen

۲. برای انسان نیز می‌توان ازچنین محرک‌هایی سخن گفت که از تغذیه تا تحریک جنسی بکار می‌روند.

کنید که به طور خودکار انجام می‌شود. صدف خور نمی‌داند چرا روی تخم غول آسائی نشسته است. بر همین اساس، پرنده مادر را روباتی تصور کنید که چنان برنامه ریزی شده که به دهان گشوده باز غذا دهد. صرف نظر از اینکه تا چه اندازه برایمان مسخره به نظر برسد که آن دهان گشوده متعلق به ماهی یا جوجه عظیمی باشد که تقلیدی از فرزند اوست.

اگر جوجه‌های کوکو حفره دهانی اَبَر هنجاری دارند که دو جوجه معمولی را شبیه سازی می‌کنند، کوکوی آسیایی، قرقی–کوکوی هورسفیلد (*Cuculus fugax*)[1]، جلوتر رفته و جلوه‌ای به اندازه یک دسته جوجه را به نمایش می‌گذارد (تصویر ۸). جوجه‌های این کوکو علاوه بر حفره دهانی زرد رنگ، یک زوج حفره دهانی قلابی به صورت لکهٔ پوست برهنه در روی هر بال با همان رنگ زرد حفره واقعی دهان دارند که می‌تواند هر یک از آنها را به نوبت در کنار حفره دهانی تکان دهد. پرنده میزبان (گونه‌ای سینه سرخ آبی رنگ در مطالعه انجام شده توسط دکتر کیتا تاناکا[2] در ژاپن) یکباره با اثر مضاعف حفره دهانی و لکه پوست تحریک می‌شود. دکتر تاناکا چندین عکس به همراه چند قطعهٔ ویدئو فوق‌العاده در این باره را برای پروفسور داوکینز فرستاده است. ویدئوها نشان می‌دهد که به محض اینکه پرنده میزبان از راه می‌رسد، جوجه کوکو به طور شگفت آوری بال راست خود را بلند کرده و آن را تکان می‌دهد. چنین وضعیتی بیننده را به یاد شمشیر زنی می‌اندازد که سپر خود را بلند می‌کند تا مانع حمله شود. اما، این تمثیل کاملاً نادرست است زیرا هدف دفاع نبوده بلکه جلب کردن است. حتی یک قطعه ویدیو نشان می‌دهد که سینه سرخ می‌خواهد به زور به لکه زرد واقع بر بال بلند شده غذا بدهد. اما برگشته و غذا را وارد حفره باز دهان جوجه کوکو می‌کند. سیاه کردن هوشمندانه لکه روی بال توسط پژوهشگران ژاپنی موجب کاهش میزان غذا رسانی توسط سینه سرخ‌ها به جوجه‌های انگل شد. همین داستان دربارهٔ انگل آشیان دیگری، قرقی–کوکوی سوت زن[3]، *Hierococcyx nisicolor*، در چین صدق می‌کند. مثل قرقی–کوکوی هورسفیلد، جوجه‌ها لکه‌های زرد رنگی روی بال دارند که به همان وضعی که در بالا توضیح داده شد، برای فریفتن اولیایی که آنها را به فرزندی پذیرفته‌اند، به کار می‌برند.

به اندازه کافی درباره کوکو سخن گفته شد، پرنده‌ای که باید به چشم پرنده میزبان خود «منفور» باشد. اما، واقعیت آن است که یکی از عجایب طبیعت و انتخاب طبیعی است.

**شکل ۸.** قرقی–کوکوی هورسفیلد با دهان گشوده کاذب روی بال

## منابع


۱. ابراهیمی، محسن. ۱۳۹۹. *دائرة المعارف بزرگ اسلامی*، جلد چاپی ۶.

۲. منصوری، جمشید.۱۳۸۷. *راهنمای پرندگان ایران*. انتشارات فرزانه. ۵۱۳ صفحه.

3. Dawkins, R. 2024. The backward Gene's-eye view. In "*The genetic book of the dead: A Darwinian reverie*". Yale Univ. Press.


1. Horsefield's Hawk cuckoo
2. Tanaka, et al. (2005)
3. Whistling hawk cuckoo (Li et al. 2010)

# دگرگونی نقش مطالعات تکوین (نمو جنینی) در زیست‌شناسی تکاملی

**عطا کالیراد**
**موسسه ماکس پلانک برای زیست شناسی در توبینگن، آلمان**
**ata.kalirad@tuebingen.mpg.de**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

نقش فرآیند تکوین در زیست‌شناسی تکاملی مدرن بسیار کم‌رنگ است و تقریباً تمامی مدل‌های تکاملی رایج، برای ساده‌سازی تکوین را از صورت‌بندی خود حذف می‌کنند. اما تاریخ زیست‌شناسی تکاملی و ژنتیک تا میانه قرن بیستم نقش پررنگ برای تکوین قائل بود و بسیاری فهم فرآیند تکوین را کلید درک وراثت می‌دانستند. در یادداشت زیر، به دگرگونی تاریخی که منجر به کم‌رنگی تکوین در زیست‌شناسی تکاملی شده می‌پردازم و به دگرگونی معنای واژگان به سبب این تغییر نگرش اشاره می‌کنم. به نظر می‌رسد که پژوهش‌های کنونی در باب میانکنش فرآیندهای تکوینی در تولید تنوع زیستی راه را بر درآمیختن زیست شناسی تکاملی و تکوین فرآهم کرده باشد.

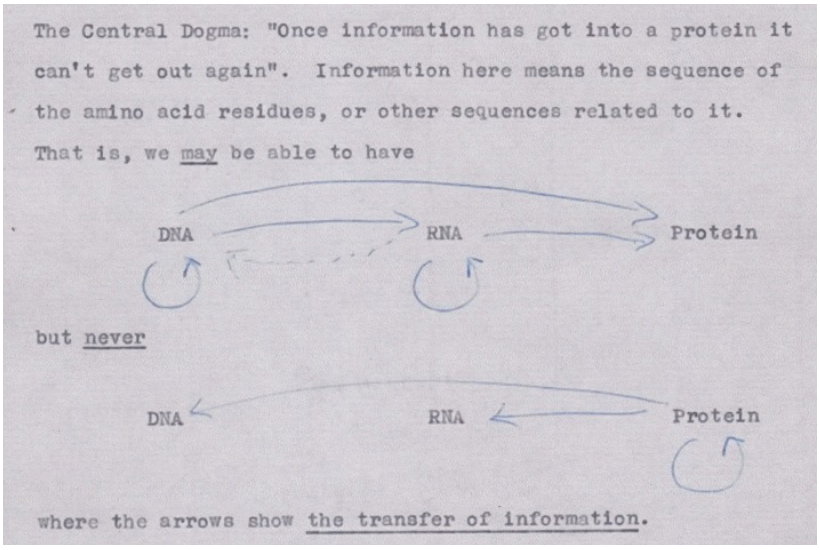
**کلیدواژگان:** زیست شناسی تکاملی، تکوین جنینی، اپیژنتیک، اصل مرکزی زیست شناسی مولکولی

پدیداری آنچه تلفیق نوین[1] خوانده می‌شود بدون صورت‌بندی میانی ریاضی تکامل ممکن نبود. اما آنچه چنین صورت‌بندی را میسر کرد، ساده‌سازی اساسی رابطه میان ماهیت وراثت و مجموعه ویژگی‌های ریختی و رفتاری موجود زنده، یعنی رخنمود[2]، بود. درک ژرفای این تغییر در نگرش به موجودات زنده برای زیست‌شناس امروزی بسیار دشوار خواهد بود، چراکه درک و دریافت زیست‌شناسان در نیمه دوم قرن نوزدهم از وراثت اساساً هیچ سنخیتی با آنچه در کتب درسی زیست‌شناسی، تکوین، ژنتیک، و تکامل آموزش داده می‌شود ندارد. کنکاش در باب آنچه زیست‌شناسان قرن نوزدهمی «حقیقتاً» در سر داشتند خود مشکلات اساسی دیگری را پیش خواهد آورد. سوای دشواری پژوهشی فهم راستین آنچه داروین و یا لامارک در باب وراثت می‌پنداشتند (اغلب به سبب محدود بودن منابع، و بویژه در خصوص داروین اظهارات گاهی متناقض در یادداشت‌های شخصی و آثار منتشرشده)، درک راستین دگرگونی اساسی، که شاید برخی آن را حتی نمونه‌ای از دگرگونی ابرانگاره (پارادایم) می‌پندارند، نیز برای زیست‌شناس عصر ما آسان نیست. در طی این دوران پر تب و تاب، اَبَرانگاره‌ای پیشین که یکسره فهم سرشت موجودات زنده را مبتنی بر درک ساز و کارهای تکوینی می‌دانست، جای خود را بر اَبَرانگاره‌ای مولکولی داد که تکوین را صرفاً یکی از بسیار ویژگی‌های موجودات زنده می‌انگارد و جستجوی چیستی حیات را به فهم چگونگی خوانش و بازتولید اطلاعات مورد نیاز برای ساخت موجود زنده – عبارات نگاشته شده به زبان نوکلئوتیدها در توالی دنای موجودات زنده– گره زد. نماد این دیدگاه مولکولی را می‌توان در قالب اصل مرکزی زیست‌شناسی مولکولی[3] یافت. فرانسیس کریک، در یادداشتی شخصی در اکتبر سال ۱۹۵۶ میلادی دیدگاه خود در خصوص این دیدگاه را چنین بیان می‌کند: «وقتی اطلاعات وارد پروتئین شود، دیگر نمی‌تواند از آنجا خارج شود»[4] (تصویر ۱). از آنجا که بخش اصلی آنچه رخنمود یک جاندار را شکل می‌دهد حاصل عملکرد پروتئین‌هاست، چنین تصویری از شارش اطلاعات در موجود زنده جای چندان برای تکوین به عنوان بخشی کلیدی در پدیدآمدن ویژگی که زنده‌بودن خوانده می‌شود ندارد. چنین نگرشی، تکوین‌دانی کل‌نگر چون کنراد وَدینگتن[5] را برآشفت. به عنوان مثال، در واکنش به اظهار چنین دیدگاه به ظاهر فروکاست‌گرایانه‌ای به سرشت موجودات زنده در طی سلسله سخنرانی‌های فرانسیس کریک در دانشگاه واشنگتن که در قالب کتاب «*در باب انسان‌ها و مولکول‌ها*[6]» منتشر شد، ودینگتن چنین

1. Modern synthesis
2. Phenotype
3. Central dogma of molecular biology
۴. کریک بعدها عنوان «فرض پایه‌ای» (Basic assumption) را مناسب‌تر از «باور (دگم)» یافت. باید در نظر داشت که باور بنیادین کریک اساساً متفاوت از رابطه‌ای دنا > رنا > پروتئین است که اغلب به اشتباه به عنوان تعریف این مفهوم به کار می‌رود. این تعریف ناراست نخست توسط جیمز واتسون در کتاب درسی زیست‌شناسی مولکولی ژن (۱۹۵۷) (*Molecular Biology of the Gene*) گنجانده شد. تعریف نخست مبتنی بر شارش اطلاعات است اما تعریف دوم منعکس‌کننده روند سنتز این ماکرومولکول‌های زیستی.
5. Conrad Hal Waddington (1905 – 1975)
۶ *Of Molecules and Men* (۱۹۶۶)؛ عنوانی که نام رمان جان استاین‌بک (*Of Mice and Men*) را در ذهن تداعی می‌کند. در جمله ترجمه‌های فارسی این اثر، این عنوان به «*موش‌ها و آدم‌ها*» ترجمه شده است.

نگاشت که، «آیا [نقد ویتالیسم] تازیانه‌زدن بر اسبی مرده نیست؟ کریک تلاش بسیار می‌کند تا نشان این اسب، لااقل با بی‌رمقی، همچنان نفس می‌کشد. [...] مشکل این است که ویتالیسم را چگونه باید تعریف کرد» (۱).

برای فهم سرچشمه نقد ودینگتن، باید به دوران پیش از کشف مارپیچ دوگانه حیات سفر کرد. دورانی که طی آن تکوین، و نه زیست‌شناسی مولکولی، بهترین روش برای فهم اسرار حیات به نظر می‌رسد.




**شکل ۱**- یادداشتی انتشارنیافته از فرانسیس کریک تحت عنوان «ایده‌هایی در باب سنتز پروتئین». در این یادداشت، کریک برای نخستین بار مفهوم اصل مرکزی را توضیح می‌دهد. پس از تعریف این باور، او می‌افزاید: « در اینجا مراد از اطلاعات توالی آمینو اسیدها یا توالی‌های دیگر مرتبط به آن است.» پیکان‌ها جهت انتقال اطلاعات را نشان می‌دهند (منبع: https://wellcomecollection.org/works/xmscu3g4)

## وراثت از منظر داروین

بزرگ‌ترین دشواری داروین در پی‌ریزی نظریه تکامل، توضیح چگونگی پدیدارشدن تنوع زیستی بود. در نبود یک نظریه وراثت مبسوط، همانگونه که داروین خود متذکر شده بود، «نادانی ما از قوانین تکامل ژرف است»[۱]. منتقدان معاصر داروین نیز از همین منظر بر نظریه داروین خرده گرفتند. به عنوان نمونه، فیلمینگ جنکین[۲] در نقد خود بر منشأ گونه‌ها چنین نگاشت: «نظریه داروین نیازمند آن است که حدی بر تفاوت ممکن میان زادگان و نیاکان نباشد یا، اگر هم حدی وجود داشته باشد، چنان بالا باشد که امکان بیشترین تفاوت میان هر یک از اشکال حیات را بدهد. تنوع مورد نظر، اگر بینهایت نباشد لااقل ناشناخته است.»[۳] پژوهش‌های فرانسیس گالتون در باب وراثت نیز، به ویژه در باب شباهت والدین و فرزندان در انسان، گرچه به ابداع رگراسیون در آمار انجامید، اما گره از ماهیت تنوع ژنتیکی نگشود.

داروین، ناآگاه از آزمایش‌های مندل که ۱۸۶۶ میلادی منتشر شده‌بود[۴]، به صورت‌بندی نظریه‌ای وراثتی خود پرداخت که در نهایت در جلد دوم اثر سترگ داروین -تنوع حیوانات و گیاهان اهلی[۵]- به انتشار درآمد. فرضیه پانژنسیس[۶] گرچه با نظریه‌های مدرن ژنتیکی که در قرن بیستم صورت‌بندی شد چندان سنخیتی ندارد، اما به خوبی دیدگاه قرن نوزدهمی در باب ساختار چنین فرضیه‌ای را روشن می‌کند. ویژگی قابل توجه این نظریه، عدم تمایز+ میان یاخته‌های جنسی و پیکری است و دیگر درهم تنیده بودن تکوین و وراثت. چنین تصوری از وراثت، که میانکنش محیط و جاندار را بخش اساسی شکل‌دهی وراثت می‌پندارد را می‌توان به صورتی دیگر در عقاید لوثر بربنک[۷]، گیاهشناس خودآموخته آمریکایی نیز یافت. بربنک که با پدیدآوردن اشکال جدیدی از گیاهان، من‌جمله سیب‌زمینی، شهرت بسیار یافت وراثت را «صرفاً حاصل جمع همه محیط‌های زیستی که نسل‌های پیشین تجربه‌کرده‌بودند[۸]» می‌پنداشت.

پیشنهاد وایسمان[۹] در اواخر سده نوزدهم در خصوص نقش اساسی یاخته‌های جنسی در وراثت و جدایی یاخته‌های پیکری از این

1. *Origin*, 1859, p.168
2. Henry Charles Fleeming Jenkin
3. Review of The Origin of Species (1867)
4. *Versuche über Pflanzen-Hybriden*
5. The Variation of Animals and Plants Under Domestication(1868)
6. Pangenesis
7. Luther Burbank (1849 – 1926)
8. Luther Burbank, The Training of the Human Plant, 1907, page 68.
9. August Friedrich Leopold Weismann

فرآیند، که به سد وایسمان مشهور شد، عملاً امکان نظری اثر محیط بر وراثت را که شالوده دیدگاه وراثتی قرن نوزدهم بود از بیخ و بن از میان برد. کشف دوباره نظریه مندل، به همراه کشف ساختار فیزیکی ماده وراثتی توسط ساتون[1] و بوورِی[2] در ابتدای قرن بیستم و پیشنهاد مفهوم ژنوتیپ توسط یوهانسون در ۱۹۰۹ میلادی[3]، بستر را برای جداکردن تکوین از وراثت مهیا کرد.

باوجود وزیدن این بادهای مخالف، برخی همچنین در پی اثبات آزمایشگاهی امکان وراثت صفات به سبب اثر محیط بر والدین بودند. در ۱۹۱۹ میلادی، پال کامِرر[4] در وین[5] آزمایش‌های شگفت انگیزی را بر گونه قورباغه اروپایی[6] به انجام رساند که ظاهراً پیشرفت‌های نظری اخیر در باب وراثت را به چالش می‌کشید. در بسیاری از دوزیستان، اندروژن سبب تورم دست‌ها می‌شود که به جلب جفت کمک می‌کند. در گونه مورد مطالعه کامرر، به دلیل خشکی محیط چنین صفتی بروز نی‌کند اما او توانست با انجام آزمایش در دمای بالا، قورباغه‌ها را مجبور به تخم‌گذاری در آب کند و تنها طی سه نسل، زمان بسیار اندک برای بروز جهش، این قورباغه‌ها نیز دچار تورم دست شدند. بررسی‌های گلدوین نوبل[7] اما اشکار کرد که این تورم‌ها چیزی جز رنگ تزریق‌شده به دستان قورباغه نبودند. کامرر که ظاهراً از چنین مسأله ناآگاه بود – گمان می‌رود که شاید دانشجویی با عقایدی همسو با حزب نازی با نمونه‌های او چنین کرده بود – آبروی حرفه‌ای خود را از دست رفته و دید و در نهایت دست به خودکشی زد. (۲)

در دهه ۱۹۳۰ میلادی، ستاره اقبال تکوین در افق نظریه تکامل بیش از پیش افول کرد. عامل اصلی این افول را باید در شرق جستجو کرد، جایی که در سایه استالین ژنتیک شوروی، که لااقل همگام با ژنتیک غرب پیش می‌رفت، اندک اندک به عقب بازگردانده شد. سرنوشت تراژیک نیکولای ایوانوویچ واویلوف[8] در خلال تصفیه دانشگاه و مراکز پژوهشی از ژنتیکدانان «غرب‌زده» در اتحاد جماهیر شوروی نه تنها نشان داد که درآمیختن ایدئولورژی و علم ره به ترکستان می‌برد، بلکه باور به اثر محیط بر ژنتیک را نیز در غرب به باوری پلید بدل کرد. نقش اصلی در پاکسازی ژنتیک شوروی از باورهای غرب‌زده و واپسگرایانه را تروفیم دنیسوویچ لیسنکو[9] بر عهد گرفت. این ژنتیک‌دانا آماتور، تأکید زیست‌شناسی تکاملی بر رقابت میان افراد و چارچوب نظری ژنتیک مدرن، که بر اساس آن محیط مستقیماً بر مواد وراثتی اثر نداشت، را خلاف اصول مارکسیسم می‌پنداشت. آزمایش‌های او در پرورش گیاهان زراعی، که در ایستگاه گیاه‌شناسی در گنجه (جمهوری آذربایجان) در نیمه دهه ۱۹۲۰ میلادی آغاز شد، به دعوی او در خصوص موفقیت در پرورش غلاتی که زمستان‌های سخت را تاب می‌آورند انجامید که در روزنامه رسمی کمیته مرکزی حزب کمونیست شوروی – پراودا – منعکس شد و راه را بر ترقی شتابناک لیسنکو گشود.

## کلوپ زیست‌شناسی نظری

با وجود افول اهمیت محیط بر فنوتیپ موجودات زنده و تمرکز روزافزون بر اهمیت علّی ماهیت ژنتیکی، برخی پژوهشگران به پویش در پی ترسیم تصویری کل‌گرایانه در باب ماهیت موجود زنده ادامه دادند. یکی از پژوهشگران برجسته در این پویش، ایوان ایوانوویچ اشمالهاوسِن[10]، متولد کیف در اوکراین کنونی، بود. «نظریه انتخاب پایدارساز[11]» اشمالهاوسن چارچوبی بود برای برجسته‌کردن اهمیت ریخت‌زایی در فرآیند تکامل و اثر انتخاب طبیعی بر پایدارساختن ریخت‌زایی در طی تکامل، به منظور کاهش واریانس محیطی در فنوتیپ به سبب میانکنش محیط و سامانه تکوین. با وجود ترجمه اثر اشمالهاوسن توسط ایزادور دوردیک[12] و ویراست تئودوسیوس دوبژانسکی[13] به زبان انگلیسی[14]، عقاید چندان اثری بر رون تکوین تفکر تکاملی نداشتند، تا جایی که دانش‌آموختگان زیست‌شناسی تکاملی و ژنتیک در عصر ما انتخاب پایدارساز را مترادف اثر انتخاب طبیعی بر توزیع مقادیر یک صفت در یک جمعت می‌پندارند.[15] اشمالهاوسن نیز خود در بحبوحه لیسنکوئیسم در شوروی کرسی استادی خود را از دست داد و روزگارش را در گمنامی سپری کرد.

در انگلستان، گرایش‌های چپ شماری پژوهشگران و رویکرد کل‌نگرانه – در مقابل فروکاست‌گرایی – به شکل‌گیری گروهی منجر شد که سودای انقلاب در زیست‌شناسی را در سر داشت. بانی این گروه، که کلوپ زیست‌شناسی نظری[16] خوانده می‌شد، جوزف هنری ووجِر[17]، که دوستانش او را «سقراط» خطاب می‌کردند بود. ووجر پس از بازگشت از میادین نبرد جنگ جهانی اول به پژوهش در حوزه جنین‌شناسی در کالج دانشگاهی لندن پرداخت اما در طی پژوهش‌هایش اندک‌اندک به پرسش‌های بنیادین زیست‌شناسی علاقمند شد. شکل‌گیری این کلوپ در اوایل دهه ۱۹۳۰ میلادی به

1. Walter Sutton
2. Theodor Boveri
3. Johannsen WL. Elemente der Exakten Erblichkeitslehre. Gustav Fisher, Jena; 1909.
4. Paul Kammerer (1880 - 1926)
5. Biologische Versuchsanstalt Wien
6. *Alytes obstetricans*
7. Gladwyn Kingsley Noble (1894 - 1940)
8. Nikolai Ivanovich Vavilov (1887 - 1943)
9. Trofim Denisovich Lysenko (1898 - 1976)
10. Ivan Ivanovich Schmalhausen (1884 – 1963)
11. The Theory of Stabilizing Selection
12. Isadore Dordick
13. Theodosius Dobzhansky
14. *Factors of Evolution: The Theory of Stabilizing Selection* (1949)
۱۵. به عنوان مثال، انتخاب پایدارساز بر طول نوک پرندگان در یک جمعیت به کاهش شایستگی نوک‌های بسیار کوچک یا بزرگ و بیشینه‌ساختن شایستگی طول‌های حد واسط نوک می‌انجامد.
16. Theoretical Biology Club
17. Joseph Henry Woodger (2 May 1894 – 8 March 1981)

ووجر این امکان را داد تا شماری از همفکران خود در حوزه مختلف علوم را دور یکدیگر جمع کند: افرادی چون جوزف نیدِم[۱] (شیمی‌دان و جنین‌شناس)، کنراد ودینگتون (تکوین و جنین‌شناسی)، دوروتی رینچ[۲] (ریاضی‌دان)، و جوزف بارنل[۳] (شیمی‌دان). این افراد جملگی باورهای کمونیستی با غلظت‌های متفاوت داشتند (بارنل فعال سیاسی و عضو حزب کمونیست بریتانیای کبیر بود و نیدم به سبب عقایدش به ویژه ادعایش مبنی بر استفاده نیروهای آمریکایی از سلاح‌های میکروبی در جنگ کره تا دهه ۱۹۷۰ میلادی در لیست سیاه دولت ایالات متحده جا داشت) و هم‌نظر بودند که باید راه سومی – به جای فروکاست‌گرایی محض و یا باور به وجود نیرویی حیاتی در کالبد موجودات زنده – یافت تا کشف سرشت راستین فرآیندهایی که به موجودات زنده سامان می‌بخشند میسر شود.

درک اهمیت باورهای این گروه و برنامه پژوهشی مورد نظر آنان – با فرض اینکه چنین برنامه وجود داشت – از منظر زیست‌شناسی امروزی بسیار دشوار است، چراکه حتی در میانه قرن بیستم نیز دیدگاه‌هایی که کلوپ زیست‌شناسی نظری از آن دفاع می‌کرد به باور بسیاری از رونق افتاده بودند و تنها شایسته افزوده شدن به فهرست عقایت ناراست تاریخ زیست‌شناسی بودند. با کشف ساختار ماده وراثتی و بدل‌شدن زیست‌شناسی مولکولی به ستون اصلی خیمه زیست‌شناسی نوین، اهمیت زیست‌شناسی تکوینی در توضیح وراثت و تکامل کم‌رنگ شد. به عنوان مثال، گوئینث گودفلد[۴]، تاریخ‌دان بریتانیایی، در ۱۹۶۵ میلادی با جوزف نیدم و کنراد ودینگتون تماس گرفت تا در باب رشد و افول مفهوم سامانگر در دهه ۱۹۳۰ میلادی با این دو مکاتبه کند(۳). کشف سامانگر اشپمان–منگولد[۵] در دهه ۱۹۲۰ میلادی، که پرده از چگونگی تصمیم‌گیری در باب عاقبت یاخته در طی تکوین موجود زنده را اندکی کنار زد، تحولی اساسی در زیست‌شناسی تکوینی را سبب شد و – افزون بر جایزه نوبلی که نصیب هانس اشپمان کرد – مسبب پژوهش‌های بسیار با هدف شناخت ساز و کارهایی که سرنوشت یک یاخته را تعیین می‌کردند شد. پرسش گودفلد انعکاس‌دهنده دگرگونی اساسی علم زیست‌شناسی از دهه ۱۹۲۰ تا دهه ۱۹۶۰ میلادی است. پاسخ ودینگتون به گودفلد به خوبی از سرخوردگی او و زیست‌شناسان هم‌سویی از مسیری که زیست‌شناسی در نیمه دوم قرن بیستم پی گرفت حکایت دارد: «مفهوم سامانگر هرگز افول نکرد ... آنچه افول کرد آدمکی پوشالی بود که شماری زیست‌شناس آمریکایی عَلَم‌کرده‌بودند با این هدف که او را بر زمین بیفکنند.»[۶]

بخشی از کم‌اثری کلوپ زیست‌شناسی نظری در شکل‌دهی مسیر زیست‌شناسی را باید در سوگیری سیاسی این گروه جستجو کرد. کارل پاپر[۷] در یادداشتی پس از درگذشت هنری ووجر نگاشت، تجربه حضورش در جلسات کلوپ زیست‌شناسی نظری را چنین توصیف کرد: «دکتر ویزنِر[۸]، یکی از دوستان دیرینه‌ام که در وین با او آشنا شده‌بودم، که همانند ووجر زیست‌شناسی عملی بود عضو کلوپ زیست‌شناسی نظری بود و از این جهت من نیز در جلسات این گروه حضور یافتم. [...] در آنجا به شدت از خامی سیاسی برنال، وادینگتون و هیالمار لوییس[۹] (یا برداشت من از دیدگاه آنان) جاخوردم چراکه چپ‌گرایی آنان از آن قسمی بود که من سال‌ها پیش‌تر کنار گذاشته‌بودم.» (۴) گرچه چنین چپ‌گرایی عریانی از جانب متفکرین و دانشمندان در دهه ۱۹۳۰ میلادی و به ویژه در طی جنگ جهانی دوم، دورانی که عمو سَم و عمو جو (جوزف استالین) دست در دست هم در مقابل فاشیسم می‌جنگیدند (تصویر ۲)، دلیلی برای انتقاد از آنان نبود، اما پس از پایان جنگ جهانی دوم و پدیدارشدن نظم نوینی پس از جنگ و بدل شدن کمونیسم به عنوان دشمن شماره یک این دوران جدید، علم‌ورزی با چاشنی چپ‌گرایی در ایالات‌متحده و بریتانیا دیگر فعالیتی بی‌خطر به نظر نمی‌آمد.

بحث بر سر آنچه بر سر ژنتیک در شوروی آمده بود پس از پایان جنگ جهانی دوم به خوبی تغییر نگرش به شوروی، و در بعد وسیع‌تر به چپ‌گرایی، را آشکار می‌کند. مجادله میان دوتن از بانیان سنتز نوین تکاملی، جی بی اس هالدین و رولاند فیشر در برنامه «جنجال لیسنکو» رادیو بی‌بی‌سی در نوامبر ۱۹۴۸ نمونه بارزی تغییر جهت وزش بادهای سیاسی این دوره است. گرچه دشمن اصلی لیسنکو به اذعان خود او، ژنتیک «واپسگرایانه» غربی بود، اما افرادی که چندان هم همسو با چارچوب فروکاست‌گرایانه ژنتیک غربی نبودند نیز از گزند لیسنکو در امان نماندند. شاید جالب‌توجه‌ترین این افراد، ایوان ایوانوویچ اشمالهاوسن[۱۰]، ژنتیک‌دان متولد کیف بود که در ۱۹۴۸ به سبب عقاید هم‌سو با مورگان و وایزمن از مقام استادی برکنار شد. مهم‌ترین اثرش، تحت عنوان «*عوامل تکامل: نظریه انتخاب تثبیت کننده*[۱۱]» که در ۱۹۴۶ میلادی به زبان روسی به چاپ رسید، به همت تئودوسیوس دوبژانسکی و ترجمه ایزادور دوردیک[۱۲] در ۱۹۴۹ میلادی به زبان انگلیسی به چاپ رسید.

## از انتخاب تثبیت‌کننده تکوین تا انتخاب تثبیت‌کننده ژن‌ها

دگرگونی معنایی دو واژه در نیمه دوم قرن بیستم میلادی به خوبی

1. Noel Needham[۱] (1900 – 1995)
2. Dorothy Maud Wrinch (1894 – 1976)
3. John Desmond Bernal (1901 – 1971)
4. Gwyneth June Goodfield (1927 – 2025)
5. Spemann–Mangold organizer
6. Peterson, The Conquest of Vitalism or the Eclipse of Organicism?, p. 282.
7. Karl Raimund Popper (1902 - 1994)
8. Bertold Paul Wiesner (1901–1972)
9. Hjalmar Lewis
10. Ivan Ivanovich Schmalhausen (1884 – 1963)
11. *Factors of Evolution: The Theory of Stabilizing Selection*
12. Isadore Dordick

انعکاس‌دهنده کم‌رنگ شدن اهمیت زیست‌شناسی تکوینی از منظر زیست‌شناسی تکاملی و ژنتیک مولکوبی است. نخستین واژه در عنوان کتاب اشمالهاوسن یافت می‌شود: «انتخاب تثبیت‌کننده». برای زیست‌شناس عصر ما، انتخاب ثبیت‌کننده معنای سرراست دارد و اشاره به اثر انتخاب طبیعی بر توزیع یک صفت، و در نتیجه ژن‌هایی که سبب آن صفت می‌شوند، دارد. بر اثر انتخاب تثبیت‌کننده، شایستگی مقادیر بیشینه یا کمینه یک صفت شایستی پایین‌تری نثبت به مقادیر متوسط دارند و در نتیجه واریانس توزیع صفت در جمعیت در طی نسل‌ها و بر اثر انتخاب طبیعی کاهش می‌یابد. اما از منظر اشمالهاوسن اثر انتخاب طبیعی بر سامانه تکوینی است که منجر به کانالیزه‌شدن آن در برابر تغییرات محیطی می‌شود، به نحوی که برنامه تکوینی صفت ثابت را می‌آفریند و اشکال متفاوت ناشی از حساسیت سامانه تکوینی به محیط دیگر پدید نمی‌آیند. در منابع میانه قرن بیستم تمایز میان اشکال رخنمودی ناشی از پاسخ سامانه تکوینی به محیط زیست، آنچه موم‌سانی تکوینی[1] و یا پلی‌فینیسم[2]، که مشخصاً به پدیدار شدن تعدادی صفت گسسته در پاسخ محیط اشاره دارد، و پلی‌مورفیسم[3]، یعنی تنوع رخنمودی ناشی از جهش‌های ژنتیکی، داده نمی‌شود.

اپی‌ژنتیک واژه دیگری است که سراسر از منظر معنایی دچار دگرگونی شد. از منظر ودینگتون، علم اپی‌ژنتیک، ترکیب پیشوند یونانی ἐπί به γένεσις، به مطالعه میانکنش ژن‌های و محصولات آنان می‌پردازد که رخنمود را پدید می‌آورند[4]. مراد ودینگتن از میانکنش‌ها همان فرآنید تکوین بود که نقش تفسیر داده‌های ژنتیکی به رخنمودها را برعهده داشت و از منظر او کلیدی‌ترین حلقه در زنجیره میان ژن و رخنمود بود. اما در طی نیمه دوم قرن بیستم، اندک‌اندک نقش تکوین از معنای اپی‌ژنتیک کنار رفت، تا آنجا که در هالیدی یکی از تعاریف اصلی اپی‌ژنتیک را وراثت هسته‌ای که وابسته به تغییرات توالی دنا نیست را دانست. (۵)

## آیا تکوین جایگاهی در زیست‌شناسی تکاملی خواهد داشت؟

در این یادداشت، به اختصار به تاریخ تکوین در زیست‌نشاسی تکاملی و کم‌رنگ‌شدن آن در طی قرن بیستم به عنوانی بخش اساس در فهم ما از وراثت پرداختم. اما آیا زمان برای افزودن تکوین به زیست‌شناسی تکاملی رسیده است؟ تصور زیست‌شناسی تکاملی درآمیخته با تکوین شاید برهه کنونی بیش از هر زمان میسر است چراکه اندک‌اندک سازوکارهایی که در پس موم‌سانی تکوینی پنهان‌شده بودند آشکار می‌شوند و با وجود چنین فهم اساسی از ماهیت موم‌سانی تکوینی و وراثت غیر ژنتیکی، درهم‌آمیختن این حقایق دنیای طبیعیت با چارچوب نظری زیست‌شناسی تکاملی بالاخره ممکن است. به عنوان مثال، در نماتدی به نام *Pristionchus pacificus* که بسیار به مدل معروف *Caenorhabditis elegans* می‌ماند، در شرایط محیطی خاص و بدون نیاز به جهش ژنتیکی، کرم بالغ دهانی عریض خواهد داشت که امکان شکار نماندهای دیگر را میسر می‌کند. پژوهش‌های اخیر پرده از چگونگی بروز این نوع از پلی‌فینیسم برداشته و نشان می‌هد که چگونه مولکول‌های رنا به انتقال این صفت از نسلی به نسل دیگر و در نبود محرک محیطی منجر می‌شوند. جالب آنکه می‌توان این صفت را با جهش کانالیزه کرد، به شکلی که پلی‌فنیسم از میان رود و کرم‌ها همواره دهان شکارچی را بروز دهند بدون توجه به شرایط محیط (۶). چنین سناریویی به خوبی نشان می‌دهد که برخلاف تصور برخی که گنجاندن چنین دگرگونی در زیست‌شناسی تکاملی را بازگشت لامارکیسم قلمداد می‌کردند، افزودن تکوین در تکامل قرابت بسیاری با تصور داروین از تکامل در طبیعت دارد. گویی با پیشرفت‌های کنونی بیش‌تر به تصور داروین از وراثت صفات نزدیک شده‌ایم.

## منابع


1. Waddington, C. No Vitalism for Crick. *Nature* 216, 202– 203 (1967). https://doi.org/10.1038/216202b0.
2. Aronson, The Case of The Case of the Midwife Toad, *Behaviour Genetics*, 5(2)1975.
3. Peterson, ERIK. "The Conquest of Vitalism or the Eclipse of Organicism? The 1930s Cambridge Organizer Project and the Social Network of Mid-Twentieth-Century Biology." *The British Journal for the History of Science,* vol. 47, no. 2 ,2014, pp. 281–304.
4. Karl Raimund Popper . *The British Journal for the Philosophy of Science*, Sep.,1981, Vol. 32, No.3, pp.328 -330
5. Holliday R., 1994. Epigenetics: an overview. Dev. Genet. 15: 453–457
6. Shiela Pearl Quiobe et al., EBAX1-/ZSWIM8 destabilizes miRNAs, resulting in transgenerational inheritance of a predatory trait.Sci. *Adv.*11,eadu0875(2025).DOI:10.1126/sciadv.adu0875


1. Developmental plasticity
2. Polyphenism
3. Polymorphism
4. Waddington C. H., 1942. The epigenotype. Endeavour1: 18

# از مقاومت تا تحمل:
# مرزبندی دو مفهوم کلیدی در واکنش گیاهان به علف‌کش‌ها

روزبه زنگوئی نژاد*[1]، اسکندر زند[2]
۱. مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
۲. بخش تحقیقات علف‌های هرز، موسسه تحقیقات گیاه‌پزشکی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی
r.zangoueinejad@areeo.ac.ir
نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳

**چکیده**

هم‌پوشانی و تداخل معانی برخی از واژگان در زمینه‌هایی از علوم، گاهی سبب دشواری در تمایز مفاهیم علمی نهفته در پس آن‌ها می‌شود. در زمینه علوم علف‌های هرز دو عبارت مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش از جمله این واژگان هستند. این دو عبارت اگرچه در بسیاری از جوامع مرتبط با علوم کشاورزی به عنوان یک مفهوم واحد تلقی می‌شوند اما در واقعیت تفاوت عمیقی مابین این دو وجود دارد که اجازه نمی‌دهد و نباید آن دو را مابه‌ازای یکدیگر به کار گرفت. در واقع مفهوم مقاومت به علف‌کش اشاره به بروز یک وضعیت ویژه در جمعیت‌های علف‌هرز دارد که در طول زمان و در نتیجه کنش‌های انسانی از طریق کاربرد مکرر یک یا چند نوع علف‌کش خاص ایجاد می‌شود، در حالی که عبارت تحمل به علف‌کش بازتاب‌دهنده وجود یک صفت ذاتی در یک گونه خاص گیاهی است که مستقل از مداخلات بشری در بستر زمان، وجود داشته و خواهد داشت. بر این اساس علف‌های‌هرز مقاوم به علف‌کش، علف‌های‌هرز متحمل به علف‌کش، محصول مقاوم به علف‌کش و نهایتاً محصول متحمل به علف‌کش هر کدام پدیده‌هایی هستند که به طور مستقل قابل بررسی بوده، دارای اشتراک رخداد با یکدیگر نیستند. هر کدام از این‌ها اهمیت مختص به خود را در ساختارهای کشاورزی داشته، می‌توانند اثرات سازنده و مخرب کاملاً متفاوتی را برجای گذارند، که البته تا کنون تنها علف‌های‌هرز و محصولات مقاوم به علف‌کش‌ها سهم قابل توجهی از مباحث و موضوعات را در جوامع علمی و عملیاتی بخش کشاورزی به خود اختصاص داده‌اند. در مقاله جاری سعی شده است تا ضمن تبیین تفاوت دو پدیده مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش مبتنی بر واقعیت‌های کاربستی آنها، اهمیت هرکدام در سازوکارهای نظام‌های کشاورزی مورد بررسی قرار گیرد.

**کلید واژگان:** مقاومت به علف‌کش، تحمل به علف‌کش، علف‌های‌هرز، محصولات زراعی.

## تشریح واژگان «مقاومت» و «تحمل» به علف‌کش

از آن‌جایی که واژه‌ها به خودی خود بار معنایی ویژه‌ای دارند که القائ مفاهیم علمی جز از راه به‌کارگیری آن‌ها میسر نیست، لذا کاربرد واژه‌ها در موقعیت‌های مناسب در تناسب با معنای ماهوی آن‌ها می‌تواند راه‌گشای بسیاری از گره‌ها در مسیر بهینه‌سازی توصیف فرآیندهای علمی در ارتباط با حل مسائل پیش آمده در هر زمینه‌ای از علم باشد. گاهی اوقات مفاهیم علمی به دلیل نزدیک بودن معانی واژگان به‌کار گرفته جهت تشریح آن‌ها، چنان نزدیک به یکدیگر به نظر می‌رسند که اساساً جدا نمودن آن‌ها در طیفی از بی‌مورد تا غیرضروری قرار می‌گیرد. اما می‌بایست توجه داشت که هرگز نمی‌توان محدودیت در القای معنای واژگان را بستر پذیرفته شده‌ای جهت خلط نمودن مفاهیم علمی قرار داد. به بیان دیگر، حقیقت تفاوت رخدادها در هر زمینه‌ای از علم را نمی‌توان به دلیل محدودیت در ظرفیت واژگان نادیده گرفت به طوری که گاهی اوقات هم‌پوشانی‌ها یا تداخلاتی در معانی برخی از واژگان بیان کننده مفاهیم علمی وجود دارد که تمیز دادن آن‌ها حتی توسط افراد متخصص در آن موضوع علمی خاص نیز به سادگی میسر نیست. دو عبارت «مقاومت به علف‌کش[1]» و «تحمل به علف‌کش[2]» بر اساس تعاریف ارائه شده از سوی انجمن علف‌های هرز ایالات متحده[3] و کمیته اقدام مقاومت علف‌کش[4] در سال ۱۹۹۸، تصریحات روشن و توضیحات مشخصی دارند (۱). مقاومت به علف‌کش، توانایی توارثی گیاه برای زنده ماندن و تولید مثل پس از قرار گرفتن در معرض دوزی از یک علف‌کش است که معمولاً پیش از این برای آن گونه کشنده بوده است. در حال حاضر ۲۷۳ گونه از علف‌های‌هرز مقاوم به انواع علف‌کش‌ها، شامل ۱۵۶ گونه دولپه‌ای و ۱۱۷ گونه تک‌لپه‌ای در سرتاسر جهان گزارش شده‌اند. این گونه‌های علف‌هرز در مجموع به ۱۶۸ علف‌کش مختلف با ۲۱

1. Herbicide resistance
2. Herbicide tolerance
3. Weed Science Society of America; WSSA
4. Herbicide Resistance Action Committee

نحوه عمل متفاوت صفت مقاومت را بروز داده‌اند. همچنین شایان توجه است که گونه‌های علف‌هرز مقاوم شده در ۱۰۲ محصول و از ۷۵ کشور گزارش شده‌اند. در یک گیاه، مقاومت ممکن است به طور طبیعی رخ دهد یا توسط تکنیک‌هایی مانند مهندسی ژنتیک یا انتخاب از طریق کشت بافت یا جهش‌زایی ایجاد شود. گیاهانی که از طریق به کارگیری تکنیک‌های مهندسی ژنتیک امکان بروز صفت مقاومت به یک یا چند علف‌کش را می‌یابند، در اصطلاح گیاهان دست‌ورزی شده ژنتیکی نامیده می‌شوند. از جمله عمده‌ترین محصولات دست‌ورزی شده ژنتیکی که در سرتاسر جهان طی سال ۲۰۲۳ میلادی کشت شده‌اند، می‌توان به پنبه، سویا، ذرت، کلزا، چغندرقند، یونجه، نیشکر، برنج، گندم و بادمجان اشاره کرد (۲). بر اساس آخرین آمار در دسترس، در سال ۲۰۲۳ میلادی، محصولات دست‌ورزی شده ژنتیکی در سطحی معادل۲۰۶/۳ میلیون هکتار در ۷۶ کشور جهان کشت شده‌اند که در مقایسه با سال ۱۹۹۶ رشدی ۱۲۱ برابری نشان می‌دهد (۳).

اما از طرف دیگر، تحمل به علف‌کش به عنوان توانایی ذاتی یک گونه برای زنده ماندن و تولید مثل پس از تیمار شدن با یک علف–کش تلقی می‌شود. در واقع در این فرآیند هیچ گونه انتخاب یا دستکاری ژنتیکی دخیل نبوده، بلکه این گیاه به طور طبیعی می‌تواند در برابر نوع خاصی علف‌کش یا طیفی از علف‌کش‌ها صفت تحمل را بروز دهد. با توجه به نکات بیان شده می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در مورد مقاومت به علف‌کش اگرچه یک صفت قابل توارث در برخی از افراد جمعیت وجود دارد اما آن‌چه که سبب غالبیت بروز آن صفت در جمعیت خواهد شد ایجاد فشار انتخابی از طریق مصرف یک یا چند علف‌کش خاص در طول زمان جهت مهار یک گونه خاص علف‌هرزی است که نهایتاً با مهار نمودن افراد حساس در جمعیت، فضای کافی جهت استقرار افراد مقاوم در آن جمعیت مهیا خواهد شد. بنابراین بدون وجود تداخلات از جانب انسان‌ها اساساً امکان بروز صفت مقاومت به یک یا چند علف‌کش امکان‌پذیر نخواهد بود. اما زمانی که در مورد تحمل به علف‌کش صحبت می‌شود، موضوع کاملاً متفاوت است. در حقیقت اگرچه تحمل به یک یا چند علف‌کش نیز به صورت یک صفت قابل توارث بروز می‌کند اما این صفت به صورت غالب در یک جنس و گونه خاص گیاهی به طور ذاتی وجود دارد و بروز و ظهور آن صفت وابسته به وجود تداخلات انسانی از طریق برقراری فشار انتخابی جهت غالب شدن آن صفت در جمعیت گیاهی نیست. بنابراین، پدیده مقاومت به علف‌کش «رخ می‌دهد» در حالی که پدیده تحمل به علف‌کش «وجود دارد». به عبارت دیگر زمانی که در مقالات یا گزارش‌های علمی قصد ارائه مطالبی در ارتباط

## فرهنگ واژگان

**دست‌ورزی ژنتیکی (Genetically Modification)**: به دست‌کاری و تغییر مستقیم ماده ژنتیکی (DNA یا RNA) نوعی از انواع حیات برای رسیدن به هدفی خاص در بروز صفت یا صفاتی از طریق آن‌ها اطلاق می‌شود.

**رقم (Cultivar):** گیاهی که به طور هدفمند توسط انسان از طریق انتخاب، اصلاح یا دست‌ورزی ژنتیکی به وجود آمده تا ویژگی‌های خاصی را نشان دهد.

**Herbicide target-site resistance**

**(مقاومت جایگاه هدف نسبت به علف‌کش):**

مقاومت علف‌های هرز نسبت به محلل اثر علف‌کش زمانی رخ می‌دهد که جهش‌هایی در ژنی که آنزیم یا پروتئین هدفِ علف‌کش را کُد می‌کند به وجود آید. این جهش‌ها ساختار آن را تغییر می‌دهد و مانع اتصال مؤثر علف‌کش شده و در نتیجه علف‌هرز نسبت به آن مقاوم می‌شود.

**Herbicide non-target-site resistance**

**(مقاومت غیر جایگاه هدف نسبت به علف‌کش):**

به نوعی از مقاومت در علف‌های‌هرز نسبت به علف‌کش‌ها گفته می‌شود که به‌دلیل تغییر در جایگاه اثر علف‌کش ایجاد نمی‌شود، بلکه برخلاف مقاومت جایگاه هدف، ژن یا آنزیم هدف دچار جهش نشده است. در عوض، گیاه با سازوکارهای دیگری از اثر علف‌کش جلوگیری می‌کند. مهم‌ترین سازوکارهای مقاومت غیرجایگاه هدف عبارت‌اند از کاهش جذب علف‌کش، کاهش انتقال در داخل بافت‌ها و آوندهای گیاهی، متابولیسم یا تجزیه سریع‌تر علف‌کش به نحوی که گیاه علف‌کش را قبل از اینکه بتواند اثر بگذارد از طرقی تجزیه و بی‌اثر می‌کند و همچنین نگه داشتن علف‌کش در بخش‌های غیرحساس گیاه تا به نقاط حساس نرسد.

**مقاومت چندگانه نسبت به علف‌کش‌ها (Multiple resistance):**

به نوعی از مقاومت به علف‌کش‌ها گفته می‌شود که یک بیوتیپ یا جمعیتی از علف‌های–هر نسبت به دو یا چند علف‌کش با سازوکارهای اثر متفاوت مقاوم اند

**شار ژنی (Gene flow):** فرآیند انتقال ژن یا آلل‌ها از یک جمعیت گیاهی به جمعیت دیگر را شار ژنی می‌نامند.

**اَبَر علف‌هرز (Super weed):** به علف‌های هرزی اطلاق می‌شود که به چندین علف‌کش مختلف مقاوم شده و کنترل آن بسیار سخت شده است.

**گیاهِ خودروی ناخواسته (Volunteer weed):** گیاهی است که بدون کشت برنامه‌ریزی شده به خودی خود از طریق جوانه‌زنی بذرهای برجای مانده از سال زراعی گذشته جوانه زده و رشد می‌کند. جوانه‌زنی گندم در مزرعه کلزا مثال روشنی از این مفهوم را به نمایش می‌گذارد.

**نحوه عمل علف‌کش (Herbicide mode of action):** مسیر زیستی یا فرآیند ویژه‌ای در گیاه که علف‌کش آن را مختل می‌کند و در نهایت باعث مرگ یا توقف رشد گیاه می‌شود.

**اکسشن (Accession):** یک نمونه گردآوری‌شده از یک گونه گیاهی خاص است که از یک منبع مشخص مانند یک منطقه جغرافیایی یا یک جمعیت وحشی جمع‌آوری شده و با یک شماره اختصاصی ویژه در بانک ژن ثبت می‌شود تا همیشه قابل ردیابی باشد.

**پیوستگی ژنی (Gene Linkage):** به حالتی گفته می‌شود که دو یا چند ژن روی یک کروموزوم نزدیک به هم قرار داشته باشند و بنابراین با هم و به‌صورت گروهی [همبسته] در هنگام میوز و تشکیل گامت به ارث برسند.

1. International Herbicide-Resistant Weed Database. (2025). https://www.weedscience.org/Home.aspx

با «مقاومت به علف‌کش» وجود دارد بدون شک می‌بایست عنوان شود که «یک جمعیت خاص از علف‌های‌هرز» یا «یک رقم خاص گیاهی» به «یک علف‌کش خاص» به نحوی از انحائ «مقاوم شده است». اما زمانی که ارائه مطالب در هر دو صورت گزارشات مکتوب و شفاهی علمی در ارتباط با پدیده تحمل صورت می‌گیرد می‌بایست به این صورت بیان شود که «یک جنس و گونه خاص گیاهی» به یک علف‌کش خاص متحمل «بوده است»، که این گزاره به این معنی است که «آن جنس و گونه خاص گیاهی» (تا زمانی که ماهیت ذاتی ژنتیکی‌اش تغییر نیافته) به آن علف‌کش متحمل بوده، هست و خواهد بود. در جدول شماره ۱، توضیحاتی در ارتباط با هر دو دسته علف‌های‌هرز و محصولات مقاوم و متحمل به علف‌کش‌ها ارائه شده است. توجه به این مورد بسیار با اهمیت است که اصولاً مکانیسم‌های دخیل در هر دو رخداد مقاومت و تحمل به علف‌کش کاملاً یکسان‌اند (۷-۴). به بیان دیگر انواع مکانیسم‌های در ارتباط با جایگاه هدف و غیر جایگاه هدف به طور کاملاً مشابه مسبب ایجاد هر دو حالت مقاومت و تحمل به علف‌کش هستند (۱۱-۸). اما آنچه سبب ایجاد تمایز میان این دو پدیده می‌شود نحوه بروز و ظهور این صفات در یک گونه گیاهی در بستر زمان است (۵ و ۷). در حقیقت زمانی که پدیده تحمل به علف‌کش رخ داده باشد صفتی همزاد با یک گونه گیاهی بروز پیدا کرده است که به واقع حالتی غیرطبیعی در ارتباط با آن گونه گیاهی رخ نداده است. اما زمانی که پدیده مقاومت به علف‌کش در مورد گونه‌های علف‌هرزی مورد واکاوی قرار می‌گیرد از آنجایی که این صفت تنها در افراد بسیار محدودی از کل جمعیت وجود داشته است نشان می‌دهد که این توانمندی در این افراد ذیل تغییرات تکاملی طی زمان و به صورت محدود رخ داده است. به طوری‌که این وضعیت نشان می‌دهد که صفت مقاومت به علف‌کش حتی در همان افراد محدود در جمعیت، یک صفت (پیشینی) همزاد نبوده، تحت تاثیر تحولات تکاملی در بستر زمان ایجاد شده است. در ضمن، آن‌چنان که توضیح داده شد، ظهور جمعیت‌های مقاوم به علف‌کش نیز در واقع ذیل فشار انتخابی کاربرد علف‌کش یا علف‌کش‌ها به دلیل از بین رفتن افراد حساس جمعیت و خالی شدن فضا جهت اشغال شدن توسط افراد مقاوم رخ می‌دهد. بنابراین همچنان جمعیت‌هایی از آن گونه علف‌هرزی ممکن است در نقاط مختلف جغرافیایی دیگر وجود داشته باشند که یا فاقد افراد مقاوم به آن علف‌کش یا علف‌کش‌های خاص بوده باشند یا همچنان تعداد افراد مقاوم در آن جمعیت‌ها در فقدان فشار انتخابی کاربرد علف‌کش در حداقل باشد.

در مورد محصولات مقاوم به علف‌کش نیز که موضوع کاملاً روشن و واضح است به طوری که اساساً در این دسته از محصولات صفت مقاومت به علف‌کش طی فرآیندهایی آن‌چنان که در جدول ۱ مورد اشاره قرار گرفته است ایجاد می‌شود و بروز چنین صفتی در این دسته از گیاهان ذیل روندهای تکاملی دسته‌بندی نمی‌شود. بنابراین بر اساس واقعیت‌های علمی و انعکاس صحیح آن‌ها در قالب به کارگیری صحیح واژگان به هیچ وجه نمی‌توان دو پدیده «تحمل به علف‌کش» و «مقاومت به علف‌کش» را یکسان در نظر گرفت.

برمبنای توضیحات ارائه شده، آنچه که شگفت‌انگیز است این است که نه فقط در ادبیات عامه، بلکه حتی در جوامع علمی کشاورزی نیز تفاوت چندانی میان این دو پدیده «تحمل به علف‌کش» و «مقاومت به علف‌کش» قائل نشده و در بسیاری از موارد این دو پدیده، یکسان انگاشته می‌شود. طی یک تحقیق میدانی بر مبنای مصاحبه مستقیم که توسط زنگوئی نژاد و زند (منتشر نشده) صورت گرفته است، مشخص شد که از یک جامعه آماری ۲۰۰ نفری از کشاورزان بالغ بر ۱۰۰ درصد از آن‌ها اساساً امکان درک تفاوت‌های میان دو پدیده مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش مبتنی بر اطلاعات زمینه‌ای خود را نداشتند. همچنین ۱۰۰ درصد از کشاورزان مصاحبه شونده اگرچه اذعان داشتند که با عبارت مقاومت به علف‌کش (به صورت لفظی) آشنا بوده‌اند اما هیچ گونه پیشینه علمی و حتی ذهنی در مورد عبارت تحمل به علف‌کش، تا لحظه انجام مصاحبه، نداشتند. از طرف دیگر، یک جمعیت آماری ۱۰۰ نفری از کارشناسان بخش کشاورزی که ۴۶، ۳۹ و ۱۵ نفر از آن‌ها به ترتیب دارای تحصیلات تا سطح کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در گرایش‌های مختلف علوم کشاورزی بودند در ارتباط با دو عبارت مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش مورد سوال قرار گرفتند.

نتایج حاصل نشان داد که تنها ۵ درصد از جمعیت مصاحبه شونده با دو عبارت مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش به طور کلی ذیل تفاوت لفظی آشنا بودند و تنها ۱ درصد از مصاحبه شوندگان امکان توضیح تفاوت‌های میان این دو پدیده را به صورت علمی داشتند. نتایج پژوهش صورت گرفته، که همچنان در حال انجام و تکمیل است، نشان می‌دهد که اصولاً در جوامع مرتبط با امر کشاورزی چه در حیطه عملیاتی و چه در حیطه آکادمیک، هیچ گونه نگاه جدی تمایز دهنده‌ای بین دو پدیده مقاومت به علف-کش و تحمل به علف‌کش وجود ندارد که این مهم می‌تواند سر منشاء مشکلات عدیده بعدی باشد که خود محملی غیرقابل چشم پوشی در به هدر رفتن منابع خواهد بود که به تفصیل در بخش‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود.

انعکاس عدم تمایز بین دو پدیده مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش حتی در مقالات منتشر شده در نشریات طراز اول جهان نیز قابل ردیابی است. به عنوان مثال، در مقاله‌ای که تحت عنوان «The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management» در نشریه «*Pest Management Science*» به چاپ رسیده،

**جدول ۱**– دسته‌بندی علف‌های‌هرز و محصولات متحمل و مقاوم به علف‌کش‌ها (۲۱-۱۲).

| ردیف | نوع | توضیحات |
|---|---|---|
| ۱ | علف‌هرز مقاوم به علف‌کش | به حالت یا وضعیتی اطلاق می‌شود که فرد یا افرادی از یک جمعیت خاص گونه‌ای از علف‌های‌هرز دارای ویژگی منحصر به فردی در سطح مولکولی، فیزیولوژیک و یا مورفولوژیک بوده که می‌توانند در مقابل یک دوز کشنده توصیه شده برای آن گونه خاص علف‌هرزی دوام آورده و بقا داشته باشند. در ضمن آن ویژگی منحصر به فرد قابلیت توارث به نسل‌های بعدی را خواهد داشت. این وضعیت زمانی بروز می‌نماید که فشار انتخابی ناشی از تداوم کاربرد یک علف‌کش خاص یا علف‌کش‌هایی با نحوه عمل یکسان ایجاد شده باشد. |
| ۲ | علف هرز متحمل به علف‌کش | به حالت یا وضعیتی اطلاق می‌شود که تمامی افراد یک جمعیت علف‌هرزی توانایی زنده‌مانی در برابر کاربرد یک دوز کشنده از علف‌کشی را دارند که توانایی از بین بردن جمعیت‌های دیگر از جنس‌های دیگر آن گونه خاص و یا گونه‌های هم‌خانواده آن را دارند. توانایی ویژه این جمعیت علف‌هرزی می‌تواند خصوصیتی در سطح مولکولی، فیزولوژیک و یا مورفولوژیک باشد که از نسلی به نسل دیگر به ارث می‌رسد و فراگیر بودن آن در جمعیت، تحت تاثیر از بین رفتن افراد حساس جمعیت به دلیل تداخل مکانیسم‌های بیرونی مانند فشار انتخابی کاربرد علف‌کش‌ها و نهایتاً جایگزینی تدریجی آن‌ها با افراد دارای قدرت خاص زنده‌مانی ایجاد نشده است، بلکه این توانمندی به طور ذاتی در تمامی افراد جمعیت وجود داشته، دارد و خواهد داشت. |
| ۳ | محصول مقاوم به علف‌کش | به حالت یا وضعیتی اطلاق می‌شود که یک گیاه محصول از یک جنس و گونه خاص که پیش از این در برابر کاربرد یک دوز کشنده از یک علف‌کش معین توانایی زنده‌مانی نداشته است به طرقی از قبیل کاربرد جهش، دست‌ورزی ژنتیکی و غیره دارای قابلیت دوام‌آوری در برابر آن دوز کشنده از آن علف‌کش معین شده است. توانایی ایجاد شده در این گونه از محصولات به هر کدام از طرق ذکر شده قابلیت توارث در نسل‌های بعدی را ندارد. |
| ۴ | محصول متحمل به علف‌کش | به حالت یا وضعیتی اطلاق می‌شود که جنس و گونه‌ای خاص از یک گیاه محصول توانایی زنده‌ماندن در برابر کاربرد یک دز کشنده از علف‌کشی را دارد که توانایی از بین بردن جنس‌های دیگر آن گونه خاص و یا سایر گونه‌های هم‌خانواده آن را دارند. توانایی ویژه این جنس و گونه خاص می‌تواند خصوصیتی در سطح مولکولی، فیزولوژیک و یا مورفولوژیک باشد که از نسلی به نسل دیگر به ارث می‌رسد و وجود آن نیازمند تداخل مکانیسم‌های بیرونی مانند فشار انتخابی از طریق کاربرد علف‌کش‌ها نیست، بلکه این توانمندی به طور ماهوی در این جنس و گونه خاص وجود داشته، دارد و خواهد داشت. |

نگارنده به وضوح به محصولات متحمل به گلایفوسیت[1] اشاره می‌کند در حالی که مقصود این محقق محصولات مقاوم به گلایفوسیت است (۲۲). در مقاله دیگری با عنوان «Genetically Modified Herbicide-Tolerant Crops, Weeds, and Herbicides: Overview and Impact»، منتشر شده در نشریه Environmental management، در جایی که نگارنده می‌خواسته به محصولات مقاوم به علف‌کش که از طریق دست‌ورزی ژنتیکی ایجاد شده‌اند اشاره کند از عبارت «Genetically Modified Herbicide-Tolerant Crops» استفاده کرده است که در واقع اشاره به محصولات متحمل به علف‌کش دارد که از طریق مهندسی ژنتیک معرفی شده‌اند (۲۳). از این دست مثال‌ها که نشان دهنده کاربرد ناصحیح پدیده مقاومت به علف‌کش مابه‌ازای پدیده تحمل به علف‌کش است می‌توان به بسیاری از مقالات دیگر مانند مقاله «Engineering Herbicide Tolerance in Transgenic Plants» که در نشریه بسیار معتبر «Science» نشر یافته است و یا مقاله دیگری ذیل عنوان «for engineering Cytochromes P450 herbicide tolerance» منتشر شده در نشریه «Trends in plant science» اشاره کرد (۲۵-۲۴).

از این‌رو اهمیت آگاهی از تفاوت آشکار بین دو عارضه مقاومت به علف‌کش و تحمل به علف‌کش در سطوح مختلف افراد در جوامع مرتبط با کشاورزی کاملاً مشهود است و همین موضوع نگارندگان مقاله حاضر را بر آن داشت تا پس از تبیین تفاوت‌های میان این دو رخداد؛ مزایا، معایب، نگرانی‌های مرتبط و کاربردهای هر کدام از این دو پدیده را به طور مجزا مورد کنکاش قرار دهند.

## ابعاد مدیریتی و عملکردی مقاومت و تحمل به علف‌کش‌ها

پدیده مقاومت به علف‌کش از دو بعد کلی قابل بررسی است. نخست، بروز جمعیت علف‌های‌هرز مقاوم به علف‌کش که این عارضه مخرب و غیرسازنده می‌نماید. به بیان دیگر ظهور چنین پدیده‌ای نشانه‌ای از عدم کارآیی گزینه‌های علف‌کشی است که تاکنون موجبات مهار گونه‌هایی از علف‌های‌هرز را پدید می‌آورده‌اند (۲۹-۲۶). والش و پولس (۳۰) دریافتند که نمونه‌هایی از جمعیت‌های علف‌هرز تربچه وحشی[2] که دارای مقاومت از نوع چندگانه به علف‌کش‌هایی از

1. Glyphosate-resistant crops

2. *Raphanus raphanistrum*

خانواده‌های علف‌کش‌های شبه‌اکسینی[1]، بازدارنده‌های فتوسنتز (فتوسیستم II)[2] و بازدارنده‌های غیراشباع کننده فایتوئن[3] بودند از مزارعی واقع بر روی کمربند گندم در نواحی شمال‌غربی استرالیا جمع‌آوری شده بودند که در این نواحی هفده فصل زراعی پی‌درپی یک الگوی ثابت از تعدادی علف‌کش استفاده شده بود.. چاندی و همکاران (۳۱) بیان داشتند که چچم ایتالیایی[4] مقاوم به مزوسولفورون[5]، پینوکسادن[6]، ایمازامکس[7] و پیروکسولام[8] در مزارع گندم جنوب غربی ایالت کارولینای شمالی واقع در نواحی شرقی کشور ایالات متحده به شدت گسترش یافته است. داویس و همکاران (۳۲) نخستین گزارش از مقاومت گونه‌ای از برروموس[9] به علف‌کش گلایفوسیت را ارائه نمودند. این محققین دریافتند که جمعیت‌های مشکوک به مقاومت در برابر علف‌کش گلایفوسیت (۵۴۰ گرم ماده موثره در هکتار) تنها حدود ۲۱ تا ۳۰ درصد مهار خواهند شد. در ایران نیز نخستین گزارش از بروز جمعیت‌های علف‌هرز مقاوم به علف‌کش در سال ۲۰۰۴ توسط زند و همکاران ارائه شد (۳۳). طی این پژوهش وجود جمعیت‌های علف‌هرز مقاوم به برخی علف‌کش‌های متعلق به خانواده‌های شیمیایی پیریدازینون[10]، فنیل–کاربامات[11] و تیوکاربامات‌ها[12] در چغندرقند گزارش شد. مین‌باشی معینی و همکاران (۳۴) گزارش نمودند که چند گونه علف‌هرزی شامل خونی‌واش[13]، یولاف وحشی[14] و چچم در برابر کاربرد دزهای توصیه شده چندین علف‌کش از خانواده بازدارنده سنتز استیل کوآنزیم آ کربوکسیلاز[15] مقاومت بروز داده و مهار نمی‌شوند. همچنین ساسانفر و همکاران (۳۵) مقاومت چندگانه را در علف‌هرز یولاف وحشی زمستانه[16] در برابر دزهای توصیه شده علف‌کش‌های دایکلوفوپ‌متیل، فنوکساپروپ‌اتیل و کلودینافوپ پروپارژیل[17] گزارش نمودند. بنابراین رخداد ظهور جمعیت‌های علف‌هرز مقاوم به علف‌کش، عرصه‌های زراعی و باغی را به چالش کشیده و موجب می‌شود که به تدریج پایداری نظام‌های تولید محصولات کشاورزی به دلیل قابلیت گسترش جهانی عارضه مقاومت به یک یا چند علف‌کش در گونه‌های علف‌هرز با تهدیدات جدی و چالش‌های جبران‌ناپذیری مواجه شود. از طرف دیگر بروز پدیده مقاومت به علف‌کش در جمعیت‌های علف‌هرز سبب هدر رفت هزینه‌های قابل توجهی در ارتباط با سموم علف‌کشی که پس از آن کارآیی خود را از دست داده‌اند شده و زمینه را برای هزینه کرد مبالغ بیشتر به منظور توسعه و معرفی گزینه‌های جایگزین می‌گشاید (۳۷–۳۶). اما نگاه دومی که می‌توان به پدیده مقاومت به علف‌کش داشت، زمانی است که این صفت در قالب یک گونه تجاری از محصولات بروز می‌یابد (۴۰–۳۸). محصولات مقاوم به علف‌کش که به طور عمده مبتنی بر مسیرهای اصلاحی مدرن با استفاده از تکنیک‌های بیوتکنولوژیک طی دهه‌های اخیر عرضه شده‌اند در کنار نقش بسیار قابل توجهی که در افزایش تولید محصولات با قیمت‌های مقرون به صرفه داشته‌اند موجبات ایجاد نگرانی‌های به‌جا و گاهاً نابجایی در جوامع بشری شده‌اند (۴۴–۴۱). از آن‌جایی که توسعه چنین ارقام تجاری معمولاً و در قاطبه موارد با انتقال یک ژن نامرتبط به گیاه هدف صورت می‌گیرد نگرانی‌های عدیده‌ای را سبب شده است. شار ژنی از جمله مواردی است که می‌تواند نگرانی صحیح و قابل اعتنایی در ارتباط با آن دسته از ارقام تجاری مقاوم به علف‌کش باشد که از طریق دست‌ورزی ژنتیکی ایجاد شده‌اند. رخداد شار ژنی که در واقع انتقال ژن مقاومت از گیاه دست‌ورزی شده به گونه‌های علف‌هرز با قرابت با آن محصول می‌باشد، در واقع می‌تواند زمینه بروز و توسعه گونه‌های اَبَر علف‌هرز را فراهم آورد که خود سبب به خطر افتادن تولید محصولات کشاورزی در سطحی بسیار بالا خواهد شد (۴۶–۴۵). شار ژنی مهم‌ترین خطر ناشی از محصولات تراریخته است و به سه نوع طبقه بندی می‌شود: درون‌گونه‌ای، بین‌گونه‌ای و بین محصولات تراریخته. البته شار ژنی در خود طبیعت جزئی از [جریان پیوسته و سازگار شونده] تغییرات تکاملی محسوب می‌شود، اما چون در مورد گیاهان تراریخته مقاوم به علف‌کش این تغییر در بستر فرآیندی غیر از روال طبیعی به وقوع می‌پیوندد، انتقال آن ژن هدف نیز به صورتی غیرطبیعی با احتمال بالا رخ خواهد داد (۴۷). یکی از نگران کننده‌ترین گیاهان زراعی در رابطه با شار ژنی، کلزا است که دارای نرخ دگرگشنی بالا بوده و تنوع گونه‌های خویشاوند قابل توجهی دارد. در مقابل، تواتر شار ژنی از طریق دگرگشنی در غلاتی مانند برنج، گندم و جو نسبتاً کم است، اما همچنان بروز شار ژنی امکان‌پذیر خواهد بود (۴۷). یکی دیگر از خطرات احتمالی و فوری در ارتباط با محصولات تراریخته مقاوم به علف‌کش‌ها، بروز علف‌های‌هرز داوطلب در کشت‌های بعدی است (۴۹–۴۸). به واقع با توسعه ارقام تجاری از محصولات مختلف مانند کلزا، جو، ذرت، پنبه، سویا، برنج و سایر محصولاتی از این دست که دارای مقاومت چندگانه به طیفی از علف‌کش‌های متنوع دارای نحوه عمل متفاوت هستند، زمینه برای تبدیل شدن آن‌ها به یک علف‌هرز بالقوه در زراعت‌های بعدی تحت عنوان علف‌های‌هرز

1. Auxin-like herbicides
2. Photosystem II
3. Phytoene desaturase (PDS)–inhibitors
4. *Lolium multiflorum*
5. Mesosulfuron
6. Pinoxaden
7. Imazamox
8. Pyroxulam
9. *Bromus sterilis*
10. Pyridazinone
11. Phenyl carbamate
12. Thiocarbamate
13. *Phalaris minor*
14. *Avena fatua*
15. Acetyl-CoA carboxylase (ACCase) synthesis inhibitors
16. *Avena ludoviciana*
17. Clodinafop-propargyl

داوطلب طی یک برنامه تناوب زراعی را به شدت پدید آورده است (۴۹). در نواحی شمالی ایالات متحده به دلیل توانایی بسیار بالای زنده‌مانی گیاهچه‌های باقی مانده کلزا از کشت‌های پیشین، ریزش بذر در حین یا پیش از برداشت محصول کلزا و خصوصیت خواب بذر ثانویه در ارقام تجاری مقاوم به علف‌کش کلزا، نهایتاً گیاهچه‌های کلزا می‌توانند در کشت‌های بعدی در تناوب مانند کتان و نخودفرنگی تداخل بسیار مخربی را ایجاد کنند (۴۹). اگرچه در بسیاری از کشورها در سطح جهان نگرانی‌های دیگری از جنس آسیب به سلامت انسان‌ها به موجب استفاده از محصولات دست‌ورزی شده ژنتیکی مطرح شده است اما هیچ‌کدام از این دست ادعاها تا کنون به صورت علمی ثابت نشده و بیشتر در سطح ادعا باقی مانده‌اند (۵۰). در نگاه عمومی، محصولات مقاوم به علف‌کش به دو دلیل مشکل ساز هستند: مهندسی ژنتیک جهت ایجاد این گونه از محصولات و استفاده از علف‌کش‌ها به میزان بیشتر نسبت به محصولات غیرمقاوم. در حقیقت این دو رویه سبب القاء میزان خطر قابل توجه در استفاده از این دست محصولات شده است. به بیان دیگر، این نگرانی در کسر قابل ملاحظه‌ای از مردم وجود دارد که خطرات استفاده از این گونه محصولات بر سودمندی کاربرد آن‌ها غلبه کند. همچنین استفاده از محصولات تراریخته ممکن است مسیر صحیحی جهت تثبیت کشاورزی پایدار نباشد از آن جهت که احتمالاً حق افراد برای انتخاب محصولات غیرتراریخته نقض خواهد شد. اگرچه باز هم تاکید می‌گردد همچنان قطعیت علمی در ارزیابی ریسک به‌کارگیری این گونه از محصولات قابل اتکا و ارجاع نیست (۵۴-۵۱). همچنین در مورد ادعای افزایش مصرف برخی از سموم علف‌کش مانند گلایفوسیت به سبب گسترش معرفی محصولات مقاوم به این ترکیب شیمیایی با استناد به آمارها به هیچ وجه نمی‌توان به چنین موردی به صورت جدی اعتنا نمود (۴۰، ۵۵ و ۵۶).

در ارتباط با پدیده تحمل به علف‌کش، موضوع در مقایسه با محصولات مقاوم به علف‌کش بسیار متفاوت است به نحوی که اصولاً بروز چنین عارضه‌ای اگر در ارتباط با جمعیت علف‌های‌هرز حادث شود نمی‌تواند به معنی ایجاد خلل در روندهای تولید محصول تلقی گردد. به عبارت دیگر، زمانی که تمامی اعضای جمعیت یک گونه علف‌هرز، سطحی از تحمل به یک گزینه علف‌کشی دارند، اصولاً آن علف‌کش از ابتدا در لیست مهارکننده‌های آن گونه قرار نخواهد گرفت و در نتیجه عدم مهار به کمک آن موجب ایجاد زیان اقتصادی -ازجمله با کاهش تولید محصول یا از دست رفتن یک گزینه شیمیایی- نخواهد شد. از طرف دیگر، اگر چنین عارضه‌ای در ارتباط با یک رقم تجاری و یا حتی در مورد یک رقم غیرتجاری از محصولات وجود داشته باشد، در حقیقت به مثابه یک مزیت بسیار ارزشمند تلقی خواهد شد. به عنوان مثال، زنگوئی نژاد و همکاران (۵۷) طی آزمایش‌های گلخانه‌ای و مزرعه‌ای نشان دادند که سه اکسشن وحشی گوجه‌فرنگی به نام‌های TOM199، TOM198 و TOM300 در برابر کاربرد دوز پراکنش[1] علف-کش دایکمبا[2] به میزان ۳ گرم از ماده موثره در هکتار صفت تحمل را بروز می‌دهند. نتایج این پژوهش نشان داد که این سه اکسشن وحشی گوجه‌فرنگی پس از تیمار با علف‌کش دایکمبا در دوز پراکنش کمتر از ۱۵ درصد دچار خسارت ظاهری شدند (۵۷). همچنین در مقایسه با دو رقم تجاری Better boy و Money maker به عنوان ارقام کاملاً حساس در برابر دوز پراکنش علف‌کش دایکمبا وضعیت جابجایی علف‌کش[3] در اکسشن‌های وحشی هیچ تفاوت معنی‌داری نداشت اگرچه میزان جذب در ارقام تجاری حساس به مراتب بیشتر از اکسشن‌های وحشی بود (۵۸). این محققان با توسعه آزمایشات، نتیجه گرفتند که یکی از دلایل میزان جذب کمتر سه اکسشن متحمل به دایکمبا به دلیل ویژگی‌های مرفولوژیک برگ‌های آن‌ها بوده است، به نحوی که اکسشن‌های وحشی دارای برگ‌های باریک‌تر با تراکم بالاتر کرک[4] در سطح برگ هستند (۵۸). در ضمن مطالعات با استفاده از نشانگرهای SSR[5] جهت بررسی دلایل بروز تحمل به علف‌کش دایکمبا در سطح مولوکلی نشان داد که احتمالاً این صفت در اکسشن‌های وحشی مورد مطالعه در ارتباط با یک ژن بیان شونده تحت تاثیر تنش خشکی به نام *1e16* است. علاوه بر این مشخص شد که بیان ژن *TIR1* از مجموعه ژن‌های F-box AFB/TIR1 در چهار بازه زمانی ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ساعت پس از تیمار علف‌کش در ارقام تجاری حساس در مقایسه با اکسشن‌های متحمل به طور معنی‌داری بیشتر بود (۵۹). این در حالی بود که در بیان دو ژن *AFB1* و *AFB2* تفاوت معنی‌داری میان اکسشن‌های وحشی و ارقام تجاری مشاهده نشد (۵۹). بررسی واکنش برخی اکسشن‌های وحشی خربزه‌های ایرانی به سه دز پراکنش شبیه‌سازی شده علف‌کش توفوردی شامل ۳/۷، ۱۱/۲ و ۱۱۲/۱ گرم ماده موثره در هکتار طی یک آزمایش دو ساله مزرعه‌ای مشخص نمود که اکسشن MEL-R1 با ثبت ۲۰ درصد خسارت ظاهری متحمل‌ترین و اکسشن MEL-D8 با ۹۰ درصد خسارت ظاهری حساس‌ترین اکسشن‌های مطالعه شده ۶ هفته پس از تیمار علف‌کش در سال ۲۰۱۹ بودند (۶۰). اما در سال ۲۰۲۰، ۶ هفته پس از تیمار علف‌کش توفوردی[6]، اکسشن MEL-S3 تنها ۲۰ درصد خسارت ظاهری را نشان داد و تفاوت معنی‌داری از این لحاظ با اکسشن MEL-R1 نداشت. ضمناً تنها اکسشن‌های MEL-R1 و MEL-S3 پس از اعمال علف‌کش توفوردی در دز ۱۱۲/۱ گرم در هکتار توانستند تولید

1. Drift dose
2. Dicamba
3. Herbicide translocation
4. Trichome
5. Simple Sequence Repeat/ STR (Simple Tandem Repeat)
6. 2,4-D

محصول را ثبت نمایند (۶۰). ماسیوناس (۶۱) تحمل برخی از ارقام گوجه‌فرنگی به علف‌کش ای‌سی فلورفن[1] پس از سبز شدن را طی آزمایش‌های گلخانه‌ای و مزرعه‌ای مورد بررسی قرار داد. در آزمایشات گلخانه‌ای ارقام Carmen, Petopride 2 و Heinz 1350 در مقابل کاربرد علف‌کش ای‌سی فلورفن (۱/۱ کیلوگرم ماده موثره در هکتار) متحمل بوده در حالی که ارقام Advantage و Red Plum حساس بودند. در آزمایشات مزرعه‌ای ارقام Heinz ۱۳۵۰ و Veeroma در برابر کاربرد علف‌کش ای‌سی فلورفن صفت تحمل را بروز دادند اما دو رقم Advantage و Red Plum کاملاً حساس بودند (۶۱). همچنین دیتمار و همکاران (۶۲) با انجام مطالعات گلخانه‌ای و مزرعه‌ای دریافتند که رقم تجاری گوجه‌فرنگی Amelia در برابر کاربرد خاک مصرف (از طریق سیستم آبیاری قطره‌ای) و پس‌رویشی علف‌کش‌های هالوسولفورون[2] (۱۳ گرم ماده موثره در هکتار)، ایمازوسولفورون[3] (۱۱۲ گرم ماده موثره در هکتار) و تری‌فلوکسی‌سولفورون[4] (۵ گرم ماده موثره در هکتار) متحمل است. علاوه بر این، دیتمار و همکاران (۶۳) نشان دادند که یک رقم تجاری فلفل دلمه، Heritage، توانایی بروز صفت تحمل در مقابل کاربرد خاک‌مصرف علف‌کش‌های هالوسولفورون (۱۳ گرم ماده موثره در هکتار)، ایمازوسولفورون (۱۱۲ گرم ماده موثره در هکتار) و تری‌فلوکسی‌سولفورون (۵ گرم ماده موثره در هکتار) به صورت پس‌رویشی هدایت شده[5] را دارد به طوری که به لحاظ عملکرد نهایی تولید محصول تفاوت معنی‌داری با کرت‌های شاهد مشاهده نشد. چنان که ذکر شد، تهدید شار ژنی که در مورد گیاهان مقاوم شده به علف‌کش‌ها با استفاده از تکنیک‌های مهندسی ژنتیک می‌تواند رخ دهد، در ارتباط با گیاهان متحمل به علف‌کش‌ها یا رخ نخواهد داد و یا احتمال بروز آن در بستر روندهای تکاملی طبیعی بسیار ناچیز خواهد بود. نتیجتاً ایجاد گونه‌های اَبَر علف‌هرز به دلیل به‌کارگیری ارقام تجاری متحمل به علف‌کش به میزان بسیار قابل توجهی در مقایسه با ارقام تجاری مقاوم به علف‌کش کاهش می‌یابد. همچنین به طور مطلق نگرانی‌های زیست‌محیطی و یا در ارتباط با سلامتی نوع بشر به دلیل مصرف چنین محصولاتی تحقیقاً در دامنه ناچیز تا صفر قرار خواهد گرفت زیرا هیچ‌گونه دست‌ورزی ژنتیکی در معرفی و توسعه چنین ارقامی دخیل نمی‌باشد.

بنابراین به وضوح می‌توان نتیجه گرفت که ظهور چنین پدیده‌ای در ارتباط با محصولات در حقیقت یک فرصت استثنایی و یک مزیت بسیار ارزشمند جهت بهبود و بلکه گسترش دادن راهبردهای مدیریت علف‌های‌هرز، بدون هزینه‌کرد مبالغ هنگفت جهت معرفی محصولات مقاوم به علف‌کش و عدم ایجاد نگرانی‌های زیست‌محیطی از هر نوعی است. لذا بر خلاف پدیده مقاومت به علف‌کش که چه در عرصه‌های کشاورزی و در بستر زمان به دلیل ایجاد فشار انتخابی به سبب مصرف مداوم یک علف‌کش خاص و یا مصرف علف‌کش‌هایی با نحوه عمل یکسان ایجاد شده باشد و چه از طریق به کارگیری تکنیک‌های اصلاحی کلاسیک و مدرن بروز یافته باشد، می‌تواند منشائ نگرانی‌های متعددی باشد، عارضه تحمل به علف‌کش در هیچ کدام از ابعاد خود حساسیت برانگیز نبوده و ایجاد کننده نقصان در نظام‌های کشاورزی در سطح جهان نخواهد بود.

## فرصت‌ها و دورنمای
## کاربردهای مقاومت و تحمل به علف‌کش‌ها

«طی ۵۰ سال آینده، کشاورزان و دامداران جهان برای تولید بیشتر مواد غذایی در مقایسه با حجم تولید انجام شده طی ۱۰۰۰۰ سال گذشته فراخوانده خواهند شد و شکل گرفتن این فرآیند می‌بایست با تکیه بر راهکارهای سازگار با محیط زیست صورت پذیرد.» نورمن بورلاگ، پدر انقلاب سبز طی نامه‌ای در سال ۲۰۰۸ خطاب به مجلس سنای ایالات متحده از محصولات مقاوم به علف‌کش‌ها حمایت کرد، زیرا از نظر این دانشمند ضمن افزایش تقاضا برای مواد غذایی هر چه بیشتر در سالیان پیش‌رو به دلیل محدود بودن منابع، این میزان تولید می‌باید در کنار حفظ منابع طبیعی انجام پذیرد. به بیان دیگر ایشان حتی علی‌رغم تمامی انتقادات و نگرانی‌ها در ارتباط با محصولات مقاوم به علف‌کش، به‌کارگیری چنین ارقامی را معقول و لازم می‌دانسته است (۴۰).

پدیده مقاومت طی بیش از سه دهه گذشته به خوبی معایب و مزایای خود را نشان داده است، گسترش جمعیت علف‌های‌هرز سخت مهار تا غیرقابل مهار و گسترش روزافزون طیفی از نگرانی‌های زیست محیطی به دلیل استفاده از ارقام تجاری مقاوم شده به برخی از علف‌کش‌ها در زمره معایب این رخداد قابل دسته‌بندی هستند. از سوی دیگر افزایش تولید محصولات مقرون به صرفه در ضمن کاهش مقدار مصرف علف‌کش‌ها از مزایای به کارگیری محصولات مقاوم به علف‌کش‌ها است، اگرچه هزینه اولیه توسعه این دست از محصولات ممکن است در برخی از موارد پیشبرد چنین پروژه‌هایی را با چالش‌های جدی روبرو سازد (۴۰).

اما در مورد پدیده تحمل به علف‌کش تا لحظه نگارش مقاله جاری به گواه استناد به تحقیقات انجام شده طی سالیان گذشته می‌توان با قطعیت گفت که به هیچ عنوان از پتانسیل این فرآیند طبیعی در هیچ کدام از عرصه‌های کشاورزی به شایستگی بهره‌برداری نشده است. وجود صفت تحمل به یک یا چند علف‌کش در یک گونه گیاهی به ویژه در مورد گیاهان زراعی و باغی می‌تواند سبب تسهیل فرآیند

1. Acifluorfen
2. Halosulfuron
3. Imazosulfuron
4. Trifloxysulfuron
5. Directed post-emergence

تولید در بخش کشاورزی و البته صورت دادن گستره‌ای از امور مهم دیگر در بخش‌های غیرکشاورزی شود. در گام نخست، انجام تست‌های غربالگری با استفاده از آزمایشات دز–پاسخ[1] در ارتباط با ارقام تجاری و در مرحله بعد ارقام بومی غیرتجاری می‌تواند اطلاعات بسیار ارزشمندی در مورد وجود گونه‌های متحمل به علف‌کش‌ها را به دست دهد (۶۳–۵۸). در صورتی که احیاناً ارقام تجاری صفت تحمل را بروز دهند، رویداد بسیار قابل اعتنایی خواهد بود. اما اگر صفت تحمل در ارقام غیرتجاری تشخیص داده شود در مراحل بعد می‌توان نه فقط با استفاده از روش‌های اصلاح مدرن[2] بلکه حتی با تکیه بر راهبردهای اصلاحی کلاسیک نیز مسیر را جهت معرفی ارقام تجاری توانمند در بروز صفت تحمل به علف‌کش‌ها هموار نمود. این مورد به دو دلیل بسیار عمده حائز اهمیت ویژه است؛ ابتدا این‌که توسعه ارقام تجاری از این طریق با هزینه‌های ناچیز امکان‌پذیر خواهد بود و همچنین نگرانی‌های ثانویه از هر لحاظ مانند شار ژنی، ایجاد بیماری در مصرف‌کننده‌ها و غیره را از بین خواهد رفت. به واقع چنین رخدادی در هر کدام از محصولات زراعی یا باغی می‌تواند فرصت‌های بی‌نظیری جهت تولید محصولات اقتصادی‌تر، سالم‌تر و کم–خطرتر از هر لحاظ را در سطح جهان پدید آورد.

از طرف دیگر بایستی توجه داشت، گونه‌های گیاهی با توانایی مقاومت در مقابل کاربرد برخی از علف‌کش‌ها، معمولاً می‌توانند با بروز صفات دیگری که مسیر را جهت تولید محصولات کشاورزی تسهیل کنند نیز نقش داشته باشند (۶۵–۶۴). دلیل این مهم وجود پیوستگی بین صفات این‌چنینی می‌باشد (۶۷–۶۶). بنابراین غربال نمودن اکسشن‌های وحشی، ارقام استاندارد و یا حتی ارقام تجاری می‌تواند زمینه‌ساز امکانات مناسبی جهت مدیریت تنش‌های رو به رشد غیرزیستی[3] مانند شوری منابع آب و خاک، همچنین تنش‌های دما و رطوبت ناشی از گسترش تغییرات اقلیمی و البته تنش‌های زیستی[4] مانند حساسیت به طیفی از آفات متنوع باشد. به بیان دیگر، از آن‌جایی که نخستین گام در برخورد با تنش‌های زنده و غیرزنده بهره‌گیری از ارقام متحمل به آن‌ها است، دسترسی داشتن به منبعی گسترده از ذخایر ژنتیکی کمک شایانی به مدیریت تسهیل شده‌تر و به صرفه‌تر چنین تنش‌هایی می‌باشد (۶۹–۶۸).

از طرف دیگر بین پیوستگی صفات مختلف یک رابطه دو طرفه وجود دارد، به این معنی که ممکن است اکسشن‌ها یا ارقامی که حتی به سایر تنش‌های غیرزنده یا زنده متحمل هستند، هم‌زمان صفت تحمل به یک یا چند علف‌کش را نیز بروز دهند (۷۲–۷۰). تقریباً در میان تمامی پایان‌نامه‌های دانشجویی که توسط دانشجویان رشته علوم‌علف‌های‌هرز در سطح ایران به انجام رسیده است، هیچ پایان‌نامه دانشجویی در زمینه گونه‌های گیاهی متحمل به علف‌کش صورت نگرفته است. همین مورد نشان می‌دهد که این شاخه مهم از علم علف‌های هرز اساساً به طور کامل مغفول مانده، از ظرفیت عظیم موجود در ذخایر ژنتیکی گیاهان کشور اعم از علف‌های‌هرز و محصولات کشاورزی از این بابت استفاده نشده است. ضمناً می‌بایست توجه داشت که اگرچه مطالعه گونه‌هایی گیاهی متحمل به علف‌کش‌ها به طور کلی از نظر دور مانده است اما در زمینه بررسی ارقام گیاهی متحمل به شوری و خشکی تحقیقات گسترده‌ای در سطوح مختلف در کشور انجام شده است (۸۲–۷۳). همین موضوع نشان می‌دهد که اگرچه اهمیت ارقام متحمل به تنش‌های غیرزنده در سطح کشور طی سالیان گذشته درک شده است اما متاسفانه در ارتباط با تحمل به علف‌کش‌ها تا کنون رویداد مثبتی رخ نداده است.

## نتیجه‌گیری

اگرچه کشوری مانند ایران، با تنوع گسترده آب و هوایی و دارا بودن شمار گونه‌های گیاهی بومی قابل اعتنا، در واقع یک مخزن عظیم از تنوع ژنتیکی جهت توسعه دادن ارقام تجاری متحمل به طیفی از علف‌کش‌ها طی یک مسیر تسهیل شده می‌باشد، اما تا کنون تحقیقاً هیچ تلاش عملی جهت سامان‌دهی به چنین امر لازم و ضروری صورت نگرفته است. به بیان دیگر، در حالی که دسترسی کشور ایران به تکنولوژی‌های پیشرو در تولید بذر و دامنه قابل توجهی از ارقام تجاری به دلیل تنش‌های سیاسی، تحت لوای قوانین غیرعادلانه مختلف در سطح جهان محدود شده است، تا لحظه نگارش مقاله جاری هیچ گونه تلاش عملی به منظور معرفی ارقام تجاری متحمل به علف‌کش‌ها با استفاده تنوع ژنتیکی گیاهی موجود در سطح کشور صورت نپذیرفته است.

البته باید توجه داشت که در چند دهه گذشته مطالعات گسترده‌ای در ارتباط با ارقام متحمل به شوری و خشکی صورت گرفته است و حجم عظیمی از پایان‌نامه‌های دانشجویی نیز در ارتباط با این دو موضوع شکل گرفته است. اما چنان‌که ذکر شد در مورد ارقام متحمل به علف‌کش تقریباً هیچ گونه مطالعه‌ای رخ نداده است. بنابراین همین موضوع نشان می‌دهد که اهمیت ارقام گیاهی ذاتاً متحمل به نوعی از تنش‌های غیرزنده (و یا حتی زنده) درک شده است، لیکن در مورد گونه‌های متحمل به علف‌کش فعالیت تحقیقاتی چندانی صورت نگرفته است.

از این‌رو، ایجاد یک برنامه مطالعاتی جدی و پیشروانه در سطح مراکز دانشگاهی و تحقیقاتی از یک طرف و از سوی دیگر راه‌اندازی یک بانک از ذخایر ژنتیکی گیاهی دارای صفت تحمل به یک یا چند علف‌کش می‌تواند زمینه‌ساز پیشرفت قابل توجهی در مسیر معرفی و توسعه ارقام تجاری متحمل به علف‌کش در سطح

1. Dose–Response Experiments
2. Modern breeding approaches
3. Abiotic stresses
4. Biotic stresses

کشور باشد. شایان ذکر است که در سطح جهان شرکت‌های مطرح در زمینه تولید بذر همواره در هر زمان و مکان به دنبال گردآوری چنین منابع ژنتیکی به منظور تسهیل معرفی ارقام تجاری متحمل به علف‌کش‌ها می‌باشند. لذا فراهم‌آوری چنین منابع ژنتیکی علاوه بر ایجاد و تسهیل زمینه تولید ارقام متحمل به علف‌کش، می‌تواند منبع مناسبی جهت ارزآوری- در صورت ارائه آن‌ها به عنوان منبع خام ژنتیکی اولیه- در بازارهای جهانی باشد. در مجموع شکل‌گیری، تثبیت و تحکیم رویکردی متفاوت به پدیده تحمل به علف‌کش فراتر از پدیده مقاومت به علف‌کش می‌تواند تحول قابل ملاحظه‌ای را در عرصه‌های مختلف کشاورزی کشور ایجاد نماید.

## منابع


1. [WSSA] Weed Science Society of America. (1998). Herbicide resistance and herbicide tolerance defined. *Weed Technology*, 12,789-790.
2. Cheng, X., Li, H., Tang, Q., Zhang, H., Liu, T., & Wang, Y. (2024). Trends in the global commercialization of genetically modified crops in 2023. *Journal of Integrative Agriculture*, 23(12),3943-3952.
3. Monitor, G. A. (2024). *Global GM Crop Area 2023 Review*.
4. Holt, J. S., Powles, S. B., & Holtum, J. A. (1993). Mechanisms and agronomic aspects of herbicide resistance. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 44(1),203-229.
5. Gressel, J. (2009). Evolving understanding of the evolution of herbicide resistance. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science,* 65(11),1164-1173.
6. Délye, C., Duhoux, A., Pernin, F., Riggins, C. W., & Tranel, P. J. (2015). Molecular mechanisms of herbicide resistance. *Weed Science*, 63(SP1), 91-115.
7. Délye, C., Jasieniuk, M., & Le Corre, V. (2013). Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds. *Trends in Genetics*, 29(11),649-658.
8. Yuan, J. S., Tranel, P. J., & Stewart, C. N. (2007). Non-target-site herbicide resistance: a family business. *Trends in Plant Science*, 12(1),6-13.
9. Yang, Q., Deng, W., Li, X., Yu, Q., Bai, L., & Zheng, M. (2016). Target-site and non-target-site based resistance to the herbicide tribenuron-methyl in flixweed (Descurainia sophia L.). *BMC Genomics*, 17,1-13.
10. Rey-Caballero, J., Menéndez, J., Osuna, M. D., Salas, M., & Torra, J. (2017). Target-site and non-target-site resistance mechanisms to ALS inhibiting herbicides in Papaver rhoeas. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 138,65-57.
11. Jugulam, M., & Shyam, C. (2019). Non-target-site resistance to herbicides: recent developments. *Plants*, 8(10),417.
12. Beckie, H. J. (2020). Herbicide resistance in plants. *Plants*, 9(4),435.
13. Gaines, T. A., Duke, S. O., Morran, S., Rigon, C. A., Tranel, P. J., Küpper, A., & Dayan, F. E. (2020). Mechanisms of evolved herbicide resistance. *Journal of Biological Chemistry*, 295(30),10307-10330.
14. Travlos, I., de Prado, R., Chachalis, D., & Bilalis, D. J. (2020). Herbicide resistance in weeds: Early detection, mechanisms, dispersal, new insights and management issues. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8 ,213.
15. Matzrafi, M., Peleg, Z., & Lati, R. (2021). Herbicide resistance in weed management. *Agronomy*, 11(2),280.
16. Leon, R. G., Dunne, J. C., & Gould, F. (2021). The role of population and quantitative genetics and modern sequencing technologies to understand evolved herbicide resistance and weed fitness. *Pest Management Science,* 77(1),12-21.
17. Dong, H., Huang, Y., & Wang, K. (2021). The development of herbicide resistance crop plants using CRISPR/Cas-۹mediated gene editing. *Genes*, 12(6), 912.
18. Bourdineaud, J. P. (2022). Toxicity of the herbicides used on herbicide-tolerant crops, and societal consequences of their use in France. *Drug and Chemical Toxicology*, 45(2), 698-721.
19. Gosavi, G., Ren, B., Li, X., Zhou, X., Spetz, C., & Zhou, H. (2022). A new era in herbicide-tolerant crops development by targeted genome editing. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(2),184-191.
20. Jin, M., Chen, L., Deng, X. W., & Tang, X. (2022). Development of herbicide resistance genes and their application in rice. *The Crop Journal*, 10(1), 26-35.

21. Ofosu, R., Agyemang, E. D., Márton, A., Pásztor, G., Taller, J., & Kazinczi, G. (2023). Herbicide resistance: Managing weeds in a changing world. *Agronomy*, 13(6),1595.

22. Shaner, D. L. (2000). The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 56(4),320-326.

23. Bonny, S. (2016). Genetically modified herbicide-tolerant crops, weeds, and herbicides: overview and impact. *Environmental management*, 57(1),31-48.

24. Shah, D. M., Horsch, R. B., Klee, H. J., Kishore, G. M., Winter, J. A., Tumer, N. E., ... & Fraley, R. T. (1986). Engineering herbicide tolerance in transgenic plants. *Science*, 233(4762),478-481.

25. Werck-Reichhart, D., Hehn, A., & Didierjean, L. (2000). Cytochromes P450 for engineering herbicide tolerance. *Trends in plant science*, 5(3),116-123.

26. Lee, L. J., & Ngim, J. (2000). A first report of glyphosate-resistant goosegrass (Eleusine indica (L) Gaertn) in Malaysia. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 56(4),336-339.

27. Francischini, A. C., Constantin, J., Oliveira Jr, R. S., Santos, G., Braz, G. B. P., & Dan, H. A. (2014). First report of Amaranthus viridis resistance to herbicides. *Planta Daninha*, 32 ,571-578.

28. Marchesi, C., & Saldain, N. E. (2019). First report of herbicide-resistant Echinochloa crus-galli in Uruguayan rice fields. *Agronomy*, 9(12),790.

29. Papapanagiotou, A. P., Abichou, A., Spanos, T., Livieratos, I., Menexes, G., Vasilakoglou, I., & Eleftherohorinos,I. G. (2025). Acetyl-CoA carboxylase herbicide resistance and fitness of spring milletgrass (Milium vernale) populations infesting winter cereal monoculture in Greece. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 53(1),14325.

30. Walsh, M. J., Powles, S. B., Beard, B. R., Parkin, B. T., & Porter, S. A. (2004). Multiple-herbicide resistance across four modes of action in wild radish (*Raphanus raphanistrum*). *Weed Science*, 52(1),8-13.

31. Chandi, A., York, A. C., Jordan, D. L., & Beam, J. B. (2011). Resistance to acetolactate synthase and acetyl Co-A carboxylase inhibitors in North Carolina Italian ryegrass (*Lolium perenne*). *Weed Technology*, 25(4) 659-666

32. Davies, L. R., Hull, R., Moss, S., & Neve, P. (2019). The first cases of evolving glyphosate resistance in UK poverty brome (*Bromus sterilis*) populations. *Weed Science*, 67(1),41-47.

33. Zand, E., Bazu Bandi, M., Fereydun Pur, M., Maknali, A., Hatami, S., Partovi, M., ... & Jamshidi, S. (2004). Investigation Of Resistance To Some Herbicides Of Pyridazinone, Phenyl-Carbamate And Thiocarbamates In Weeds Of Sugar Beet Fields And Efficacy Of The Localand Original Formulations.

34. Minbashi Moeini M, Baghestani MA, Ahmadi A, Abtali Y, Esfandiari H, Adim H, et al. (2008) Analytical approach to weed management of irrigated wheat fields of Iran. In: Proceedings of the 2nd National Weed Science Congress (Mashhad, Iran, 29–30 January 2008). Ferdowsi University of Mashhad Press, Mashhad, Iran, 1–28.

۳۵. حمیدرضا ساسان فر، اسکندر زند، محمدعلی باغستانی و محمدجواد میرهادی. (۲۰۰۹). بررسی مقاومت توده‌های علف هرز یولاف وحشی (*Avena ludoviciana*) به علف‌کش کلودینافوپ پروپارژیل در استان فارس. *فصلنامه علوم محیطی*، ۱۱۸-۱۰۹، (۱)۷.

36. Jabran, K., & Chauhan, B. S. (2015). Weed management in aerobic rice systems. *Crop Protection*,78,151-173.

37. Bourguet, D., & Guillemaud, T. (2016). The hidden and external costs of pesticide use. Sustainable Agriculture Reviews, (19), 35-120.

38. Green, J. M. (2007). Review of glyphosate and ALS-inhibiting herbicide crop resistance and resistant weed management. *Weed Technology*, 21(2),547-558.

39. Green, J. M., & Owen, M. D. (2011). Herbicide-resistant crops: utilities and limitations for herbicide-resistant weed management. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(111),5819-5829.

40. Green, J. M. (2012). The benefits of herbicide-resistant crops. *Pest Management Science*, 68(10),1323-1331.

41. Dale, P. J. (1999). Public concerns over transgenic crops. *Genome Research*, 9(12),1159-1162.

42. König, A. (2003). A framework for designing transgenic crops—science, safety and citizen›s concerns. *Nature Biotechnology*, 21(11),1274-1279.

43. Rani, S. J., & Usha, R. (2013). Transgenic plants: Types, benefits, public concerns and future. *Journal of Pharmacy Research*, 6(8),879-883.
44. Ricroch, A. E., Guillaume-Hofnung, M., & Kuntz, M. (2018). The ethical concerns about transgenic crops. *Biochemical Journal*, 475(4),803-811.
45. Beckie, H. J., Warwick, S. I., Nair, H., & Séguin-Swartz, G. (2003). Gene flow in commercial fields of herbicide-resistant canola (Brassica napus). *Ecological Applications*, 13(5),1276-1294.
46. Mallory-Smith, C., & Zapiola, M. (2008). Gene flow from glyphosate-resistant crops. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 64(4),428-440.
47. Kwon, Y. W., & Kim, D. S. (2001). Herbicide-resistant genetically-modified crop: its risks with an emphasis on gene flow. *Weed Biology and Management*, 1(1),42-52.
48. Peltonen-Sainio, P., Pahkala, K., Mikkola, H., & Jauhiainen, L. (2014). Seed loss and volunteer seedling establishment of rapeseed in the northernmost European conditions: potential for weed infestation and GM risks. *Agricultural and Food Science*, 23(4),327-339.
49. Jhala, A. J., Beckie, H. J., Peters, T. J., Culpepper, A. S., & Norsworthy, J. K. (2021). Interference and management of herbicide-resistant crop volunteers. *Weed Science*, 69(3),257-263.
50. Madsen, K. H., & Sandøe, P. (2005). Ethical reflections on herbicide-resistant crops. *Pest Management Science: Formerly Pesticide Science*, 61(3),318-325.
51. Frewer L. J., Howard, C., & Shepherd, R. (1995). Consumer perceptions of food risks. *Food Science and Technology* (9),212-216.
52. Madsen, K. H., & Sandøe, P. (2001). Herbicide resistant sugar beet–what is the problem?. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 14,161-168.
53. Lassen J, Madsen KH and Sandøe P, Ethics and genetic engineering—lessons to be learned from GM foods. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 24: 263-271 (2002).
54. Hansen, J., Holm, L., Frewer, L., Robinson, P., & Sandøe, P. (2003). Beyond the knowledge deficit: recent research into lay and expert attitudes to food risks. *Appetite*, 41: 111-121.
55. Duke, S. O. (2005). Taking stock of herbicide-resistant crops ten years after introduction. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 61(3),211-218.
56. Kniss, A. R. (2018). Genetically engineered herbicide-resistant crops and herbicide-resistant weed evolution in the United States. *Weed Science*, 66(2), 260-273.
57. Zangoueinejad, R., Alebrahim, M. T., & Tseng, T. M. (2019). Evaluation of auxin tolerance in selected tomato germplasm under greenhouse and field conditions. *Weed Technology*, 33(6),815-822.
58. Zangoueinejad, R., Alebrahim, M. T., & Tseng, T. M. (2020a). Absorption and translocation of dicamba in dicamba-tolerant wild tomato. *Canadian Journal of Plant Science*, 101(1),30-38.
59. Zangoueinejad, R., Alebrahim, M. T., & Tseng, T. M. (2020b). Molecular and physiological response to dicamba in dicamba-tolerant wild tomato. *Journal of Mississippi Academy of Sciences*, 65, 358-373.
60. Zangoueinejad, R., Sirooeinejad, B., Alebrahim, M. T., & Bajwa, A. A. (2021). The Response of iranian melon (Cucumis melo L.) accessions to 2 ,4-D drift. *Plants*, 10(11),2442.
61. Masiunas, J. B. (1989). Tomato (Lycopersicon esculentum) tolerance to diphenyl ether herbicides applied postemergence. *Weed Technology*, 3(4),602-607.
62. Dittmar, P. J., Monks, D. W., Jennings, K. M., & Booker, F. L. (2012). Tolerance of tomato to herbicides applied through drip irrigation. *Weed Technology*, 26(4),684-690.
63. Dittmar, P. J., Monks, D. W., & Jennings, K. M. (2016). Tolerance of bell pepper to herbicides applied through a drip irrigation system. *Weed Technology*, 30(2),486-491.
64. Hall, D., Tegström, C., & Ingvarsson, P. K. (2010). Using association mapping to dissect the genetic basis of complex traits in plants. *Briefings in Functional Genomics*, 9(2),157-165.
65. Ingvarsson, P. K., & Street, N. R. (2011). Association genetics of complex traits in plants. *New Phytologist*, 189(4),909-922.

66. Baucom, R. S. (2009). A herbicide defense trait that is distinct from resistance: the evolutionary ecology and genomics of herbicide tolerance. *Weedy and Invasive Plant Genomics*, 163-175.

67. Comont, D., MacGregor, D. R., Crook, L., Hull, R., Nguyen, L., Freckleton, R. P., ... & Neve, P. (2022). Dissecting weed adaptation: Fitness and trait correlations in herbicide-resistant Alopecurus myosuroides. *Pest Management Science*, 78(7),3039-3050.

68. Atkinson, N. J., & Urwin, P. E. (2012). The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. *Journal of Experimental Botany*, 63(10),3523-3543.

69. Shivhare, R., & Lata, C. (2017). Exploration of genetic and genomic resources for abiotic and biotic stress tolerance in pearl millet. *Frontiers in Plant Science*, 7 ,2069.

70. Pywell, R. F., Bullock, J. M., Roy, D. B., Warman, L. I. Z., Walker, K. J., & Rothery, P. (2003). Plant traits as predictors of performance in ecological restoration. *Journal of Applied Ecology*, 40(1),65-77.

71. Breseghello, F., & Sorrells, M. E. (2006). Association analysis as a strategy for improvement of quantitative traits in plants. *Crop Science*, 46(3),1323-1330.

72. Roscher, C., Schumacher, J., Gubsch, M., Lipowsky, A., Weigelt, A., Buchmann, N., ... & Schulze, E. D. (2012). Using plant functional traits to explain diversity–productivity relationships. PloS One, 7(5), e36760.

۷۳. فرهاد قوامی، محمدعلی ملبوبی، محمدرضا قنادها، بهمن یزدی صمدی، جواد مظفری و محمدجعفر آقایی. (۲۰۰۴).بررسی واکنش ارقام متحمل گندم ایرانی به تنش شوری در مرحله جوانه زنی و گیاهچه. *مجله علوم کشاورزی ایران*. ۴۶۴-۴۵۳,(۲)۳۰.

۷۴. اعظم برزویی، محمد کافی، حمیدرضا خزاعی، علی خراسانی و عباس مجدآبادی. (۲۰۱۱). مطالعه خصوصیات فیزیولویک و فعالیت آنزیم سوپر اکسید دسموتاز دو رقم حساس و متحمل به شوری گندم در مراحل مختلف رشد در اثر آبیاری با آب شور. *پژوهش‌های زراعی ایران*. ۲۰۱-۱۹۰,(۲)۹.

۷۵. اسداله احمدی خواه، هدا شجاعیان، محدهادی پهلوانی و لیلا نیری پسند. (۲۰۱۴). شناسایی لاین‌های موتانت متحمل به شوری در برنج و انگشت نگاری آن‌ها با نشانگر. ISSR *ژنتیک نوین*. ۳۱۲-۲۹۹,(۳)۹.

۷۶. انسیه اشرفی, جمشید رزمجو و مرتضی زاهدی. (۲۰۱۵). بررسی اثر تنش شوری بر خصوصیات بیوشیمیایی گیاهچه‌ها و ارتباط آن با تحمل به شوری ارقام یونجه در شرایط مزرعه. *پژوهش‌های کاربردی زراعی*, ۵۶-۴۳,(۴)۲۸.

۷۷. راهله احمدپور، نظام آرمند، سعیدرضا حسین‌زاده و سمیه چاشیانی. (۲۰۱۶). گزینش ارقام متحمل به تنش خشکی در گیاه عدس (*Lens culinaris Medik.*) از طریق سنجش پارامترهای جوانه زنی. *علوم و تحقیقات بذر ایران*. ۸۷-۷۵.

۷۸. وحید اطلسی‌پاک. (۲۰۱۶). تاثیر تنش شوری بر رشد و توزیع یونی در ارقام متحمل و حساس گیاه کلزا. (*Brassica napus L.*). ۸۲-۷۱. *نشریه تولید و فرآوری محصولات زراعی و باغی*. ۸۲-۷۱.

۷۹. وحید اطلسی‌پاک. (۲۰۱۸). بررسی تجمع سدیم در برگ‌های ارقام حساس و متحمل به شوری گندم (*Triticum aestivum L.*). *تولیدات گیاهی* ۵۶-۴۳,(۱)۴۱.

۸۰. آتنا علاقمند، شهاب خاقانی، محمدرضا بی‌همتا، مسعود گماریان و منصور قربان‌پور. (۲۰۲۰). بررسی اثر کیتوزان و نانوکیتوزان بر خصوصیات زراعی و اسیدهای چرب امگا ۳، ۶ و ۹ در برخی ارقام گیاه دارویی (*Nigella sativa L.*) تحت تنش خشکی. *اکوفیتوشیمی گیاهان دارویی*, ۹۶-۸۳ ,(۴)۷.

۸۱. سکینه فرجی و ثریا کرمی. (۲۰۲۴). معرفی ارقام و ژنوتیپ‌های متحمل به کم‌آبی در انار. *مجله ترویجی انار*.

۸۲. روژین سهرابی، علیرضا پیرزاد، محسن نیازخانی و تورج میرمحمودی. (۲۰۲۵). تأثیر ۲۴-اپی براسینولید و عصاره گل کلم بر عملکرد دانه و برخی ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی ارقام حساس و متحمّل به شوری کینوا. *پژوهش‌های زراعی ایران*.

# علوم پایه و کنترل آفات گیاهی: مدل ریاضی با الهام فیزیکی

**محمود سوف باف سرجمعی**
**گروه گیاه پزشکی، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران**
**msoufbaf@aeoi.org.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

به عنوان شرحی مختصر از مقوله تعاملات زیبا و شگفت انگیز ریاضیات و زیست شناسی، مقاله حاضر با استفاده از دو گزیده دقیق از روش‌های بنیادین مدل سازی و آنالیز پایداری یک مدل نمونه از دو مقاله کلیدی در زمینه کاربرد مدل‌های ریاضیاتی در مدیریت تلفیقی حشرات آفت را جزییاتی بین رشته‌ای را تشریح می‌کند. در یک بخش به تبیین فرآیند ساخت یک مدل ریاضی از یک سیستم دینامیکی حشره آفت (میزبان)–پارازیتوئید (دشمن طبیعی) بر اساس روابط علّی موجود بین متغیرهای مختلف مستقل و وابسته پرداخته، در بخش دیگر یک مثال عینی در این خصوص ارائه می‌دهد. هدف اصلی این مقاله، بیان حتی المقدور مختصر و مفید این رویکرد علمی بین رشته‌ای ریاضیات–زیست شناسی به زبانی ساده و قابل استفاده برای کلیه علاقه‌مندان به این حوزه است.

**کلیدواژگان:** پارازیتوئید، دینامیک جمعیت، مدل ریاضی، مدیریت تلفیقی، نقطه تعادل

## ۱. مقدمه

تاکنون مدل ریاضی جامع و کاملی که در مطالعه تغییرات در فراوانی جمعیت طبیعی یک حشره به طور رضایت بخش قابل اتکا باشد توسعه نیافته است. دلیل اصلی این حقیقت در فراوانی فاکتورهای موثر در دینامیک جمعیت‌ها و نیز ارتباطات این فاکتورها با هم است که به اثرات کاهش یافته یا تشدید یافته آن‌ها بر تغییرات جمعیت حشرات در فضا و زمان منجر می‌گردد و طبیعتا تشخیص مهم‌ترین فاکتورها و یا بحرانی‌ترین ترکیبات آن‌ها و لحاظ آن‌ها در مدل‌های جمعیتی کاری نشدنی است؛ چه اگر شدنی نیز باشد، اصل اساسی مدل‌سازی ریاضی که ساده‌سازی[1] است نقض می‌شود و مدلی خواهیم داشت که تجزیه و تحلیل آن هزینه بالایی دارد. همچنین، فاکتورهای مذکور به طور پیوسته در حال تغییر بوده، از مسیرهای علیّ[2] مستقیم و غیرمستقیم متنوعی بر جمعیت حشرات اثر می‌گذارند. به عنوان یک نمونه ساده و البته ساده‌انگارانه از برهمکنش‌های پیچیده حاکم بر سیستم‌های دینامیکی با محوریت حشرات آفت می‌توان به اثر یک حشره‌کش (کاهش تراکم میزبان) که خود متاثر از دماست اشاره نمود. در این رویکرد، تراکم میزبان و تراکم پارازیتوئید هماهنگ با دما، نرخ پارازیتیسم را تنظیم می‌کند. بنابراین غلظت حشره‌کش، تراکم میزبان و تراکم پارازیتوئید همگی در برهمکنش با هم در کنترل بقای[3] یک حشره آفت نقش دارند. از دیدگاه ضرورت اتکال به مدل‌های ریاضیاتی در کنترل حشرات آفت، ذکر این نکته کافی است که ارزیابی راهکارها در ابعاد وسیعِ اکوسیستم‌های کشاورزی و یا طبیعی همچون جنگل‌ها و غیره به صورت تجربی غیرعاقلانه و هزینه خطاها (محاسباتی و عملیاتی) و جبران آن‌ها خارج از توان هر نهادی می‌باشد و لذا لازم است تا با ابزار مدل‌سازی از نتایج اتخاذ آن روش‌ها در ابعاد بزرگ پیش از اقدام عملی آگاهی حاصل نمود. علی‌رغم پیچیدگی و سختی قابل ملاحظه در استحصال جواب تحلیلی معادلات ریاضی مورد استفاده در دینامیک جمعیت حشرات، حل عددی این معادلات و نیز شبیه‌سازی کامپیوتری رویدادهای مرتبط به طور مستقیم، فارغ از پیچیدگی‌های ریاضی و زیست‌شناسی مرتبط، به دلیل پیشرفت قابل توجه آنالیز عددی در افزایش سرعت و کاهش حجم محاسبات در کامپیوتر، رویکردی عملیاتی، قابل استناد و استفاده در مطالعات و تصمیم سازی‌های مختلف این حوزه می‌باشد.

در مقاله حاضر با بهره‌گیری از مطالب دو مقاله کلیدی در زمینه ساخت مدل‌های ریاضی (وات[4] ۱۹۶۱) و به کارگیری آن‌ها در کنترل حشرات آفت (تانگ و چک[5] ۲۰۰۸)، پس از بیان ساده اصول و راهکارهای ساخت مدل ریاضی برای یک پدیده دینامیکی در دنیای حشرات، یک مثال از کاربرد این مدل‌ها در مدیریت تلفیقی حشرات آفت ارائه می‌شود. هدف اصلی، بیان این رویکرد علمی بین رشته‌ای ریاضیات–زیست شناسی به زبانی ساده و قابل استفاده برای کلیه علاقه مندان به این حوزه –با نشان دادن امکان بهره‌گیری‌های مشابه– در حوزه وسیعی از پژوهش‌های زیست شناختی و غیره است.

1. Simplification
2. Causal path
3. Survival
4. Watt
5. Tang and Cheke

## ۲- بخش اول، ساخت و توسعه مدل

در این بخش گزیده‌ای از مقاله وات (۱۹۶۱) برای تبیین روند ساخت مدل ریاضی برای توصیف یک پدیده زیستی در دنیای حشرات آفت ارائه می‌شود. به دلیل محتوای نزدیک به آموزشی مقاله مذکور و نیز برای جلوگیری از بروز انحراف در بازنویسی روش‌های بیان شده در آن مقاله در اکثر موارد از ترجمه دقیق جملات استفاده شده، در موارد لازم برای تشریح، توضیحات ضروری در خودِ متن و یا به صورت زیرنویس اضافه شده است.

### *۲-۱- ضرورت استفاده از مدل‌های ریاضی در دینامیک جمعیت*

ساخت و توسعه مدل‌های ریاضی برای دینامیک جمعیت حشرات آفت، به ویژه از منظر استفاده از ابزارهای پردازش گران‌قیمت همچون سوپرکامپیوترها، یک فرآیند هزینه بر است. اولین استفاده مورد انتظار از یک مدل ریاضی توسعه یافته در این کاربرد، استحصال بهترین روش ممکن برای کنترل جمعیت آفت است. چنانچه بقای یک حشره آفت تنها به یک فاکتور وابسته باشد، می‌توان نسبت زنده مانده‌ها را به مقادیر نسبی آن فاکتور در یک نمودار نشان داد و مقداری از آن فاکتور که بقا را به حداقل می‌رساند را به طور مستقیم و یا با روش‌های مختلف درون‌یابی[۱] به دست آورد. با این حال، وقتی بقا متاثر از چندین فاکتور می‌باشد روش گرافیکی به تنهایی جوابگو نبوده، لذا روش‌های پیشرفته‌تر ریاضی برای درک چگونگی کاهش بقا به کار گرفته می‌شود. هر اندازه مساله کنترل جمعیت پیچیده‌تر باشد، استفاده از مدل‌های ریاضی برای رسیدن به بهترین روش کنترلی ضروری‌تر است. به عنوان مثال با افزایش تجمعی مقاومت به حشره‌کش‌ها استفاده متوازنی از حشره‌کش-عامل بیوکنترل[۲] و احتمالا در تلفیق با روش‌های کنترل زراعی ضروری است و لذا نسخه نهایی تصمیمات مدیریتی تنها به اتکال به دستورالعمل‌های موردی و بدون توسل به مدل‌های کارآمد به دست نمی‌آید. یک مدل در پیوند با تجزیه واریانس برای تعیین فاکتورهای تنظیم‌کننده جمعیت آفت به کار می‌رود و از این طریق، عواملی که ارزش مطالعه بیشتری دارند مشخص می‌گردد. همچنین یک مدل در تشخیص مهم‌ترین مشخصه یک فاکتور و نیز تعیین درجه اهمیت آن به عنوان یک عامل تنظیم کننده به کار می‌آید. ابتدا یک مدل مفهومی[۳] برای بیان اثر یک فاکتور یا فاکتورهای خاص تهیه می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های آماری مناسب، مقادیر پارامترها را برای همه حالات به دست آورده، نهایتا مقادیر پارامترها به متغیرهای زیستی مرتبط قابل اندازه‌گیری ارتباط داده می‌شوند. حال با دانستن متغیری که مقدار موثر بودن فاکتور را تنظیم می‌کند موثرترین نسخه از فاکتور تعیین می‌شود.

### فرهنگ واژگان

**پارازیتوئید:** حشراتی که رفتار شبیه پارازیتیسم دارند را پارازیتوئید یا شبه پارازیت گویند. دلیل اصلی این نامگذاری عدم تطابق کامل این رفتار و نیز جثه حشرات با رفتار و جثه پارازیت‌ها می‌باشد.

**دینامیک جمعیت:** تغییرات جمعیت روی تغییرات متغیر(های) مستقل زمانی/ فضایی.

**مدل ریاضی:** قانون حاکم بر پدیده زیستی به زبان ریاضی که با تجزیه و تحلیل آن به سوالات مرتبط به صورت عددی و یا تحلیلی پاسخ داده می‌شود. رایج‌ترین این قوانین به صورت معادلات دیفرانسیل معمولی و معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی فرمول‌بندی می‌شوند. در معادلات دیفرانسیل معمولی متغیر وابسته تنها به یک متغیر مستقل که عمدتا زمان در نظر گرفته می‌شود و مشتقات آن وابسته است. ولی در معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی وابستگی مذکور به دو یا تعداد بیشتری از متغیرهای مستقل و مشتقات آن‌ها است. به عنوان مثال در موجودات خونسرد همچون حشرات، علاوه بر زمان، دما نیز به عنوان یک متغیر مستقل ناگزیر دیگر در نظرگرفته می‌شود.

**مدیریت تلفیقی:** اعمال مجموعه‌ای از راهکارها و ابزار مورد استفاده در کنترل جمعیت حشرات آفت و کاهش آن به زیر سطح زیان اقتصادی.

**نقطه تعادل (agent Biocontrol):** نقطه تعادل[۴] در یک دستگاه دینامیکی زمان پیوسته معادل نقطه ثابت[۵] (Mechanistic) در دستگاه‌های دینامیکی زمان گسسته و عبارت است از مختصاتی که در آن متغیرهای دستگاه رشد و حضیضی ندارند و رفتار دستگاه خطی سازی شده حول آن نقاط پایدار، ناپایدار و یا نوسانی می‌باشد. دینامیک نوسانی خود می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد.

به‌عنوان مثال، چنانچه مشخص گردد که یک کارایی جستجوگری[۶] ثابت در یک معادله شکار، اندازه نسبی یک ارگان مرتبط با شکارگری در گونه‌های شکارگر می‌باشد (مثلا آرواره بزرگتر یا کوچکتر در شکارگرها یا تخم ریز بلندتر یا کوتاه تر در پارازیتوئیدها)، معادله شکار فقط بر اساس صفات و رفتارهای گونه‌ای که اندازه نسبی مناسبی دارد ساخت می‌یابد. به عنوان مثالی دیگر در خصوص میزان سمیت یک حشره‌کش، چنانچه دلیل سمیت بیشتر یک آنالوگ[۷] نسبت به بقیه معلوم نباشد، انجام آزمون و خطا برای یافتن بهترین آنالوگ یک رویه علمی نیست؛ اما چنانچه رابطه بین ساختار مولکولی حشره‌کش و سمیت معلوم باشد، به راحتی می‌توان آنالوگ‌های سمی‌تر را شناسایی کرد (ریم اشنایدر[۸] ۱۹۵۴ به نقل از وات ۱۹۶۱). یک مدل ریاضی با مشخص کردن متغیرهایی که لازم است اندازه‌گیری شوند و اینکه چگونه، کی و کجا اندازه‌گیری شوند، موضوعات مورد تحقیق را روشن می‌سازد. نهایتا همانند آنچه در فیزیک رخ داده است، یکی از مهم‌ترین نتایج به کارگیری مدل‌ها حصول نتایج منطقی و در عین حال جالب می‌باشد. برای مثال ظرفیت قابل تحمل محیط[۹] یک حشره آفت در یک محیط باز بر خلاف انتظار تابعی از محیط نمی‌باشد بلکه نتیجه رقابت درون

۱. Interpolation که شامل یافتن یک تابع درونیاب بر اساس یک سری محاسبات روی یک مجموعه داده تجربی می‌باشد.

2. agent Biocontrol
3. Mechanistic
4. Equilibrium
5. Fixed point
6. Searching efficiency
۷. Analog یا یک نسخه مولکولی دیگر از ماده شیمیایی
8. Riemschneyder
9.Carrying capacity

گونه‌ای[1] حشره مورد مطالعه در آن محیط است.

*۲-۲- ساخت مدل*

یک حشره تک نسلی[2] را در نظر بگیرید. از نمادهای زیر برای تعاریف مرتبط استفاده می‌شود.

$N_t$ تراکم حشرات بالغ (تعداد در واحد سطح) موجود قبل از تخم‌ریزی در سال t

$N_{t+1}$ تراکم حشرات بالغ در زمان متناظر در سال t+1

$T_{t:t+1}$ شاخص روند جمعیت حشره آفت سال جاری نسبت به سال گذشته

$X_t$ مقدار متغیر برای فاکتور i ام تنظیم کننده تعداد حشرات در طی فاصله زمانی t تا t+1

$P_t$ نسبتی از $N_t$ که ماده‌اند و در زمان t تخم‌گذاری می‌کنند

$F_t$ میانگین باروری در زمان t

$S_E$ نسبتی از تخم‌ها که تا زمان تفریخ زنده می‌مانند (بقای تخم)

$S_I....S_{VI}$ بقای سنین ۱ تا ۶ لاروی[3]

$S_P$ بقای شفیره[4]

$S_A$ بقای حشرات بالغ تا و نیز شامل زمان تخم‌گذاری در سال t+1

با داشتن این اطلاعات تابع ۱ تحلیل می‌شود. فرم شناخته شده تحول زمان-گسسته جمعیت حشرات به صورت کلی زیر نشان داده می‌شود.

$$T_{t:t+1}=\frac{N_{t+1}}{N_t}=f(X_1,X_2,...,X_n) \qquad (1)$$

از n متغیر مستقل موجود در تعریف تابع ۱ فقط تعدادی قابل کنترل توسط انسان هستند و سایرین از قبیل فاکتورهای مرتبط با آب و هوا در این معادله قابل دستورزی و کنترل نیستند. هیچ گونه اولویت بندی بین متغیرهای مستقل قائل نشده و تابع قابل شکستن به چند تابع مستقل از هم نیست. مساله مهم از منظر کنترل حشرات آفت این است که با در نظر گرفتن آرایه‌ای از مقادیر متغیر از زیرمجموعه‌ای از $X_i$ها که توسط انسان قابل کنترل نیستند (از قبیل آب و هوا)، برای سایر $X_i$ها چه مقادیری بهتر است انتخاب گردد تا بتوان جمعیت را کنترل نمود؟ برای مثال کدام روش‌های کنترل بیولوژیک، سموم شیمیایی و ... و با چه اندازه‌ای بایستی به کار رود تا هدف کنترل محقق گردد؟ به زبان ریاضی، معادله ۱ مختصات جمعیت را به عنوان یک نقطه در یک فضای n بعدی نشان می‌دهد که توسط شرایط آب و هوایی و سایر فاکتورها مشخص می‌شود. با لحاظ این مشخصات چگونه می‌توان $T_{t:t+1}$ را کاهش داد؟ برای پاسخ به این سوال می‌ایست فرم تابع ۱ را تا حد امکان توسعه داد. اولین قدم از نگاه زیست شناسی این است که معادله ۱ با زمان فنولوژیک[5] ساختاربندی شود زیرا اثر هر فاکتور بر یک جمعیت به زمان اثر آن فاکتور از دیدگاه آنتوژنی[6] کلیه افراد در جمعیت بستگی دارد. برای مثال بادهای سهمگین چنانچه در یک مرحله خاص از نشو و نمای فردی برخی از گونه‌های حشرات آفت جنگل رخ دهند به طور قطعی مهم هستند. به عنوان نمونه، زمانی که لاروهای خیلی کوچک یک پروانه برگ‌خوار با آویزان شدن از انتهای تار ابریشمی خود جابجا می‌شوند اطلاعات زمانی مفیدتری محسوب می‌شود تا اینکه تنها بدانیم این بادها در دو هفته آخر بهار می‌وزند و یا به عنوان مثالی دیگر، زمان تفریخ تخم در مطالعه شکارگرها و پارازیتوئیدهای تخم نسبت به زمان تقویمی ارجح هستند. بنابراین لازم است تابع ۱ به فرم ۲ بازنویسی شود.

$$T_{t:t+1}=P_t\,F_t\,S_E\,S_I...S_{VI}\,S_P\,S_A \qquad (2)$$

این شکل از تابع را مدل نامیده و هر جمله از معادله ۲ به صورت تابعی به عنوان یک زیر-مدل تعریف می‌شود (تابع ۳).

$$S_E=f_E\,(X_1^E,X_2^E,...,X_3^E) \qquad (3)$$

که در آن $F_E$ تابع بقای تخم بوده و $X_{IE}$ها مقادیر متغیر برای هریک از فاکتورهای مستقلی است که در مرحله تخم باعث مرگ و میر حشره می‌شوند. به همین ترتیب معادله ۳ را نیز می‌توان به توابع کوچک‌تری شکست که عمل فاکتورهای تنظیم کننده جزئی‌تری را در هر مرحله زیستی حشره توصیف کنند. هر یک از این جملات می‌تواند شامل بیش از یک متغیر باشد، زیرا به عنوان مثال تعداد لاروهای مورد حمله یک پارازیتوئید توسط عمل همزمان و برهم کنش فاکتورهایی چون دما، رطوبت، تراکم میزبان و تراکم خود پارازیتوئید تنظیم می‌شود. در ادامه برای ساختاربندی زیر-مدل‌ها و

1. Intraspecific

۲. حشره‌ای که در یک سال یک نسل تولید می‌کند و در منابع اغلب با monovoltine یا univoltine یاد می‌شود.

۳. به اولین مرحله نابالغ بعد از تخم در حشرات با دگردیسی کامل، لارو Larva گویند که عمدتا به صورت کرمی شکل ولی با مرفولوژی‌ها و نیز رفتارهای متنوع در راسته‌های مختلف حشرات می‌باشد.

۴. آخرین مرحله تکامل فردی نابالغ در حشرات با دگردیسی کامل را شفیره Pupa گویند که قبل از ظهور حشرات کامل می‌باشد و عمدتا در داخل یک پوسته سخت از جنس کیتین می‌باشد. در این دوره، ابتدا بافت‌های دوره لاروی تجزیه (هیستولیز) و سپس بافت‌های حشره بالغ ساخته می‌شود (هیستوژنز).

5. Phenologic

۶. Ontogeny به مفهوم نشو و نمای یک حشره از تخم تا بلوغ و با عبور از کلیه مراحل زیستی می‌باشد. کامل‌ترین سیکل زیستی در حشرات با دگردیسی یا متامورفوزیس کامل شامل تخم، لارو (با سنین مختلف لاروی یا اینستارها)، شفیره و حشره کامل می‌باشد که عمدتا در حشرات متعلق به راسته‌های پیشرفته از قبیل بال‌پولک‌داران (پروانه‌ها و شب‌پره‌ها)، بال‌غشائیان (زنبورها)، دوبالان (مگس‌ها و پشه‌ها) و قاب بالان (سوسک‌ها) مشاهده می‌شود. سیکل‌های زیستی ساده‌تری نیز در بین راسته‌های مختلف حشرات مشاهده می‌شود.

یا زیر–زیر– مدل‌ها اقدام به جمع آوری داده‌های مربوط به جمعیت حشره و متغیرهای مستقل مختلف از قبیل داده‌های آب و هوایی می‌شود. در این رابطه تخمین جمعیت حشرات آفت و عوامل بیوکنترل طبق روش‌های موجود در منابع انجام می‌شود. در این مرحله توجه به جزئیات اکولوژیک، فیزیولوژیک و رفتاری گونه‌های مورد مطالعه از اهمیت بالایی برخوردار است. به عنوان مثال نرخ مصرف[1] هر مرحله زیستی از شکارگرها مهم است و بایستی به صورت جداگانه ثبت شود. پوره و بالغین سن‌های شکارگر عموما نرخ مصرف متفاوتی دارند که در عمل شکارگری نهایی هرکدام به شکلی متفاوت ظاهر خواهند شد. نهایتا داده‌های به دست آمده از این رویه را می‌توان به روش‌های متنوع تجزیه رگرسیونی خطی و چندگانه به صورت مدل‌های پیشگو تبدیل کرد. ایراد اساسی این مدل‌ها غفلت از متغیرهای غیرخطی است که در پدیده‌های زیستی حشرات غالب است ولی به هر حال رگرسیون‌های چندگانه به عنوان راهنمایی ارزنده در کارهای مقدماتی برای ساخت یک مدل تحلیلی همچنان مورد توجه هستند. همچنین مدل‌های استنتاجی، مدل‌هایی قابل حصول از طریق درون‌یابی و یا برون‌یابی از مجموعه داده‌های به دست آمده در آزمایشگاه هستند که موضوع انتگرال‌گیری عددی است که روش‌های مذکور در منابع مربوطه به تفصیل در دسترس‌اند. پس از استحصال توابع درون‌یاب، می‌توان از آن‌ها به عنوان توابع پیشگو برای سایر نقاط داده‌ای دلخواه استفاده کرد.

ساخت یک مدل استقرایی–استنتاجی برای توصیف یک پدیده پیچیده موضوعی کاملا متفاوت از محاسبه یک معادله رگرسیونی است. در این جا تلاش بر این است تا معادله‌ای ساخته شود که تعداد کمی از فاکتورهای تنظیم کننده را به مرگ و میر ناشی از خودشان ارتباط دهد. ابتدا مجموعه‌ای از فرضیات در خصوص اثر فاکتورهای مختلف بر بقا، باروری و نسبت جنسی آفت تشکیل شده، سپس این فرضیات به صورت مجموعه‌ای از معادلات – عموما معادلات دیفرانسیل معمولی[2] ODE و یا معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی[3] PDE – بیان می‌شوند. نهایتا این معادلات انتگرال گیری و حل شده و مجموعه‌ای از جواب‌ها حاصل می‌گردد. یکی از معروف ترین مجموعه‌های استقرایی–استنتاجی، دستگاه معادلات معرفی شده توسط ولترا[4] در سال ۱۹۲۶ می‌باشد. ضعف ذاتی چنین مدل‌هایی اهمیت ندادن به منطق منتج به استنتاج‌ها می‌باشد و لذا نتایج نهایی از فرضیات پایه‌ای اتخاذ شده درست‌تر نمی‌باشند. به بیان بهتر، مدل‌سازی رویه‌ای مفید خواهد بود اگر بر اساس فرضیات استقرایی تایید شده از لحاظ زیستی بنا شده باشد. بنابراین روش بهینه ساخت یک زیر–زیر–مدل، شروع کردن با یک حدس در خصوص یک مسیر علی بر مبنای مناسبات زیستی، آزمون این حدس یا فرضیه و خالص سازی فرضیه بر اساس نتایج آزمون خواهد بود. در واقع از استقرا برای تعیین بهترین فرضیات و از استنتاج برای جستجوی کاربردهای غیرمستقیم فرضیات استفاده می‌شود و لذا این رویه از ساخت مدل را استقرایی–استنتاجی می‌نامند. این چرخه (فرضیه سازی–آزمون فرضیه–خالص سازی فرضیه) تا حصول یک قانون علمی حاکم بر یک زیر–زیر–مدل ادامه می‌یابد و در نهایت موفقیت اصلی زمانی حاصل می‌شود که یک زیر–مدلی به دست آید که نحوه ترکیب مرگ و میرهای جزئی مشاهده شده را برای رسیدن به مرگ و میر کلی حقیقی مشاهده شده به بهترین وجه توصیف کند. مرگ و میرهای جزئی مربوط به هر فاکتور از قبیل پارازیتیسم و شکارگری، سموم شیمیایی و... با روش‌های مرسوم حشره شناسی در آزمایشگاه و صحرا قابل اندازه‌گیری‌اند. به هر حال جداسازی مرگ و میرهای مرتبط به هر فاکتور، به ویژه شکارگری، از مرگ و میرهای سایر فاکتورها امری حساس و نیاز به طراحی دقیقی از آزمایشات دارد. استفاده از جداول زندگی در تعیین فاکتورهای موثر برکاهش بقای حشرات و مقایسه آن‌ها برای تعیین فاکتورهای کلیدی مرگ و میر یک رویه کارآمد و مفید است. در این روش مرگ و میر ناشی از عوامل مختلف زنده (عوامل مختلف بیوکنترل، مقاومت گیاه میزبان و ...) و غیرزنده (استرس‌های فیزیکی محیطی و ...) در هر مرحله از زیست حشره آفت مورد مطالعه و آماربرداری (نسبت زنده مانده‌ها و محاسبه بقا) قرار گرفته، پس از تشکیل جداول زندگی با استفاده از معادلات دموگرافی شاخصه‌های مختلف رشد جمعیت و به تبع آن نقش هر عامل کنترلی در تنظیم جمعیت حشره آفت مشخص می‌شوند (کری[5] ۲۰۰۱).

مدل‌سازی با رسم نمودار مرگ و میرهای جزئی مربوطه به هر فاکتور در مقابل مقادیر آن فاکتور آغاز می‌شود. سپس استنباط قانون حاکم بر این روابط بر اساس دانش ریاضی از توابع مقدماتی[6] و ترکیبات مختلف آن‌ها و نیز اصول حاکم بر تشکیل منحنی‌ها، سطوح و احجام در فضاهای متناظر به دست خواهد آمد. سپس دامنه کار به معادلات خاصی محدود و شکل معادله طی یک رویه منطقی منظم مشخص می‌شود. همانند کلید شناسایی گونه‌های حشرات، می‌توان از کلید زیر برای حدس بهترین معادلات ریاضی توصیف کننده برای یک پدیده استفاده کرد.

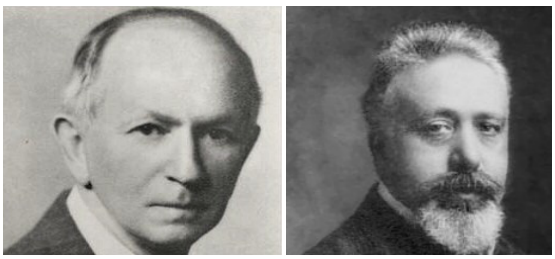
1. Consumption rate
2. Ordinary Differential Equations
3. Partial Differential Equations
4. Volterra
5. Carey
۶. توابع مقدماتی شامل توابع ثابت، چندجمله‌ای، مثلثاتی، معکوس مثلثاتی، کسری، رادیکالی، توانی، نمایی، لگاریتمی و قدرمطلق است.

| | | |
|---|---|---|
| ۱ | متغیر Y حداقل در ابتدای امر می‌تواند به عنوان تابعی از تنها یک متغیر دیگر باشد | ODE |
| ۲ | متغیر Y به وضوح تابعی از دو یا بیشتر از متغیرهای مستقل دیگر باشد | PDE |
| ۳ | لحاظ مشتق دوم در معادله پایه ضروری نیست | DE of 1st Order |
| ۴ | لحاظ مشتقات مرتبه n در معادله پایه ضروری است | DE of nth Order |
| 5 | توان‌های مشتق برای توصیف پدیده ضروری نیست | DE of degree 1 |
| 6 | توان‌های nام مشتق برای توصیف پدیده ضروری است | DE of degree n |

معادلات معرفی شده در کلید بالا دسته بزرگی از معادلات را نشان می‌دهند که در توصیف پدیده‌های زیستی بیشترین مورد استفاده را داشته‌اند. برای آشنایی با انواع معادلات دیفرانسیل، خواننده می‌تواند به کتاب‌های حسابان پیشرفته و یا معادلات دیفرانسیل مراجعه کند. از میان معادلات اشاره شده در بالا، پرکاربردترین در مطالعات زیستی، ODE مرتبه اول با درجه ۱ است که به فرم معادله ۴ یا فرم کامل نمایش داده می‌شود.

$$M(x,y)\,dx + N(x,y)\,dy = 0 \qquad (4)$$

گاه معادلات دیفرانسیل خطی در اکولوژی نظری به عنوان اساس مطالعه پدیده‌های معینی همچون رقابت و شکارگری مکررا به کار گرفته شده‌اند. نمونه بارز آن، کار مستقل لوتکا[1] ۱۹۲۵ و ولترا ۱۹۲۶ در ساختاربندی مدل راهبردی معروف به لوتکا–ولترا است.



**شکل ۱**– آلفرد جیمز لوتکا، سمت چپ، زیست–ریاضیدان و زیست–آماردان لهستانی–آمریکایی و ویتو ولترا، سمت راست، ریاضیدان و فیزیکدان ایتالیایی. این دو دانشمند در پی به کارگیری اصول علوم فیزیکی در علوم زیستی موفق به ارائه مدل راهبردی معروف لوتکا–ولترا به صورت مستقل از هم به ترتیب در سال‌های ۱۹۲۵ و ۱۹۲۶ میلادی گردیدند. لوتکا کار روی این معادلات را ابتدا در سال ۱۹۱۰ آغاز نمود. در سال ۱۹۲۰، مدل خود را به سیستم‌های ارگانیک توسعه داده و در سال ۱۹۲۵ از این مدل برای آنالیز برهمکنش‌های شکار–شکارچی در کتاب خود با عنوان Biomathematics استفاده نمود. همان مجموعه معادلات در سال ۱۹۲۶ توسط ولترا منتشر شد که با الهام از یک زیست شناس دریا به سیستم‌های زیستی توسعه داده شده بود. این دو معادله شامل

$$\frac{dX}{dt} = \alpha X - \beta XY$$

$$\frac{dY}{dt} = \delta XY - \gamma Y$$

است که در آن X و Y به ترتیب جمعیت شکار و شکارگر بوده و پارامترهای $\alpha$ معادل نرخ رشد شکار، $\beta$ نرخ شکارگری شکارگر (نرخ کشتن و خوردن شکار)، $\delta$ نرخ افزایش جمعیت شکارگر با مصرف شکار و $\gamma$ نرخ مرگ و میر شکارگر است.

به طرق مختلفی می‌توان ساخت یک زیر–زیر–مدل را آغاز کرد. فرض نمایید یک متغیر وابسته Y تحت تاثیر فاکتور $X_1$ و نحوه تاثیر این فاکتور متاثر از تغییرات اعمالی در Y بوسیله فاکتورهای $X_2$ و $X_3$ باشد. به عبارت دیگر $f(X_1,X_2,X_3)$. حال برای ساخت یک معادله دیفرانسیل از اثر $X_1$، $X_2$ و $X_3$ بر Y، اولین مساله، تصمیم گیری در خصوص این است که کار با کدام نسخه از معادلات زیر آغاز شود (وات ۱۹۶۰):

$$\frac{dY}{dX_1} = f(X_1,X_2,X_3)$$

$$\frac{dY}{dX_2} = f(X_1,X_2,X_3)$$

$$\frac{dY}{dX_3} = f(X_1,X_2,X_3)$$

اغلب تصمیم گیری در این خصوص از ابتدا واضح است. چنانچه متغیری که Y در ابتدا نسبت به آن مشتق پذیر است متغیری باشد که نهایتا در معادله انتگرال وارد می‌شود، انتگرال گیری از عبارت منتج نهایی آسان‌تر خواهد بود. پس از انتخاب یکی از فرم‌های فوق، برای مثال $dY/dX_2$، می‌توان اثرات $X_2$ بر Y را از مسیرهای علی (سببی) مختلف بررسی کرد. برای مثال تراکم جمعیت از مسیرهای گوناگونی همچون احتمال جفت‌یابی، رقابت برای محل‌های تخم گذاری و دیگر اشکال رقابت بر باروری یک گونه اثر می‌گذارد. برای مثال، ۴ مسیر علی A، B، C و D برای یک پدیده متصور است. روشن است که

$$\frac{dY}{dX_2} = f(X_1,X_2,X_3) = f(A,B,C,D)$$

$$A = f_A(X_1,X_2,X_3)$$
$$B = f_B(X_1,X_2,X_3)$$
$$C = f_C(X_1,X_2,X_3)$$
$$D = f_D(X_1,X_2,X_3)$$

ترکیبات مختلف این مسیرهای چهارگانه (جمع، ضرب و...) بستگی به درک دقیق رویداد زیستی مورد مطالعه داشته و از قوانین احتمالات تبعیت می کند. به عنوان مثال احتمال رخ دادن دو رویداد تصادفی مستقل از هم مساوی حاصل ضرب احتمالات تک تک رویدادهاست. برای اتخاذ فرم صحیح معادلات برای اثر هرکدام از متغیرها بر Y ضروری است تا نمودار حاصل از رسم بقای Y در مقابل هر فاکتور به دقت بررسی شود. در این راستا، پاسخ به پنج

1. Lotka

نمونه سوال زیر می‌تواند به انتخاب بالغ بر ۳۰ نوع از معادلات عملگر رهنمون باشد.

۱- آیا dY/dX متناسب با X است؟
۲- آیا dY/dX متناسب با X است؟
۳- آیا dY/dX به طور عکس متناسب با X است؟
۴- آیا dY/dX به صفر میل می‌کند هر گاه X به یک مجانب فوقانی Y-max میل کند؟
۵- آیا dY/dX به بی نهایت میل می‌کند هر گاه X به یک مجانب زیرین X-min میل کند؟

با پاسخ به سوالات فوق، از چپ به راست در دیاگرام درختی زیر (جدول ۱)، می‌توان به شکل اولیه مناسبی از معادله حاکم بر سیستم مورد مطالعه دست یافت. معادله ۳۲ که ساده‌ترین در این دیاگرام می باشد پس از انتگرال‌گیری به فرم $Y=a+bX$ که یک خط راست است در می‌آید. انتگرال‌گیری از سایر معادلات این دیاگرام نیز با مراجعه به کتب مرجع به سادگی قابل انجام است. به عنوان مثال فرم انتگرال معادله ۳۰ به صورت $Y=Ymax\ (1+e^{-bX})$ یکی از راه‌های نوشتن معادله توسط گاوس[1] در دهه ۴۰ میلادی برای توصیف حمله پارازیت‌ها و شکارگرها می‌باشد (گاوس ۱۹۳۴ به نقل از وات ۱۹۶۱).

پس از تعیین معادله توصیف کننده پدیده زیستی، از آن انتگرال گیری به عمل آمده تا به فرم مناسب برای آزمون زیستی در آید. ادامه مسیر در ارزیابی مدل به میزان پیچیدگی مدل بستگی دارد. آزمون گرافیکیِ درستی فرضیات با استفاده از هر یک از مدل ها، مثلا معادله ۳۰، با بررسی اثر $X_1$ بر A زمانی که $X_2$ و $X_3$ ثابت فرض شوند به شرح زیر است. با لحاظ

$$\frac{dY}{dx_1} = b(Amax-A)$$

$$-In(Amax-A) = bX_1-In(Amax)$$

و از آنجا که یک bی ثابت مورد نظر است، رابطه بالا به شکل زیر بازنویسی می‌شود.

$$In\left(\frac{Amax}{Amax-A}\right)= bX_1 \qquad (5)$$

چنانچه معادله ۳۰ به درستی ارتباط بین A و $X_1$ را با لحاظ $X_2$ و $X_3$ ثابت توصیف نموده باشد، رسم نمودار معادله ۵ ( رسم A در مقابل $X_1$) منجر به یک خط راست خواهد شد. در غیر این صورت و با عدم حصول خط راست، لازم است معادله اولیه دیگری غیر از معادله ۳۰ را آزمود. چنانچه آزمون خط راست موفق بود مرحله بعد که شامل تست جواب متغیرهای ثابت انگاشته شده $X_2$ و $X_3$ می‌باشد انجام می‌شود. از معادله ۵ به دست می‌آید:

$$\frac{In\left(\frac{Amax}{Amax-A}\right)}{X_2} = b\ (\equiv Z)$$

چنانچه معادله ۳۰ به عنوان یک زیر-زیر-مدل برای توصیف اثر فاکتور $X_1$ روی A کفایت نماید، لازم است نمودار مقادیر Z در مقابل $X_2$ به صورت یک خط ثابت باشد. چنانچه در زمان رسم نمودار Z مقابل $X_2$ یک خط راست موازی محور $X_2$ به دست نیاید نتیجه می‌شود که معادله ۳۰ به تنهایی برای توصیف اثر $X_1$ بر A کافی نیست زیرا $X_2$ اثر مزبور را تغییر داده است. در این مرحله لازم است یک جمله که بیانگر اثر $X_2$ می‌باشد به درستی (از جنبه زیستی و ریاضیاتی) به معادله ۳۰ وارد شود. این فرآیند تکرار می‌شود تا رابطه A با $X_1$ به دست آید، بدین مفهوم که یک معادله بر اساس آزمون نمودار زیر انتخاب شود.

$$\frac{In\left(\frac{Amax}{Amax-A}\right)}{X_2} = f(X_2)$$

مجددا یک نگاشت مناسب انتخاب می‌شود تا فرم معادله انتخاب شده، مورد آزمون قرار گیرد. برای مثال چنانچه نگاشت زیر انتخاب شده باشد:

$$\frac{dz}{dx_2} = \frac{bz}{X_2}$$

فرآیند فوق جهت آزمون معادله پیشنهادی (فرضیه جدید) تا زمان حصول یک معادله مناسب تکرار می‌شود. زمانی که معادلات مربوط به مسیرهای C، B، A و D به دست آمد، یک تخمین نهایی از مقادیر پارامترها انجام می‌شود و زیر-زیر-مدل، با یک آزمون آماری مناسب سنجیده می‌شود. مهمترین مساله در اینجا سختی برازش داده‌های تجربی به مدل‌های پیچیده ریاضی است. به وضوح با افزایش پارامترها درجه آزادی کاهش می‌یابد و برای جلوگیری از این اتفاق، با کاهش تعداد پارامترها تا حد ممکن، درجات آزادی بزرگتر حفظ می‌شود. راه‌های دیگری همچون شکستن معادلات بزرگ به بخش‌های کوچکتر و آزمون بخش‌های کوچکتر به صورت جداگانه قبل از ترکیب کردن آن‌ها و سپس برازش همه اجزا در کنار هم نیز موجود می‌باشد. با اتمام آنالیزهای اولیه و تعیین متغیرهای مهم در زیر-مدل و زیر-زیر-مدل و تعیین فرم بهینه ریاضیاتی آن‌ها، نوبت به خالص سازی مدل می‌رسد. هدف از خالص‌سازی مدل، اولا، برای افزایش اعتبار پیشگویی (کاهش خطای استاندارد تخمین‌ها) و ثانیا، برای افزایش بینش در زمینه دینامیک جمعیت حاصل از تجزیه و تحلیل مدل می‌باشد. دو ابزاری که با آن‌ها می‌توان به تدریج مدل را تحلیلی‌تر نمود به شرح زیر است. ابزار اول، انجام آزمایشات فیزیولوژی در آزمایشگاه

1. Gause

می‌باشد که با آن می‌توان به اطلاعات مفیدی در برقراری رابطه بین ثابت‌های مدل‌های رگرسیونی حاصل از داده‌های میدانی با پارامترهای مختلف فیزیولوژیک دست یافت. هدف از چنین کاری تعیین تعداد معدودی از معیارهای قابل اندازه‌گیری است که رفتار عامل بیوکنترل در زمان را در اکوسیستم‌های جمعیت‌های طبیعی یک آفت تعیین می‌کند. ابزار دوم، وارد کردن متغیرهای مستقلی به معادله Y می‌باشد که متغیرهایی تصادفی فرض می‌شوند. در اینجا به جای پیش‌بینی یک مقدار خاص از Y یک توزیع احتمالاتی از Y پیش‌بینی می‌شود. بحث در خصوص مدل‌های تصادفی[1] و جنبه‌های مختلف تفاوت آن‌ها با مدل‌های قطعی[2] (مرکز توجه در این مقاله) خود فرصت دیگری می‌طلبد که می‌تواند موضوع نوشته دیگری باشد.

**جدول ۱**- نمودار تصمیم‌سازی در خصوص بهترین معادله توصیف کننده یک پدیده زیستی دینامیکی. این دیاگرام درختی با استفاده از پاسخ‌های بله و خیر به سوالات بالا ساخته شده است.

| کد | معادله مناسب | dY/dX به ازای نهایت میل می کند هر گاه X به یک مجانب زیرین X-min میل کند | dY/dX به صفر میل می کند هر گاه Y به یک مجانب فوقانی Y-max میل کند | dY/dX به طور عکس متناسب با X است | dY/dX متناسب با Y می باشد | dY/dX متناسب با X است |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)(Ymax-Y)Y}{(X-Xmin)X}$ | بله | بله | بله | بله | بله |
| ۲ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)(Ymax-Y)Y}{X}$ | خیر | | | | |
| ۳ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)Y}{(X-Xmin)X}$ | بله | خیر | | | |
| ۴ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)Y}{X}$ | خیر | | | | |
| ۵ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)(Ymax-Y)Y}{(X-Xmin)}$ | بله | بله | خیر | | |
| ۶ | $\frac{dY}{dX}=(b+cX)(Ymax-Y)Y$ | خیر | | | | |
| ۷ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)Y}{(X-Xmin)}$ | بله | خیر | | | |
| ۸ | $\frac{dY}{dX}=(b+cX)Y$ | خیر | | | | |
| ۹ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)(Ymax-Y)}{(X-Xmin)X}$ | بله | بله | بله | خیر | |
| ۱۰ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)(Ymax-Y)}{X}$ | خیر | | | | |
| ۱۱ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)}{(X-Xmin)X}$ | بله | خیر | | | |
| ۱۲ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)}{X}$ | خیر | | | | |
| ۱۳ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)(Ymax-Y)}{(X-Xmin)}$ | بله | بله | خیر | | |
| ۱۴ | $\frac{dY}{dX}=(b+cX)(Ymax-Y)$ | خیر | | | | |
| ۱۵ | $\frac{dY}{dX}=\frac{(b+cX)}{(X-Xmin)}$ | بله | خیر | | | |
| ۱۶ | $\frac{dY}{dX}=(b+cX)$ | خیر | | | | |
| ۱۷ | $\frac{dY}{dX}=\frac{bY(Ymax-Y)}{(X-Xmin)X}$ | بله | بله | بله | بله | خیر |
| ۱۸ | $\frac{dY}{dX}=\frac{bY(Ymax-Y)}{X}$ | خیر | | | | |
| ۱۹ | $\frac{dY}{dX}=\frac{bY}{(X-Xmin)X}$ | بله | خیر | | | |
| ۲۰ | $\frac{dY}{dX}=\frac{bY}{X}$ | خیر | | | | |
| ۲۱ | $\frac{dY}{dX}=\frac{bY(Ymax-Y)}{(X-Xmin)}$ | بله | بله | خیر | | |
| ۲۲ | $\frac{dY}{dX}=bY(Ymax-Y)$ | خیر | | | | |
| ۲۳ | $\frac{dY}{dX}=\frac{bY}{(X-Xmin)}$ | بله | خیر | | | |
| ۲۴ | $\frac{dY}{dX}=bY$ | خیر | | | | |

1. Stochastic models
2. Deterministic models

| کد | معادله مناسب | dY/dX به بی نهایت میل می کند هر گاه X به یک مجانب زیرین X-min میل کند | dY/dX به صفر میل می کند هر گاه Y به یک مجانب فوقانی Y-max میل کند | dY/dX به طور عکس متناسب با X است | dY/dX متناسب با Y می باشد | dY/dX متناسب با X است |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۲۵ | $\frac{dY}{dX}=\frac{b(Ymax-Y)}{(X-Xmin)X}$ | بله | بله | بله | خیر | خیر |
| ۲۶ | $\frac{dY}{dX}=\frac{b(Ymax-Y)}{X}$ | خیر | | | | |
| ۲۷ | $\frac{dY}{dX}=\frac{b}{(X-Xmin)X}$ | بله | خیر | | | |
| ۲۸ | $\frac{dY}{dX}=\frac{b}{X}$ | خیر | | | | |
| ۲۹ | $\frac{dY}{dX}=\frac{b(Ymax-Y)}{(X-Xmin)}$ | بله | بله | خیر | | |
| ۳۰ | $\frac{dY}{dX}=b(Ymax-Y)$ | خیر | | | | |
| ۳۱ | $\frac{dY}{dX}=\frac{b}{(X-Xmin)}$ | بله | خیر | | | |
| ۳۲ | $\frac{dY}{dX}=b$ | خیر | | | | |

### ۲-۳- روش‌های استفاده از مدل‌ها

یک مدل تحلیلی با آگاهی کافی نسبت به مکانیزم‌های عمل هر یک از فاکتورهای موثر در یک پدیده را می‌توان برای یافتن عوامل کنترلی مناسب به کار برد. برای مثال فرضا معادله پایه در توصیف کارایی یک پارازیتوئید به صورت معادله ۶ باشد (وات ۱۹۵۹).

$$N_A = PK\left(1 - e^{-aN_0P^{1-b}}\right) \qquad (6)$$

$N_0$ بیانگر تراکم میزبان، P بیانگر تراکم پارازیتوئید و K تعداد تخم به ازای هر پارازیت ماده و $N_A$ تعداد میزبان مورد حمله می‌باشد. به علاوه فرضا K تابعی از اندازه بدن، دما و رطوبت باشد که با معادله زیر تعیین می‌شود.

$$K = (r + sL)(e^{-dX_1^2} + He^{-fX_2^2})$$

L طول بدن حشره و r، s، d و f ثابت‌هایی برای مشخصات گونه حشره است. H رطوبت نسبی و $X_1$ و $X_2$ اختلافات بین هر دمای مشاهده شده با دو دمای بهینه مختلف است. به طور مشابه، ثابت a که اندازه کارایی جستجوگری پارازیتوئید را نشان می‌دهد را می‌توان در ارتباط با پارامتر دقت در تعقیب علایم میزبان (A) و چهار پارامتر فیزیولوژیک و بیوشیمیایی حاصل از فعالیت آئرودینامیک شامل $F_1$، $F_2$، $F_3$ و $F_4$ بیان کرد. نهایتا پارامتر d، میزان کاهش کارایی جستجوگری پارازیتوئید در اثر اشکال مختلف رقابت درون گونه‌ای را می‌توان به صورت تابعی از توانایی تشخیصی ضد سوپرپارازیتیسم[۱] $F_1$، $F_2$، $F_3$، $F_4$، A، (D) بیان کرد. لحاظ چهار پارامتر اخیر به پیروی از فرضیه‌ای اولیه مبنی بر توانایی غلبه بر اثرات زیان‌بار افزایش تراکم پارازیتوئید (سوپرپارازیتیسم) با افزایش قدرت پرواز پارازیتوئید است[۲]. با افزایش P مقدار $N_A$ افزایش می‌یابد، زیرا هرچه پارازیتوئید بیشتر باشد قاعدتا نرخ تجمعی حمله بالاتر است ولی در یک زمان، افزایش رقابت بین پارازیتوئیدها باعث کاهش نرخ حمله می‌شود که منجر به لحاظ جمله $\exp(-aP^{-b})$ در مدل می‌شود.

افزایش تراکم میزبان $N_0$ نیز اثر عکس دارد. با افزایش تراکم میزبان یافتن آن‌ها به وسیله پارازیتوئید/شکارگر راحت‌تر شده و لذا $N_A$ افزایش می‌یابد. به هر حال یک جمعیت از یک پارازیتوئید مشخص تعدادی متناهی تخم دارد و به محض عبور تراکم میزبان از یک سطح مشخص (PK) نسبت به تراکم پارازیتوئید، دیگر تخمی برای گذاشتن در بدن یا روی بدن میزبان موجود نخواهد بود. در چنین مواردی $N_A$ به سطح اشباعی مجانب به PK می‌رسد و از این نقطه به بعد رقابت منفعل گروهی[۳] میزبان تعیین کننده سرنوشت پارازیتیسم است (اشماسن[۴] ۱۹۴۹ به نقل از وات ۱۹۶۱). با توجه به تعاریف و توصیفات بالا، معادله ۶ به صورت ۷ بازنویسی می‌گردد.

$$N_A = P\left[(r + sL)(e^{-dX_1^2} + He^{-fX_2^2})\right]\left(1 - e^{-a(A,F_1,F_2,F_3,F_4)N_0P^{1-b(D,A,F_1,F_2,F_3,F_4)}}\right) \qquad (7)$$

۱. چنانچه پارازیتوئید بیش از یک تخم در بدن میزبان قرار دهد، سوپرپارازیتیسم رخ داده و اگر بیش از یک گونه از پارازیتوئیدها یک میزبان را پارازیته کنند مالتی پارازیتیسم رخ داده است. برای آشنایی بیشتر با طبقه‌بندی‌های مختلف انواع پارازیتیسم در حشرات به ون دریش و بیلوز (۲۰۱۲) مراجعه شود.

۲. به احتمال زیاد منظور وات (۱۹۶۱) در اینجا در توجیه استفاده از پارامترهای آئرودینامیک، مالتی پارازیتیسم بوده است.

3. Passive group competition

4. Schmalhausen

معادلاتی چون معادله ۷ که یک زیر–زیر–مدل شاخص است، ضرورت دوم در کابرد مدل‌های ریاضی مبنی بر شفاف‌سازی اهداف تحقیق را برآورده می‌سازد. برای فرمول‌بندی مدل و به دست آوردن مقادیر پارامترهای معادله ۷، نیاز به مطالعه گسترده تعداد زیادی از پارازیت‌ها از گونه‌های متنوع در زمینه‌های سه‌گانه‌ای دارد که عبارت‌اند از:

۱- سیستم علت–معلولی (طول بدن–دما–باروری)؛
۲- رابطه بین کارایی جستجوگری و فاکتورهای کنترل کننده آن؛ و
۳- کاهش کارایی جستجوگری و وابستگی آن به تراکم پارازیت و فاکتورهای خاص هر گونه تغییردهنده اثر تراکم پارازیت.

چنین تحقیقی لازم است در برگیرنده ترکیبی از دو فعالیت باشد. ابتدا، لازم است تا ثابت‌هایی مانند a در شرایط طبیعی و در خصوص تعداد قابل توجهی از گونه‌های پارازیتوئید اندازه‌گیری شده، سپس، مطالعات فیزیولوژیک، بیوشیمیایی و رفتاری در آزمایشگاه انجام شود تا ضمن تحلیل مکانیزم‌ها مشخص شود کدام فاکتورها در تعیین a نقش دارند. به دست آوردن مقادیر متغیرهای مختلف قابل دست ورزی منتج به حداقل‌سازی روند رشد جمعیت آفت، یک مساله ریاضی ساده نیست. چنین مسائلی امروزه در حیطه شاخه‌ای از ریاضیات به نام تحقیق در عملیات[1] و با استفاده از روش‌های متنوع برنامه ریزی خطی[2]، غیرخطی و دینامیکی و از طریق الگوریتم‌های خاص قابل‌حل‌اند. با استفاده از ابزارهای موجود در ریاضیات کلاسیک و مدرن، با چند روش می‌توان برخی مقادیر را حداکثر یا حداقل سازی کرد. انتخاب هر روش به فرمولاسیون مدل و نیز طبیعت یا زیست‌شناسی مساله بستگی دارد. به اختصار به چند روش اشاره می‌شود:

۱- فرض نمایید که لازم است روند رشد جمعیت آفت $T_{t:t+1}$ حداقل‌سازی شود و دست‌ورزی همه متغیرهای موجود در مدل مجاز باشد. Piها را پارازیتوئیدها یا شکارگرها، Diها را عوامل بیماری‌زا و Wiها را فاکتورهای آب و هوایی در نظر بگیرید. چنان چه روند رشد جمعیت آفت به عنوان تابعی از این متغیرهای مستقل به صورت زیر

$$T_{t:t+1} = f(P_1 \dots P_n, D_1 \dots D_n, W_1 \dots W_n) \qquad (8)$$

در نظر گرفته شود می‌توان مقادیری از هر متغیر مستقل که باعث حداقل شدن $T_{t:t+1}$ می‌شود را به صورت زیر به دست آورد. شرط اول مشتق پذیر بودن این تابع نسبت به تمامی متغیرهای اشاره شده در بالا ست و دوم اینکه بایستی دارای یک حداقل یا حداقل‌های موضعی[3] مختلف قابل محاسبه با رویکردهای تکراری باشد. دستگاه معادلات با مشتقات جزئی زیر محاسبه می‌شوند.

$$\frac{\partial T}{\partial P_1} = f'_{P_1}(P_1 \dots P_n, D_1 \dots D_n, W_1 \dots W_n) \qquad (9)$$
$$\vdots$$
$$\frac{\partial T}{\partial W_n} = f'_{W_n}(P_1 \dots P_n, D_1 \dots D_n, W_1 \dots W_n)$$

سپس هر معادله در دستگاه ۹ را مساوی صفر قرار داده و همه به طور همزمان برای مقادیر مناسبی از $P_1$ تا Wn محاسبه می‌شوند. دو ایراد به این مدل وارد است. اول اینکه انسان نمی‌تواند همه متغیرهای مستقل مربوطه را کنترل نماید و ثانیا حل همزمان همه معادلات در دستگاه ۹ سختی ریاضیاتی قابل توجهی پدید می‌آورد. به هر حال پایه همه روش‌های مزبور همین رویه است. همه روش‌های معادل روش ۱ در بالا پاسخگوی این سوال هستند که کدام مقادیر از هر یک از متغیرها به حداقل‌سازی روند رشد جمعیت آفت می‌انجامند. به بیان دیگر، مقدار صفر برای هر متغیر گویای لزوم عدم به کارگیری آن عامل کنترل است.

۲- بیائید مساله را کمی پیچیده‌تر و در عین حال واقعی‌تر تعریف کنیم. هدف، حداقل‌سازی روند رشد جمعیت و $N_t$، تعداد حشرات آفت درست قبل از تخم‌گذاری در سال t، است. فرض کنیدکه کنترلی بر این جمعیت و نیز آب و هوا در دست نباشد بدین معنی که برخی متغیرها در تنظیم روند رشد جمعیت از کنترل خارج باشند. در چنین مواردی مجموعه معادلات ۹ شامل یک معادله به ازای هر متغیر مستقلی خواهد بود که توانایی کنترل آن فراهم است. سایر متغیرهای مستقل به عنوان ثابت با مقادیر در سال t در نظر گرفته می‌شوند. مجددا مساله یافتن حداقل تابعی است که محدودیت‌های نقطه‌ای در آن اعمال می‌شود.

۳- فرمول بندی مورد اشاره در ۲ هنوز به اندازه کافی واقعی نیست زیرا علاوه بر محدودیت نقطه‌ای روی جواب مساله، محدودیت‌های دیگری وجود دارند که جزئیات بیشتری دارند. برای مثال در کنترل شیمیایی چنانچه غلظت سم مصرفی (دوز) و یا دفعات سم پاشی خیلی افزایش یابد عواقب عدیده ای در بر دارد. اولا، قیمت سموم افزایش خواهد یافت و سود حاصل از تولید محصولات کاهش می‌یابد؛ ثانیا، اثرات جانبی مخرب روی دیگر فون‌های منطقه همچون فون حشرات مفید رخ خواهد داد؛ و ثالثا از حد مجاز باقیمانده سموم در محصولات عدول خواهد شد. معادل همین نگرانی‌ها در خصوص کنترل بیولوژیک و نیز کنترل زراعی نیز متصور است. در خصوص واردسازی شکارگرها، پارازیتوئیدها و عوامل بیمارگر، رهاسازی جمعیت‌های بزرگ گران و رهاسازی کم بی‌تاثیر بوده و به سهولت از محیط حذف می‌شوند. چنانچه انواع مختلف محدودیت‌های اشاره شده در بالا در نظر

1. Operation research

۲. Linear programming که موضوعی متفاوت از برنامه نویسی کامپیوتری Computer programming است.
۳. Local extremum شامل مینیمم و ماکزیمم موضعی و نقطه زینی است.

گرفته شوند ارتباط آن‌ها با یکدیگر به وضوح قابل مشاهده است. حداکثر هزینه برای رهاسازی عوامل بیوکنترل به هزینه لازم در سایر روش‌های کنترل بستگی دارد زیرا کل هزینه کنترل (بنا به ملاحظات اقتصادی) نبایست از یک مقدار معین تجاوز کند. به جای اعمال یک سری محدودیت‌های نقطه‌ای همانند آنچه در رویکرد ۲ آمد، می‌توان مساله حداقل/حداکثر سازی را با اتخاذ محدودیت‌های تابعی به صورت واقعی‌تری فرمول بندی نمود. در مساله اخیر معادله پایه به صورت

$$T_{t:t+1} = f(N_t, P_1 \dots P_n, D_1 \dots D_n, W_1 \dots W_n) \qquad (10)$$

است ولی تحت محدودیت‌هایی به فرم

$$P1_{P1} + P2_{P2} + \cdots C3_{C3} = 2700 \qquad (11)$$

در می آید که $P_1$ هزینه رهاسازی هر عدد پارازیتوئید/شکارگر اول، $P_2$ هزینه رهاسازی هر عدد پارازیتوئید/شکارگر دوم و $C_3$ هزینه اعمال کنترل شیمیایی به ازای هر هکتار است که به عنوان مثال کل این هزینه معادل ۲۷۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. مساله ۱۰ و محدودیت ۱۱ را می‌توان با ضرایب لاگرانژ (موجود در کتب حسابان پیشرفته) حل کرد.

سه روش بیشینه‌یابی اشاره شده در بالا را می‌توان به روش‌های کلاسیک حسابان حل نمود. سه روش بعدی به مقداری تغییر و توسعه در روش‌های قبلی نیاز دارد. در مساله قبل شرط ۱۱ در اصل گویای کمتر بودن هزینه‌ها از ۲۷۰۰ دلار است. این تفاوت به ظاهر جزئی ولی مهم از جنبه ریاضی به فرمول‌بندی قیدها به صورت

$$P1_{P1} + P2_{P2} + \cdots C3_{C3} \leq 2700 \qquad (12)$$

منجر می شود. پرواضح است که هیچگاه مقادیر دقیق هزینه‌ها یا مصرف مواد ضروری نیست بلکه کمتر یا مساوی آن‌ها مدنظر گرفته می‌شود. سه روش بعدی، از این قیود برای حل مساله اکسترمم (بیشینه/کمینه) استفاده می‌کنند. هر سه روش آتی با عنوان مسایل برنامه‌ریزی ریاضی از شاخه تحقیق در عملیات یاد می‌شوند.

۴- چنانچه مساله و نامعادلات مربوط به قیود به صورت خطی در نظر گرفته شوند یک مساله برنامه‌ریزی خطی ساخته می‌شود. به هر حال مجددا مساله خطی از واقعیت به دور است زیرا مساله روند رشد جمعیت آفات خطی نمی‌باشد و نرخ بسیاری از فرآیندهای زیر-زیر-مدل، همانند آنچه در معادله ۶ رخ می‌دهد، با رسیدن به مجانب‌ها کاهش می‌یابد.

۵- چنانچه معادلات پایه و نامساوی‌های قیود به صورت غیرخطی باشند مساله برنامه‌ریزی غیر خطی شکل می‌گیرد. الگوریتم‌های حل مساله با این رویکرد در منابع تحقیق در عملیات یافت می‌شود

۶- در کلیه موارد فوق، مساله در یک بازه زمانی t تا t+1 در نظر گرفته می‌شود ولی رویکرد کنترل آفات از این منظر متفاوت است. معادله ۱۰ به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$T_{t:t+1} = f(N_t, P_{1,t} \dots P_{n,t}, D_{1,t} \dots D_{n,t}, W_{1,t} \dots W_{n,t})$$

حال به عنوان نتیجه‌ای از تخصیص مقادیر خاص به متغیرهای مستقل معین و در نتیجه اتخاذ مقادیر معین توسط بقیه متغیرهای مستقل (آب و هوا و ....)، در سال t، معادله ۱۰ یک مقدار برای $T_{t:t+1}$ تولید می‌کند و این، مقدار $N_{t+1}$ را تعیین می‌کند زیرا طبق معادله ۱:

$$N_{t+1} = T_{t:t+1} N_t \qquad (13)$$

معادلات مشابه به معادله ۱۳ قابل توسعه برای متغیرهای مستقل معینی چون پارازیتوئیدها و شکارگرهاست. به عبارت دیگر یک سیستمِ بسته خواهد بودکه در آن $N_{t+n}$ نه تنها تابعی از اتفاقات در سالِ t+n در نظر گرفته می‌شود بلکه به عنوان تابعی از اتفاقات در سال‌های t+n-1، t+n-2، t+n-3 و غیره نیز هست.

شش رویکرد اشاره شده در بالا برای مساله اکسترمم‌یابی توابع به عنوان فرآیندهای تصمیم سازی تک مرحله‌ای در نظر گرفته می‌شوند. در مقابل رویکرد تصمیم‌سازی چند مرحله‌ای که دارای مزایایی نسبی است در ادامه شرح داده می‌شود. فرض کنید تصمیم این باشد که یک حشره با روش حذف تک مرحله‌ای کنترل شود. آیا این بهترین روش برای کنترل حشره است؟ علاوه بر این که تعمیم این روش به ابعاد گسترده غیرممکن است (یعنی کنترل یک مرحله‌ای کل جمعیت یک آفت در یک منطقه به هر روش)، دلایل دیگری نیز وجود دارد که نشان می‌دهد این روش بهترین راه نیست. به عنوان مثال معادله ۶ نشان می‌دهد که عوامل کنترل ممکن است به ازای یک واحد کنترل، بسیار بی‌تاثیر باشند و لذا وقتی که واحدهای زیادی برای کاربرد هم زمان و تک مرحله‌ای با هم جمع شوند بسیار گران خواهند شد. بنابراین احتمالا تقسیم فرآیند کنترل به چند مرحله مفیدتر واقع شود. برای پاسخ به این سوال به یک نظریه در خصوص تخصیص بهینه منابع به هر مرحله از کنترل نیاز است و برنامه ریزی دینامیکی ممکن است پاسخی به این نیاز باشد. حال فرض کنید قرار این باشد که کنترل حشره آفت به عنوان یک فرآیند تخصیص چندمرحله‌ای در نظر گرفته شود. این بدین مفهوم است که چگونه باید بودجه موجود در داخل یک فصل یا در بین فصول مختلف به هر روش کنترلی تخصیص داده شود. چنانچه n سال داشته و یا n زمان در یک فصل و برای هر n، از m روش کنترل استفاده شود لازم است شاخص رشد بلند-مدت جمعیت به عنوان تابعی از mn متغیر در نظر گرفته

شود. طبیعتا کار با چنین تابعی با لحاظ حداقل‌ها برای m و n برای یک آفت، سنگین و هزینه بر خواهد بود. در مقابل، پیشنهاد برنامه‌ریزی دینامیکی این است که به یک فرآیند تصمیم‌سازی چند مرحله‌ای به صورت چند فرآیند تصمیم سازی تک مرحله‌ای نگاه شود. این روش، آنالیز و ارتباط شکل خروجی‌های تابعی در مرحله nام به تصمیمات در مرحله ۱-nام است. در عمل یک فرآیند تصمیم‌سازی mn بعدی که برای یک نقطه ثابت در زمان در نظر گرفته شده است با n عدد فرآیند تصمیم‌سازی m بعدی در هر نقطه از زمان جایگزین می‌شود. به طور خلاصه به نظر می‌رسد روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی و دینامیکی در فرمول‌بندی مساله حداقل‌سازی شاخص رشد جمعیت یک آفت واقعی‌ترین روش‌ها هستند.

۷- روش کلاسیک در یافتن بیشینه‌های $T_{t:t+n}$ این است که برای یافتن نقاط بیشینه لازم است همه نقاط در فضای mn بعدی را جستجو نمود ولی امروزه با روش‌های ریاضی مدرن به همراه کامپیوترهای قوی می‌توان بیشینه‌ها را روی یک سطح n بعدی یا همان لاتیس (شبکه) پیدا کرد.

## ۳- بخش دوم، یک مثال کاربردی

در ادامه برای روشن شدن نحوه استفاده از مدل‌های پایه‌ای در تجزیه و تحلیل کنترل تلفیقی آفات بر اساس روش‌های شیمیایی و کنترل بیولوژیک، گزیده ای از مقاله تانگ و چک (۲۰۰۸) ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که همانند بخش اول، در این بخش نیز جملات عینا از مقاله مذکور ترجمه و تشریحی مختصر برای روشن شدن برخی مطالب اضافه شده است.

کنترل خسارت حشرات آفت در قالب رویکرد نوین مدیریت تلفیقی آفات[1] IPM که در دهه ۱۹۵۰ میلادی معرفی (استرن[2]، ۱۹۷۳) و سپس در دهه‌های ۷۰ و ۸۰ میلادی توسعه داده شد (ون لنترن[3] ۲۰۰۰)، یک راهکار بلند مدت است که در آن روش‌های مختلف کنترل جمعیت (و به تبع آن خسارت) حشرات آفت بر اساس اتفاقات ترکیبی فنولوژیک گیاه میزبان-حشره گیاه خوار-دشمنان طبیعی با یکدیگر ترکیب شده، در قالب یک برنامه مدیریتی برای کاهش جمعیت حشرات آفت به زیر سطح زیان اقتصادی EIL[4] و درست قبل از این سطح جمعیتی یعنی در آستانه اقتصادی ET[5] اعمال می‌شود. ET بیانگر جمعیتی از حشرات است که اقدام کنترلی برای جلوگیری از رسیدن به EIL بایستی صورت پذیرد و EIL اندازه‌ای از جمعیت حشره است که خسارت اقتصادی وارد می‌سازد. بنابراین فهم و استفاده مناسب از سطوح تصمیم سازی اقتصادی در مواجهه با آفات باعث افزایش تولید و سود حاصل از آن و حفظ کیفیت محیط زیست به دلیل مصرف بهینه سموم شیمیایی می‌گردد.

یکی از جنبه‌های جذاب یک سیستم دینامیکی، کاربرد آن در پیشگویی وقایع است. برهمکنش‌های میزبان-پارازیتوئید با روش‌های کنترل تلفیقی به منظور تشخیص فاکتورهای پایدارکننده چنین برهمکنش‌هایی توسط محققین زیادی مدل سازی و مطالعه شده است. به طور خاص، مدل‌های تحلیلی به دلیل سادگی‌شان، مطالعه فاکتورهای موثر بر پایداری سیستم در نقطه تعادل مرتبط با پارازیتیسم را تسهیل می‌سازند. در مقاله تانگ و چک (۲۰۰۸) هر دو رویکرد معادلات دیفرانسیل که مدل‌های زمان پیوسته‌اند و معادلات تفاضلی که مدل‌های زمان گسسته هستند برای مدل‌سازی یک سیستم میزبان-پارازیتوئید با لحاظ یک راهکار کنترل تلفیقی به کار گرفته شده است. مدل دیفرانسیلی برای برهمکنش‌های شکار-شکارگری‌ای توسعه داده شده است که در آن جمعیت‌های میزبان و پارازیتوئید در داخل نسل‌ها و نیز بین نسل‌های متوالی به طور پیوسته به روز می‌شوند. بنابراین زمانی که نسل‌های میزبان همپوشانی دارند یک دستگاه متشکل از دو معادله دیفرانسیلی به صورت زیر برای توصیف دینامیک جفتی میزبان-پارازیتوئید مناسب‌تر است.

$$\frac{dH}{dt} = b_1(H)H - f(H,P)P, \qquad (14)$$
$$\frac{dP}{dt} = \gamma_1 f(H,P)P - \mu P$$

که در آن H و P فراوانی میزبان و پارازیتوئید (در اینجا عموما مرحله بالغ حشرات در نظر گرفته می‌شود)، $b_1(H)$ نرخ خالص سرانه رشد جمعیت میزبان، $f(H,P)$ واکنش تابعی سرانه پارازیتوئید یا نرخ حمله به میزبان، $\mu$ نرخ مرگ‌ومیر سرانه پارازیتوئید و $\gamma_1$ کارائی تبدیل میزبان به پارازیتوئید است. لازم به ذکر است مدل نیکلسون-بیلی[6] برهمکنش میزبان-پارازیتوئید در نسل‌های گسسته را توصیف می‌کند و یک نقطه تعادل مثبت دارد که هیچگاه پایدار نیست (نیکلسون و بیلی ۱۹۳۵). فاکتورهای پایدارکننده متنوعی چون ناهمگونی فضایی، جستجوی تصادفی، رشد وابسته به تراکم میزبان، انواعی از واکنش تابعی پارازیتوئیدها و مداخله متقابل[7] بین پارازیتوئیدها برای همزیستی پایدار سیستم‌های تک میزبان-تک پارازیتوئید به کار گرفته شده‌اند. یک دستگاه معادلات تفاضلی جفت شده میزبان-پارازیتوئید با نسل‌های گسسته را به صورت زیر می‌توان نوشت.

$$H_{t+1} = b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t) \qquad (15)$$
$$P_{t+1} = \gamma_2 H_t[1 - g(H_t,P_t)] + \delta P_t$$

1. Integrated Pest Management
2. Stern
3. Van Lenteren
4. Economic Injury Level
5. Economic Threshold
6. Nicolson-Baily
7. Mutual interference

که در آن $H_t$ و $P_t$ فراوانی جمعیت میزبان و پارازیتوئید در زمان t، $b_2(H)$ نرخ خالص سرانه افزایش جمعیت میزبان، $g(H,P)$ نسبتی از جمعیت میزبان که از پارازیته شدن فرار می‌کنند، $\gamma_2$ واکنش عددی یا تعداد پارازیتوئیدهای تولید و خارج شده از هر میزبان منفرد پارازیته و $\delta$ که همواره مقادیر بزرگ‌تر مساوی صفر دارد بقای مستقل از تراکم پارازیتوئیدهاست که در نسل t نمود می‌یابد. نرخ بقای بین نسلی پارازیتوئیدها متاثر از چندین فاکتور – از قبیل مهاجرت به داخل، بقای زمستانه و پارازیته کردن میزبان جایگزین– است. واکنش تابعی یک مصرف کننده به تغییر در تراکم‌های یک منبع عموما به صورت نرخ مصرف سرانه منبع توسط مصرف کننده به عنوان تابعی از تراکم منبع در نظر گرفته می‌شود. امروزه پرکاربردترین مدل برای توصیف واکنش تابعی پارازیتوئیدها معادله دیسک هولینگ نوع II است که افزایش با شیب کاهش یابنده به سطح مجانبی اشباعی در نرخ حمله را توصیف می‌کند (هولینگ[1] ۱۹۵۹). رشد میزبان در غیاب پارازیتوئیدها عموما به صورت لجستیک و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$b_1(H) = r\left(1-\frac{H}{K}\right), \qquad b_2(H) = \exp\left(r\left(1-\frac{H}{K}\right)\right) \qquad (16)$$

که در آن r نرخ رشد ذاتی و K ظرفیت قابل تحمل محیط می‌باشد. واکنش تابعی نوع II هولینگ به فرم زیر فرمول‌بندی می‌شود.

$$f(H,P) = \frac{\alpha T H}{1+\alpha T_h H}, \qquad g(H,P) = exp\left(\frac{\alpha T H}{1+\alpha T_h H}\right) \qquad (17)$$

که در آن $\alpha$ نرخ جستجوگری لحظه‌ای به معنی میانگین تعداد دفعات مواجهه سرانه هر پارازیتوئید با میزبان در هر واحد زمانی جستجوست، T کل زمان در دسترس برای جستجو یعنی کل زمانی که میزبان‌ها در معرض پارازیتوئیدها قرار دارند و Th زمان دستیابی یعنی مدت زمان مابین مواجهه با یک میزبان تا جستجوی مجدد یک میزبان دیگر و به عبارت بهتر مدت زمان مصروف برای شکار کردن و مصرف یک میزبان/طعمه است. یادآور می‌شود که انواع دیگری از واکنش‌های رشدی همچون توابع رشدی بورتون–هالت[2] (مدل گسسته) و گامپرتز[3] (مدل پیوسته) برای جمعیت میزبان موجود است. همچنین ترکیبات مختلفی از این توابع رشدی و نیز واکنش‌های تابعی نیز قابل تعریف و کاربرد هستند که منجر به سیستم‌های متفاوت میزبان–پارازیتوئید و رفتار دینامیکی متفاوت در این سیستم‌ها می‌شود. مدل زمان پیوسته ۱۴ با توابع رشدی $b_1(H)$ و واکنش‌های تابعی $f(H,P)$ مختلف، دینامیک بسیار ساده‌ای دارد که فقط شامل نقطه تعادل پایدار[4] و یا چرخه‌های حدی[5] است. با این حال، بدینگتون[6] و همکاران (۱۹۷۵) نشان دادند که مدل‌های زمان گسسته میزبان–پارازیتوئید می‌توانند مجموعه غنی‌تری از انواع الگوهای دینامیکی شامل همزیستی، انشعاب دوبل شدن دوره تناوب[7] و جواب‌های آشوبناک[8] را نشان دهند. طبیعت گسسته فعالیت‌های انسان و اثرات منجر به تغییرات بسیار سریع در تراکم جمعیت آفات را می‌توان با معادلات دیفرانسیل تکانشی[9] توصیف کرد. چنین معادلاتی از سه جز تشکیل شده‌اند:

یک معادله دیفرانسیل زمان پیوسته که حاکم بر وضعیت سیستم در بین تکانه‌هاست؛ معادله تکانه که یک جهش تکانه‌ای را با یک تابع جهشی در زمان رخ دادن جهش مدل می‌کند؛ و یک قید جهش که مجموعه‌ای از جهش‌ها است که در آن معادله جهش فعال است.

به عنوان مثال، کاهش تکانشی تراکم جمعیت یک آفت با شکار انبوه و یا مسموم کردن آن با سموم شیمیایی ممکن است. همچنین افزایش تکانشی جمعیت یک شکارگر یا پارازیتوئید با تولید و رهاسازی انبوه آن امکان پذیر است. مدل‌های ۱۴ و ۱۵ با لحاظ یک راهکار مدیریت تلفیقی از قبیل رهاسازی دشمنان طبیعی یا پاشش سموم شیمیایی در زمان رسیدن جمعیت آفت به ET به صورت زیر توسعه داده شده است. از جنبه ریاضی، توسعه مدل ۱۴ با ET به دلیل پیوستگی جواب‌ها آسان است و به صورت (۱۸) توسعه می‌یابد.

$$\begin{cases} \left.\begin{aligned} \frac{dH(t)}{dt} &= b_1(H)H - f(H,P)P \\ \frac{dP(t)}{dt} &= \gamma_1 f(H,P)P - \mu P \end{aligned}\right\} & if \quad H(t) < ET \\ \left.\begin{aligned} H(t^+) &= (1-q_1)H(t), \\ P(t^+) &= (1+q_2)P(t)+\tau \end{aligned}\right\} & if \quad H(t) = ET \\ H(0^+) = H_0 < EL, \qquad P(0^+) = P_0 \end{cases} \qquad (18)$$

1. Holling
2. Beverton-Holt
3. Gompertz
4. Stable equilibrium
5. Limit cycle
6. Beddington
7. Period doubling bifurcation
8. Chaotic solutions
9. Impulsive

که در آن $H(t^+)$ و $P(t^+)$ فراوانی میزبان و پارازیتوئید بعد از اعمال راهکار کنترلی در زمان t و $H(0^+)$ و $P(0^+)$ تراکم اولیه از جمعیت آن‌ها می‌باشد. در این مدل فرض می‌شود که تراکم اولیه جمعیت میزبان همیشه کمتر از ET است. در مدل ۱۸، $0 \le q_1 < 1$ نسبتی است که متناسب با آن، تراکم آفت به محض رسیدن جمعیت به ET با کشتن یا شکار انبوه کاهش می‌یابد در حالیکه $q_2 \ge 0$ نسبتی برای نرخ رهاسازی پارازیتوئیدها و $\tau \ge 0$ تعداد ثابت دشمنان طبیعی رهاسازی شده در زمان t است. با جمعیت اولیه $(H_0,P_0)$ یکی از سه حالت زیر اتفاق می‌افتد:

- بیشترین جمعیت میزبان همیشه زیر ET باقی می‌ماند؛
- بیشترین جمعیت میزبان به تعداد متناهی بار به ET می‌رسد؛
- بیشترین جمعیت میزبان نامتناهی بار به ET می‌رسد.

نتیجتا زمان‌های رسیدن جواب‌ها به ET تعیین شده $(t_n, n=1,2,\ldots)$ و بر اساس آن یک برنامه مدیریت تلفیقی طراحی می‌شود. به علاوه، $Tnc=t_n-t_{n-1}$ با $t_0=0$ به عنوان طول دوره طغیان میزبان در نظر گرفته می‌شود. n می‌تواند بسته به جواب مدل‌ها متناهی یا نامتناهی باشد. به دلیل ناپیوستگی و پیچیدگی رفتار دینامیکی مدل‌های گسسته، جواب‌ها دقیقا ET را قطع نمی‌کنند. اتفاقی که عموما رخ می‌دهد جهش ناگهانی به زیر یا بالای ET در برخی نسل‌ها است که در صورت وقوع چنین وضعیتی، تاکتیک‌های کنترلی همچون کنترل بیولوژیک و کنترل زراعی، به دلیل تاخیر در پاسخ میزبان، قادر به کاهش فوری تراکم آفت نیستند. بنابراین یک سمپاشی در این نسل لازم است تا جمعیت سریع، مطمئن و آسان کاهش یابد. لازم به ذکر است اتکال کامل به آفت کش‌های شیمیایی یک رویکرد نامطلوب به شمار می‌رود، زیرا حشرات به سرعت مقاوم می‌شوند و در نتیجه راهکارهای موثر بایستی در یک برنامه تلفیقی در هم ادغام و مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال اگر چنانچه آفتی در نسل k یک طغیان داشته باشد به نحوی که $b_2(H_k)H_k g(H_k,P_k) > ET$، یک سمپاشی لازم است و حداقل تعداد $T_k^d b_2(H_k)H_k g(H_k,P_k)$ حشره آفت لازم است کشته شوند تا $(1-T_k^d)b_2(H_k)H_k g(H_k,P_k)=ET$ گردد که در آن $1-T_k^d$ نسبت نرخ بقا در نسل k بعد از کاربرد سم می‌باشد که به تراکم میزبان و پارازیتوئید بستگی دارد. برای کنترل موثرتر لازم است دیگر روش‌های کنترل از قبیل کنترل بیولوژیک به طور هم زمان به کار روند. لذا بر اساس مدل ۱۵ مدل زیر با لحاظ ET توسعه می‌یابد.

$$\left.\begin{array}{c} H_{t+1} = \min\{b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t), ET\}, \\ P_{t+1} = \gamma_2 H_t[1-g(H_t,P_t)] + \delta P_t, \\ P_{t+1^+} = (1+q_2)P_{t+1} + \tau, \quad if \quad H_{t+1} = ET, \end{array}\right\} \qquad (19)$$

$$H_{0^+} = H_0 < ET, \quad P_{0^+} = P_0$$

که در جمله اول کمترین مقدار بین آستانه اقتصادی و جمعیت میزبان در زمان t در نظر گرفته می‌شود. $q_2 \ge 0$ نسبتی برای رهاسازی پارازیتوئیدها و $\tau \ge 0$ تعداد ثابت دشمنان طبیعی رهاسازی شده در زمان t می‌باشد. نرخ کشتن آنی با حشره کش را می‌توان با رابطه ۲۰ تعیین کرد.

$$T_t^d = \left\{\begin{array}{ll} 1 - \dfrac{ET}{b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t)}, & if \quad b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t) > ET, \\ 0 & otherwise \end{array}\right\} \qquad (20)$$

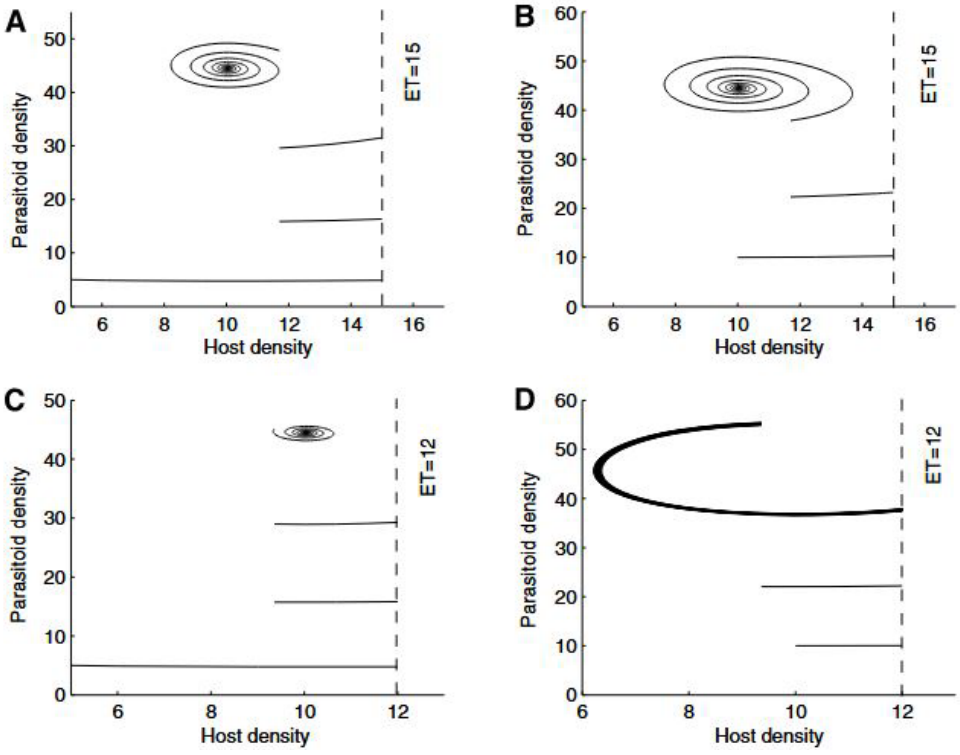
برای عمومیت دادن بیشتر به فرمولاسیون مدل، زمانی که حشره آفت در نسل k یک طغیان داشته و از ET عدول نماید یک سمپاشی به کار می‌رود تا $(1-T_k^d)b_2(H_k)H_k g(H_k,P_k)=(1-q_1)$ ET برقرار شود، آنگاه مدل زیر به دست می‌آید.

$$\left.\begin{array}{c} H_{t+1} = b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t), \\ P_{t+1} = \gamma_2 H_t[1-g(H_t,P_t)] + \delta P_t, \end{array}\right\} \quad if \;\; b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t) \le ET, \qquad (21)$$

$$\left.\begin{array}{c} H_{t+1^+} = (1-q_1)ET, \\ P_{t+1^+} = (1+q_2)P_{t+1} + \tau, \end{array}\right\} \quad if \quad b_2(H_t)H_t g(H_t,P_t) > ET$$

$$H_{0^+} = H_0 < ET, \quad P_{0^+} = P_0$$

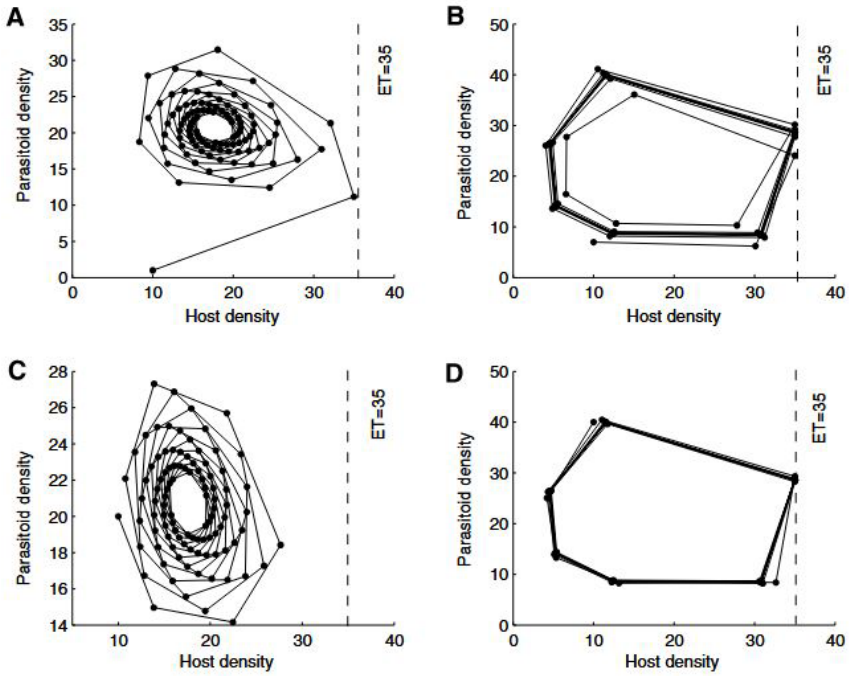
مدل ۲۱ در حالت $q_1=0$ به مدل ۱۹ کاهش می‌یابد. مدل‌های ۱۸ و ۱۹ شامل فاکتورهای کلیدی یک برنامه کنترل تلفیقی شامل ET، نرخ کشتن لحظه‌ای ($q_1$ در مدل ۱۸ و Ttd در مدل ۱۹)، دوز و زمان اعمال سمپاشی (Tnc و Ttd) و نرخ رهاسازی دشمنان طبیعی ($q_2$ و $\tau$) هستند و لذا قابل استفاده در تخمین و پیش‌بینی تراکم جمعیت میزبان–پارازیتوئید، کمک در طراحی یک برنامه مدیریتی مناسب، تصمیم سازی مدیریتی، کنترل جمعیت آفت تا تنزل به زیر ET و جلوگیری از خسارت اقتصادی‌اند. پارامترهای Tnc و Ttd اطلاعات ضروری برای تصمیم سازی در خصوص چگونگی به کار بستن موفق یک برنامه مدیریت تلفیقی ارائه می‌دهند. با حل عددی مدل‌های ۱۸ و ۱۹ فاکتورهای موثر بر یک برنامه مدیریت تلفیقی از قبیل تراکم اولیه جمعیت، نسبت میزبان–پارازیتوئید و روش‌های انبوه سازی یا افزون سازی[1] کنترل بیولوژیک و نیز روابط بین ET، وضعیت‌های پایدار جمعیت و روش‌های کنترل قابل محاسبه است. چنانچه ET نسبتا بزرگ باشد (مثلا بزرگتر از بیشترین دامنه نوسانات جمعیت میزبان)، موفقیت روش‌های کنترل به میزان زیادی به مقادیر اولیه و نسبت‌های میزبان–پارازیتوئید بستگی خواهد داشت. در مدل ۱۸ با لحاظ مقادیر $r=1.9, T=100, T_h=1, K=150, \alpha=0.0004, \tau=10, q_1=0.22, q_2=0.2$ مختصات نقطه تعادل مثبت پایدار سیستم برابر $E_1=(10.04,44.498)$ خواهد بود و لذا با لحاظ ET بالاتر از ۱۰/۰۴ اثر دو مقدار اولیه (۵،۵) و (۱۰،۱۰) و دو آستانه اقتصادی ۱۲ و ۱۵ بر راهکارهای مدیریت تلفیقی در شکل ۱ نشان داده شده است.




**شکل ۱**– اثر مقادیر اولیه و سطوح مختلف آستانه اقتصادی بر راهکارهای مدیریت تلفیقی بر اساس مدل ۱۸

بخش A در شکل ۱ بیانگر آن است که با مقدار اولیه (۵و۵) جواب دستگاه با لحاظ مقادیر فرضی فوق برای پارامترها در نهایت پس از اعمال سه برنامه کنترل تلفیقی به نقطه تعادل پایدار سیستم $E_1$ میل می‌کند. حال اگر مقدار اولیه‌ی (۱۰و۱۰) لحاظ شود، بخش B در شکل ۱ نشان می‌دهد که پس از اعمال دو بار کنترل تلفیقی، جمعیت به نقطه تعادل پایدار خود میل می‌کند. حال چنانچه ET را از ۱۵ به ۱۲ کاهش داده و مقادیر اولیه به صورت قبل باشد، بخش C در شکل بیانگر آن است که همان نتایج A با مقدار اولیه (۵و۵) به دست می‌آید در حالی که با مقدار اولیه (۱۰و۱۰) یک راهکار کنترلی متناوب لازم است تا سیستم به تعادل برسد (شکل ۱–D). در مجموع می‌توان دریافت که با مقادیر اولیه مختلف و آستانه های متفاوت، ملزم به اتخاذ راهکارهای مختلف کنترلی هستیم. آنالیز مشابه با استفاده از مدل ۱۹ به نتایج نشان داده شده در شکل ۲ منتج می‌شود.

۱. Augmentation که خود شامل دو حالت رهاسازی تقویتی inoculative release و رهاسازی انبوه mass-release یا inundation می‌باشد.




**شکل ۲**- اثر مقادیر اولیه و سطوح مختلف آستانه اقتصادی بر راهکارهای مدیریت تلفیقی بر اساس مدل ۱۹

در اینجا با لحاظ مقادیر r=1.9, T=100, $T_h$=1, K=50, $\alpha$=0.0006, $\delta$=0.4, $q_2$=0.2 ,$\tau$=10، مدل ۱۹ دارای نقطه تعادل مثبت پایدار $E_2$=(17.57,20.75) می‌باشد. جواب نشان داده شده در بخش A شکل ۲ با مقدار اولیه $(H_0,P_0)$=(1,10) بیانگر آن است که جواب دستگاه پس از یک بار کنترل تلفیقی به $E_2$ میل می‌کند ولی با تغییر مقدار اولیه به $(H_0,P_0)$=(10,7)، جواب دستگاه در بخش B شکل ۲ نشان می‌دهد که جمعیت میزبان بی‌نهایت بار طغیان خواهد داشت و لذا یک کنترل تلفیقی متناوب در این حالت لازم است. اما چنانچه جمعیت اولیه پارازیتوئید به ۲۰ افزایش یابد جواب دستگاه بدون اثر تکانشی بوده و مستقیما به $E_2$ می‌رسد (بخش C شکل ۲). در این حالت مشاهده می‌شود که دشمنان طبیعی می‌توانند طغیان میزبان را با موفقیت فرونشانده و یک سیستم پایدار میزبان-پارازیتوئید ایجاد کنند. حال اگر جمعیت اولیه پارازیتوئید باز هم افزایش و به ۴۰ برسد، بخش D شکل ۲ بیانگر آن است که یک راهکار کنترل متناوب لازم است تا جمعیت میزبان کاهش یابد و از خسارت اقتصادی جلوگیری به عمل آید. این نتیجه موید اینست که رهاسازی اشباعی پارازیتوئیدها ضرورتا در کنترل حشرات آفت مفید نیست.

مثال فوق تنها یک نمونه از کاربرد مدل‌های ریاضی در تجزیه و تحلیل سیستم‌های میزبان-پارازیتوئید است که می‌تواند اطلاعات مفیدی را در زمینه شرایط حصول سیستم‌های پایدار در زمان در اختیار قرار دهد. با نگرش دقیق‌تر به سیستم‌های دلخواه و اعمال تغییرات در هر بخش از مدل‌های موجود در منابع همچون مدل ۱۸ و ۱۹ و با استفاده از رویکردهای معرفی شده در بخش اول مقاله می‌توان به مدل‌هایی که سیستم مورد نظر را به نحو بهتری توصیف کنند دست یافت. در مجالی دیگر، رویکردهای تحلیلی، تجربی و یا تجربی-تحلیلی مورد استفاده توسط ابداع کنندگان مدل‌های مختلف موجود در زمینه شکارگری و پارازیتیسم از قبیل لوتکا-ولترا، نیکولسون-بیلی، هولینگ، ایولف-گاوس[1]، رویاما[2]، وات، تامسون-استوی[3] و هسل-وارلی[4] و نقش آفرینی یا عدم نقش آفرینی آن‌ها در افزایش آگاهی از برهم کنش‌های شکار-شکارگری یا میزبان-پارازیتیسم و همچنین دخل و تصرف‌های صورت گرفته در آن‌ها توسط متاخرین آن‌ها بر اساس مقاله کلیدی رویاما ۱۹۷۱ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## تشکر و قدردانی

از استاد گرامی، جناب آقای دکتر غلامرضا رکنی لموکی به دلیل ارائه پیشنهادهای ارزنده برای بهبود کیفیت مقاله تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از محقق محترم Sanyi Tang به دلیل اجازه استفاده عینی از فرمول‌ها و شکل‌های موجود در مقاله ایشان در مقاله حاضر تشکر می‌شود.

1. Ivlev-Gause
2. Royama
3. Thompson-Stoy
4. Hassell- Varley

## منابع


1. Beddington, J.R., Free, C.A. and Lawton, J.H., 1975. Dynamic complexity in predator-prey models framed in difference equations. *Nature*, 255(5503), pp.58-60.
2. Carey, J.R., 2001. Insect biodemography. *Annual review of entomology*, 46(1), pp.79-110.
3. Gause, G. F. 1934. The struggle for existence. 123-147.
4. Holling, C.S., 1959. Some characteristics of simple types of predation and parasitism. The canadian entomologist, 91(7), pp.385-398.
5. Lotka, A.J., *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins Co, Baltimore,(New York, 1925). Reprinted in 1956 as Elements of Mathematical Biology.
6. Nicholson, A.J. and Bailey, V.A., 1935. The balance of animal populations.
7. Riemschneider, R., 1954. Configuration et action de certains insecticides. Examen Stéréochimique et toxicologique d'analogues du DDT. Chim. Ind, 72, p.261.
8. Royama, T.,1971.A comparative study of models for predation and parasitism.Population Ecology,13, pp.1-91.
9. Schmalhausen, I.I., 1949. Factors of evolution: the theory of stabilizing selection.
10. Stern, Vernon M. 1973. Economic thresholds. 259-280.
11. Tang, S. and Cheke, R.A., 2008. Models for integrated pest control and their biological implications. *Mathematical Biosciences*, 215(1), pp.115-125.
12. Van Driesche, R. and Bellows Jr, T.S., 2012. Biological control. Springer Science & Business Media.
13. Van Lenteren, J.C., 2000. Success in biological control of arthropods by augmentation of natural enemies. In Biological control: measures of success (pp. 77-103). Dordrecht: Springer Netherlands.
14. Volterra, V., 1926. Variazioni e fluttuazioni del numero d›individui in specie animali conviventi. Società anonima tipografica» Leonardo da Vinci».
15. Watt, K.E.F., 1959. A mathematical model for the effect of densities of attacked and attacking species on the number attacked. The Canadian Entomologist,91(3), pp.129-144.
16. Watt, K.E., 1961. Mathematical models for use in insect pest control. *The Memoirs of the Entomological Society of Canada*, 93(S19), pp.5-62.
17. Watt, K.E., 1960. The effect of population density on fecundity in insects. The Canadian Entomologist, 92(9), pp.674-695.

# فلسفه کاهش دوره‌های تحصیلی در آموزش عالی: تحلیلی نظام‌مند از ابعاد آموزشی، اقتصادی و سیاستی

**احمد شعبانی**
**دانشکده شیمی دانشگاه شهید بهشتی، تهران و عضو پیوسته شاخه شیمی فرهنگستان علوم**
**a-shaabani@sbu.ac.ir**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

در سال‌های اخیر، کاهش طول دوره‌های تحصیلی در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری به‌عنوان یکی از روندهای جهانی در نظام‌های آموزش عالی مطرح شده است. این تحول تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل از جمله تحولات بازار کار، الزامات عدالت آموزشی، ملاحظات اقتصادی، ظهور فناوری‌های نوین از جمله هوش مصنوعی، نیاز به همسویی با استانداردهای بین‌المللی و گذار از آموزش مدرک‌محور به آموزش مهارت‌محور شکل گرفته است. در این مقاله، موضوع کاهش طول دوره‌های تحصیلی با رویکردی تحلیلی ـ سیاستی بررسی شده و فلسفه این کاهش از پنج بُعد کلیدی آموزشی، پژوهشی، اقتصادی، اجتماعی و سیاستی مورد واکاوی قرار گرفته است. یافته‌ها نشان می‌دهد که در شرایط محدودیت منابع ملی و تشدید فشارهای اقتصادی، کاهش طول دوره‌های تحصیلی، در صورت حفظ و ارتقای کیفیت آموزشی، می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در تحقق عدالت آموزشی عمل کند؛ به‌گونه‌ای که با کاهش مدت زمان تحصیل، امکان افزایش ظرفیت پذیرش دانشجویان بدون دریافت شهریه فراهم شده و فشار اقتصادی بر خانوارها کاهش می‌یابد. با این حال، موفقیت اجرای این سیاست مستلزم بازنگری بنیادین در برنامه‌های درسی، حذف دروس تکراری و غیرضروری، و ایجاد هماهنگی سامانه‌ای و یکپارچه میان مقاطع آموزش عمومی و آموزش عالی است. این پژوهش با تأکید بر ضرورت تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد، در پی فراهم‌سازی زمینه گفت‌وگوی تخصصی میان صاحب‌نظران، سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان آموزش عالی بوده و با هدف کمک به طراحی و تدوین سیاست‌های کارآمد کاهش طول دوره‌های تحصیلی در نظام آموزش عالی ایران تدوین و ارائه شده است.

**کلید واژگان:** آموزش عالی، بازنگری برنامه درسی، برنامه‌ریزی درسی، دوره تحصیلی، عدالت آموزشی، فناوری‌های آموزشی، مهارت‌محوری

## ۱. پیش گفتار

ساختار نظام‌های آموزشی در سطح جهانی تنوع چشمگیری دارد؛ این تنوع نه‌تنها بین کشورها، بلکه در برخی موارد در درون یک کشور (بین استان‌ها یا مؤسسات آموزشی) نیز مشاهده می‌شود. تفاوت‌های ساختاری این نظام‌ها ریشه در اهداف آموزشی، طول دوره‌های تحصیلی، و نوع رشته‌های ارائه‌شده دارد (۱). در این چارچوب، هرگونه سیاست‌گذاری در حوزه کاهش طول دوره‌های دانشگاهی مستلزم دو شرط اساسی است: اول، نگاهی سامانه‌ای به کل نظام آموزشی از دوره ابتدایی تا تحصیلات تکمیلی؛ و دوم، بازنگری هماهنگ در برنامه‌ها و محتوای درسی در تمام مقاطع. تمرکز انحصاری بر یک مقطع تحصیلی (مانند کارشناسی) بدون توجه به پیوندهای آن با مقاطع پیشین و پسین، نوعی نگاه جزیره‌ای محسوب می‌شود که اجرای مؤثر سیاست‌ها را با چالش مواجه می‌سازد. افزون بر این، الگوگیری از تجربه سایر کشورها تنها در صورتی اثربخش خواهد بود که مبتنی بر شناخت عمیق و جامع از نظام آموزشی، ساختار برنامه‌های درسی و الزامات بومی آن کشورها انجام شود.

در ایران، تاریخچه اصلاحات آموزشی نشان‌دهنده‌ی دو رویکرد ناهمگون است: اولاً، تغییرات در نظام آموزش و پرورش اغلب بدون توجه کافی به پیوند آن با آموزش عالی انجام شده است؛ و ثانیاً، بازنگری‌های برنامه‌ای در دانشگاه‌ها گاهی بدون در نظر گرفتن ساختار آموزش عمومی صورت گرفته است. ازاین‌رو، انتظار می‌رود هرگونه تحول و اصلاح در دوره‌های دانشگاهی، در تعامل نزدیک، هماهنگ و هم‌افزا با نظام آموزشی و محتوای درسی مقاطع آموزش عمومی طراحی و اجرا شود. این مقاله با هدف تحلیل فلسفه کاهش دوره‌های تحصیلی و ارائه چارچوبی عملیاتی برای اجرای آن در ایران، به بررسی نظام‌مند ابعاد مختلف این سیاست می‌پردازد.

## ۲- ضرورت بازنگری پیش از کاهش دوره تحصیلی

قبل از اجرای کاهش دوره‌های آموزشی، ضروری است ابتدا باز نگری برنامه‌ها و مواد درسی انجام شود و سپس طول دوره‌ها بر اساس اهداف و نتایج بازنگری مورد بررسی و تعیین شود. با توجه به اینکه سیاست کلی پذیرش دانشجو در آموزش عالی کشور در

کلیه مقاطع تحصیلی به صورت متمرکز و درقالب آزمون‌های ملی (کنکور) که سوالات از مواد درسی از قبل تعریف و تعیین شده طراحی می‌شود، لذا بازنگری نیز می‌بایست به صورت متمرکز و توسط وزارت علوم با استفاده از خبرگان دانشگاهی صورت پذیرد. به عبارتی، برنامه ریزی درسی دانشگاه محور در نظام آموزش عالی آسیب‌های فراوانی به همراه خواهد داشت (۲). با توجه به پیشرفت‌های شگرفی که در فناوری‌های آموزشی از قبیل هوش مصنوعی و ... به عمل آمده و دامنه و وسعت آن در آینده افزون‌تر خواهد شد، قطعا بازنگری باید مبتنی بر آینده تا نگاه به امروز و دیروز طراحی و تدوین شود. کاهش طول دوره‌ها بدون بازنگری بنیادین در برنامه‌های درسی، تنها به حذف تصادفی دروس منجر خواهد شد و کیفیت آموزش را تضعیف می‌کند. در ایران، سیاست متمرکز پذیرش دانشجو از طریق آزمون‌های ملی، لزوم بازنگری متمرکز و هماهنگ برنامه‌های درسی را تقویت می‌کند. برنامه‌ریزی درسی دانشگاه‌محور که در آن هر دانشگاه به‌صورت مستقل برنامه درسی طراحی می‌کند در نظام آموزش عالی ایران با چالش‌هایی از جمله ناهماهنگی بین مؤسسات و کاهش کیفیت مواجه خواهد شد

## ۳- عدالت اقتصاد آموزشی

عدالت به معنای توزیع منصفانه منابع، فرصت‌ها و حقوق در جامعه است. عدالت اجتماعی زمانی محقق می‌شود که افراد، فارغ از طبقه، جنسیت، قومیت یا موقعیت اقتصادی، به فرصت‌های برابر دسترسی داشته باشند. اقتصاد به ساختار تولید، توزیع و مصرف کالاها و خدمات اشاره دارد و سیاست‌های اقتصادی، سطح رفاه اجتماعی، اشتغال، تورم و توزیع ثروت را شکل می‌دهند و یک اقتصاد کارآمد می‌تواند بستر مناسبی برای تحقق عدالت اجتماعی و جامعه پایدار را فراهم کند. آموزش یکی از مهم‌ترین ابزارهای ارتقای مهارت‌ها، آگاهی و توانمندی‌های افراد است و آموزش باکیفیت و در دسترس، نقش بزرگی در کاهش نابرابری‌ها دارد و موتور محرک توسعه اقتصادی و اجتماعی پایدار محسوب می‌شود. میان سه مفهوم عدالت، اقتصاد و آموزش ارتباطی عمیق و چند سویه وجود دارد. آموزش عادلانه، به افراد امکان می‌دهد مهارت کسب کنند و فرصت‌های اقتصادی بهتری داشته باشند. عدالت اقتصادی در آموزش، نابرابری را کاهش می‌دهد. عدالت آموزشی به معنی توزیع برابر امکانات آموزشی، و هرگونه نابرابری در آموزش مستقیماً به نابرابری اقتصادی منجر و ناپایداری جوامع می‌شود. در شرایطی که افزایش ظرفیت پذیرش دانشجویان رایگان روزبه‌روز دشوارتر می‌شود، کاهش طول دوره‌ها با حفظ کیفیت، راهکاری کلیدی برای گسترش عدالت آموزشی محسوب می‌شود.

در دنیای امروز که منابع ملی و طبیعی به شدت در حال کاهش است و عرضه و تقاضا به شدت نامتوازن شده است، سیاست‌ها و برنامه‌های افزایش بهره وری، کاهش هزینه‌ها به منظور غلبه بر حل مسائل و چالش‌ها در اولویت هر کشوری قرار دارد. کما اینکه وضعیت نامتوازن در حوزه‌های مختلف از قبیل آب سالم، هوای پاک، انرژی پاک، بهداشت و درمان (دارو و ...)، امنیت غذایی، آموزش برای همگان و ...که بخشی از اصول هفده‌گانه مجمع عمومی سازمان ملل متحد[1] است (۴ و ۳)، در اغلب کشورها با آسیب‌های جدی مواجه شده است. در سال‌های اخیر، در ایران نیز به دلیل کاهش و محدودیت منابع، آسیب‌های برخی از این اهداف از قبیل هوای پاک، آب سالم، انرژی پاک و ... تشدید شده و کم کم تبدیل به چالش و بحران می‌شود. در حوزه آموزش نیز، تحصیل در مدارس غیرانتفاعی و دانشگاه‌های غیر انتفاعی هزینه‌های سرسام آوری به خانواده ها تحمیل می‌کند، با اطمینان می‌شود اذعان کرد از جمله عوامل موثر در کاهش نرخ رشد جمعیت و آسیب‌های اجتماعی محسوب می‌شود.

## ۴- تعداد دانشجویان شاغل بدون پرداخت شهریه در کشور

در حال حاضر، تعداد کل دانشجویان وزارت عتف در ایران در سال ۱۴۰۲ حدود ۳,۱ میلیون نفر گزارش شده است. بدون احتساب دانشجویان وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی (که جمعا حدود ۱۹۰ هزار دانشجوست)، حدود ۴۲۰ هزار دانشجو در مقطع کارشناسی(۳۸ درصد)، ۱۹۵ هزار درمقطع ارشد (۳۸درصد) و ۶۳ هزار نفر در مقطع دکتر (۲۷,۶ در صد) از کل دانشجویان کشور، در وزارت عتف تحصیل می‌کنند. به عبارتی در سه مقطع تحصیلی دانشگاهی حدود ۶۸۸ هزار دانشجو از ۳,۱ میلیون دانشجو در کشور در وزارت عتف (حدود ۲۲ درصد از کل دانشجویان) به تحصیل اشتغال دارند. اگر دانشجویان پردیسی و نوبت دوم شهریه پرداز در دانشگاه‌های دولتی معاف از شهریه کسر شود، درصد و تعداد کل دانشجویان بدون پرداخت شهریه در کشور در دانشگاه‌های دولتی حتی کمتر از ۲۲ درصد خواهد شد (۵). لازم به ذکر است درصد کمی از دانشجویان معاف از شهریه در دانشگاه‌های برخوردار تحصیل می‌کنند.

چنانچه اشاره شد، مهم‌ترین نوع عدالت، عدالت آموزشی است که پایداری اقتصادی، سیاسی، فرهنگی و اجتماعی را در پی دارد. در نظام آموزشی کشور، پذیرش دانشجو، مبتنی بر عدالت دانشی و نخبگانی است و از طریق آزمون‌های سراسری سازمان سنجش آموزش کشور (کنکور) انجام می‌شود. لازم به ذکر است، در مقایسه با برخی از کشورها (آمریکا)، درصد مناسبی از دانشجویان در ایران با هزینه منابع ملی (دولتی) پذیرش و تحصیل می‌کنند. با توجه به اینکه امکان افزایش ظرفیت پذیرش دانشجو بدون پرداخت شهریه در کشور روز به روز دشوارتر می‌شود، لذا کاهش دروس و دوره‌ها دانشگاهی در هر سه مقطع با حفظ کیفیت، گامی مهم در راستای

1. United Nations

عدالت اقتصاد آموزشی دولتی و خانوارها محسوب می‌شود. چراکه با کاهش دوره‌ها مدت زمان ماند دانشجو در دانشگاه کاهش و بالطبع فرصت بیشتری برای پذیرش دانشجو بدون پرداخت شهریه فراهم می‌شود. به عبارتی با کاهش دوره کارشناسی از ۴ سال به ۳ سال، ۲۵ درصد ظرفیت جدید برای پذیرش دانشجوی بدون پرداخت شهریه فراهم می‌شود. با این حال، این مزیت تنها در صورتی تحقق می‌یابد که کیفیت آموزش و پژوهش لطمه نبیند؛ ظرفیت‌های ایجادشده به دانشجویان رایگان اختصاص یابد؛ و زیرساخت‌های آموزشی و استادی متناسب با افزایش ظرفیت تقویت و اصلاح شوند.

## ۵-برنامه درسی در نظام آموزشی فعلی در مقطع کارشناسی در کشور

در حال حاضر، دروس دوره های کارشناسی ۱۳۳ واحد می‌باشد که در ۸ ترم یا ۴ سال تحصیلی توزیع می‌شود. با کاهش حدود ۲۷ واحد درسی، تعداد واحدها به ۱۰۶ واحد تقلیل می‌یابد که در طول دوره ۳ سال یا ۶ ترم، هر ترم به طور متوسط ۱۷٫۶ واحد درسی، دانشجویان می‌توانند دانش آموخته شوند. شاید مهم‌ترین سوال این باشد که دروسی که می‌شود حذف یا تعداد واحد آنها را کاهش داد کدام‌اند؟

-دروس اختیاری ۱۲ واحد است. پیشنهاد می‌شود ضمن جایگزینی این دروس با عناوین جدید متناسب با نیازهای روز و آینده، مجموع آن‌ها به سه درسِ دو واحدی (در مجموع ۶ واحد) تقلیل یابد.

-دروس پایه ۲۲ واحد است. با توجه به تغییرات و اصلاحاتی که در محتوای درسی کتاب‌های دبیرستانی انجام شده است، پیشنهاد می‌شود تعداد واحدهای این بخش به نصف کاهش یابد.

در نتیجه، به‌طور تقریبی و سرانگشتی، از مجموع ۱۳۳ واحد درسی، با بازنگری در سه بخشِ دروس عمومی، اختیاری و پایه، بیش از ۲۰ واحد درسی کاسته خواهد شد.

لازم به ذکر است که به دلیل عدم رعایت منابع درسی استاندارد بین‌المللی که اغلب آن‌ها در فهرست منابع درسی ملی نیز معرفی شده‌اند، در برخی موارد، دروس تکراری یا دارای همپوشانی بالا، با عناوینی نظیر پیشرفته و یا با پیشوند و پسوندهای مشابه، در مقاطع بالاتر تحصیلی ارائه می‌شوند. به بیان دیگر، چنانچه ارائه دروس در مقطع کارشناسی مطابق با استانداردهای بین‌المللی صورت گیرد، ارائه و تکرار بسیاری از دروس در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی ضرورتی نخواهد داشت؛ کما اینکه در بسیاری از کشورهای اروپایی و سایر کشورها، دوره‌های تحصیلات تکمیلی عمدتاً پژوهش‌محور بوده و تعداد دروس نظری در این مقاطع محدود است. بنابراین، موضوع کاهش واحدها و دوره‌ها باید به‌صورت سامانه‌ای، یکپارچه و هم‌زمان در کلیه مقاطع تحصیلی

## ۶-دلایل دیگر در تبیین کاهش دوره های تحصیلی

### *۶-۱- تحول فلسفه آموزش از مدرک محوری به مهارت‌محوری*

در دنیای معاصر، ارزش تحصیلات عالی دیگر صرفاً در کسب مدرک تحصیلی نهفته نیست، بلکه در توانایی حل مسئله، تفکر انتقادی، و یادگیری مادام‌العمر جستجو می‌شود. این تحول فلسفی سبب شده است تا نظام‌های آموزشی به‌سوی دوره‌های کوتاه‌مدت، فشرده و مهارت‌آموزی کاربردی حرکت کنند (۶). در ایران، دانشگاه‌های علمی-کاربردی با رویکردی عمل‌گرا، موفق شده‌اند جذابیت ویژه‌ای در میان دانشجویان دنبال‌کننده اشتغال سریع ایجاد کنند. برنامه درسی این دانشگاه‌ها با ۶۵ تا ۷۰ واحد درسی و مجموع ۱۷۰۰ تا ۲۰۰۰ ساعت آموزشی در مدت ۲ تا ۳ سال قابل اجراست و بر ترکیب آموزش نظری در مرکز و آموزش عملی در محیط کار تأکید دارد. این دوره ها به دو روش نیمسالی و پودمانی اجرا می‌شود (۷).

### *۶-۲- پیشرفت فناوری‌های آموزشی و تغییر سلسله مراتب یادگیری*

فرایند آموزش معمولا در سه سطح انجام می‌شود. آموزش در سطح داده[1] (اطلاعات خام بدون زمینه) و آن عبارت است از آموزش اعداد، و یا آموزش نام یک پرنده بدون ارتباط با چیزهای دیگر. آموزش در سطح اطلاعات[2] (داده‌های پردازش شده با معنا) که در این سطح از آموزش، داده‌ها پردازش شده و حقایقی با مفهوم به دست می‌دهد که به توصیف و تعریف داده‌ها می‌پردازند. برای مثال دمای هوا تا ۱۵ درجه افت می‌کند و یا اینکه کلاغ‌ها سیاه رنگ‌اند. آموزش در سطح دانش[3] (الگوهای تحلیلی پاسخگو به پرسش‌های «چرا»، « چگونه» و «چطور»)، که یک الگو ارائه می‌دهد و سطح آن به مراتب بالاتر از آموزش داده و اطلاعات است تعریف می‌شود. به عنوان مثال، عبارت «اگر رطوبت زیاد باشد و دما افت کند، جو اغلب غیر محتمل است که رطوبت را نگاه دارد و بنابراین باران می‌آید،» نمونه‌ای از آموزش دانش است. برخی از امتیازات دارایی از نوع ثروت دانش یا دانایی، نسبت به سایر دارایی‌ها عبارت است از: ذاتا غیر رقیب و تمام نشدنی است، ناملموس اما قابل دستکاری است، غیرخطی و نمایی است، به آسانی قابل حمل است، غیرقابل محصور و شیوع پذیراست، قابل ذخیره سازی است، جمع پذیر با سایر دانش‌هاست و الگوپذیر است. به عبارتی گسترش مرزهای دانش، گسترش داده و اطلاعات صرف نیست بلکه علاوه بر تجربیات ( دانش و دانایی)، الهامات و دانش ضمیری دانشمند و پژوهشگر موضوع مورد نظر را به تحلیل می‌پردازد. بنابراین آموزش خلاق و مولد به روشی اطلاق می‌شود که اولا مبتنی بر فرایند

1. Data
2.Information
3.Knowledge

آموزش دانش و آموزش در پاسخ به کلمات چرا، چطور، و چگونه بیان شود، ثانیا روش آموزش از جزء به کل باشد، ثالثا آموزش به یک الگو و یا مدل منجر شود، و رابعا علیرغم واگرایی در اجزای سازنده، طی فرایند ترکیب اجزا که توام با همگرایی است، تنوع و واگرایی در حاصل (محصول) به دست آید و به عبارتی با در دست داشتن یک الگو موارد متعددی خلق و کشف شود (۸). پیشرفت فناوری‌های حوزه آموزش از قبیل هوش مصنوعی نه تنها زمینه آموزش از نوع داده و اطلاعات را منسوخ نموده بلکه برخی از رشته‌های دانشگاهی در آینده جایگاهی در نظام آموزش عالی نخواهند داشت. البته این پیشرفت‌ها و تحولات ضرورت ایجاد رشته‌ها، دروس و سرفصل‌های نو را ایجاب می‌کند. لذا، تحولات و پیشرفت‌ها در فناوری‌های آموزشی، ضرورت بازنگری در روش‌های سنتی آموزش را آشکار ساخته و نشان می‌دهد که آموزش مؤثر باید مبتنی بر پاسخ به پرسش‌های تحلیلی باشد؛ از جزء به کل پیش رود؛ به تولید الگو یا مدل منجر شود، با وجود همگرایی در فرآیند یادگیری، واگرایی در محصول نهایی (خلاقیت) را تقویت کند.

*۶-۳- نیازهای بازار کار و سرعت تغییرات فناورانه*

بازار کار معاصر با سرعت بی‌سابقه‌ای در حال تحول است؛ مهارت‌هایی که امروز مطلوب هستند، فردا ممکن است منسوخ شوند. این واقعیت، ضرورت ورود سریع‌تر نیروی متخصص به بازار کار را تقویت می‌کند. با این حال، در شرایط ایران که بیش از ۴۰ درصد دانش‌آموختگان با بیکاری مواجه‌اند (۹)، نیاز بازار کار نمی‌تواند شاخص اصلی کاهش دوره‌ها باشد؛ زیرا مهارت‌های مورد نیاز بازار فعلی ایران همواره پیشرو دانشگاه‌ها نبوده است. بنابراین، کاهش دوره‌ها باید بر اساس تحلیل آینده‌نگر نیازهای اقتصادی-اجتماعی طراحی شود، نه صرفاً بر اساس شرایط فعلی بازار.

*۶-۴-ملاحظات اقتصادی: کاهش هزینه خانوارها و دولت*

طولانی‌شدن دوره‌های تحصیلی هزینه‌های مالی قابل توجهی را بر خانوارها و دولت تحمیل می‌کند و ورود نیروی کار به بازار را به تأخیر می‌اندازد. در شرایط کاهش منابع ملی و فشارهای اقتصادی، کاهش دوره‌ها می‌تواند بهره‌وری نظام آموزشی را افزایش دهد. این کاهش هزینه‌ها تنها مربوط به شهریه نیست؛ بلکه شامل هزینه‌های فرصت از دست‌رفته (تأخیر در اشتغال)، هزینه‌های زندگی دانشجویان، و هزینه‌های زیرساختی دولت می‌شود. با این وجود، باید توجه داشت که برخی دانشجویان در ایران به‌دلیل فرار از سربازی یا بیکاری، عمداً سنوات تحصیلی خود را افزایش می‌دهند؛ پدیده‌ای که مستلزم طراحی مکانیزم‌هایی مانند پرداخت شهریه پس از اتمام مدت استاندارد تحصیل است.

*۶-۵-تصحیح نگاه به دکتری از مدرک شغلی به پژوهش تخصصی*

در بسیاری از کشورهای پیشرفته، به‌ویژه اروپا، مدرک دکتری دیگر به‌عنوان یک مدرک شغلی عمومی در نظر گرفته نمی‌شود، بلکه مسیری تخصصی برای تربیت پژوهشگران حرفه‌ای محسوب می‌گردد. در این نظام‌ها، دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری عمدتاً پژوهش‌محور هستند و ارائه دروس نظری گسترده در این مقاطع معمول نیست. این رویکرد، ضمن کوتاه‌کردن دوره‌ها، تمرکز بر تولید دانش تخصصی را تقویت می‌کند. در ایران، با وجود ارائه دروس تکراری یا با همپوشانی بالا در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری (که در کارشناسی باید پوشش داده شده باشند)، این تحول هنوز به‌طور کامل رخ نداده است.

*۶-۶- افزایش انعطاف‌پذیری و مسیرهای جایگزین*

در عصر اطلاعات، آموزش در حال حرکت به سمت دوره‌های کوتاه، آموزش برخط، گواهی‌نامه‌های مهارتی و ترکیبی از کار و تحصیل می‌باشد. لذا، در بسیاری از امور و رشته‌ها دانشگاهی، ضرورتی برای ایجاد دوره‌های بلند مدت ۴ سال نمی‌باشد.

*۶-۷-چابکی دانشگاه‌ها در برابر فناوری*

برخی از رشته‌های دانشگاهی به ویژه فناوری اطلاعات، هوش مصنوعی و علوم داده با سرعت بالا در حال تغییرند. لذا به منظور همراهی فناوری، برنامه‌های درسی باید کوتاه‌تر و قابل به‌روز رسانی شوند.

*۶-۸- تمرکز بر توانمندی‌های قابل انتقال*

فلسفه جدید آموزش عالی متمرکز بر تفکر انتقادی، مهارت ارتباطی، مدیریت زمان، خلاقیت و یادگیری مادام‌العمر می‌باشد. لذا برای توانمند سازی، کاهش دوره‌ها جای تامل دارد.

## ۷- مزایا و چالش‌های کاهش دوره‌های تحصیلی

الف-مزایای احتمالی: افزایش بهره‌وری نظام آموزشی از طریق کاهش هزینه‌های عملیاتی؛ گسترش فرصت‌های تحصیل رایگان برای گروه‌های محروم‌تر (عدالت آموزشی)؛ کاهش فشار اقتصادی بر خانوارها و دولت؛ انطباق سریع‌تر برنامه‌های درسی با تحولات فناورانه؛ تقویت مهارت‌های قابل انتقال (تفکر انتقادی، یادگیری مادام‌العمر).

ب-چالش‌ها و ریسک‌های اجرایی: افت کیفیت آموزشی در صورت حذف دروس بدون تحلیل علمی؛ افزایش بیکاری در صورت عدم همسویی خروجی‌های آموزشی با نیازهای بازار؛ کاهش توانمندی‌های مهارتی دانش‌آموختگان در رشته‌هایی که نیاز به تمرین طولانی‌مدت دارند (مانند پزشکی)؛ کاهش تولید دانش در صورت کوتاه‌شدن بی‌رویه دوره‌های پژوهشی؛ ناهماهنگی بین مقاطع در صورت عدم هماهنگی بازنگری برنامه‌ها در آموزش عمومی و عالی.

## ۸-نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات

فلسفه کاهش دوره‌های تحصیلی در آموزش عالی بر چهار رکن کلیدی استوار است: افزایش بهره‌وری آموزشی از طریق حذف دروس غیرضروری و تکراری؛ تقویت عدالت آموزشی با گسترش دسترسی به تحصیلات رایگان؛ همسویی با تحولات فناورانه و نیازهای آینده بازار کار؛ تغییر فلسفه آموزش از مدرک‌محوری به مهارت‌محوری و یادگیری مادام‌العمر.کاهش دوره تحصیلی باید به شکل سامانه‌ای و مبتنی بر فلسفه و اهداف آموزشی انجام شود و بازنگری برنامه‌های درسی، مقدم بر هرگونه کاهش دوره، لحاظ گردد. در سطح جهانی، کاهش طول دوره‌های تحصیلی یک روند عمومی است. در برخی مناطق، مانند اروپا، این کاهش‌ها در قالب برنامه‌های هماهنگ ملی و منطقه‌ای صورت می‌گیرد، در حالی که در آمریکا و برخی کشورهای شرق آسیا، تصمیم‌گیری‌ها بیشتر محلی و منطقه‌ای است. تجربه جهانی نشان می‌دهد هرکجا سیاست‌گذاری متمرکزتر باشد (اروپا و بسیاری از کشورهای آسیایی)، تغییرات سریع‌تر رخ داده و هرکجا اختیار به مؤسسه‌ها یا ایالت‌ها (استان‌ها) واگذار شود (آمریکا)، تغییرات پراکنده و نوآورانه‌تر است. همچنین، شکل و میزان کاهش دوره‌ها در کشورهای مختلف متفاوت است و این کاهش برای همه رشته‌ها یکسان نیست. در ایران، با توجه به متمرکز بودن پذیرش دانشجو، کاهش دوره تحصیلی نمی‌تواند به صورت منطقه‌ای یا استانی اجرا شود، هرچند برخی رشته‌ها در برخی دانشگاه‌ها می‌توانند به شکل پایلوت مورد آزمایش قرار گیرند. این موضوع ممکن است ضرورت حذف آزمون‌های متمرکز در مقاطع تحصیلات تکمیلی، به‌ویژه در پذیرش دانشجوی دکتری، و تفویض اختیار پذیرش به دانشگاه‌ها را نیز ایجاب کند. نقش دولت‌ها در حوزه آموزش و پرورش باید برجسته باشد و از رشد شتابان مدارس غیرانتفاعی جلوگیری شود، به‌ویژه با توجه به اینکه شهریه سالانه برخی از این مدارس بیش از چند برابر هزینه تحصیل در یک سال دانشگاه است. کاهش نرخ باروری در ایران به‌عنوان یکی از چالش‌های جمعیتی مهم دهه‌های اخیر، تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل اقتصادی، اجتماعی و نهادی قرار دارد. در میان این عوامل، افزایش هزینه‌های آموزش، به‌ویژه گسترش مدارس و دانشگاه های غیرانتفاعی، به‌عنوان یک متغیر کمتر مورد توجه، اما اثرگذار بر تصمیمات باروری خانوارها مطرح است.

### پیشنهادات اجرایی:

-اولویت بازنگری برنامه‌های درسی: هرگونه کاهش دوره باید پس از بازنگری علمی و هماهنگ برنامه‌ها در تمام مقاطع انجام شود.

-رویکرد سامانه‌ای: بازنگری برنامه‌ها باید به‌صورت همزمان در آموزش عمومی و عالی صورت گیرد تا ناهماهنگی‌ها کاهش یابد.

-اجرای آزمایشی (پایلوت): در رشته‌هایی که امکان‌پذیر است، کاهش دوره‌ها به‌صورت آزمایشی در تعداد محدودی دانشگاه اجرا شود.

-تفویض اختیار هدفمند: در مقاطع تحصیلات تکمیلی به‌ویژه دکتری، اختیار پذیرش و طراحی برنامه باید به دانشگاه‌های معتبر واگذار شود تا انعطاف‌پذیری افزایش یابد.

-نظارت بر کیفیت: ایجاد سازوکارهای نظارتی مستقل برای اطمینان از عدم افت کیفیت آموزشی در دوره‌های کوتاه‌شده.

### چشم انداز پژوهشی آینده

بررسی کتابخانه‌ای نشان می‌دهد تاکنون هیچ یا کمتر مقاله پژوهشی معتبر و نظام‌مند درباره ضرورت کاهش یا افزایش دوره‌های آموزشی در دانشگاه‌های ایران منتشر شده است. این خلأ پژوهشی در حالی است که تصمیمات کلان و اثرگذار در این حوزه اتخاذ می‌شود، بی‌آنکه پشتوانه‌ای از شواهد علمی و نتایج مطالعات تجربی داشته باشند. به عبارتی در عمل، یا پژوهش‌های مرتبط اساساً انجام نمی‌شوند، یا در صورت انجام، نتایج آن‌ها در فرآیند سیاست‌گذاری و تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. این وضعیت نشان‌دهنده یکی از ضعف‌های اساسی نظام تصمیم‌سازی در اغلب زمینه ها و از جمله آموزش در کشور است؛ ضعفی که ریشه در فقدان سازوکار مؤثر برای ترجمه دانش و بهره‌گیری هدفمند از نتایج تحقیق و پژوهش در تصمیمات راهبردی دارد. تداوم این رویکرد می‌تواند به اتخاذ سیاست‌هایی منجر شود که نه‌تنها کارآمدی نظام آموزش عالی را افزایش نمی‌دهند، بلکه پیامدهای بلندمدت و پرهزینه‌ای برای کیفیت آموزش و سرمایه انسانی کشور به همراه خواهند داشت. لذا پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های تجربی در موارد زیر انجام شود:

-تحلیل تطبیقی تأثیر کاهش دوره‌ها بر اشتغال‌پذیری دانش‌آموختگان در کشورهای مختلف از جمله در ایران؛

-مطالعه موردی موفقیت‌ها و شکست‌های اجرای سیاست کاهش دوره در دانشگاه‌های اروپایی؛

-طراحی مدل ریاضی برای بهینه‌سازی طول دوره‌ها با در نظر گرفتن متغیرهای کیفیت، هزینه و عدالت آموزشی.

### تقدیر و تشکر

از همکار محترم جناب آقای دکتر اسماعیل جعفری دانشیار برنامه ریزی درسی و عضو محترم هیات علمی دانشکده علوم تربیتی و روان‌شناسی دانشگاه شهید بهشتی که حوصله به خرج دادند و پیش‌نویس مقاله را بدقت مطالعه و نکات ارزنده‌ای در جهت ارتقای کیفی آن ارائه فرمودند، کمال امتنان و تشکر را دارم.

## منابع


1. Schaller, M. D., & Barbier, M. (2021). FastTrack, a strategy to shorten time to degree. FASEB BioAdvances, 3(7),482-489.: https://doi.org/10.1096/fba.2020-00144

۲- رضا نوروزی زاده و کورش فتحی واجارگاه.» درآمدی بر برنامه ریزی درسی دانشگاهی»، موسسه پژوهش و برنامه ریزی آموزش عالی، ۱۳۸۷.

3. UN Adopts New Global Goals, Charting Sustainable Development for People and Planet by 2030. UN News Centre (25 September 2015): http://go.nature.com/asLH5h.

4. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development (UN, 2015); http://go.nature.com/po6vaj.

۵- احمد شعبانی ۱۴۰۳ «بررسی عملکرد برنامه ششم توسعه در حوزه آموزش عالی»، *نشریه نشاء علم*، سال پانزدهم، شماره اول، صفحات ۱۶-۱.

6. Wlodkowski, R. J. (2003). Accelerated learning in colleges and universities. New Directions for Adult and Continuing Education, 2003(97),5-16.: https://doi.org/10.1002/ace.84

7. https://dec.uast.ac.ir/file/download/regulation/673c4eae1a1b-0bakhsh.08.pdf?language=fa&subdomain=dec

۸- احمد شعبانی، ۱۳۹۸ «خلاقیت و اکتشاف «*شریه نشاء علم*»، سال نهم، شماره دوم، ص ۶۲-۵۴.

۹- احمد شعبانی، ۱۳۹۵» بیکاری دانش آموختگان دانشگاهی و مهاجرت مغزها «*شریه نشا علم*»، سال هفتم، شماره اول، صفحات ۱۵-۶.

# درک وضعیت انسانی کاربران هوش مصنوعی
# در خوانش نگرش‌های هانا آرنت، خورخه لوئیس بورخس، مارکوس گابریل و عهد عتیق

**عباس پورخصالیان**
**پژوهشگرسابق مرکز پژوهش‌های مجلس**
**کارشناس ارشد نگهداری و بهره برداری شبکه در شرکت ارتباطات زیرساخت**
**apurkhess@gmail.com**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

گسترش شتابان فناوری هوش مصنوعی، به‌ویژه سکوهای هوش مصنوعی مولد، ابعاد بنیادین وضعیت انسانی را در ساحت‌های کنش، معنا و جمع‌گرایی دگرگون ساخته است. این مقاله با رویکردی تحلیلی–تفسیری و میان‌رشته‌ای، مفهوم «وضعیت انسانی» در اندیشه هانا آرنت را در نسبت با تجربه معاصر کاربران هوش مصنوعی بازخوانی می‌کند و آن را در گفت‌وگو با استعاره «کتابخانه بابل» خورخه لوئیس بورخس، رئالیسم نوِ مارکوس گابریل و روایت اسطوره‌ای برج بابل در عهد عتیق قرار می‌دهد. فرض اصلی مقاله آن است که هوش مصنوعی، در صورتی که به مرجع حقیقت و تولید معنا بدل شود، می‌تواند به تضعیف کنش انسانی، فروپاشی فضای عمومی، بحران معنا و شکل‌گیری نوعی توتالیتاریسم دیجیتال بینجامد. در مقابل، اگر هوش مصنوعی به‌مثابه ابزاری در خدمت داوری انسانی و در چارچوب تکثر میدان‌های معنا فهم شود، نه‌تنها تهدیدی برای وضعیت انسانی نخواهد بود، بلکه می‌تواند امکان‌های تازه‌ای برای کنش، مسئولیت و معناآفرینی فراهم آورد.

**کلید واژگان:** وضعیت انسانی، هانا آرنت، هوش مصنوعی مولد، کتابخانه بابل، مارکوس گابریل، فلسفه فناوری

## ۱. مقدمه

پرسش از «وضعیت انسانی» همواره یکی از مسائل محوری فلسفه سیاسی و انسان‌شناسی فلسفی بوده است. هانا آرنت با فاصله‌گیری از ذات‌گرایی متافیزیکی، وضعیت انسانی را نه امری ثابت، بلکه حاصل مجموعه‌ای از شرایط تاریخی، سیاسی و فناورانه می‌داند که امکان زیستن، کنش‌گری و معنابخشی را فراهم می‌کنند. در دهه‌های اخیر، ظهور و گسترش فناوری هوش مصنوعی، به‌ویژه در قالب سکوهای مولد زبان و تصویر، این شرایط را به‌گونه‌ای بنیادین دگرگون ساخته است. این تحول، پرسش‌هایی تازه درباره جایگاه انسان، نقش داوری انسانی و نسبت میان تولید اطلاعات و تولید معنا پیش می‌کشد. این مقاله می‌کوشد با تلفیق فلسفه سیاسی، ادبیات و الهیات، به تحلیل این وضعیت نوپدید بپردازد.

## ۱. وضعیت انسانی
## در اندیشه هانا آرنت و مسئله هوش مصنوعی

آرنت در وضعیت انسانی سه فعالیت بنیادی کردار (Labor)، کار (Work) و کنش (Action) را از یکدیگر متمایز می‌کند. کردار به چرخه زیستی و بقاء کار به ساخت جهان مصنوع انسانی، و کنش به عرصه عمومی، گفتار و سیاست مربوط است.

در عصر هوش مصنوعی، خودکارسازی کردار و بهینه‌سازی کار، اگرچه کارآمدی را افزایش می‌دهد، اما خطر اصلی متوجه کنش است؛ زیرا تعاملات انسانی به‌تدریج با روابط واسطه‌مند و الگوریتمی جایگزین می‌شوند. از منظر آرنتی، این روند می‌تواند به تضعیف جمع‌گرایی، زایندگی و مسئولیت اخلاقی بینجامد و انسان را به «حیوان کارگر» فروکاهد.

## ۲. بورخس و «کتابخانه بابل»: استعاره‌ای از بحران معنا

داستان «کتابخانه بابل» بورخس، جهانی را تصویر می‌کند که در آن همه ترکیب‌های ممکن زبان وجود دارند، اما تمایز حقیقت از تصادف تقریباً ناممکن است. این استعاره به‌طرزی چشمگیر با وضعیت کاربران هوش مصنوعی مولد هم‌خوانی دارد؛ جایی که وفور پاسخ‌ها لزوماً به فهم یا معنا نمی‌انجامد.

بورخس نشان می‌دهد که وفور بی‌پایان اطلاعات می‌تواند به فروپاشی مرجع حقیقت، شکل‌گیری فرقه‌ها و گسترش ناامیدی وجودی بینجامد؛ خطری که در مواجهه بی‌انتقاد با هوش مصنوعی نیز قابل مشاهده است.

## ۳. مارکوس گابریل و امکان رهایی از بن‌بست بورخسی

مارکوس گابریل با طرح رئالیسم نو، ایده جهان به‌مثابه یک کلّ

منسجم و فراگیر را رد می‌کند و به‌جای آن از «میدان‌های معنا» سخن می‌گوید. معنا از نظر او واقعی، اما موضع‌مند و متکثر است. این دیدگاه امکان بازاندیشی نسبت انسان و هوش مصنوعی را فراهم می‌کند: هوش مصنوعی تنها در برخی میدان‌های معنا که رایانش‌پذیرند عمل می‌کند و نمی‌تواند جایگزین داوری انسانی شود. بدین‌ترتیب، بحران معنا نه اجتناب‌ناپذیر، بلکه حاصل خطای هستی‌شناختی در تلقی از دانش و حقیقت است.

### ۴. برج بابل در عهد عتیق: تکثر در برابر وحدت مطلق

روایت برج بابل در عهد عتیق، هشداری علیه میل انسان به وحدت مطلق، سلطه و جاودانگی است. پراکندگی زبان‌ها و فرهنگ‌ها، در این روایت، شرط امکان تکثر و جلوگیری از تمرکز قدرت و معنا تلقی می‌شود.

در نسبت با هوش مصنوعی، این روایت بر ضرورت حفظ تنوع زبانی، فرهنگی و تفسیری تأکید می‌کند و از واگذاری مرجعیت معنا به یک نظام واحد هشدار می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

تحلیل تطبیقی اندیشه آرنت، استعاره بورخس، رئالیسم نوِ گابریل و روایت عهد عتیق نشان می‌دهد که بحران اصلی عصر هوش مصنوعی نه در خود فناوری، بلکه در خلط میان تولید اطلاعات و تولید معنا نهفته است. اگر هوش مصنوعی به مرجع حقیقت بدل شود، وضعیت انسانی با تهدیدهایی جدی مواجه خواهد شد؛ اما اگر این فناوری به‌مثابه ابزاری در خدمت کنش، داوری و مسئولیت انسانی فهم شود، می‌تواند در چارچوب تکثر میدان‌های معنا به غنای تجربه انسانی یاری رساند.

## منابع


۱. پورخصالیان، عباس. (۱۴۰۴). «نظم تکنولوژیکی جدید جهان در عصر هوش مصنوعی». . پایگاه خبری عصر ارتباط.
۲. گزارش بررسی سند هوش مصنوعی ملی از مؤسسهٔ تحقیقات علمی کشور به تاریخ اول آبان ۱۴۰۳.

3. «Made in China 2025» Plan. State Council of the People›s Republic of China.
4. Lee, K.-F. (2018). AI Superpowers: China, Silicon Valley, and the New World Order. Houghton Mifflin Harcourt.
5. «The CHIPS and Science Act of 2022». United States Congress.
6. Zahran, M. & Awan, A. (2023). «Gulf States› AI Investments and the Shifting Geopolitics of Technology». Journal of Digital Geopolitics.
7. «Saudi- U.S. Strategic Artificial Intelligence Partnership Agreement». (2025). Official Press Release.

ریشه‌های فرهنگی در هوش مصنوعی: چگونه DeepSeek و ChatGPT جهان‌بینی‌های متفاوتی را منعکس می‌کنند.(Siew M. loh)

# نقش راهبردی سرمایه‌گذاری کشورهای جنوب خلیج فارس در هوش مصنوعی و جایگاه نامعلوم جمهوری اسلامی ایران در نظم تکنولوژیک جدید

**عباس پورخصالیان**
**پژوهشگرسابق مرکز پژوهش‌های مجلس**
**کارشناس ارشد نگهداری و بهره برداری شبکه در شرکت ارتباطات زیرساخت**
**apurkhess@gmail.com**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

**چکیده**

این نوشته به شکل‌گیری نظم جدید جهان تحت تأثیر قدرت‌های برآینده از فناوری هوش مصنوعی و بررسی رقابت فناورانه کشورهای جنوب خلیج فارس (عربستان سعودی، قطر، امارات متحده عربی و عمان) با یکدیگر برای احراز جایگاهی مناسب در یکی از دو هرم قدرت مبتنی برهوش مصنوعی به رهبری ایالات متحده یا چین؛ و تأثیر سلسله مراتب‌های قدرت دیجیتالی بر بازتعریف نظم ژئوپلیتیکی جهان می‌پردازد. با تمرکز بر سرمایه‌گذاری‌های کلان این کشورها در شرکت‌های پیشرو آمریکایی و نیز تا حدی در شرکت‌های فرافنِ («هایتِک») چینی، هدف این پژوهش تحلیلِ گذارِ نقشِ این کشورها از مصرف‌کننده فناوری بودن به تحقق رسیدن به جایگاه کنشگری فعال در عرصه قدرت دیجیتالی و تبیین نقش میانجی‌گری آنان در منطقه است. در مقابل، جایگاه نامعلوم و منفعل جمهوری اسلامی ایران در این تحول عظیم تکنولوژیکی نقد و بررسی می شود. یافته‌ها حاکی از آن است که همکاری‌های راهبردی، به ویژه میان عربستان و ایالات متحدهٔ، همچون همیاری استراتژیک بین اسرائیل و آمریکا در قالب «معاملات نامتقارن هوش مصنوعی» صورت می‌گیرد که منجر به تثبیت هرم قدرت به رهبری ایالات متحده و افزایش وابستگی فناورانه کشورهای جنوب خلیج فارس و دیگر کشورهای طرف قراردادهای فرافن به قدرت دیجیتالی متمرکز و مستقر در رأس هرم می‌شود. در جریان شکل گیری این دو ساختار جهانی قدرت دیجیتالی، جمهوری اسلامی ایران فاقد راهبردی کلان و عملی برای جایگاه‌یابی در یکی از این دو هرم قدرت دیجیتالی است، در حالی که توانایی لازم برای ایجاد یک هرم قدرت دیجیتالی سوم، مستقل از دو هرم مذکور، متشکل از کشورهای غیرمتعهد و ایفای نقش در نظم تکنولوژیکی آینده جهان را نیز ندارد.

## ۱. مقدمه

انقلاب هوش مصنوعی، فراتر از یک تحول فنی، در حال بازتعریف بنیادین مفاهیم قدرت، حاکمیت و امنیت در نظام بین‌المللی است. رقابت دو ابرقدرت دیجیتالی: ایالات متحده و چین، بر سر تسلط بر فناوری هوش مصنوعی، هسته مرکزی مناقشات ژئوپلیتیکی معاصر را تشکیل می‌دهد. در این میان، اغلب کشورهای دیگر نه ناظرانی منفعل، بلکه بازیگرانی فعال در تعیین توازن جدید قدرت هستند. کشورهای جنوب خلیج فارس، با درک این تحول، با بسیج سرمایه‌های مالی عظیم و اراده سیاسی متمرکز، در صدد ایفای نقشی فراتر از نقش سنتی خود به عنوان صادرکننده انرژی و مصرف کنندهٔ فناوری‌های وارداتی برآمده‌اند. این پژوهش با تحلیل راهبردهای این کشورها در سرمایه‌گذاری و بومی‌سازی هوش مصنوعی، به واکاوی الگوی جدید «شراکت و میانجی‌گری» آنان می‌پردازد و در ادامه، با مقایسه تطبیقی، غیبت راهبردی جمهوری اسلامی ایران را در این عرصه حیاتی مورد بررسی قرار می‌دهد.

## ۲. شرح پژوهش

این پژوهش با روشی توصیفی–تحلیلی و با اتکا به داده‌های میدانی و اسناد همکاری‌های بین‌المللی، به شرح وضعیت موجود قدرت‌های دیجیتالی می‌پردازد.

### ۲,۱ استراتژی ایالات متحده برای رهبری جهانی هوش مصنوعی

*طرح اقدام هوش مصنوعی*، منتشر شده در ژوئیه ۲۰۲۵، یک چارچوب استراتژیک جامع است که هدف آن تبدیل ایالات متحده به قدرت پیشرو جهانی در حوزه هوش مصنوعی است. این طرح بر سه پایه اساسی استوار است، به شرح زیر:

• شتاب‌دهی به نوآوری‌ها: از طریق کاهش محدودیت‌های نظارتی برای تسریع توسعه فناوری هوش مصنوعی و تقویت بخش خصوصی؛ تمرکز بر ارتقای آموزش و مهارت‌های مرتبط با هوش مصنوعی برای تقویت نیروی کار آمریکایی؛

• گسترش زیرساخت‌های هوش مصنوعی در آمریکا: شامل توسعه مراکز داده، شبکه‌های تأمین برق و دیگر زیرساخت‌های ضروری برای طراحی و راه‌اندازی سیستم‌های پیشرفته هوش مصنوعی؛

مقررات زدایی به منظور رفع محدودیت‌های زیست‌محیطی برای ساخت مراکز داده بزرگ؛

• رهبری بین‌المللی و صیانت از امنیت: با در دست گرفتن قدرت استانداردسازی جهانیِ سخت‌افزار و نرم‌افزارهای هوش مصنوعی از طریق ایجاد اتحادهای استراتژیکی و حذف یا محدودسازی نفوذ رقبایی مانند چین؛ ترویج «بی‌طرفی ایدئولوژیک» در توسعه سیستم‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه در مدل‌های مورد استفاده دولت؛ مقابله علیه «سوگیری‌های سیاسی» در مهندسی هوش مصنوعی؛ حمایت از پژوهش‌های علمی با استفاده از هوش مصنوعی، مانند کشف مواد نو یا داروهای جدید؛ اقدام علیه جعل‌های پیشرفته (Deepfakes)؛ تلاش برای کاهش نفوذ کمیسیون فدرال تجارت (FTC) بر صنعت هوش مصنوعی؛ ترجیح مقررات یکپارچه فدرال به نفع صنعت، به‌جای قوانین سختگیرانه ایالتی.

این طرح با استقبال نمایندگان صنعت مواجه شده، اما نگرانی‌هایی را درباره کم‌توجهی به ملاحظات امنیتی و مسایل زیست‌محیطی به‌وجود آورده است.منتقدان به‌ویژه خواست «بی‌طرفی ایدئولوژیکی» را چالش‌برانگیز می‌دانند، زیرا از نظر فنی پیاده‌سازی آن دشوار است و احتمال سوءاستفاده سیاسی از آن وجود دارد.

## ۲,۲ رقابت کشورهای عسقاع (عربستان، قطر، امارات و عمان) در گذار از مصرف گرایی به کنشگری

این کشورها با ایجاد صندوق‌های سرمایه‌گذاری کلان (مانند صندوق سرمایه‌گذاری عمومی عربستان)، برای موقعیت سازی و جایگاه یابی مناسب در هرم قدرت‌های دیجیتالی جهان، راهبردهای چندوجهی‌ای را در پیش گرفته‌اند، از قبیلِ:

· *دنبال کردن استراتژی سرمایه‌گذاری خارجی:* خرید سهام و سرمایه‌گذاری مستقیم در شرکت‌های پیشرو هوش مصنوعی مانند «اِنویدیا» و «AMD» در آمریکا و همچنین در شرکت‌های چینی فعال در زیرساخت‌های ابری، ارتباطات سیارِ $G_5$ (و نسل بعدی آن $G_6$) بعلاوهٔ نظارت هوشمند؛

· *پیگیری استراتژی توسعه داخلی:* تأسیس نهادها و شرکت‌های ملی هوش مصنوعی، سرمایه‌گذاری در توسعه مدل‌های زبانی بومی به کمک برترین شرکت‌های فرافن و ایجاد «کلان خوشه»های رایانش ابری (در مورد مفهوم «کلان خوشهٔ» رجوع کنید به بند ۲,۲: «توضیح در باره چیستی «کلان خوشه‌های زیرساختی هوش مصنوعی»»)؛

· *استمرار استراتژی انعطاف پذیری ژئوپلیتیکی:* کشورهای جنوب خلیج فارس، به دنبال ساختن آینده‌ای هستند که در آن، به رغم کوچک بودن جغرافیایی، بازیگرانی غیرقابل حذف در سیاست‌های منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای باشند. در این راستا، آنها همزمان روابط راهبردی خود با آمریکا و همکاری با چین را حفظ می‌کنند، تا به موقع بتوانند قدرت چانه‌زنی خود را افزایش و میزان وابستگی یکطرفه به یک قطب را کاهش دهند؛ هدف نهایی تعقیب این استراتژی‌ها، تبدیل شدن این کشورها به «هاب منطقه‌ای هوش مصنوعی» و کسب «قدرت نرم دیجیتالی» از طریق ایفای نقشِ «متحد میانجی» بین ابرقدرت‌ها در جهان، بخصوص در منطقهٔ «خموشا» (خاورمیانه و شمال آفریقا) است

## • ۲,۳ کلان خوشه‌های زیرساختی هوش مصنوعی مورد نیاز عربستان

کلان خوشه‌های مدلِ هوش مصنوعیِ طراحی شده برای عربستان، بسیار بزرگ‌مقیاس، یعنی دارای میلیون‌ها GPU از نوعِ پردازشگرهای پیشرفتهٔ [Nvidia H100 / H200 / B200] ، به علاوهٔ هزاران پردازشگر فوق سریعِ AMD MI300X است که تنها برای خنک نگه‌داشتن آنها و محل استقرارشان به تأمین ده‌ها گیگاوات انرژی از نیروگاه‌های گازسوز، خورشیدی و بادیِ اختصاصی نیاز است.

### • توضیح درباره چیستی «کلان خوشه‌های زیرساختی هوش مصنوعی»:

یک خوشه زیرساختی هوش مصنوعی [AI infrastructure cluster] مجموعه‌ای از زیرساخت‌ها شاملِ مراکز داده، سوئیچ‌های نسل جدید مناسب برای یاددهی رفتار مناسب و یادگیری ماشینی در مقیاس عظیم، شبکه‌ها و تجهیزات رایانشی متعددی‌ست که در یک منطقه متمرکز می‌شوند، تا ظرفیت رایانشی بسیار بزرگی را تولید کنند. انواع «خوشه‌های زیرساختی هوش مصنوعی» را بر حسب شمار کاربران و بزرگی سیستم هوش مصنوعی به «اَبَرخوشه Super- Cluster» (برای سکوهای هوش مصنوعی شرکتی)، «کلان خوشه Mega-Cluster» (برای سکوهای هوش مصنوعی ملی) و «فراخوشه Hyper-Cluster» (برای سکوهای هوش مصنوعی جهانی) تقسیم می‌کنند.
منظور از «کلان خوشهٔ هوش مصنوعی» [که گاهی به آن «tech mega-cluster» هم گفته می‌شود] مجموعه‌ای است متشکل از ده‌ها هزار تا صدها هزار واحد پردازشگر گرافیکی (GPU) در یک مکان؛ واحدهایی که کارکردشان سرعت بخشیدن به عملکرد سیستم هوش مصنوعی است، بسیار سریع‌تر و کارآمدتر از واحد پردازشگر مرکزیِ دیرآشنا (CPU) است.

## ۲,۴ الگوی همکاری نامتقارن، شکل دهندهٔ هرم قدرت جهانی

همکاری‌های بین المللی ایالات متحده آمریکا با متحدانش در حوزه فرافن (از آن جمله: در پروژه‌های هوش مصنوعی) بندرت از نوع

«معامله متقارن» (برابر) هستند؛ برعکس: اغلب آنها «معامله‌هایی نامتقارن» (Asymmetric AI Deals) به شمار می‌آیند. برای مثال: همکاری‌های اخیر عربستان سعودی و آمریکا تحت سند «شراکت راهبردی هوش مصنوعی» (۲۸ آبان ۱۴۰۴)، نمونه‌ای بارز از یک «معامله نامتقارن هوش مصنوعی» است.

در الگوی معامله نامتقارن:

• قدرت برتر (آمریکا): کنترل هستهٔ سختِ فناوری از جمله تراشه‌های پیشرفته (GPU/ASIC)، مدل‌های پایه، زیرساخت‌های ابری و حق تعیین استانداردهای داده را در دست دارد. (ASIC) واحدِ «مدار فشرده دارای کاربرد ویژه» است که اغلب از شماری ریزپردازنده، بلوک‌های حافظه از جمله، RAM، ROM، EEPROM، حافظه درخش (Flash memory) و سایر اجزاء رایانشی تشکیل می‌شود. برای درک پیچیدگی مدارات درون یک تراشه ASIC، در نظر بگیرید که برخی از تراشه‌های بسیار پیشرفته ASIC، امروزه دارای حدود ۱۵۳ میلیارد ترانزیستور است! به همین دلیل:

• کشور فرودست (عربستان): در ازای دسترسی به فناوری، منابعی مانند پایگاه‌داده‌های ملی، سرمایه مالی و مزیت‌های جغرافیایی خود را در اختیار شرکای غربی (شرکت های بزرگ آمریکایی) می‌گذارد

این رابطه، وابستگی امنیتی و فناورانه کشور خریدار را نهادینه کرده و «سرعت تحول دیجیتالی» آن را تنظیم می‌کند.

اکثر توافقنامه‌های فرافن بین آمریکا و اسرائیل نیز از منظر حقوقی و دیپلماتیکی، لفظاً به‌صورت همکاری برابر معرفی می‌شوند؛ اما از منظر قدرت، منافع و وابستگی واقعی، توافقنامه‌هایی نامتقارن هستند؛ زیرا به نفع آمریکا وزن بیشتری دارند، هرچند به اسرائیل هم منافع قابل توجهی می‌رسانند.

منابعی برای ارجاع:

https://www.energy.gov/articles/us-and-israel-pledge-work-together-unleash-ai-innovation-new-memorandum-understanding?utm_source=chatgpt.com

### ۲,۵ وضعیت فعلی جمهوری اسلامی ایران: جایگاهی نامعلوم در حاشیه ترادیسی دیجیتالی مناسبات قدرت در جهان

در تقابل با راهبرد فعال کشورهای عربی در متن ترادیسی دیجیتالی مناسبات قدرت در جهان دارد و موضع جمهوری اسلامی ایران را می‌توان ضعیف ارزیابی، به شرح زیر توصیف کرد:

ـ *فقدان راهبردی عملی:* جمهوری اسلامی ایران دارایِ اسناد زیر در مورد هوش مصنوعی است.

• یک سند بین المللی: «سند هوش مصنوعی جهان اسلام» که در دومین اجلاس وزیران آموش عالی کشورهای اسلامی عضو OIC در تهران در اردیبهشت ۱۴۰۴ به پیشنهاد ایران مطرح شد و به تصویب رسید؛

• یک سند استانی: سند نقشه راه و سیاست گذاری هوش مصنوعی استان یزد تحت عنوانِ «یزد هوشمند»؛ و

• حداقل دو سند ملی هوش مصنوعی مصوب، یکی در وزارت عتف و دیگری در شورای عالی انقلاب فرهنگی. همین سند ملی هوش مصنوعی مصوب شورای عالی انقلاب فرهنگی، از طرف مؤسسهٔ تحقیقات علمی کشور (به تاریخ اول آبان ۱۴۰۳)، سندی «غیرعملیاتی» با «هدف گذاری‌های کمی غیرواقع بینانه و دست نیافتنی»، «فاقد نگاشت نهادی دقیق» و بدون «تعیین تکلیف شفاف در قبال همکاری با غرب یا شرق» ارزیابی شده است.

ـ *وابستگی به پلتفرم‌های عمومی هر دو قطب:* استمرار و ادامهٔ روند استفاده از پلتفرم‌های عمومی و غالباً رایگان چینی و آمریکایی بدون دستیابی به فناوری پایه یا انتقال واقعی دانش.

ـ *انفعال در عرصه بین‌المللی:* عدم توانایی در جذب سرمایه‌گذاری یا ایجاد شراکت‌های فناورانه عمیق به دلیل تحریم‌ها و ملاحظات سیاسی، که منجر به منزوی شدن در زنجیره تأمین جهانی فناوری شده است.

ـ *امید به خودکفایی در آینده‌ای نامعلوم:* تکیه بر رویکرد خوداتکایی در بلندمدت بدون برنامه‌ریزی مشخص و سرمایه‌گذاری کافی در زیرساخت‌های حیاتی مانند زنجیره تأمین نیمه‌رساناها و دانشگاه‌های تراز اول.

### ۳. داده‌های منتج از پژوهش

• سند همکاری عربستان و آمریکا (Strategic AI Partnership): این سند که در ۲۸ آبان ۱۴۰۴ امضا شد، بر توسعه «کلان خوشه‌های زیرساختی هوش مصنوعی» در عربستان با استفاده از ظرفیت‌های انرژی، زمین و جغرافیای این کشور تأکید دارد و آن را یک گام «امنیتی–تکنولوژیکی بلندمدت» می‌خواند.

• تأسیس واحدی موسوم به «شرکت Humain» در سال ۲۰۲۵ (در کنار شرکت قدیمی MOZN متخصص در حوزه هوش مصنوعی عربستان سعودی) درزیرمجموعه صندوق سرمایه‌گذاری عمومی عربستان و آغاز به کار و همکاری عملی این شرکت جدید با غول‌های تراشه‌سازی ایالات متحده مانند اِنویدیا و AMD برای تأمین، تولید و وارد کردن تراشه‌های پیشرفته مورد نیاز در سامانه‌های هوش مصنوعی این کشور.

• راهبرد دوحه و ابوظبی: سرمایه‌گذاری مستقیم قطر و امارات در استارت‌آپ‌ها و شرکت‌های هوش مصنوعی در دو سوی رقابت آمریکا–چین برای ایجاد پرتفوی متنوع و کاهش ریسک وابستگی

به یک قطب.

• تعلل و بسنده کردن به تصویب چند سند کلی هوش مصنوعی در ایران: نبود برنامه عمل و تکرار موازی کاری سنتی، دیرآغازکنندگی و بدآغازکنندگیِ در ابتدای مسیر پیشرفت در حوزه فناوری‌های هوش مصنوعی؛ و درنتیجه: ادامه اتکا به کاربری از فناوری‌ها و دستاوردهای وارداتی، بدون انتقال دانش.

## ۴. نتیجه‌گیری

رقابت کشورهای جنوب خلیج فارس برای سرمایه گذاری هرچه بیشتر در شرکت‌های پیشرو هوش مصنوعی در ایالات متحده یا در چین، نشان‌دهنده یک تحول پارادایمی در نقش‌آفرینی منطقه‌ای است. این کشورها با پذیرش «معامله نامتقارن»، در کوتاه‌مدت وابستگی فناورانه خود را افزایش می‌دهند، اما در درازمدت، در پی کسب جایگاهی به عنوان بازیگران میانجی و تأثیرگذار در نظم دیجیتالی آینده جهان بخصوص در منطقه «خموشا» هستند. آن‌ها از رقابت آمریکا و چین برای افزایش قدرت چانه‌زنی و انباشت سرمایه دیجیتالی بهره می‌برند.

در مقابل، جمهوری اسلامی ایران با وضعیت نامعلوم و انفعال راهبردی، نه تنها در حال از دست دادن قطار ترادیسی تکنولوژیکی است، بلکه در معرض خطر حاشیه‌نشینی دائمی در نظم در حال شکل‌گیری جهان است. رویکرد فعلی «کوشش برای رسیدن به خودکفایی» بدون برنامه و سرمایه کافی، یک تهدید استراتژیکی بزرگ برای امنیت ملی، حاکمیت دیجیتالی و توسعه آینده کشور محسوب می‌شود. ضرورت بازنگری فوری در راهبرد کلان فناوری و تعیین تکلیف شفاف در تعامل با نظام جهانی، امری اجتناب‌ناپذیر برای حفظ منافع ملی کشور است.

## منابع


۱. پورخصالیان، عباس. (۱۴۰۴). «نظم تکنولوژیکی جدید جهان در عصر هوش مصنوعی، پایگاه خبری عصر ارتباط.
۲. گزارش بررسی سند هوش مصنوعی ملی از مؤسسهٔ تحقیقات علمی کشور به تاریخ اول آبان ۱۴۰۳.

3. «Made in China 2025» Plan. State Council of the People›s Republic of China.
4. Lee, K.-F. (2018). AI Superpowers: China, Silicon Valley, and the New World Order. Houghton Mifflin Harcourt.
5. «The CHIPS and Science Act of 2022». United States Congress.
6. Zahran, M. & Awan, A. (2023). «Gulf States› AI Investments and the Shifting Geopolitics of Technology». Journal of Digital Geopolitics.
7. «Saudi- U.S. Strategic Artificial Intelligence Partnership Agreement». (2025). Official Press Release.

وضعیت جدید بشر: یافتن هدف در دنیای هوش مصنوعی. (Siew M. loh)

# حکیم عمرخیام نیشابوری
# شکوه یکپارچگی نخبگی و پختگی
# در علم، ادب، فلسفه

**علی فرازمند**
**پژوهشگرسابق مرکز پژوهش‌های مجلس**
**afarazmand@gmail.com**
**نامه علوم پایه شماره ۱۴، پاییز و زمستان ۱۴۰۳**

نیکی و بدی که در نهاد بشر است
شادی و غمی که در قضا و قدر است
با چرخ مکن حواله کاندر ره عقل
چرخ از تو هزار بار بی‌چاره‌تر است

**چکیده**

در این نوشته آثار و احوال حکیم عمرخیام نیشابوری (۵۱۷-۴۳۹ هجری قمری)، اندیشمندی با آثاری درخشان در علم، ادب و فلسفه، مرور می‌شود. بیشتر عمر وی در دوران حکمرانی سلجوقیان بر ایران سپری شده، به خاطر توانائی‌های علمی در دربار سلاطین این سلسله ارج و منزلتی والا داشته است. خیام در نجوم، ریاضیات، هندسه، طب، موسیقی، فیزیک، هوا شناسی صاحب اندیشه و نظر بوده، با آثار متعددی که نوشت میراث ارزشمندی در تاریخ علم به جای گذاشت. با سرپرستی تیمی از زبدگان نجوم زمان در دوران ملکشاه سلجوقی در رصدخانهٔ اصفهان، تقویم خورشیدی (ملکشاهی یا جلالی) را بنا نهاد که همچنان دقیق‌ترین تقویم دنیا از نظر همپوشانی با فصول طبیعت به حساب می‌آید. در هندسه و ریاضیات، با بررسی و نقد کار دانشمندان پیشین، خیلی پیش از دکارت، پاسکال، نیوتون اصولی را معرفی کرد که فقط سده‌ها بعد به نبوغ و دانش وی در این زمینه‌ها پی برده، و کارهای او را پاس داشتند. جورج سارتون نیمه اول سده دوازده میلادی را عصر خیام نامیده است. او در زمینه‌های علمی دیگر مانند فیزیک و موسیقی نیز صاحب آثار است. همچنین با اثری به نام *نوروزنامه* دلبستگی خود را به فرهنگ ایرانی نشان داده است. علاوه بر آثار علمی، خیام رساله‌های فلسفی متعددی در زمینه‌های تکوین عالَم و زندگی فردی و اجتماعی انسان تحریر کرده است. رسالات وی همه کوتاه، ولی در نهایت پختگی و ایجاذ نوشته شده‌اند که اندیشه والای وی را در نگاه فلسفی به امور نشان می‌دهند. میراث ارزشمند دیگر خیام رباعیات اوست که در تک تک رباعیات اصیل وی اندیشه موج می‌زند و ترجمه آنها توسط ادوارد فیتز جرالد به انگلیسی در نیمه اول سده نوزده میلادی شهرت وی را نه تنها جهانگیر کرد بلکه موجب توجهی دوباره در میان محققین ایرانی شد. در حالی که شهرت خیام در زمانه وی صرفا به پاس نخبگی در کارهای علمی و فلسفی اوست در دنیای معاصر، بویژه پس از انتشار رباعیاتش به بسیاری از زبان‌های دنیا آوازه شاعری دارد، هرچند وجوه علمی و فلسفی وی حتی در هنر شعر- به خاطر مضامین ژرفی که به شکل پرسش و پاسخ‌هائی سروده می‌شوند- نیز کاملا آشکار است.

**کلیدواژگان:** عمرخیام، خیام نیشابوری، رباعیات، تقویم جلالی، خیام-پاسکال، خیام-نیوتون

## ۱. پیش‌درآمد

استاد جلال الدین همائی در *خیامی نامه* (۱) خود در توصیف تلاش دانشمندان ایرانی در تصحیح ترجمه اولیه عربی متون علمی از جمله ریاضیات اظهار تاسف می‌کند که «ایرانیان همیشه نان خود را بر سفره دیگران می‌گذارند. یک روز هرچه داشتند به عرب و یونان نسبت می‌دادند و امروز هرچه دارند به فرنگی نسبت می‌دهند» (*خیامی نامی* همائی، ص ۲۴). هرچند روایت منتسب به دیروز و امروزِ مورد اشاره همائی نیازمند تحلیل‌های جدی است، ولی در مورد ایراد اول استیلای حکمرانان تحت قیمومت اعراب، اندیشمندان پارسی را در اتخاذ زبان مسلط برای کتابت و گسترش ایده‌ها ناچار به همرنگی زبانی با دیوان دولت می‌کرده است. یک نکته تکمیلی هم وجود دارد که نقش اندیشمندان ایرانی در قوام دادن به زبان و ادب عرب است، یعنی ناگزیری آنان در کاربرد زبان عربی، آنها را به ناگزیری دیگری، تدوین دستور و قواعد لازم غائب در زبان عربی وقت، کشانید که برای آفرینش آثار فاخر علمی، فلسفی و ادبی‌شان ضرورت داشت. این تلاش ایرانی نکته‌ای بسیار آموزنده دارد، یعنی علاوه بر نقش آشکار علمی و فرهنگی ایران در گسترش اسلام، قوام و قاعده بخشی به زبان عربی آن زمان در گسترش ادبیات عرب و در پی آن نقش ایرانیان را در گسترش و دوام آثاری نمایان می‌سازد که به این زبان نگاشته می‌شد. در اشارت دوم، فرنگی مابی، نیز دلیل متناظری وجود دارد و آن سیطره

فرهنگ مسلح به پیشرفت‌های علمی–تکنولوژیک غرب بر دنیای نو و ساحت علم و اندیشه چند سده اخیراست. این استیلا همچون زمانهٔ همائی، پردامنه‌تر همچنان پابرجاست، ولی تاسف ایشان را باید با واقعیت دیگری جُفت کرد که غرب شروع تمدن خود را به خاستگاه یونان و فلاسفه یونانی بنا می‌گذارد بی‌آنکه بهره گیری آنان و ریشه‌های تمدنی‌شان را از تمدن‌های پیش از یونان یادآور شود. اگر به پیوستگی تطور تمدن بشری نگاه عالمانه و بی‌طرفانه داشته باشیم بی‌شک تمدن ایران، با غنائی درخور توجه، بر خاستگاه تمدن منتسب به یونان تقدم دارد. اگر از این سوگیری یونان خاسته عمدی/ سهوی غربیان با توجیهات معرفتی و تاریخی بتوان گذر کرد، ولی کوتاهی ایرانیان در نمایاندن این برداشت نادرست در سده‌های اخیر بخشودنی نیست. در کنار این باور که که اندیشمندان و اندیشه‌های ریشه دار میراث مشترکِ فرهنگی بشری به شمار می‌آیند، که تنازع بر سر خاستگاه آنها چیزی جز جهل و جدال بیهوده عاید کسی نمی‌کند، ولی پرداختن درست و غیرسوگیرانه بدانها می‌تواند سهم ملل گوناگون را در پیشرفت تمدن بشر در گسترهٔ تاریخ نشان دهد؛ نتیجه این درست اندیشی نه تنها از ضروریات تحلیل درست تاریخ تمدن بشر است، بلکه به جای رویارو قرار دادن ملل دنیا، آنها را به آشنائی، نزدیکی، قدرشناسی و همزیستی متقابل رهنمون سازد.

اشاره این نوشته به چنین رویکردی – که در تخصص نگارنده نیست ولی کنکاش و تلاش دائمی اندیشمندان جدی این قلمرو را می‌طلبد– از آن روست که نوشته‌های منسوب به خیام نیشابوری اغلب، غیر از رباعیات و *نوروزنامه*، نیز به زبان عربی است. در مورد نوشته‌های مربوط به مرور زندگی و آثار زکریای رازی و بیرونی نیز که در شماره‌های پیشین نامه علوم پایه (۲ و ۳) توسط نگارنده انجام شد نیز این وضع، البته کمتر از آثار خیام، کمابیش حاکم است. چه خوب می‌شد اندیشمندان و پژوهشگران قلمروهای مرتبط تمام آثار مکتوب عربی این نوابغ دوران را تمام و کمال به فارسی برمی‌گرداندند تا علاوه از آنهائی که به زبان مبدا این نوشته‌ها تسلط دارند همه فارسی زبانان بتوانند از آنها آسان‌تر و کامل‌تر بهره‌مند شده، شاید تحلیل آنها هم علاقه مندان بیشتری پیدا می‌کرد. نکته‌ای که نباید ناگفته گذاشت پیام نهفته استاد جلال الدین همائی در تاکید بر وادادگی آشکار ایرانیان در حفظ و پاسداشت و گسترش فرهنگ و تمدن کهن خویش است، هرچند این کوتاهی به گریز و گزیرهای تاریخی و اجتماعی نسبت داده شوند. شاید اگر ژرفای اصیل و بی‌بدیل خودِ این نام آوران ایرانی و آثارشان نبود، صرفِ تلاش‌های اندیشمندانی که به بررسی و معرفی آنها پرداخته‌اند نمی‌توانست این تمدن و شکوه میراث بشری را زنده و پابرجا نگاه دارد. برای یادآوری به نقش اصیل بزرگانی چون فارابی، مولوی، خیام، فردوسی، ابن سینا، زکریای رازی، بیرونی، نظامی گنجوی، ابوالحسن بیهقی، خوارزمی، ناصر خسرو، نصیرالدین طوسی و ده‌ها عالم و حکیم دیگر بنگرید که سِرِشت اندیشه‌هایشان زمان ناپذیر و تاثیر گذار، و آثار و احوالشان همه پاسدار اندیشه، علم، هنر و موسیقی ... تمدن ایرانی‌اند. این کوتاهی در همه ادوار بیشتر متوجه حکمرانان و سپس بدرجاتی ناشی از کوتاهی اندیشمندان هر جامعه‌ای است، بی‌آنکه تلاش‌های موثر فردی و بعضا جمعی رهروان این بزرگان تخفیف داده شوند

## زندگی و روزگار خیام

غیاث الدین ابوالفتح عمربن ابراهیم خیامی، مشهور به خیام نیشابوری، ریاضیدان، فیلسوف، منجم طراح تقویم جلالی و رباعی سرا، متولد ۴۳۹ قمری و درگذشته ۵۱۷ قمری (هردو به تقریب) زاده نیشابور است. نیاکانش نیز همه از اهالی همین شهر بوده‌اند. خیام به معنی خیمه دوز و از این رو لقب اصلی وی، خیامی، را انتساب حرفه خیمه دوزی به پدر یا خاندان وی می دانند. حجه الحق، حکیم فیلسوف، امام، نصرت الدین از القابی است که هم عصرانش به وی بخشیده‌اند. درباره تحصیلات او روایات دقیقی در دست نیست. معتبرترین سند از زندگی خیام، اثر ابوالحسن (علی ابن زید) بیهقی با عنوان *تتمه صوان الحکمه* است که در آن به تفصیل از خیام یاد شده و مقارن دوران زندگی وی نوشته شده است. بیهقی که خود در ایام کودکی همراه پدرش به دیدار خیام رسیده بود، در این اثر خیام را در اقسام علوم شامل حکمت، ریاضیات، لغت و فقه و تاریخ صاحب نظر نامیده است. ابراهیم پدر خیام که چادر دوزی فقیر است در اندیشه تربیت پسر بسیار باهوش خود از مولانا محمد قاضی، پیش‌نماز مسجد محلی یاری می‌جوید. قاضی با طرح پرسش‌هائی از خیام به استعداد وی پی می‌بَرد. خیام نزد اولین استادش بیشتر علوم قرآنی، صرف و نحو عربی ادبیان و مقدمات علم دین می‌آموزد. ابوالحسن انباری (حکیم و هندسه دان) از استادان دیگری است که خیام از او حدیث، تفسیر، فلسفه، علوم ریاضی و ستاره شناسی (و اثر بطلمیوس *المجسطی*) را فرا گرفت؛ شاگردی‌اش نزد امام موفق نیشابوری در دروس پیشرفته، همچنین شاگرد ناصرالدین محمد منصور (از فقهای حنفی هم عصر وی) بود. همچنین از ابوحامد غزالی نیز تعلیماتی گرفته، و همدرس وی هم بوده است. اما رابطه این دو آسان نبوده، شاید جزم اندیشی غزالی و آزاد اندیشی خیام عامل این دشواری رابطه بوده است که گفته‌اند غزالی *المنقذ من الضلال* را در پاسخ به مباحثاتش با خیام نوشته باشد. (۴) خیام اما با سنائی اُلفت و موانست نزدیک داشته است. خیام در طب نیز دست داشت و در مداوای بیماری آبله سلطان سنجر نقش داشت. بر پایه آموخته‌هایش از آثار ابن سینا، خیام خود را شاگرد وی خوانده، یکی از خطبه‌های وی در مورد یکتائی خداوند (*خطبه توحیدیه* یا معروف به *الخطبه الغراء*) را از عربی به فارسی برمی‌گرداند. برخی خیام را شاگرد بهمنیار بن مرزبان از شاگردان معروف این سینا نیز دانسته‌اند. نقل است وی فلسفه را مستقیم از منابع یونانی آموخته باشد. یکی دیگر از کهن‌ترین

آثاری که در آن از خیام یاد شده *منشآت* خاقانی است که از او با صفت «قافله سالار دانش» یاد می‌شود. اشارت دیگر که نشانه منزلت بالای خیام در میان حاکمان نیشابور است نامه‌ای منسوب به سنائی غزنوی است. گویا سنائی که در سفر نیشابور دیداری هم با خیام داشته در کاروانسرائی منزل می‌گزیند که در آن سرقتی هزار دیناری رخ می‌دهد. گمان دزدی به خدمه‌ای هندو می‌رود که در محکمه عنوان می‌کند آن را به شاگرد سنائی داده است و شاگرد برای گریز از اتهام می‌گوید دینارها را به سنائی، که به قصد هرات نیشابور را ترک کرده بود، داده است. سنائی در مظان اتهام که از ترس آبرو حتی به خودکشی فکر می‌کند، نامه درخواستی به خیام می‌نویسد و طلب یاری می‌کند تا در محکمه وساطت کند که سنائی در مرتبه‌ای نیست که تهمت سرقت زیبنده او باشد. از چهره‌های مشهور عین القضات همدانی و نظامی عروضی صاحب *چهار مقاله* از شاگردان وی بوده‌اند. از حضور امام محمد غزالی نیز در مجالس درس اشارات ابن سینای وی یاد شده است.

## بستر و اوضاع تاریخی فرهنگی عصر خیام

بیشتر عمر خیام در نیشابور می‌گذرد و حضور وی در اصفهان برای تدوین تقویم جلالی حدود ۱۸ سال طول می‌کشد و سفرهائی به سمرقند و بغداد هم داشته است. نیشابور به نقل از استاد شفیعی کدکنی در پیشگفتار آموزنده ایشان در کتاب *تاریخ نیشابور* (۵) ترجمه محمد بن حسین خلیفه نیشابوری (با مقدمه، تصحیح و تعلیقات شفیعی کد کنی) فشرده‌ای است از ایران بزرگ که زمانی کلان‌شهر دوران خود بوده، از حدود کاشمر امروزی تا دامنه کوه‌های هزار مسجد در شمال، از مشرق از فردوس امروزی و گناباد و طبس تا مرز گرگان در غرب و به عبارتی تمام خراسان امروزی را در برمی‌گیرد. در این کتاب نام بردن ۲۷۰۰ دانشمند که در چهار سده اول عصر اسلامی در آن آمد و شد کرده‌اند، نشانه عظمت علمی و فرهنگی نیشابور آن زمان و در عین حال اسیر آشوب‌های سیاسی و دست به دست گشتن آن توسط زمامداران حکومت‌های گوناگون است؛ و خیام در اوایل حکومت ترکان سلجوقی پس از سقوط آل بویه یا دیلمیان و سیطره ایشان بر نیشابور، کلان‌شهر با سنت علمی فرهنگی با شکوه، به دنیا آمد.

طغرل بیگ سرسلسله سلجوقیان است که از ۴۲۹ تا سال ۵۹۰ هجری قمری بر ایران حکمفرما بودند تا به دست خوارزمشاهیان از حکومت برچیده شدند. برخلاف آل بویه که بر بخش‌هائی از ایران سلطه داشتند، سلجوقیان بر پهنه وسیعی از خاک ایران حکمرانی کردند. حکمرانی سلجوقیان در برهه زمانی میانه سده سوم تا هفتم قمری است که بنوعی دوران تجدید حیات ایران، تحت سیطره بیگانگان، به شمار می‌رود. سلجوقیان از اتحاد قبائل ترک با زندگی چوپانی، چادرنشینی و ایلاتی پدید آمدند که اغلب در حواشی شهرهای ماورا النهر، بخارا، سغد سمرقند و قُهِستان (به معنی کوهستان؛ مرکز فلات ایران، از طبس و فردوس و بیرجند و گناباد تا ناحیه تایباد در خراسان) می‌زیستند. به اقتضای روش زندگی صاحب مهارت‌ها بوده و با گستره زندگی آنان، از ایران تا ترکستان، نفرات زیادی داشتند. فرمانروایان نیز از نیروی آنها در مواجهه با مشکلات یاری می‌جُستند و عموما تزاحمی نسبت به یکدیگر نداشتند. از شواهد گستردگی و اقتدار این دودمان نقل است (۶) که محمود ابن سبکتکین برای ارزیابی قدرتشان در سفرِ بخارا پیامی مودت جویانه برای دیدار با سلجوق ابن لقمان می‌فرستد. یکی از پسران سلجوق به نام اسرائیل با ده هزار سوار عزم دیدار او می‌کند و چون محمود با خبر می‌شود فرستاده‌ای می‌فرستد که نیازی به مدد فوری ندارد و فقط قصد دیدار و آشنائی دارد. اسرائیل با سیصد نفر به دیدار وی آمده، اکرام می‌بیند. محمود به قصد استعلام از وی می‌پرسد اگر جنگی در بلاد کفر درگیرد و او در غیبت ناگزیر از کمک برای حفظ خراسان شود از آل سلجوق چه تعداد برای این کار آماده باشند؟ اسرائیل با غرور تیری را نشان می‌دهد که اگر به زیستگاه قوم خود پرتاب کند سی هزار مردِ کار، سواره حاضر شوند. محمود می‌گوید اگر زیاده نیرو بخواهیم چطور؟ او می‌گوید تیری دیگر را به نشانی فرستم ده هزار نیروی جدید عزم یاری کنند. در پی تکرار سوال، محمود پاسخ می‌گیرد که اگر تیرهایی دیگر به بلخان کوه و ترکستان و ... فرستند تا سی صد هزار ترک برای رزم عازم می‌شوند. محمود از این گفتگو به تفکر در می‌آید و در می یابد که با اینان نمی‌تواند در افتد. ادامه داستان این می‌شود که او با حیلت‌هائی سال‌ها با این قوم سر می‌کند. ولی نهایتا کار فرزندش مسعود به جنگ با ترکان سلجوقی می‌انجامد که با شکست نهائی سلطان مسعود غزنوی به سال ۴۳۱ قمری در دندانقان خراسان، طغرل سلجوقی پس از تسخیر خراسان در نیشابور رسما حکمرانی سلجوقی را اعلام می‌دارد که سرآغاز دوران تازه‌ای در تاریخ ایران است. وی آخرین امیر آل بویه را نیز شکست می‌دهد و حکمرانی‌اش از خراسان تا میان رودان گسترش می‌یابد. طغرل، سردمدار نخست حکمرانی رسمی این خاندان، پس از به قدرت رسیدن به القائم بامرالله خلیفه عباسی در بغداد نامه‌ای برای کسب پشتیبانی و حمایت خود از خلیفه هر جا که لازم باشد می‌نویسد، چرا که برای مشروعیت حکمرانی به تائید خلیفه نیاز داشت. خلیفه نیز گویا طی نامه‌ای از وی درخواست یاری کرده بود. سلجوقیان سال‌ها پیش با گرویدن به اسلام تابع مذهب سنی شده، بنابراین می‌توانستند از حمایت خلیفه عباسی مطمئن باشند. بویژه آنکه در این زمان خلافت عباسی قدرت سیاسی پیشین را نداشت و با توجه به قدرت گرفتن فِرَق مذهبی جدید اقتدار دینی سرتاسری خود را نیز از دست داده، با برخاستن حکومت‌های محلی شیعی و اسماعیلیه و استیلای دیلمیان آل بویه در خلافت بغداد، قدرت شان رو به زوال می‌رفت. بدین ترتیب، با سیاست طغرل و قدرت رو به افزایش سلجوقیان و کسب حمایت مشروع دینی از خلیفه، وحدت در بخش عظیمی از جامعه اسلامی دوباره پدیدار

شد و خلیفه عباسی طغرل را به لقب «سلطان شرق و غرب» یاد کرد. بیشترین اقتدار حکومت سلجوقیان به دوره حکومت طغرل، ملکشاه و آلب ارسلان مربوط می‌شود. خواجه نظام الملک وزیر قدرتمند سلجوقیان کار صدارتش در دربار را از دوره آلب ارسلان آغاز کرد و در تمام طول حیات ملکشاه این وزارت ادامه داشت. در زمامداری آلب ارسلان فتوحات سلجوقیان تا ارمنستان و گرجستان گسترش پیدا کرد. خواجه نظام الملک در به قدرت رساندن ملکشاه و حفظ اقتدار وی پس از رسیدن به حکومت نقش فوق العاده‌ای ایفا کرد. در دوره حکمرانی ملکشاه، که بخش عمده زندگی علمی و فرهنگی خیام هم در همین روزگار بوده است، سلجوقیان به اوج اقتدار خود رسیدند و از ماوراء النهر و افغانستان تا سوریه و شرق دریای مدیترانه را به استیلای خود درآوردند. سرانجام ملکشاه حدود یک ماه پس از قتل وزیر مقتدرش خواجه نظام الملک که به دست یکی از اسمعیلیون (یا به روایتی دیگر به تحریک پیشکار همسر ملکشاه توسط یکی از غلامانش) کشته شد، هنگامی که در بغداد به سر می‌برد به یرقان درگذشت.

پس از کشته شدن خواجه نظام الملک و درگذشت ملکشاه، خیام هم بدون پشتیبانی آنها و قطع کمک مالی به رصدخانه در اصفهان و عدم توجه به فعالیت ادامه کار زیج توسط حاکمان جدید، اصفهان را به قصد خراسان ترک کرد. وی از سال ۴۷۹ قمری بقیه عمر خود را در نیشابور و مرو گذرانید. خیام پس از مراجعت از اصفهان در این دو شهر کارهای علمی خود را دنبال کرد. احتمالاً رساله‌های *میزان الحکم* و *قسطاس‌المستقیم* در همین جا نوشته شده است و *رساله مسائلی* در حساب نیز احتمالاً به همین سال‌ها مربوط می‌شود. پیش از به پایان بردن این خلاصه در مورد روزگار خیام در دوران ملکشاه سلجوقی، به تاریخ دو سه سده پیش از ظهور سلجوقیان اشاره کوتاهی می‌شود تا معلوم شود چه رویدادهائی اجازه داد پس از سقوط امویان (تا هجوم و سیطره مغول در اوایل سده هفتم قمری) بتدریج فرهنگ ایرانی، علی رغم استیلای اعراب و سپس حکمرانان ترک، باز جلوه گر شود و دانشمندان ایرانی از یک طرف و نیز مشاوران و وزیران ایرانی این حکمرانان توانستند به زنده نگاه داشتن و پایندگی تاریخ و فرهنگ ایران مدد رسانند. در حکومت بنی امیه، حدود یک و نیم سده اول استیلای عرب و حکمرانی خلفای اموی، بر غیر عرب از جمله ایرانیان جفای زیادی شد و بساط اندیشه و تمدن آنها در رکود قرار گرفت، هرچند که حتی خلفای اموی به اعتبار و شکوه فرهنگ ایرانی واقف بوده، از ایرانیان در بساط حکمرانی خویش بهره می‌برده‌اند. نهایتا به همت ایرانیان و قیام ابومسلم خراسانی امویان ساقط می‌شوند و خلافت به خاندان دیگر اعراب، بنی عباس، می‌رسد. در طول خلافت عباسیان، ایرانیان با احراز مقامات دولتی و تسلط به زبان عربی آثار زیادی پدید آوردند که همه به زبان عربی نگاشته می‌شد و در نتیجه دانشمندان ایرانی، مانند روزبه (ابن مقفع)، سیبویه، عمرفرخان، محمد موسی خوارزمی و ابومشعر بلخی که در سده دوم و سوم هجری می‌زیستند همه تازی قلمداد شدند؛ البته شهره به عرب بودن در مورد تمام دانشمندان ایرانی که آثار خویش را به عربی می‌نوشتند در بیشتر ادبیات تاریخی غرب و نیز کشورهای عربی همچنان تسری دارد. آثار ایشان شامل ادبیات، طبیعیات، حقوق، موسیقی، قواعد صرف و نحو، تاریخ، طب، شیمی، داروسازی، جغرافی و زمین شناسی، نجوم و ریاضی می‌شد. ایرانیان در کنار زبان عربی و فرهنگ اسلامی، در حفظ آداب و شعائر ایرانی کوتاهی نداشتند و بسیاری از متون پهلوی را به زبان عربی ترجمه کردند، گرچه گاهی با تهمت زندیق بودن و گاهی حتی مرگ مواجه شدند. با این حال هر کجا که توانستند، مانند گرگان، طبرستان و دیلمان، بر ضد خلفای عرب شوریدند و به مذهب شیعه گرویدند. همچنین این نهضت‌ها در خراسان و سیستان به خاطر سابقه پایداری‌های حماسی و ملی و نیز دوری از مرکز خلافت، بویژه موفق بودند. در برخی از این نواحی، از جمله با حمایت یعقوب لیث، زبان فارسی دوباره جان گرفت. جور و فساد دربار خلفای بغداد و به ضعف آمدن اقتدار آنان، در گرایش مردم به مقابله و بازگشت به سنن ملی تاثیر داشت. به دنبال یعقوب لیث، به عصر سامانیان می‌رسیم که به زبان فارسی و شعرای فارسی میدان بخشیدند و اوج آن پدید آوردن شاهنامه فردوسی است که سرانجام در عصر محمود غزنوی به سال ۴۰۰ قمری انتشار یافت. از علمای دیگر این دوره ذکریای رازی و ابونصر فارابی هستند. این روند در دوره‌های بعد در حکمرانی آل زیار ادامه یافت و آثاری چون *قابوس‌نامه* (شامل ۴۴ باب در مورد آداب و اخلاق و رسوم زندگی و آداب کار و کسب حرفه‌های گوناگون) توسط قابوس وشمگیر یکی از همین حکمرانان منتشر شد. ابوریحان بیرونی نیز کتاب *آثار الباقیه* را به قابوس وشمگیر تقدیم کرده است. اوج قدرت ایرانیان تصرف بغداد (۳۳۵ هجری قمری) به دست احمد دیلمی است که نماد پیروزی فرهنگ و تشیع ایرانی در برابر خلفای سنی عرب به حساب می‌آید. بعد از این شکست، قدرت سیاسی و اقتصادی اعراب در ایران درهم شکست و خلیفه هم که بیشتر ریاست دینی را برعهده داشت خود تحت نفوذ حکمرانان ایرانی بود. حمایت آل بویه از دانشمندان ایرانی موجب شد تا ری و اصفهان نیز مانند بغداد مرکز علم شد. از دانشمندان بنام این دوره ابو علی مسکویه رازی است که اثری مشهور با عنوان *تجارب الامم* در تاریخ به جای گذاشت. سپس در دوره غزنوی زبان فارسی و عربی هر دو رواج داشت و ابوریحان بیرونی که چشم و چراغ محمود غزنوی است در کنار آثار بسیاری که دارد *التفهیم* را به هر دو زبان فارسی و عربی می‌نویسد (۲) و ابن سینا نیز در کنار آثار عربی ماندگار خویش *دانشنامه علائی* را به فارسی پدید می‌آورد.

سلاطین سلجوقی که قبایل تحت امرشان تمدنی بدوی داشتند، علی رغم تسلط بر ایران، به فرهنگ و آئین‌های ایرانی احترام

می‌گذاشتند و عنصر ایرانیت که در تمام دوران پس از حمله اعراب که به شکل‌های گوناگون به مدد ایرانیان – اغلب با در دست داشتن دیوان حکومتی – زنده نگاه داشته می‌شد جان تازه‌ای گرفت. در همین عصر است که علاوه بر عمرخیام علمائی چون خواجه نظام الملک (صاحب *سیاست‌نامه*)، ناصرخسرو، سنائی شاعر، و امام محمد غزالی (از استادان نظامیه بغداد و نویسنده *احیاء العلوم* و *المنقذ من الاضلال* که در هر دو به انتقاد از اوضاع علمی و دینی پرداخته است) آثار خویش را به فارسی و عربی پدید آوردند. *کیمیای سعادت* (خلاصه‌ای از *احیاء العلوم*) و *نصیحه الملوک* از آثار دیگر امام محمد غزالی به فارسی نوشته شده‌اند. با این حال مثل ادوار گذشته استیلای تازیان، در عصر سلجوقیان نیز فِرَق گوناگون مذهبی، سنی و شیعه، اشاعره و معتزله، در مباحثات و منازعات دینی و فقهی به سر می‌بردند و داستان همیشگی برچسب زدن اتهام بی‌دینی و کافری هم بر اندیشمندانِ بر قدرت و بی قدرت به پا بود. از جمله امام محمد غزالی و خیام خود از این اتهامات بری نماندند. بدین ترتیب بین سده سوم تا هفتم قمری، به خاطر افول اقتدار خلفای بغداد و در سایه حکمرانان علاقه‌مند به فرهنگ و تمدن ایرانی و نیز همت سترگ دانشمندان نخبه و بی‌رقیب ایرانی آثار زیادی به هر دو زبان فارسی و عربی به یادگار ماند؛ بخشی از همان میراث فرهنگی غنی و گسترده ایرانیان در طول تاریخ تمدن بشر که همچنان در سطح ملی و جهانی مورد توجه اندیشمندان است. غرب هم در همین ایام (نیمه دوم قرن یازدهم و نیمه اول قرن دوازدهم میلادی) با امپراطوری سلجوقی درگیر جنگ‌های صلیبی شد که در هر دو جنگ صلیبی اول شکست خورد. در پی این شکست قلمرو حکومت سلجوقی تا آناتولی گسترش یافت.

سه یار دبستانی بودن خیام، حسن صباح و خواجه نظام الملک به دلیل تفاوت‌های سنی ایشان داستانی بیش نیست؛ اما اگر نه یار دبستانی، گوئی در دبستان زندگی در درس مبارزه و مقابله با صاحبان زر و زور و تزویر زمانه خود، هر یک با خلق و خو و سرشتی متمایز شرکت داشته، هر سه بنوعی در جنبش شعوبیه دخیل بوده‌اند. این جنبش ملی گرایانه علمی، ادبی و سیاسی برای مبارزه با سلطه بیگانگان اعم از تازیان یا ترکان شکل گرفته، این سه با نگرشی جداگانه بنوعی در خدمت این جنبش قرار می‌گیرند. خیام دانشمندی است که به خاطر نخبگی ژرف علمی‌اش، حاکمان نمی‌توانند وی را نادیده بگیرند و در نتیجه کارهای علمی خویش را در حد توان و امکان و برخی را به سفارش آنها توسعه می‌بخشد بی‌آنکه به انقیاد آنها کشیده شود. در سایه آوازه علمی به دربار سلجوقیان راه می‌یابد و بویژه در دوره ملکشاه اول (ملقب به جلال‌الدوله معز الدین و الدنیا)، سومین سلطان سلجوقی ارج ویژه‌ای می‌یابد. خواجه نظام الملک وزیر، از جمله حامی خیام، در حکمرانی قدرتمند ملکشاه و در نفوذ ایرانیان به حکمرانی نقش زیادی داشت. حسن صباح هم با پیش گرفتن راه مبارزه آشکار رهبری اسماعیلیان را برعهده داشته، به روایتی حتی در کشتن خواجه نظام الملک دست داشته است. جالب اینکه یان ریپکا[1] خیام را مغز متفکر اسماعیلیان قلمداد می‌کند که نشانه‌ای از مقابله او با بساط جور ستمگران عصر خود است (به نقل از ۷، ص. ۱۸).

از ابداعات مهم دوران سلجوقی تاسیس مدارس نظامیه به همت خواجه نظام الملک طوسی است. نظامیه‌ها مرکز آموزش عالی به حساب می‌آمدند که مجهز به کتابخانه‌های معتبر بوده، در آنها علوم زمانه شامل ادبیات، ریاضیات، طب و حکمت، فقه و حدیث و تفسیر قران تعلیم داده می‌شد. مهدی فرشاد در جلد دوم *تاریخ علم* (۸) خود می‌نویسد که بیشتر استادان این مدارس ایرانی یا تربیت شده در مکتب دانشمندان ایرانی بودند و خود اسامی تعدادی از آنها را در این کتاب ارزشمند آورده است. این مدارس تحت نظارت حکومت اداره می‌شدند و در واقع بنوعی راهی برای آموزش دینی حکومتی، پیوند زدن آموزش و نهاد مذهبی و احیای تسنن، و جلوگیری از نفوذ فرقه‌های مذهبیِ منافی این نگرش و نیز جلوگیری از نفوذ تبلیغات جامعه الازهر در بسط دیدگاه‌های شیعی بود. نظامیه‌ها ابتدا در شهرهای بزرگ مثل بغداد، نیشابور، اصفهان، مرو، موصل، بلخ، قاهره و هرات تاسیس و سپس تا هفتاد نظامیه در اغلب شهرهای تحت حکومت اسلامی بنا شدند. ده درصد درآمد حکومت صَرف این مدارس می‌شد که شامل حقوق استادان بنام و کارکنان دیگر می‌شد. امام محمد غزالی از علمای با نفوذ نظامیه بغداد بود و از جمله سعدی شیرازی هم در این نظامیه تعلیم دیده است. غزالی با درک قدرت خلیفه و حکومت دینی، ضمن قبول تفوق شریعت بر ارکان زندگی، سعی در موازنه قدرت سلطان، خلیفه و علما داشت؛ علما را به استقلال تشویق می‌کرد، هرچند به خاطر تنگناهای مادی اکثر دانشمندان ناچار به سر سپردن به انقیاد حکومت و مقتضیات زندگی بودند و اعتبار علما و دانشمندان صرفا با نظر و تائید حکومت تعیین می‌شد. تاسیس نظامیه‌ها به هر نیتی که بوده در کنار تاسیس دانشگاه جندی شاپور به دست شاپور اول از افتخارات تمدن ایرانی و پیشگام آموزش عالی در جهان به شمار می‌روند، یکی یادگار ایران باستان و و دیگری یادگار ایران دوره اسلامی. مکتب جندی شاپور مجهز به بیمارستان و رصدخانه و کتابخانه‌ای عظیم و مدارسی برای آموزش ریاضیات و نجوم از هسته‌های علمی اصلی و فعال جهان باستان بود. همچنین مکتب جندی شاپور به لحاظ تاریخی، حلقه واسط انتقال فلسفه و فرهنگ یونان و معارف هند به ایران و سپس انتقال آنها به فرهنگ اسلامی است. نقش ایرانیان در پیشگامی سنت آموزش عالی به این دو مرکز اشاره شده محدود نمی‌شود، چرا که تاسیس بیت الحکمه (خانه دانش) به دستور مامون در سال ۲۰۰ هجری قمری و عمدتا به دست ایرانیان با گنجینه‌ای از یک میلیون کتاب

1. Jan Rypka

در بغداد، مراکز آموزشی تاسیس شده در نیشابور پیش از رواج نظامیه‌ها در سده پنجم هجری، و نیز تاسیس مراکز فرهنگی توسط عضدالدوله دیلمی و حکمرانان دیگر آل بویه در طول سده چهارم و تاسیس بیمارستان عضدی در بغداد از جمله فعالیت‌های ایرانیان در تاسیس مراکز آموزشی عالی بوده است. مسعود خیام با نقل قولی از استاد شفیعی کدکنی که «شکست عنصر ملی سبب شکست علم می‌شود» به چنین وضعیتی در عهد سلاجقه و نیز «اعجاز ریاضیات و حکمت خیام» در پنج سده پیش از تولد دکارت تاکید می‌کند (۸)

## توصیف خیام در اقوال هم عصران

در بخش‌های مختلف این نوشته از هم عصران خیام یاد شده است و در اینجا خلاصه‌ای از مستندات اقوال آنها آورده می‌شود. (۱۷–۹). خیام در میان هم عصران خود شهرتی دانشمند، و حکیم و عالِم دین دارد و در میان اقوال آنان به شاعر بودن و رباعیات وی اشاره‌ای نمی‌شود. حتی سنائی که شاعری توانا و شناخته شده است و احوال خیام را می‌داند شواهدی نیست که آنها در زمینه شعر و شاعری گفتگوئی داشته‌اند. در نامه سنائی به خیام برای کمک گرفتن در اتهام سرقتی که خادم وی انجام داده است با وجود ذکر القاب متعدد هیچ اشاره‌ای که نشانی از شاعر بودن خیام باشد به میان نمی‌آید. این نامه قدیمی‌ترین اثری است که به ذکر صفاتی چند از خیام می‌پردازد و از جمله وی را «پیشوای حکیمان» و «نگاهبان جوهر نبوت» می‌خواند. زمخشری یکی دیگر از هم عصران خیام از وی به عنوان «شیخ الامام الخیامی» یاد می‌کند و به ذکر مشاهداتی از خیام به عنوان فرد مسلط بر صرف و نحو عربی می‌پردازد. روایت دیگر معاصرین به اشارات نظامی عروضی سمرقندی در اثر *چهار مقاله* یا *مجمع النوادر* وی است. او از خیام به عنوان «خواجه امام» و «حجت الحق» نام می‌برد و می‌گوید در تمام عالم نظیری چون او سراغ نداشته است. اشاره شیرین دیگر نظامی در همین اثر به دیداری است که در آن در مجلسی با حضور امام مظفر اسفزاری، عمر خیام آرزو می‌کند آرامگه او در جائی باشد که در هر بهاری باد شمال بر آن گل افشانی کند. چهار سال پس از مرگ عمر خیام، نظامی که به نیشابور آمده با آگهی از مرگ استاد بر مزارش حاضر می‌شود و با شگفتی خاک آرامگه خیام را پوشیده از انبوه شکوفه درختان میوه پیرامون خاک او می‌بیند! نظرات زید بن بیهقی که بیش از دیگران به زندگی خیام می‌پردازد نیز بر تبحّر وی در اقسام علوم، حکمت و انواع ریاضی و طب تاکید می‌ورزد. القاب حجه الحق، حکیم، و امام نیز بر مرجعیت وی به عنوان عالِم دین صحه می‌گذارد. برای تاکید بر حافظه بسیار قوی خیام، وی به کتابت نوشته‌ای طولانی که ظاهرا در اصفهان فقط برای خواندن در دسترس بوده اشاره می‌کند که خیام با هفت بار خواندن آن در مراجعت به نیشابور با مطابقت کامل آن را تحریر می‌کند. همچنین بیهقی بر تسلط خیام به گونه‌های نادر و انواع قرائت قران اشاره می‌کند. عماد الدین کاتب اصفهانی نیز در کتاب خویش *خریده القصر* که حدود سه چهار دهه پس از درگذشت خیام نوشته شده، خیام را یگانهٔ عصر در علم نجوم و حکمت می‌خواند و به مرتبت و احترام وی اشاره می‌کند. در همین اثر نه تنها خیام را یگانه عالم در حکمت و فلسفه می‌نامد به شاعر بودن وی نیز اشاره می‌کند.

اقوال دیگر بخوبی آنهائی که ذکر شد نیستند و قضاوت‌های بی‌انصافانه و مناقشات بر علیه خیام نیز کم نیستند. سنائی که در نامه مددجویانه‌اش از عمرخیام در جریان اتهام سرقتی به خادم و خود وی القاب وزینی بر خیام می‌شمارد بعدها وی را با برچسب‌هایی چون اعتقاد به فیلسوفان یونان، ندانستن راه دین، حکیم زشت‌خوی، بدعت گذار و ...در جهتی مخالف می‌نوازد. خیام شاید به خاطر مرتبت و منزلتی که نزد بزرگان دارد و نیز نخبگی یکپارچه مورد حسد بوده، و آرای فلسفی و آزاداندیشی‌اش مورد نقد و گاهی تکفیر قرار گرفته است. دشمنان و منتقدان فلسفه (و فرزندِ خلف آن علم) در لباس و لسان دین براحتی به خیام و امثال وی که در هر دو زمینه دست بالا داشته‌اند دشمنی آشکار ورزیده‌اند. در روایت‌های متعدد شیخ نجم‌الدین رازی، امام محمدغزالی، قاضی جمال‌الدین قفطی، شیخ فریدالدین عطار نیشابوری، شمس تبریزی از جمله عالمان و بزرگانی هستند که با نگاه دینی خاص خود از خیام با تعابیر ناشایست یاد کرده‌اند. طُرفه اینکه در مورد غزالی روایت شده پیش از طلوع آفتاب هر روزه نزد خیام اشارات ابن سینا را می‌خوانده، ولی در میان مردم از او به زشتی یاد می‌کرد. بنا بر این روایت خیام روزی با گرد آوردن گروهی از مطربان و طبالان در سرای خود از آنها می‌خواهد همزمان با آغازِ درسش با غزالی آنها نیز نواختن را شروع کنند که در نتیجه وقتی مردم برای دریافتن علت این سروصدا به سرای خیام می‌شتابند می‌بینند که غزالی در محضر او به درس نشسته است. خیام به حاضران می‌گوید از غزالی بپرسند او که هر پگاهی برای تعلیم در سرای وی حاضر می‌شود چرا نزد مردم او را به کُفریات متهم می‌سازد؟ اگر درس او کفریات است چرا برای تعلیم نزد او می‌آید و اگر چنین نیست بدگوئی‌هایش از چه روست؟ رسم مرسوم طرد و انزوای آنانکه فراتر از زمان و زبان‌های جاری می‌اندیشند دامن خیام را نیز فرا گرفته است. فلسفه عقل گرایانه مشائی مکتب فکری خیام است و در اغلب رسائل وی، اندیشه آشکارتر وی همین مکتب است. شاید جزم اندیشی اشعریان، از جمله غزالی مانع همدلی واقعی وی با خیام بوده است

از خیام در آثار عالمان دیگرِ نزدیک به زمان درگذشتِ وی به صُوَر گوناگون یاد شده است. نظامی عروضی او را در پهنهٔ عالم بی‌بدیل دانسته، عماد کاتب او را در زمانه بی‌مانند دانسته، زمخشری عنوان حکیم دنیا و فیلسوف به وی می‌بخشد (۱۵). جمال‌الدین قفطی در *تاریخ الحکما* خیام را امام خراسان و دانای زمان، معلم دانش یونان و دارای روشی از تهذیب اخلاق که نفس از کدورات طبیعت دور می‌دارد و نیز آشنا به امور مملکت داری و سیاست مدنی معرفی می‌کند. اما هم ایشان گرفتار در گرایش‌های متعصبانه، اشعار خیام

را برای شریعت چون مار گزنده و زنجیر گمراهی دانسته، صوفیان را به فریفتگی ظاهر رباعیات وی متصف می‌سازد و در عین بی‌مثال خواندن او در حکمت و نجوم آرزوی عصمت وی را می‌کند. خاقانی شاعر قرن ششم نیز در اثر موسوم به *منشآت* در تائید جایگاه علمی عالی خیام روایتی نقل می‌کند که وی به اسمعیل کاشانی از صاحب منصبانِ دربار، طلب خویش از دیوان دولتی را یادآور می‌شود و در پاسخ به ایراد کاشانی که در برابرِ چه خدمتی سالانه ده هزار دینار باید به او پرداخت شود می‌گوید آسمان و اختران باید هزار سال گردش کنند تا قافله سالار دانشی چون خیام بیرون افتد در حالی که در هر دهی از نواحی کاشان به آسانی چندین تن چون کاشانی را می‌توان یافت که از عهده کارهای وی برآیند. روایت است با نقل این قول در نزد ملکشاه وی می‌گوید بالله که خیام راست گفته است! محسن فرزانه در کتاب *خیام شناخت* خود از مرتبت خیام، رباعیات وی و شاعرانی که در طول زمان به تقلیدِ وی شعری سروده یا یادی از او کرده‌اند مستندات زیادی می‌آورد. (۱۵)

## موقعیت جهانی خیام

هر چند کارهای بسیار مهم خیام در زمینه ریاضیات و ابداع تقویم جلالی خورشیدی اهمیت تاریخی و کاربردی بی‌بدیلی دارند شهرت جهانی وی بیشتر به رواج رباعیات وی برمی‌گردد. گسست‌های تاریخی و اوضاع حاکم بر ایران فرصت شناساندن بموقع دانشمندان اعصار گذشته ما و تسلسل و پیشرفت علمی پایدار در این سرزمین کهن را از ایرانیان سلب کرده است؛ یک نمونه آن اندیشه و یافته‌های ریاضیاتی خیام است که سده‌ها پیش از شکوفائی این قلمرو علمی در تاریخ آن مستند شده است. دونامی کردن بسط دوجمله‌ای نیوتون یا مثلث پاسکال با افزودن نام خیام بدان‌ها، نشانه‌ای از به جای آوردن سهم تاریخی این اندیشمند برجسته ایرانی در تاریخ جهانی علم است. اما ترجمه رباعیات خیام توسط ادوارد فیتز جرالد، شهرت وی را جهانی کرد. او در سال ۱۸۵۹ نخستین چاپ از «ترجمه آزادِ محتوائی و موضوعی» رباعیات خیام را منتشر می‌کند و اقبال از این ترجمه، از پرخواننده‌ترین آثار شعری جهان، او و خیام هر دو را به شهرتی فراگیر می‌رساند. به نظر می‌رسد این کار فیتز جرالد به شناخت بیشتر خیام در ایران نیز کمک موثری کرده است و بیشتر تحقیقات خیامانه ایرانیان به دنبال انتشار این اثر در اروپا بوده است. خیلی پیش‌تر از فیتز جرالد رباعیات خیام در ۱۷۰۰ میلادی در کتابی از توماس هاید[1] درباره تاریخ ایران باستان منتشر شد و نیز در کتاب دیگری از هامر پورگستل[2] به سال ۱۸۱۸ بخشی از رباعیات خیام را منتشر می‌کند (۱۱، ص ۶۷). بعد از کار فیتز جرالد رباعیات خیام به زبان‌های دیگر اروپائی و غیره ترجمه شد. مترجم فرانسوی کار فیتز جرالد، اف. هنری در خصوص رباعیات خیام از جمله می‌گوید: «... منظومه غرائی که هر رباعی آن به تنهائی یک فکر و مقصود بخصوص این حکیم را در کمال اختصار بیان می‌کند و این رباعیات با حجم کوچک و معانی بزرگ ... یک مجلّد آزادی و انسانیت است. ... و این کتاب [رباعیات] نمایشگاه حوادث وجدانی و فکری است که لاابالی‌ترین و هوائی مشرب‌ترین بلکه کودن‌ترینِ مردم در روز و ساعات عمر خود متوجه آن بوده ... هر رباعی آن برای شادی و اندوه و آرامش و آشفتگی و امید و نومیدی و تنگی و فراخ حال ما ترجمان بلیغی دارد... حس حیرتی که در خوانندگان تولید می‌کند در میلیون میلیون انسان نسل بعد از نسل انتقال یافته و همه عصرها را اندیشناک ساخته و خواهد ساخت» (به نقل از ۱۴، ص ۸۳-۸۴).

شمار پژوهش‌ها و آثار جهانی منتشره در مورد خیام و رباعیات وی نشان دهنده اقبال و علاقه به مضامین کار اوست. یکی از جدیدترین این کتابنامه‌ها که به مناسبت یکصد و پنجاهمین سال ترجمه فیتزجرالد منتشر شده شامل معرفی ۲۱۱۵ اثر است[3]. (۱۴، ص پانزده). در همین منبع شمار آثار ترجمه عربی رباعیات خیام به ۶۰ اثر با اشکال گوناگون می‌رسد و یاد آور می‌شود که خواننده نامدار مصری ام کلثوم رباعیاتی از خیام را به آواز خوانده است. در نوشته‌های مستشرقین و اروپائی خیام را از نظر اندیشه به اپیکور، لوکرتیوس، ابوالعلای معری، ولتر، گوته، شوپنهاور و هاینه تشبیه کرده‌اند. مضمون رباعیات خیام با بن مایه اندیشه‌های این بزرگان قرابت دارد و در فصل پنجم کتاب *دانش و توفیق* (۱۴) به این مقایسه‌ها پرداخته، و در مواردی موقعیت ممتاز خیام را به برخی از اینها برجسته می‌سازد. کلام موزون و ایجاز تاملات فیلسوفانه خیام در مقایسه با بحث و مناقشات فلسفی لوکرتیوس یا دقایق فلسفی آمده در نوشته‌های منسوب به اپیکور را از جمله امتیازات رباعیات خیام می‌داند. در مقایسهٔ با ابولعلای معری گرچه مشابهات زیادی را در نگرش آنها به جهان و مردمان یادآور می‌شود ولی خصلت تزهّد و توقر و سنگینی خاص اعراب در معری را با سبک‌روحی و خوش مشربی و نازک طبعی و جمال پسندی ایرانیان در برابر می‌نهد و تفاوت را ناشی از مزاج و طبیعت این دو حکیم می‌داند. اگر معری در قضاوت و بدبینی نسبت به جهان و زندگی مردمان «شوپنهاور مانند» به طور جدی و سختگیرانه بر عقلانیت محض تکیه دارد خیام با نازک اندیشی، بی‌اعتنائی و خوشدلی و آسان گیری روزگار، مخاطب را به زندگی گذران دنیا دعوت می‌کند؛ معری بهترین مُلک دنیا را خالی از انسان و سنگ را بر انسان –چون ظلم نمی‌کند– افضل می‌داند، ولی خیام اینچنین قضاوت‌های صریح در مورد مردم و گمراهی‌های آنان ندارد. در یک کلام نویسنده منش خیام را به اپیکوریان و معری را به رواقیون نزدیک می‌داند (۱۴). مسعود خیام (۱۱) عمر خیام را در ردیف و مرتبت هومر، شکسپیر، دانته و گوته می‌شمارد و علی رغم بزرگی شعرای دیگر ما چون فردوسی، حافظ

1. Thomas Hyde
2. Hammer Purgstall
3. Coumans, Jos: The Rubaiat of Khayyam, An Updated Bibliography, Lieiden University Press, 2010.

و سعدی و مولوی، تنها خیام را در میان پنج شاعر بزرگ جهان جای می‌دهد و کار سترگ فیتز جرالد را در ترجمه رباعیات خیام در این شهرت دخیل می‌داند. معینی کرمانشاهی در مقدمه داهیانهٔ کوتاهی بر رباعیات خیام (۱۸) به نکته بس مهمی از علت اقبال اندیشمندان غرب به رباعیات خیام را یادآور می‌شود. او می‌گوید علت استقبال از اندیشه‌های نهفته در رباعیات خیام را که حدود یک سده پس از دوره رنسانس اروپا و مقارنِ پاگرفتن پروتستانیسم در برابر جزم اندیشی کلیسای کاتولیک منتشر می‌شود همین حال و هوای وَزِش آزاداندیشی در اروپای سده نوزدهم میلادی می‌داند؛ کرمانشاهی سرودن *رباعیات خیام* را شش سده پیش از این اوضاع در ایران، بازتابی از چند سده سکوت در برابر حکمرانی خلفای مستبد اموی و عباسی می‌خواند که صاحب آن برخلاف دو «یار دبستانی» خویش خواجه نظام الملک و حسن صباح، که یکی مخالفان را به تازیانه تکفیر و دیگری به تیر تعصب می‌کُشت، نویدبخش راه سومی مبتنی بر سرمستی آزاد اندیشی و آزادمنشی می‌خواند که می‌گفت:

اسرار ازل را نه تو دانی و نه من
وین حرف معما نه تو خوانی و نه من
هست از پس پرده گفتگوی من و تو
چون پرده درافتد نه تو مانی و نه من

## آثار علمی، فلسفی و رباعیات خیام

عمرخیام پُرگو و بس نویس نبوده است و در نتیجه آثار وی برخلاف رازی و ابوریحان بیرونی «بی‌شمار» نیست. اما از آنچه از وی به جا مانده براحتی می‌توان به نخبگی و والائی اندیشه‌های علمی، فلسفی و ادبی وی پی بُرد و شاید به وام از یک رباعی از وی، خود و آثارش را چون «بحر در کوزه‌ای» به یادگار گذاشته است! در پی کنجکاوی از میزان شهرت وی در جهان امروز، به نظرم رسید تعداد زبان‌هائی را که مدخل اصلی عنوان خیام در ویکی‌پدیا نشان می‌دهد جستجو کنم که دریافتم این مدخل به ۱۱۴ زبان خوانده شده است. یعنی مردمِ ۱۱۴ زبان دنیا به نام و زندگی- و احتمالا آثارش- علاقه‌مند و آشنا هستند. وقتی همین تعداد را برای ناموران دیگر دنیای علم و ادب ایرانی جستجو کردم، مدخل ابن سینا به ۱۵۸ زبان در صدر، حافظ به ۱۳۳ زبان در مرتبه دوم، مولوی و خیام همپایه هردو در مرتبه سوم با ارجاع به ۱۱۴ زبان، فردوسی به ۱۰۱ زبان، ابوریحان بیرونی و رازی به ترتیب با ۹۴ و ۸۶ و سعدی صاحب سخن به ۸۱ زبان در این سنجش ساده در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. بدین ترتیب، با همین معیار میزان محبوبیت، آشنائی و علاقه‌مندی مردم جهان به آثار و شخصیت [تمام دوران] این بزرگان پارسی به سنجش در می‌آیند که بی‌شک قابل توجه و مایه مباهات ایرانیان است[1].

## میراث نجومی خیام در تدوین تقویم جلالی

خیام بی آنکه ستاره شناس باشد، با شرکت در کار ابداع تقویم جلالی نقشی بسیار مهم و کاربردی در مطالعات نجومی ایفا کرده است (۴، ۷، ۸). ابوالحسن بیهقی در تتمه *صوان الحکمه* - قدیمی‌ترین اثر در دسترس درباره زندگی خیام- می‌گوید خیام کتاب *مجسطی* بطلمیوس را نزد استادش ابوالحسن انباری خوانده، و گویا این تنها مرجع از تعلیمات او در نجوم است. به نظر می‌رسد نقش او بیشتر در علمِ ریاضیاتِ زیج نویسی در میان پدیدآورندگان گاه شماری جلالی است. قطعا محاسبات ریاضی او به عنوان نابغه ریاضی در کار تیمی رصد و زیج[2] نویسی این تقویم دقیق، کانون اصلی فعالیت وی بوده است. از جمله خیام مَدارِ گردش زمین را به دور خورشید تا۱۶ رقم اعشار محاسبه کرده است. دعوت دربار سلجوقی از او و سرپرستی‌اش در کار این تقویم بتنهائی گویای نقش کلیدی وی در این کار بزرگ است. علت توجه به ابداع یک تقویم دقیق، یکی از مشکلات دربار سلجوقی در اداره قلمرو گسترده حکمرانی خویش یعنی عدم همپوشی سال‌های تقویم با گردش طبیعی فصول سال بود.

مفهوم سال و تعریف درستِ آن از دیرباز مورد توجه بشر بوده است. تعیین و تعریف سال در میان اقوام بر پایه تغییرات گردشی تکرار شونده آب و هوائی زیستگاه آن‌ها (مانند تغییرات گرما و سرما و رویش گیاهان و خشکی) به عمل می‌آمد. ناگفته پیداست که این تغییرات گردشی سالانه، بسته به اقلیم و جغرافیای هر قوم می‌تواند متغیر باشد که خود در تطبیق مقایسه‌ای تغییرات دوره‌ای سالانه بین نقاط گوناگون مشکلی افزون به حساب می‌آید. درنتیجه گستردگی قلمرو حکمرانی سلجوقیان این مشکل را بیشتر می‌کرد؛ فاصله افتادن بین تقویم رسمی، که پس از حمله اعراب و به قدرت رسیدن آنها، مبتنی بر ماه‌های قمری تعیین شده بود با ضروریات زندگی روزمره، از جمله کشاورزی، امور عرفی دیگر مانند زمان اخذ خراج و مالیات، ارتباط دقیقی نداشت. این مشکل برای مثال برای کشاورزان در تعیین زمان مالیات دادن به حکومت بود، چرا که پیش افتادن سال تقویمی از سال طبیعی زمان مناسب مالیات را برای ایشان که فصل پائیز و برداشت محصول است پس و پیش می‌کرد و در نتیجه زندگی آنان را در این مواجهه دچار بحران می‌ساخت.

---

۱. البته بدون یک تحلیلی دقیق و در دسترس نبودنِ دسته بندی طیف خاص خوانندگان ویکی‌پدیا، این معیار سنجش قطعا به عموم مردم صاحب این زبان‌ها و گویش‌ها قابل تسری نیست. همین طور شخصیت‌های مورد اشاره هریک ویژگی‌های متمایز و منحصر به فردی دارند که این معیار ساده نمی‌تواند مبنای مقایسه‌ای چندان معنی داری میان علقه‌مندان آنان باشد.

۲. واژه زیج مُعربِ زیگ، جدولی است برای نشان دادن موقعیت، زمان حلول ستارگان و کواکب برای مطالعات نجومی. زیگ در فارسی میانه به معنای زه یا کمان است که در اصل به معنی چینش نخ در بافندگی و در نوشته‌های نجوم به ترتیب ستون‌ها و ردیف‌ها در جداول این مطالعات و پژوهش‌ها اطلاق می‌شده است.البته به نوشته‌های مربوط به نجوم قدیم هم اطلاق می‌شده است.

تلاش یحیی بن برمک در زمان هارون الرشید برای اصلاح تقویم از قمری به خورشیدی با اتهام اینکه وی می‌خواهد آئین مجوسی را برگرداند ناکام ماند. در زمان متوکل عباسی، فاصله ماه قمری و خورشیدی به سه ماه کشیده شده بود و علی رغم دستور وی برای اصلاح تقویم، با مرگ او این مهم به انجام نرسید. در نتیجه، این مشکل و تلاش‌های بعدی برای اصلاح آن همچنان دوام داشت، هرچند هیچ یک از آن اقدامات نتوانسته بود تقویم واقعی طبیعی و تقویم رسمی را مطابقت دهد. تقویم یزدگردی نیز که پیش‌تر در میان ایرانیان مورد استفاده بود به دلیل عدم محاسبه سال‌های کبیسه، با مرور سال‌ها با مشکلاتی که ذکر شد و نیز عدم هماهنگی فصل‌ها با ضروریات زندگی (مثل جابجائی ایام نوروز و سایر مناسبت‌ها و آداب باستانی) مواجه می‌شد (۸).

سرانجام با سرپرستی خیام در دوره حکمرانی ملکشاه سلجوقی گروهی از ستاره شناسان و ریاضی‌دانان برای تنظیم تقویم، مشهور به تقویم جلالی در اصفهان، پایتخت وقت سلجوقیان گرد هم می‌آیند؛ گروه منجمانِ گاه شمار جلالی، شامل ابوحاتم اسفزاری، ابوالعباس لوکری، ابوالفتح منصور خاذنی، میمون ابن نجیب واسطی و ... به سرپرستی خیام زیج‌هائی را با استفاده از قواعد نجومی فراهم کرده، تقویم خود را بر اساس حرکت واقعی و گردش زمین به دور خورشید، محاسبه دقیق طول زمانی یک سال و تطبیق سرآغاز آن با نقطه اعتدالی بهاری تنظیم کردند. در گاه‌شماری‌های خوب، دوره‌های زمانی‌ای چون ماه و سال تقویمی با طول ماه سال طبیعی حداکثر همپوشی را دارند. در مقایسه سال قمری و شمسی، می‌دانیم که بین این دو سالانه ده روز فاصله می‌افتد و تبعا همپوشی فصول و ماه‌های طبیعی و مناسبت‌ها در تقویم قمری با تاخیری ده روزه آغاز می‌شود. اما در تقویم ۳۶۵ روزه ملکشاهی، هر یک از شش ماه نیمه اول سال سی و یک روزه و ۵ ماه بعدی سی روزه و ماه اسفند ۲۹ روزه تنظیم شده است، و نوروز همیشه در زمانی مقرر و بدون جابجائی (نخستین روز بهار) آغاز می‌شود. تقویم جلالی در مقایسه با سایر گاه‌شماری‌های خورشیدی، از جمله گاه‌شماری میلادی به‌مراتب دقیق‌تر است چرا که با دقت بر فصل‌های طبیعی/نجومی همپوشانی دارد (۸).

نظر به اینکه هر سال خورشیدی ساعاتی بیشتر از ۳۶۵ روز طول می‌کشد، برای تنظیم ساعت طبیعی با تقویم نجومی به ازای هرچند سال یک روز به طول ماه پایانی (اسفند ماه) افزوده می‌شود که آن نیز سی روزه می‌شود و به این کار کبیسه گیری می‌گویند. در تقویم خیامی پنج روز آخر سال (موسوم به اندرگاهان یا خمسه مسترقه) به اضافه یک روز دیگر به شش ماه اول سال (ماه‌های ۳۱ روزه) افزوده شده، کبیسه‌ها- یعنی روزها و کسرهای روز- بنحوی محاسبه شدند که هرچندسال یکبار در تقویم اعمال می‌شود تا تقویم طبیعی و نجومی از هم فاصله نیابند. خیام جدولی به دست داده است که با یک محاسبه ساده و تطبیق تاریخ رصد نیمروز با سال خورشیدی می‌توان سال‌های کبیسه را تعیین داشت. در اواخر سده نوزدهم ستاره شناسان اروپائی با دستگاه‌های رصد جدید و محاسبات دقیق طول سال خورشیدی را اندازه گیری کرده‌اند که اختلاف اندکی با محاسبات خیامی نشان می‌داد. (۸) اینکه خیام و تیمش با استفاده از ابزارآلات ابتدائی و ناقص آن زمان کار تقویم خویش را اینچنین دقیق تنظیم کرده‌اند واقعا جای شگفتی دارد و اینجاست که می‌توان دید نبوغ بشری حد و مرز نمی‌شناسد! گاه شمار میلادی در هر ۳۲۲۶ سال، در حالی که گاه شمار جلالی هر ۱۱۶۵۲۹ سال یک روز خطا دارد، و در نتیجه تقویم جلالی، در گاه شماری گذشته و آینده، دقیق‌ترین سال‌نمای دنیا به شمار می‌رود. خیام رساله‌ای در بیان زیگ ملکشاهی تحریر کرده است.

## خیامی ریاضیدان

*اشاره‌ای به تاریخچهٔ پیدایش و رشد اندیشه ریاضی (۲۱،۲۰،۸،۷)*

ریشه‌های کهن ریاضی در ایران باستان به سده‌ها پیش از میلاد می‌رسد. ریاضی به خاطر کاربرد لازمش در زندگی روزمره، کاربردی بودنِ دیرین مفاهیم آن بسیار قابل توجه بوده، و پیش از آنکه به عنوان موضوعی علمی مطرح باشد مفاهیم آن در کاربردهای روزمره زندگی انسان استفاده زیادی داشته است. حساب به عنوان «دانش عدد» کهن‌ترین کاربرد ریاضی است و استفاده از شمارش و نیز اندازه گیری از نیازهای بدیهی زندگی انسان‌ها بوده است. جبر نیز دانش حل معادلات است و قدمت استفاده از آن به مصر و بابل و بعد هند می‌رسد. واژه جبر نخستین بار در سده نهم میلادی در نوشته جبر و مقابله خوارزمی مجوسی به کار برده شده، بعدها کَرَجی ریاضیدان دیگر ایرانی در سده یازدهم میلادی و سپس خیام و غیاث الدین کاشانی کارهای جبر و مقابله داشته‌اند که هر یک روش خاص خود را دنبال می‌کرده است. واژه هندسه هم که به مسئله اندازه گیری زمین گره می‌خورد ریشه‌های کهن دارد و مفاهیم هندسی در عیلام و مصر و بابل کهن برای اندازه گیری سطح، و حدود و مرز زمین‌های کشاورزی مورد استفاده بوده‌اند. با این اشارات گذرا می‌خواهیم به سیر پیدایش ریاضیات به عنوان شاخه‌ای از علوم نظری تاکید کنیم که طبق شواهد خاستگاه آن به ترتیب در یونان، ایران (در عهد باستان و بعد به ویژه در دوران اسلامی)، و نهایتا در میان اروپائیان بوده است. و سهم ریاضی‌دانان ایرانی در این قلمرو بسیار چشمگیر است. نشانه‌های آشنائی با ریاضی کاربردی پیش از آنکه علم به حساب بیاید در ابنیه و آثار بازمانده معماری عهد باستان مانند تخت جمشید، تاسیسات آبی، مانند آنچه در شوشتر آشکار است نشانگر ابداع ادوات اندازه گیری و تبحر در استفاده از مقیاس های ریاضی است. آثار با شکوه تمدنی به جای مانده باستان در سایر قلمروها، مثل یونان، عیلام، هند،

چین و مصر نیز موید آشنائی و به کارگیری مقیاس‌های ریاضی و هندسی در میان آن‌ها و یقینا از وجود تبادل دانش و مهارت‌ها بین این تمدن‌های باستانی نشان دارند. پیش‌تر از ایران و یونان باستان، در تمدن‌های عیلام، شوش، بابل و سومر نشانه‌های استفاده از معرفت ریاضی، به خاطر نیازهای اجتماعی و اقتصادی، شناخته و ثبت شده است.

در عالَم ریاضیات به عنوان دانش نظری، هندسه یادگار یونان و دانشمند برجسته آن اقلیدس است. هندسه اقلیدسی تا دو هزار سال بر دنیای هندسه در تاریخ علم چیره بوده است. او در آثارش، مشهور به «اصول» اقلیدس، در معرفی هندسه و بسط آن در میان سایر ملل پیشگام بوده است. خیام در میان دانشمندانی که با نقد یافته‌های اقلیدس در پایه گذاری آنچه به هندسه نااقلیدسی نامیده می‌شود نقش اول را دارد. (در مقاله‌ای دلنشین و حکیمانه، توسط دکتر اسدی که در همین شماره منتشر می‌شود، نقش برجسته عمرخیام و نیز دانشمند فقید پروفسور مریم میرزاخانی و سایر بزرگان متاخر ریاضی در این زمینه روایت شده‌اند). به دنبال خیام، خواجه نصیر طوسی است که اندیشه‌های او را دنبال می‌کند و ساکری[1] ایتالیائی کارهای خیام را بی‌اطلاع از آنها به دنیا عرضه می‌کند. نام آوران بعدی گاوس[2] و نیکلای ایوانویچ لباچوسکی[3] هستند که با دنبال کردن کار خیام و ساکری هندسه نااقلیدسی امروزه را بنا می‌نهند. برای جزئیات این جریان به مقاله یادشده دکتر اسدی در همین شماره نگاه کنید. مسعود خیام می‌گوید هرچند ارشمیدس، نیوتون و گاوس را تاج سر ریاضیات جهان می‌دانند، ولی تاج سر ریاضی نه مثلث بلکه مربعی است که گوشه دیگر آن را خیام پُر می‌کند. (۱۱

اگر یونان در یک نگاه کلی مهد هندسه شناخته می‌شود، شرق باستان شامل ایران و فرهنگ میان رودان (بین النهرین) خاستگاه ریاضیات عددی و جبری است. در لوح‌های منسوب به شوش، از روابط ریاضی امروزی موسوم به *روابط دو مجهولی* و راه حل‌های آنها نشانه‌هائی دیده می‌شود. آنچه بعدها در ریاضیات دوران اسلامی پس از سده دوم هجری می‌بینیم، اغلب حاصل کار ریاضی‌دانان نامور ایرانی است. در این دوران ترجمه آثار یونانی، هندی در کنار آثار موجود تمدن ایران پیش از اسلام در زمینه نجوم و ریاضی به ظهور دانشمندان ریاضی در دوران طلائی اسلام انجامید که محمد ابن موسی خوارزمی، عمرخیام، ابوریحان بیرونی، و [دیرتر] خواجه نصیر طوسی و غیاث الدین جمشید کاشانی، به ترتیب در سده هشتم و نهم قمری نمایندگان پُرآوازه آن هستند. در مورد کارهای ناب عمرخیام در ریاضی باید گفت که اهمیت کار وی در پیشرفت ریاضیات، از سنخ کار وی بموقع و بلاواسطه در غرب ناشناخته بوده، آثار ریاضی وی [به جای آنچه می‌توانست مرجع اصلی دانسته شود] در بیشتر زمینه‌ها اساسا پس از کشف و ابداع دوباره آنها توسط اروپائیان سده نوزدهم مورد توجه قرار گرفت. اصالت کارهای وی موجب شد تا نام وی درکنار نام آوران سده‌های جدید، که اصول و مفاهیم کارهای نظیر عمر خیام را به جهان علم معرفی کردند قرار گیرد. او نخستین ریاضی‌دانی است که ضرایب بسط دو جمله‌ای (موسوم به بسط نیوتون) را تعیین کرده، و نیز ضرایب بسط چندجمله‌ای را به طور منظم مثلثی شکل ترسیم کرده است. پیشنهاد نام نهادن دو تائی با عناوین مثلث خیام–پاسکال، و دوجمله‌ای نیوتن–خیام از همین دیرآشنائی پیشگامی اندیشه و آثار خیام در این زمینه‌های مهم از علم ریاضی ریشه می‌گیرد. در ایامی که علم هندسه به تکفیر علمای ظاهر خراسان هندسه را مدخل زندقه و کفر قلمداد کرده– و درنتیجه این علوم گرفتار رکود شده بود– خیام دوباره بر اهمیت این علوم تاکید کرده، به دفاع از علوم ریاضی و ضرورتِ دانستن آنها می‌پردازد. وی در زمان خود بر تمام میراث ریاضی ایرانی، هندی و یونانی آشنا و مسلط بوده است و بیهقی از او به عنوان «ابن بجدت» در علوم زمان یاد می‌کند که به معنی «ماهر و مسلط» است.

## آثار ریاضی خیام

کتاب جبر و مقابله او *الرساله فی البراهین علی مسائل علم الجبر و المقابله* عمده‌ترین اثر ریاضی خیامی است. این رساله، هفت نسخه خطی شناخته شده دارد. متن اصلی عربی، ترجمه فارسی کتاب همراه با شرح و حواشی بسیار روشنگرانه، به همت زنده یاد دکتر غلامحسین مصاحب تحت عنوان حکیم *عمر خیام بعنوان عالم* جبر منتشر شده است.(۲۱) رساله جبر خیام را از شاهکارهای علمی قرون وسطی دانسته‌اند چرا که برای نخستین بار مبحث معادلات درجه اول و دوم و سوم را تحلیل کرده است. جورج سارتون مورخ شهیر علم درباره این رساله گفته است که:

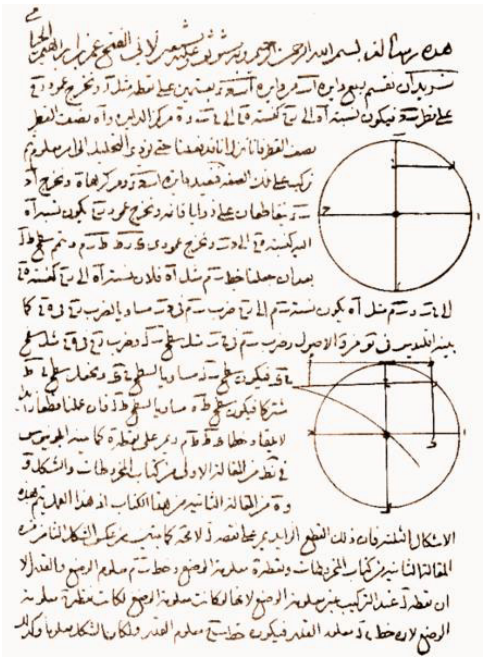
«خیام اول[4] کسی است که به تحقیق منظم علمی در معادلات درجه اول و دوم و سوم پرداخته، طبقه بندی تحسین برانگیزی از این معادلات آورده ... رساله جبر شامل این تحقیقات معرف یک فکر منظم علمی است؛ و این رساله از برجسته‌ترین آثار قرون وسطی و احتمالا از برجسته‌ترین آنها در این علم است».

1. Giovanni Girolamo Saccheri
2. Johann Carl Friedrich Gauss
3. Nikolai Ivanovich Lobachevsky

۴. به تصحیح استاد وحیدی اصل، خوارزمی نخستین بار معادلات مرتبهٔ اول و دوم را در کتاب جبر و مقابله خود تحلیل کرده است.

این صفحه‌ای از نسخه خطی (Smith Oriental MS 45) از رساله جبر و مقابله عمر خیام است. این اثر به خاطر حل حالات مختلف معادله درجه سوم – با یافتن نقاط تقاطع مقاطع مخروطی درست انتخاب شده– شناخته می‌شود. در این صفحه، خیام در مورد حالتی بحث دارد که «یک مکعب، اضلاع و اعداد آن با مربع‌ها برابرند»، و به زبان ریاضی امروزی می‌توان چنین نوشت: $x^3 + cx + d = bx^2$.

ابوجعفر محمد بن موسی خوارزمی در سده سوم هجری، پیشگام دیگر ایرانی در مطالعات جبر، عنوان جبر و مقابله در این مطالعات را ابداع کرده است. جبر به معنی جبران کردن در حل معادلات، یعنی انتقال جمله‌ای از یک طرف معادله به طرف دیگر است. مقابله هم به معنی مقابل هم قرار دادن و حذف جملات همجنس و برابر از دو طرف معادله است. واژه الگوریتم هم لاتینیزه شده نام خوارزمی است که افتخار دیگری برای این ریاضی‌دان ایرانی به شمار می‌رود. خوارزمی به معادلات درجه اول و دوم پرداخته، به کمک قواعد هندسی و به روش توصیفی به حل این معادلات می‌پردازد. خیام در حل معادلات جبری از معادلات درجه دوم فراتر رفته، با طبقه بندی معادلات درجه سه آنها را هم به روش هندسی تحلیل می‌کند. خیام در حل معادلات درجه دو، جواب‌های هندسی و عددی به دست می‌دهد ولی در مورد معادلات درج سه به این نتیجه می رسد که آنها فقط پاسخ هندسی دارند. او در این تحلیل از شیوه تلاقی قطوع مخروطی استفاده می‌کند. خیام از روش هندسی صرف برای حل معادلات، مبتنی بر «پاره‌خطها» که مرسوم ریاضی‌دانان یونانی بود پاسخ‌های «عددی» نیز به دست می‌دهد و درواقع روش جدیدی از تلفیق هندسه و عدد را پایه گذاری می‌کند. همچنین او در کار خویش از سنت‌های ریاضی‌دانان ایرانی پیش از خود و مکتب یونانی فراتر رفته، به تعاریف و اصطلاحات جبری می‌پردازد. خیام اثر دیگری هم به نام *رساله در تحلیل یک مسئله* دارد، که ظاهرا پیش از رساله جبر نوشته، در آن به تحلیل یک مسئله هندسی به معادله درجه سوم به کمک قطوع مخروطی می‌پردازد. او در این دو اثر برای نخستین بار یک گروه بندی کامل و جامع از معادلات را به دست می‌دهد.



«معادله مکعب و تقاطع مقاطع مخروطی»
صفحه اول یک نسخه خطی دو فصلی که در دانشگاه تهران نگهداری می‌شود.

نگاه خیام به نقل از مهدی فرشاد در جلد دوم *تاریخ علم ایران* (۸، ص. ۵۳۴) نگاهی کل گرایانه وی به مسائل است. مصاحب نیز در کنکاش کارهای خیام در اثر ارزنده خویش *خیام به عنوان عالم جبر* (۲۱، ص. ۱۳۵) رایی نظیر با فرشاد دارد: «اینکه وی [خیام] مشعر به اهمیت تعمیم و احتیاج به ریاضیات در آن است ... در آثار خود مکرر، تصریحا یا تلویحا، مسائل جزئی را به تحقیر می‌نگرد

و احکام کلی می‌جوید و در عین حال از آنچه در ریاضیات «بحث در مسئله» خوانده می‌شود غافل نیست». او در نوشته‌های خویش یک گام به پیش دوگام به پس بر گفته‌ها و یافته‌های خود تردید می‌ورزد ولی در نهایت کاری رو به سوی اعلی پیش می‌گیرد. علی رغم پیشگامی خیام در طرح و بنیان گذاری راه‌حل‌های مسائل معادلات گوناگون، کار وی نه توسط دانشمندان ایرانی بعد از وی دنبال شده و نه اینکه اساسا از آن باخبر بوده‌اند. حتی ریاضیدان برجسته‌ای چون غیاث الدین کاشانی که حدود دو سده بعد از خیام می‌زیسته (وفات به سال ۸۳۲ قمری) در کتاب خویش *مفتاح الحساب* در بحث موضوعات دوجمله‌ای و نیز ابداع مثلث پاسکال توسط خیام از وی نامی نبرده است که نشانه عدم اطلاع وی از آثار خیام است. ولی هم او، خواجه نصیر طوسی و دانشمند دیگری به نام ملا محمد باقر یزدی هر سه خیلی پیش‌تر از غربیان در مورد استفاده از مثلث حسابی ابداعاتی داشته‌اند که متاخر بر کار اولیه خیام بوده است. سرانجام این محققین غربی سده‌های هجده و نوزده، از جمله ژان اتین مونتوکلا[1]، جورج سارتون و وپکه[2] هستند که با مقایسه تاریخی پیشرفت علوم ریاضی، پیشگامی خیام را در می‌یابند و نقش اول وی را در حل معادلات جبری مستند می‌سازند. در این میان وپکه با اثری ارزنده، به نام *جبر عمر الخیامی*[3]، در نشر جبر خیام در تاریخ ریاضیات نقش عمده‌ای در شناساندن خیام به جامعه علمی جهانی ایفا کرد. کتاب شادروان (۲۱) مصاحب نیز به نحوه نگرش و نگارش به اثر وپکه مشابهت زیادی دارد. کتاب *جبر خیام* به زبان‌های متعددی از جمله روسی نیز ترجمه شده است.

اثر ماندنی دیگر خیام در ریاضی *شرح ما اشکل من مصادرات کتاب اقلیدس* (به فارسی: *توضیح مشکل‌سازترین موارد از مصادرات [مبادی و گزاره‌های] کتاب اقلیدس* است.) خیام در این اثر به توضیح و نقد آرای عالمان پیش از خود از گزاره‌های کتاب اصول هندسه اقلیدس می‌پردازد و برای مشکلاتی که در براهین اقلیدس راه حل‌هائی ارائه می‌کند. این اثر یک مقدمه و سه بخش جداگانه دارد. خیام در بخش اول به اصل موضوع معروف اقلیدس در مورد خطوط موازی، در دومی به مفاهیم نسبت و تناسب از نظر اقلیدس و نظرات اصلاحی خویش و در بخش سوم به ترکیب نسبت‌ها می‌پردازد. اساس ایرادات خیام بر اقلیدس آن است که می‌گوید اقلیدس در بیان *اصول اقلیدسی (اصول نیاز به اثبات ندارند و از برهان های هندسه به شمار می آیند)* مسامحه به خرج داده برخی از مسائل هندسی – مثل قضیه توازی خطوط– را که نیاز به اثبات دارند از زمره اصول آورده است و در عوض مبادیی را که می‌توانسته جزء اصول بیاورد از آنها غفلت کرده است. از مواردی که خیام افزودن آنها را به عنوان اصول لازم می‌شمارد به دو مورد اشاره می‌شود. یکی اینکه هر کمیتی را می‌توان تا بینهایت تقسیم‌پذیر دانست و هیچ کمیتی جزء تقسیم ناپذیر و لایتجزی ندارد؛ دوم تعریف نامتناهی هندسی مانند اینکه چطور می‌توان یک خط را تا بینهایت امتداد داد. خیام همچنین از ابن هیثم، از منتقدان اقلیدس، با این انتقاد که از حیطه‌ای بیرون از خود علم هندسه (مانند امتزاج موضوع ریاضی با فلسفه طبیعی مثل وارد کردن مفهوم حرکت در هندسه) به اصول اقلیدس می‌پردازد ایراداتی گرفته است. استاد جلال الدین همائی در اثر *خیامی نامه* خود (۱) با تفصیلی مقبول به نقد نظرات خیام در مورد اصول هندسه اقلیدسی پرداخته است. تحلیل کارهای ریاضی خیام در اثر با ارزش جعفر آقایانی چاوشی (۷) نیز بسیار مفید است.

از نوشته‌های دیگر ریاضی منسوب به خیام رساله‌ای در صحت طرق هندسی برای استخراج جذر و کعب و رساله *مسائل الحساب*اند که از دومی چیزی در دست نیست جز آنکه در منابع دیگر بدان ارجاع شده است.

## خیام فیلسوف

«... خیام را باید یک مکتب فکری در نظر گرفت که آشتی ناپذیری ایمان و عقل را اعلام می‌کند ولی همزمان هر دو را حرمت می‌گذارد و زیر سوال می‌برد. این چهره یگانه صادقانه می‌کوشد صریحا بگوید که اینها دو قطب سازش ناپذیر وجود انسانی و حاکی از نزاع همیشگی بین قلب و ذهن است. مسئله برای او این نبود که چگونه می‌توان این دو گفتمان را آشتی داد، بلکه چگونه انسان می‌تواند در حالی که نه تسلیم پاسخ‌های آسان پیش ساخته شود و نه به ورطهٔ پوچ گرائی و الحاد بیفتد در میان این تنش [میان عقل و ایمان] زندگی کند.» (۴)

در مورد آرای فلسفی خیام، هم به چند رسالهٔ وی در این موضوع و هم به مضامین ژرف رباعیات وی توجه شده است. شهرت اولیه وی در طول حیاتش، برخلاف دوران معاصر، بیشتر مدیون دانش وی در ریاضیات، نجوم و فلسفه است تا رباعیات. خیام در رباعیاتش از مفاهیم مورد چالشِ همواره ذهن ابنای بشر، مانند مرگ و زندگی، چیستی دنیای هستی، غم و شادی، بیم و امید، گذران عمر فانی روایت کرده که در کنار بدیهیات زندگی روزمره هر انسان، خود نوعا از زمره مسائل فلسفی هم به شمار می‌آیند؛ بیشتر اوقات هم این مضامین را به شکل پرسش مطرح می‌کند تا به نفی و نقد. با توجه به شخصیت ویژه خیام شاید به شکلی هم قصدش بیان تفکرات و مضامین فلسفی‌اش در زمانه‌ای بوده است که پرداختن آشکار بدانها موجب آزار و تکفیر صاحب اندیشه می‌شده است. قابل توجه اینکه در رباعیاتی که بنا بر پژوهش‌های متعدد قطعا می‌توان به وی نسبت داد بارِ این مفاهیم وجه ممتازی دارد و بارِ مضامین دیگر مانند خوش باشی و عیش و نوش و ... در این رباعیات اصیل کم است. آنهائی که فقط بر پایه رباعیات خیام به استنباط‌های فلسفی

1. Jean Etienne Montucla (1724-99)
2. Franz Wöpcke (1826-64)
3. L'Algebre d'Omar Alkhayyami

از آنها پرداخته‌اند، بیشتر برپایه برداشت‌ها و اندیشه برآمده از ذهن خویش را به عنوان فلسفه او جای زده‌اند، چرا که بخشی از تفاسیر و تفاصیل این اندیشه‌ها چندان هم با یکدیگر مطابقت ندارند و برخی هم از شخصیت ژرف و اندیشمندانه خیام بسیار دور است.

قدر مُسّلم، خیام در فلسفه بسیار تحت تاثیر ابن سیناست که وی را معلم معنوی خود می‌خواند و *خطبه توحیدیه* ابن سینا را هم ترجمه کرده است. بیهقی روایت می‌کند که خیام در پاسخ به انتقادات ابوالبرکات بغدادی، از منتقدین سرسخت ابن سینا، گفته که او حتی از درک اندیشه ابن سینا ناتوان است چطور می‌تواند وی را نقد کند؟ باز هم بیهقی او را «چیرهٔ حکمت و ریاضیات و معقولات» دانسته، و زمخشری وی را «حکیم جهان و فیلسوف گیتی» نامیده است. ابونصربن النسوی قاضی نواحی فارس در یک نوشته خیام را «حکیم و دانشمندی می‌خواند که ابرهای فضیلت بزرگواری از او بی‌دریغ ریزش می‌کنند و به استخوان‌های پوسیده آب حیات می‌بخشند». بنابراین در شهرت و مقبولیت والای خیام به عنوان فیلسوف و حکیم در میان اندیشمندان هم عصرش تردیدی نیست. اینکه علی رغم تسلط بر فلسفه برخلاف استادش آثار مبسوطی از خود به یادگار نگذاشته، شاید آن را کاری تکراری می‌دانسته است و یا طبق خلق و خوی خویش که اهل موعظه و اندرزگوئی نیست عمل کرده است. براستی هم خوب بنگریم مبادی فلسفی در شناخت جهان و کاربردهای آنها در زندگی از سوی فیلسوفان بس گفته شده، ابنای بشر هم از توجه و به کاربستن آنها برای زندگی و اندیشهٔ درست غفلت دارند؛ پس تکرارشان بدون آنکه چیزی تازه عرضه کنند به چه کار یک فیلسوف واقعی می‌آید؟ در نتیجه خیام جز از رسائل کوتاهی که در پاسخ به درخواست دیگران و یا در تحلیل یک مسئله خاص نوشته است آثار فلسفی مفصلی ندارد که به قصد آموزش یا تربیت شاگردان نوشته باشد. اینکه توسط برخی از هم عصرانش بدخو و تنگ حوصله شمرده شده، کم نویسی او را به بُخل در تصنیف و تالیف نسبت داده‌اند نشانه بی‌توجهی آنها به تاملات و خلق و خوی خیام است – گرچه تلویحا تائیدی بر توانائی بالقوه بالای علمی او هم هست. آثار فلسفی خیام هرچند کوتاه‌اند ولی بسیار پرنکته و پیچیده‌اند. در برخی انگار فقط با قواعد تندنویسی تحریر شده‌اند و نکات با ایجاز بسیار گفته شده که جز اهل جدی فلسفه و منطق نمی‌توانند آنها را به آسانی دریابند.

خیام در کنار توانائی علمی متمایز، با مقرری قابل توجه نزد سلاطین وقت منزلت شایسته‌ای دارد لیکن فریفته و اسیر هیچ یک از آنها نیست و برخلاف بسیاری از شعرا و اندیشمندان در کارهایش از مدح و ثنای صاحبان قدرت اثری دیده نمی‌شود. این از جهان بینی اوست که غُربتِ اندیشه ورزی نزد صاحبان قدرت و مکنت را بخوبی می‌شناسد و فراتر اینکه از علم و منزلت هم برج عاج نمی‌سازد و به دنیای مردم و تالمات آنها بی‌اعتنا نیست؛ وی علاوه از نوشته‌های فلسفی در قالب رباعیاتش به اوضاع رایج زمانه هم طعنه می‌زند و همواره در اندیشه و پرسش از چرائی و اصلاح آنهاست. به تعبیر برخی در رباعیات وی عصیان و اعتراض به اوضاع زمانه موج می‌زند. او برای بیان احساسات و عواطف خویش قالب رباعی را بر می‌گزیند که در عین کوتاه بودن، ساده، موجز و بی‌تکلف، تمنیات ذهن و دل را به اشتراک می‌گذارد.

در زیر به خلاصه‌ای از چند اثر فلسفی خیام اکتفا می‌شود تا با نکاتی از اصول فلسفه وی آشنا شویم (در منبع ۴ برخی رسائل خیام بخوبی خلاصه شده‌اند).

*فی الکون و التکلیف* (*به فارسی درباب وجود و تکلیف*)

این رساله همان طور که از نامش برمی‌آید درباب حکمت آفریدگار در آفرینش هستی و حکمت تعیین تکلیف است که در پاسخ به پرسشی از ابوالنصر عبدالرحیم نسوی، یکی از شاگردان ابن سینا و قاضی عالی‌رتبه فارس، تحریر شده است. او می‌پرسد «حکمت خدا در آفرینش عالم و تکلیف نهادن بر آدمیان چه بوده که خود بی‌نیاز از آفرینش و عبادت خلق بوده است؟» خیام که اساسا پیرو نگرش مشائی است اساس حکمت را پاسخ سه پرسش می‌داند: اینکه آیا «هست؟»... و «چیست؟»... و اینکه «چرا»؟ سوال اول از اصلِ وجود است و نیاز به نفی و اثبات دارد؛ در دومی که سوال چیستی است به نفی و اثبات نیازی نیست باید به تعیین ماهیت و تعریف آن پرداخت؛ و در سومی پرسش از علل غائی است و باید به سبب و علت وجودی پرداخت.

خیام در این رساله‌ی کوتاه ابتدا نگرش خود را در مورد کل هستی و زندگی به تصویر می‌کشد. در بخشی از رساله که به تشریح کَون و تکوین عالَم می‌پردازد حقیقت ذاتی فلسفه را سه چیز می‌داند: نخست خودِ هستی [اِنَّیت] و ثبوت آن (هل هو)؛ دوم وگر هست چیستی و حقیقت آن (ماهُوَ)؛ و سوم چرائی (لِمَ) و علت وجودی هرآنچه که هست. در مورد مناسبات هستی و چرائی آن او کفایت کتاب *البرهان* ابن سینا را یادآور می‌شود ولی در مورد رابطه هستی و چیستی آن، نکته ظریفی را پیش می‌کشد که غفلت از آن را مایه حیرت و تباهی اندیشه اهل منطق می‌شمارد. او متذکر می‌شود که در بحث از «هستی حقیقی» وجود هستی مقدم بر تحقیق دربارهٔ هست و نیستِ آن است ولی در بحث از «شرح هستی» شرح آن مقدم بر هستی قرار می‌گیرد چرا که بدون شرح شارح، نفی و اثبات هستی قابل درک نخواهد بود. درباره «چرائی هستی» آن را متاخر بر دو جزء دیگر می‌داند چرا که جز پیش از اثبات هستی و شرح ماهیت آن، نمی‌توان به علت و علل وجودی هستی پرداخت. خیام می‌گوید در بحثِ علل وجودی، شرح امورعرَضی (آنچه قائم به ذات نیست) پیش می‌آید و اینکه چرا اینها عارض می‌شوند. خیام در این بخش با تفکیک آنچه واجب الوجود، خدای یگانهٔ زنده و پوینده‌ای که هستی هر موجودی از او و حکمت وجود اوست (ذات و صفاتش محلِ چرا ندارد)، و چیزهائی که ممکن الوجود

می‌خواند بحث علّیت در مورد اول را که وجودی قائم به ذات و علّت العلل است محال می‌شمارد؛ ولی بحث در علت وجود جُز آن را غیرمحال می‌داند چرا که هر موجودی از این دست، بدون دریافتِ علت، معدوم به حساب می‌آید و اینکه دورِ جستجوی علل و اسباب سرانجام به دلیلی می‌رسد که سببی برای آن نیست.

سپس او به بحثِ تفاوت موجودات از نظر شرافت می‌پردازد که آن را از مشکل‌ترین مسائل و مایع تَحَیُّر هر خردمندی می‌داند. او آرای ابن سینا و خود را به کمال نزدیک می‌داند هرچند فروتنانه به دوجنبهٔ مقابل یکدیگر اشارتی دارد: اینکه احتمالا گفته‌هایش ظاهر فریبنده ولی بنیادی سست دارد و یا اینکه نگرشی نافذ است که باید آن را پذیرفته دانست. او می‌گوید خداوند موجودات را نه باهم، بلکه طی سلسله مراتبی آفریده است. او ابداع نخست را عقل محض می‌داند که اشرفِ موجودات به جهت نزدیکی به مبداء اول است. سپس آفریدگار در قوسی نزولی موجودات دیگر، از شریف‌ترین که حق است تا ناچیزترین آنها، کائنات فاسده، را ابداع کرد. سپس در قوسی صعودی با مرتبتی معین به ابداع موجوداتی شریف و شریف‌تر از مرحله پیشین پرداخت تا به انسان– اشرف و آخرین آنها در تکوین عالم کَون و فساد– رسید. پس نزدیک‌ترین مُبدعات به مبداء اول شریف‌ترین (عقل محض) و دورترین‌شان از آن طینت [سرشت] اولیه، اشرف آنان (انسان) است. همچنین به جهت ضرورتِ عدمِ اجتماع وجوه متضاد، بلکه متقابلات در شیئی واحد، و در زمان و جهتی واحد، خداوند تکوین اینها را در زمانی خاص مُقَدر فرمود. بعد در پاسخ به این پرسش که چرا خداوند چیزهای متضاد و مانعه الجمع را آفریده تاکید می‌کند حذر از ایجاد خیرِ بسیار به ملاحظه صدور شرّ اندک، خود شرّ بسیار دارد که جود و حکمت خدا به تمامی موجودات کمالی ذاتی بخشیده است بی آنکه بخواهد از حظّ حتی یکی از آنها بکاهد، جز آنکه موجودات به جهت نزدیکی و دوری شرافت متفاوت‌اند؛ این نه به جهت بُخل در آفرینش بلکه اقتضای حکمت سرمدی است[1].

در بخش بعدی رساله خیام صدور امر تکلیف از جانب خدا را برای رسیدن به کمالات انسانی، و دوری از ظلم و جور و ارتکاب زشتی‌هایی می‌داند که به انگیزه طمع جسمانی انجام می‌گیرند. وی جانمایه امور تکلیفی را با دیدگاهی اجتماعی می‌بیند که مبتنی بر لزوم یاری متقابل انسان‌ها و کمک و تعاون با یکدیگر برای رسیدن به کمالات است. او انجام فعالیت‌های متنوع انسانی را از عهده فردی خارج می‌بیند و همکاری اجتماعی را برای برآورده شدن ضروریات زندگی ناگزیر می‌داند. او برآورده شدن سنت و قانونِ عادلانه را بر ذمّ کسانی می‌داند که قوه عقل بیشتری داشته، نفس پاکیزه دارند و در امور دنیوی، جز قدر ضرورت و نیاز طلب نمی‌کنند و به دور از سلطه و تبعیض بر جاری ساختن عدالت اجتماعی اهتمام می‌ورزند و مرتبت آنها از آنجاست که سایه لطف و فیض الهی بر سر دارند. او در مورد عامه مردم، اینکه در پی خیر یا شر باشند یا تفاوت‌شان در فضائل و رزائل، نفس و مزاج آنها را در انتخاب راه و روش زندگی دخیل می‌داند. خیام تاکید می‌کند مردم در حقی که از آنِ خود می‌دانند زیاده خواهند و حق دیگران را به جا نمی‌آورند، خود را از بسیاری دیگر برتر می‌شمارند و اینکه شارع باید چنان از یاری و تائید حق برخوردار باشد که در اجرای حکم شریعت در میان مردم دچار عجز و ناتوانی نشود و از راه‌های گوناگون، مانند وعظ و برهان آوردن، نزدیک کردن قلوب، هشدار دادن از عقوبت و نهایتا تنبیه، همه را به راه درست شریعت رهنمون سازد. خیام در انتهای این رساله بر اطاعت از دین سه فایده می‌شمارد که عبارت‌اند از: افزایش نیروی تفکر منطقی و ریاضت نفس برای در نیفتادن در دام شهوات؛ عادت به تامل در امور الهی و مراقبت بر عبادات و دور ماندن از غرور، یقین یابی به موضوعات دینی و بهبود عدالت و تعاون اجتماعی در سایه تذکار برای برقراری نظام عالم آن طور که پروردگار اقتضا دارد.

*الجواب عن ثلاث مسائل؛ ضروره التضاد فی العالم و الجبر و البقا* (*به فارسی: پاسخ به سه مسئله: ضرورت تضاد در جهان، جبر و بقا*)

خیام در ابتدای رساله از اینکه پرسش کننده از او درباب تضاد می‌پُرسد که با شُبهۀ بزرگی روبروست سپاسگزاری می‌کند، چراکه آن را موجب مباهات و عظمت شان خود می‌داند. او تضاد را از امور ممکن الوجودها می‌داند و ذات واجب الوجود را بری از تضاد می‌داند چرا که آن را به چندگانگی دچار می‌کند که منافی واجب الوجودی و یکتائی خداوند است.

خیام در این اثر فلسفی به سه پرسش فلسفی– کلامی پرداخته، و بر سه نوع جبرگرایی تاکید می‌کند. در بُعدِ جهانی یا کیهانی، تولد ما جبری است که در آن هیچ گزینشی نداشته‌ایم. در بُعدِ هستی‌شناسی، ذات ما و جایگاه ما در سلسله مراتب کلی موجودات نیز جبر از پیش تعیین شده است. ولی دسته سوم، جبر اجتماعی– اقتصادی، ساخته دست بشر و درنتیجه تغییر آنها نیز به دست وی ممکن دانسته می‌شود. شاید این نگرش در همان چارچوب باور بنیادی خیام قرار می‌گیرد که او ذات باری را خیر کامل دانسته، وی

---

۱. شگفت است که این دیدگاه عمرخیام در امر تکوین عالم (زنده و غیرزنده) در چند سطر در کل ادبیاتی را به کار گرفته که یادآور و مقدمه تمام مباحث مدرن در زیست شناسی تکامل است. جز اینکه مبدع اول را عقل می داند (که موضوع فلسفه است) در عبارات بعدی از آفرینش ساده (کائنات فاسده) به پیچیده، تا تکامل انسان به عنوان اشرفِ موجودات زنده، در شرح توالی تکوین مفاهیم بسیار مرتبطی را به کار می‌گیرد که امروزه در بحث تکامل– آفرینش تدریجی و سلسله مراتبی– موجودات رایج است. بحث را بشکلی موجز و عقلانی جوری به پایان می‌برد که گوئی می‌خواهد عامیانه‌ترین پرسش‌ها را در تکامل، اینکه مثلا خدا چرا سوسک و پشه آفریده، را همزمان با راز حکمت سرمدی در آفرینش بازگو کند. اینکه تمام موجودات زنده کمال ذاتی دارند نکته بسیار ظریفی در تکامل است و اینکه تصور کنیم تکوین آنها بی‌پایه یا از نظر «حظّ» حق کمتری برای حیات دارند دریافت بسی مهم در تکامل دنیای زنده است؛ امروزه کاملا پیداست که تمام موجودات در یک وابستگی متقابل و پایدار تکوین یافته‌اند و تداوم و وابستگی شبکه پیچیده حیات با نگاهِ رایجِ خودخواهانه و غیرسازندۀ انسان مدار به طبیعت، یعنی توجیه توسعه اجتماعی و اقتصادی صرف برای جوامع انسانی سازگار نیست.

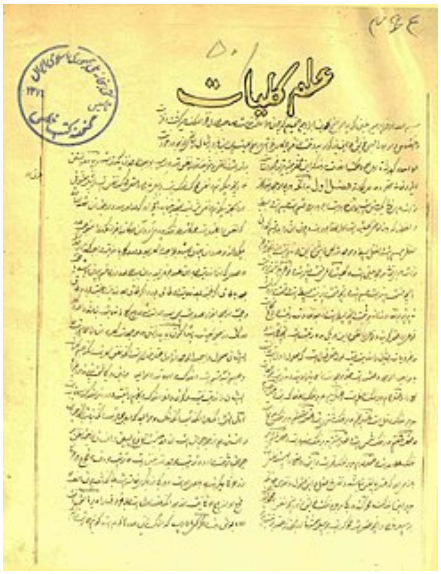
را از انتساب آفرینش شر بری می‌داند. در مورد خیر و شر، آفرینش را شامل خیر بسیار و محض می‌بیند و شر و شرور را امور عرضی و اندک شمرده، و بخل ورزیدن از ارائهٔ خیر بسیار به واسطه شرّ اندک را خود مستلزم شرّ بسیار می‌خواند. در مورد جبر یا قدر هم جبر را به حقیقت نزدیک‌تر می‌بیند ولی شخص را از در افتادن در بحث‌های موهوم جبریون برحذر می‌دارد. در مورد بقا نیز آن را محدود و مشروط به مدت می‌داند. او استدلال می‌کند اگر وجود امری خارجی و ثانویه است بقا نیز چنین است. او در اصل، وجود و بقا را یک معنی می‌داند و بقا جز استمرار وجود –و اتصاف موجود به وجود با در نظر گرفتن مدت– نیست.

*فی الوجود (فی تحقیق الصفات هم نامیده شده است)*

این اثر در باب اثبات اصالت وجود نوشته شده، مباحث آن پیچیده و نوعا بسط مباحث آمده در شرح دو رساله پیشین‌اند. در این رساله خیام به عالم وجود و عدم، ماهیت آنها و توصیف انواع صفات وجود و موجودات می‌پردازد که در قالب پرسش و پاسخ، در کنار نقد باورهای رایج دانشمندان و فیلسوفان زمان، دیدگاه‌های خود را در مسائل متعدد فلسفه و منطق معرفی می‌کند.

*رساله کلیات فی الوجود (به فارسی در باب [علم] وجود)*

این اثر به درخواست پسر نظام الملک (موید الملک) تحریر شده، خیام در مقدمه آن می‌فرماید که اهل حکمت می‌توانند گواهی دهند همین مختصر مفیدتر از چندین مجلد است، گرایشی که سیاق خیام در تمام نوشته‌های خود، یعنی مختصر و مفید نوشتن است. او در این اثر درباره مفاهیم جوهر و کلیات بحث کرده، به مسائل گوناگونی شامل رابطه میان هستی و فساد، توالی پایان ناپذیر ممکن الوجودها و تفاوت میان اینها و واجب الوجود می‌پردازد. در آخر این رساله‌ای طالبان شناخت خداوند سبحانه و تعالی را به چهار گروه تقسیم می‌کند: اوّل متکلّمان. دوّم فلاسفه، سوّم اسمعیلیان و چهارم اهل تصوّف. دربارهٔ اسمعیلیان می‌گوید که «ایشان گفتند که طریق معرفت صانع و ذات و صفات وی را اشکالات بسیار است و ادلّه متعارض و عقول در آن متحیر و عاجز؛ پس، اولی‌تر آن باشد که از قول صادق طلبند» و بعداً هم صوفیّه را بر آن سه گروه ترجیح داده و صریحا گفته است که طریق صوفیه از همه اولی‌تر است که در طریقت آنان کمالی بالاتر از خداوند و حضرتش را هم حجابی نیست. *رساله کلیات* آخرین اثر فلسفی خیام است که شاید نماینده بهتری از افکار فلسفی وی به شمار می‌رود. خیام در آن، بحث فلسفی را راه جستجوی علمی می‌داند و در عین حال به علم شهودی می‌پردازد که ورای دائرهٔ عقل است. تمایلات عرفانی خیام در این اثر آشکارتر و به برداشت‌های عارفانه اوج پختگی ابن سینا نزدیک می‌شود. آرای خیام به مشاعیون، تعالیم بودا و فیلسوف یونانی اپیکور مانند دانسته شده است. اینکه بودن یعنی تحمل رنج و بیچارگی و رنج حاصلِ آزمندی و احساس تعلق، چاره ناپذیری رنج و اینکه راه تفوق بر رنج‌ها خاموش کردن امیال است به تعالیم بودا نزدیک است. دعوت به خوش باشی و بدبینی او با تعالیم اپیکور اشتراک دارد، چرا که پیروان مکتب اپیکوری در اکنون زیستن و قدر شرایط و محدودیت‌ها را دانستن شرط آسایش می‌دانند.




برگی از یک نسخه خطی از کتاب کلیات خیام

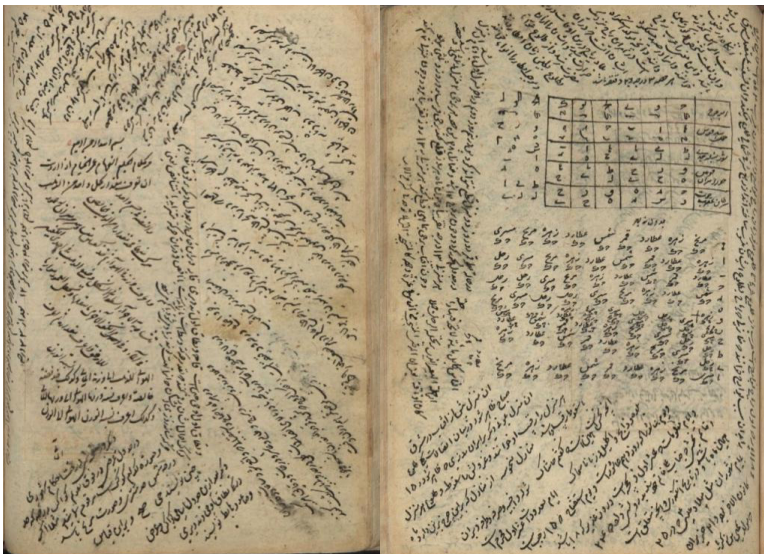
سایر آثار فلسفی خیام عبارت‌اند از: *رساله الضیاء العقلی فی موضوع العلم الکلی*؛ *رساله میزان الحکمه*؛ *قسطاس المستقیم*؛ *رساله روضةالقلوب در کلیات وجود*؛ *ترجمه خطبه توحیدیه ابن سینا*؛ *رساله مشکلات ایجاب*؛ *رساله‌ای در طبیعیات*؛ *رساله لوازم الاکمنه*؛ *عیون الحکمه*؛ *رساله معراجیه*؛ *رساله در تحقیق معنی وجود*.

## آثار دیگر خیام

*رساله فی الاحتیال لمعرفه مقداری الذَّهب و الفضه فی جسم مرکَب منها*

این اثر که نسخه منحصر بفردی از آن در کتابخانه گوتا در آلمان موجود است، به زبان امروزی به مقوله‌ای از فیزیک مربوط می‌شود که در آن روشی برای تعیین عیار طلا و نقره و ترکیب آلیاژی آنها آمده است. خیام با ترازوی آبی ساخته خود، بنوعی به دنبال کار ارشمیدس روشی استلالی و تحلیلی به کار می‌گیرد که به نظریه مدرن شباهت دارد. خیام در این اثر به تعریف جرم و پیچیدگی‌های آن می‌پردازد. حکیم عبدالرحمن خاذنی با شهرت عالی در علوم ریاضی، فیزیک و نجوم که با عمر خیام در اصلاح تقویم جلالی همکاری داشته، در کتاب *میزان الحکمه* ضمن توصیف ترازوی اختراعی خود جهت تعیین وزن مخصوص اجسام از ترازوی ارشمیدس، رازی و بیرونی و خیام سخن رانده و ترازوی خیام را با نام قسطاس المستقیم با جزئیات و عکس و نحوه کار معرفی کرده

است. خیام در این رساله توضیح می‌دهد برای تعیین عیار این فلزات باید وزن آنها را در آب و هوا به دست آورد. با دانستن وزن [مخصوص] هریک از اجزا می‌توان به خالص بودن آنها در یک جسم و یا به نسبت وجود آنها در یک شمش دست یابید (۷و۱۵)).



برگ‌هائی از نسخه‌ای خطی از رساله *فی معرفة مقدار الذهب و الفضه فی الجسم المرکب منه* که دربارهٔ تعیین مقدار طلا و نقره از جسم مرکب از آن دو (آلیاژ آنها) است؛ کتابخانه و موزه ملک در مشهد، به شمارهٔ اموال ۶۸۸٫۵، کتابت سال ۹۳۰ هجری به خط شکسته نستعلیق.

*القول علی اجناس الذی بالا ربعه*

رساله‌ای کوتاه و پنج صفحه‌ای از کتابی، با عنوان *شرح المشکل من کتاب موسیقی*، در باب موسیقی که از خود آن کتاب اثری نیست. در این رساله که بسیار فنی در مورد نظریه موسیقی است خیام از رابطه میان نُت‌ها، مینور، ماژور و ذوالاربع گفتگو کرده، با اشاره به آرای فارابی و ابن سینا طبقه بندی دیگری برای موسیقی معرفی می‌کند.

*نوروز نامه*

از میان آثار خیام، در اینکه *نوروزنامه* نوشته خیام باشد ارزیابی‌ها بسیار متفاوت‌اند. برخی آن را تماما به عنوان اثر خیام رد می‌کنند. پاره‌ای در مورد آن شک روا نمی‌دارند و با توجه به اینکه در یک اثر خطی بازمانده قدیمی نام او آمده است شاهدی کافی بر تعلق آن به خیام می‌دانند. برخی از محققین بخشی از آن را که وزین‌تر است از خیام و باقی آن را از او نمی‌دانند. یکی از کسانی که *نوروزنامه*، و اصولا شعر و رباعیات سرائی را نه از عمرخیام بلکه از خیامی دیگر می‌داند، استاد محیط طباطبائی است که می‌گوید برای خیام همین بس که کار نجوم و ریاضی دارد! لیکن دیدگاه وی بسیار افراطی است و در مصاحبه‌ای از وی که در کتاب مسعود خیام (۱۱) نیز که به طور کامل منتشر شده صریحا نقل قولی از حسین خدیو جم را –که استاد محیط طباطبائی گفته بنای مخالفت وی با انتساب *نوروزنامه* به عمرخیام جدالش با مینوی (از مدافعان جدی انتساب *نوروزنامه* به عمرخیام) و کوبیدن وی است– تائید می‌کند. لغزش اخلاقی در پژوهش این استاد مایه تاسف است که پایه کارش را نه بر اساس فکت‌ها بلکه به اعتراف خودش به قصد «دراز کردن» پژوهشگری دیگر بنا می‌نهد. نهایت اینکه رضوی در اثر جامع خویش *صهبای خرد* (۴)، بخشی از آن را با عنوان «رساله در کشف حقیقت نوروز» به خیام منتسب می‌کند و در مورد بخش‌های دیگر این اثر، به لحاظ سبک و محتوی و نیز اشتباهات در ضبط ریشه لغوی ماه‌های سال ایرانی، بر آن است که این بخش‌ها نمی‌توانند از قلم خیام باشد که دانشمندی بس دقیق است. کتاب با استفاده از اساطیر به وصف نوروز، و تحلیل ریشه شناسی نام دوازده ماه سال ایرانیان، برگرفته از زبان پهلوی، می‌پردازد.

## خیام رباعی سرا

«خیام ستاره‌ای است معادل خورشید که خود را در فضا پرتاب کرده است ...»

نقل قول بالا از لُرد آلفرد تنسیسون[1] خطاب به فیتز جرالد است که از وی به خاطر ترجمه رباعیات و شناساندن خیام به جهانیان تشکر می‌کند. با آنکه خیام در میان هم عصران و دوران حیاتش شهره شعر و شاعری نیست، اوج آوازه وی در ایران و جهان معاصر، به انتشار رباعیات او گره می‌خورد. براستی که خیام وجه دیگر شخصیت والای خویش، جستجوی معنا و حقیقت، را نیز در مضمون و آوای رباعیاتش زنده نگاه می‌دارد. انگار همان طور

1. Lord Alfred Tennyson

که بتهوون در یادآوری شکوه موسیقی می‌گوید آنجا که سخن از بیان فرو می‌ماند موسیقی به صدا در می‌آید، خیام نیز در تالم و درد خود از نابسامانی دنیای عصر خویش و آنچه ناتوان از حل آنهاست به سُرایش رباعی می‌پردازد. آیا راوی سطور زیر، در بخش آغازین *رساله فی البراهین علی مسائل الجبر و المقابله* می‌توانسته جُز با سرودن رباعیات پُرنکته و فیلسوفانه، تالمات خویش را از وضع زمانه و بی‌اعتنائی عمومی به احوال و تیرگی رایج روزگار فریاد کشد؟

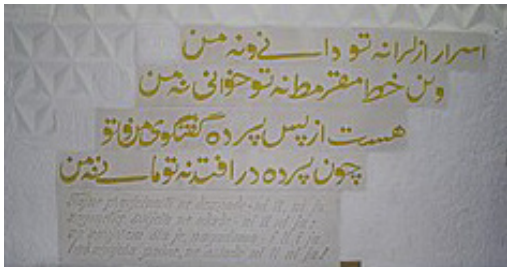
« ... به راستی ما به مصیبت نابودی تدریجی دانشمندان گرفتاریم. از آنان باقی نمانده غیر از دستهٔ قلیلی محنت‌زده که پیوسته در اندیشه آنند که غفلت‌های زمان را فرصت جُسته به تحقیق در علم و استوار کردن آن بپردازند. و بیشترِ عالِم نمایان روزگار ما، حق را با جامه باطل می‌پوشانند و گامی از حیلت‌بازی و خودنمائی و تظاهر به دانائی فراتر نمی‌روند. و آنچه را هم می‌دانند جز در راه مقاصد پست جسمانی و نفسانی استفاده نمی‌کنند! و هر که را بخواهد گِردِ حقیقت درآید و راستی را وجهه همت قرار دهد و در ترک دروغ و خودنمائی و مکر و حیلت جدّ کند، احمقش می‌خوانند و او را به تمسخر می‌گیرند... در همه حال از خدا یاری می‌جوییم و به او پناه می‌بریم».

خیام از شعر و رباعی دکانی برای شهرت نساخته و کشف رباعیات وی نیز بتدریج به عمل آمده و به نظر می‌رسد خیام آنها را از روی دل درکنار کارهای علمی و فلسفی‌اش سروده، چون منتشر نشده‌اند در زمان حیاتش همه از آنها با خبر نبوده‌اند. ظاهرا بسیاری دیگر نیز، به تاسی از مضامین رباعیات اصیل منسوب به خیام، آرا و تمنیات خود را یا از روی ترس از اغیار و حفظ موقعیت خود یا ارادت به صاحب رباعیات اصلی در شکل رباعی به نام خیام برچسب زده‌اند تا آنجا که شمار رباعیات منسوب به خیام به ۲۰۰۰ رباعی هم رسیده است. اما خیام کم گو و گزیده گو در آثار، برای بیان احساسات و تالمات خویش که سبک کوتاه رباعی را برگزیده، هر نکته از مقاصد خویش را به موجزترین شکل بیان می‌دارد و شمار رباعیات اصیل منسوب به وی برپایه پژوهش‌های متعدد (از ایرانیان شامل فروغی، صادق هدایت، سید علی میرافضلی و نیز پژوهشگران غیر ایرانی شامل ژوکوفسکی روسی) نیز زیاد نبوده، به ۲۰۰ رباعی هم نمی‌رسد.

در پژوهش رباعیات اصیل عمرخیام معیارهای چندی توسط پژوهشگران به کار گرفته شده است که بخوبی در کتاب *رباعیات خیام* میرافضلی خلاصه شده‌اند (۱۰). به اجمال این معیارها عبارت‌اند از: الف) بررسی منابع کهن (متون نثر و نظم منتشره بین ۶۰۰ قمری- چند دهه پس از درگذشت خیام- تا اوایل سده نهم قمری، و باب پژوهش در این زمینه برای یافتن منابع تاریخی همچنان باز است؛ ب) معیار تکرار و تواتر رباعیات در متون؛ ج) بررسی رباعیات کلیدی در متون کهن و معیار قرار دادن آنها برای انتخاب رباعیات دیگر از میان رباعیات منسوب به خیام- که بخش دوم کار یعنی انتخاب رباعیات به نقل از میرافضلی به ذوق و اجتهاد پژوهشگر بستگی دارد و در نتیجه پالایش رباعیات می‌تواند تفاوت‌هائی را نشان دهد؛ د) سبک قافیه بندی رباعیات که در عصر خیام چهار مصراعی بوده است از جمله اینکه مصرع چهارم حامل بار معنایی نتیجه گیرانه را القا می‌کند؛ د) اسلوب بیان رباعی که در رباعیات خیام جنبه کمابیش منطقی و استدلالی دارد و مصرع‌ها یکدیگر را بخوبی تکمیل می‌کنند و نیز دوری از صنایع لفظی شعری و تکیه بر سادگی، به دور از تخیلات شاعرانه و با فصاحت و بلاغت و ایجاز تمام سروده شده باشد؛ ه) برخورداری از گفتمان خیامیّت یعنی نزدیکی مضمون رباعیات با اندیشه‌های فلسفی و شخصیت خیامی باشد. مسعود خیام (۱۱) در کتاب *خیام و ترانه‌ها* به وجود وجه علمی و واژگان برخاسته از مفاهیم علمی در تعدادی از رباعیات پرداخته، آنها را از زمره اصیل می‌شمارد. شاید این وجه که به شکل متمایز از سوی وی عنوان شده، در همان معیار گفتمان خیامیّتی بگُنجد که در تقسیم بندی بالا آمد.

رباعیات خیام، به خاطر جذابیت و صراحت آنها در بیان حال و احوال انسانی بسیار مورد توجه و بیش از آثار دیگر وی مورد نقد و بررسی بوده‌اند. در این نوشته هم چیزی تازه و افزون بر نکاتی بسیار گفته شده نمی‌یابید و آنچه در پی می‌آید گزیده‌ای از نگرش‌های موجود در میراث ادبی خیام است. بیشترین بحث‌ها در نگاه عموم از رباعیات خیام حول شراب و مستی و بی‌قدری دنیا و مافیها از نظر وی و ... است. این نگاه سطحی از رباعیات خیام محدود به عوام نمی‌ماند و برخی خواص هم (از جمله صادق هدایت) از رباعیات وی همین استیفادها را تکرار کرده‌اند. در حالی که اگر نیک بنگریم و خیام را یکپارچه ببینیم شاید درست‌تر این باشد که فکر کنیم خُماری خیام از نیاز به اندیشگی است و در وصال آن خود و دیگران را به نشئگی برخاسته از تامل و تعقل [و دوری از غفلت زدگی] می‌خواند. اگر او در یک رباعی مخاطب را به فراموشی گذشته و بی‌بنیادی آینده، غنیمت شمردن حال فرا می‌خواند نشانه دعوت به آگاهی پیوسته به وضعی که در آن به سر می‌برد نیست؟ درکِ حال بنوعی برآیند گذشته سپری شده و آینده نیامده است و خیام اتفاقا در رباعیاتش از گذشته و حال و آینده مدام سخن می‌گوید. از دست دادن حال یا حضور غائب انسان، غرق در گذشته و در خیال آینده زیستن دیگر معنا و توجیهی برای زندگی باقی می‌گذارد که دم را غنیمت شمردن بی‌اعتبار گرفته شود؟ براستی که درک دقیق حسی و منطقیِ حال، خود کلید فهم هر آن چیزی است که شما با آن مواجهید. برخورداری دائم از سیالیت ذهن، مبتنی بر حس و درک سیالیت هر واقعه یا جریانی که دائم یا دفعتا شاهد آن هستید، برای شناخت واقعیات جهان برون، موهبتی بزرگ است. این سبک زندگی، هنر و تمرین دائم می‌طلبد و مهارت درک زندگیِ حال هم آدم توانمند می‌خواهد. و آنگاه که شناختی میسر و حاصل نمی‌شود

میان ماندن در سرگشتگی و فهمِ اینکه نادان و حیرانی، با گُم گشتگی در نادانی یا جهلِ دانستگی خودساخته، زمین تا آسمان فاصله هست. شاید پیام سرگشتگی خیام همین القای دوری از جزم اندیشی و دعوت به اندیشه باز و سیالیت ذهن باشد.




روایت مبتکرانه و آموزنده دشتی (۱۷)، در شکل یک رویای خودساخته، در مورد ایرادات نجم‌الدین رازی (مشهور به دایه) به رباعیات خیام که به استناد آنها خیام را «سرگشته غافل» و «گمگشته عاطل» می‌خواند بسیار خواندنی است. وی در رویای خود پرداخته، نجم‌الدین و فیلسوفی به نام امام معین‌الدین را (که برخلاف نجم‌الدین با گذر از ظاهر رباعیات خیام، تفاسیر محکم و معقولی از آنها دارد) در دربار کیقباد بن کیخسرو بن قلج ارسلان سلجوقی در مناظره‌ای که توسط خود سلطان دامن زده می‌شود، رویاروی هم قرار می‌دهد. در این مناظره، بینش عامیانه و به دور از درک فلسفی نجم‌الدین با بینش عمیقا فلسفی و دراکانه معین‌الدین به سنجش کشیده می‌شود. نجم‌الدین رازی ضمن نقل دو رباعیِ مسلّم و مشهور خیام در *مرصاد العباد*، او را بیچارهٔ فلسفه دهری و طبایعی خوانده است؛ مضمون رباعی زیر دستمایه رویای دشتی در ترسیم مناظره این دو در دربار سلجوقی است.

دارنده چو ترکیب طبایع آراست
باز از چه سبب فکندش در کم وکاست؟
گر نیک نیامد این عیب کراست؟
ور نیک آمد خرابی از بهر چراست؟

ابتدائی‌ترین برداشت از این رباعی مضمون پرسشگرای آن است، بی آنکه بتوان قضاوت و نتیجه گیری خاصی برای آن تراشید. آیا پرسش از چند و چون هستی موضوع اندیشه دیروز و امروز هر متفکری نیست و ساعتی تفکر در آموزه‌های دینی بر هفتاد سال عبادت برتر شمرده نشده است؟ دشتی در روایتِ رویایی خویش بین دو صاحب نظر یادشده، از مقابله تعبد صِرف با تعقل و تفکر فلسفی در خوانش این رباعی، می‌خواهد به دفاع از خیام پردازد. او دیدگاه صرفا تعبدی نجم‌الدین را، که اتفاقا کتاب *مرصاد العباد* خود را برای تقدیم به سلطان سلجوقی (شاید به طمع پاداشی شاهانه) عرضه می‌کند، به نقد می‌کشد. شادروان دشتی اینجا گوئی از نظر برداشتِ احساسی و نیز عقلانی، با نگرش خیام بسیار نزدیک می‌شود! وی در بخشی از این اثر با انتقاد از وجه تماما توصیفی کتاب *مرصاد العباد* در مورد آفرینش جهان، نگاه عامیانهٔ نجم الدین را، همچون «سیاحی که گویی در نقلِ آفرینش جهان و انسان سیاحت نامه‌ای بر پایه مشاهدات عینی می‌نویسد»، ملال آور و خارج از تناسب می‌بیند چرا که در توصیفات وی هیچ تلازمی از علل و اسباب یا «سبب و مُسبّب» از آفرینش آسمان و زمین توسط آفریدگار به چشم نمی‌خورد. از دید دشتی آرای نجم‌الدین در این کتاب از هیچ منظری قابل دفاع نیست؛ چرا که توصیفات نجم‌الدین را نه تنها از استانداردها و ارزش‌های نگاه فلسفی جستجوگر علت و معلولی تُهی می‌شمارد، بلکه بی‌نشان از دیدگاه‌های حکمت جویانهٔ ابن سینا و دیگر حکمای مسلمان در قدیمی دانستن ماهوی آفرینش در ملازمت با واجب الوجودی الهی، غیر قابل قیاس با آرای صوفیانه مبتنی بر آفرینش هستی به مثابه پرتوی از نور ازلی ذات احدی، و حتی تُهی از معنای دیدگاه قَدَری–الهی برخاسته از باور متشرعین ارزیابی می‌کند. در نتیجه او مضامین کتاب را نه تنها با سیره عقلی، بلکه با موازین شرعی هم ناسازگار می‌داند. نجم‌الدین در همین کتاب است که با نگاهی سطحی به رباعی یادشده، به تحقیر و طعن خیام می‌پردازد. در ادامه روایت رویای خودساخته، دشتی پرسش و پاسخ‌های معین‌الدین فیلسوف را در مناظره با نجم‌الدین می‌آورد[۱](۱۷).

معین‌الدین با به چالش کشیدن توصیفات نجم‌الدین به قدیمی بودن باورِ بخشی از فلاسفه به قدیمی بودن عالم، فرض عدم مطلق را با وجود هستی مطلق آفریدگار ناسازگار دانسته، جهان هستی را جزء لاینفک هستی واجب الوجود آفریدگار می‌داند و می‌گوید مسبوق بودن جهان هستی به عدم، تفسیر علت غائی آفرینش، و پذیرشِ لذت به تماشا نشستن خدا بر عبودیت بندگانش را از جهت عقلانی دشوار می‌سازد. از طرف دیگر توصیف نجم‌الدین از فلسفه آفرینش انسان از سوی خدا برای شناساندن و به رسیدن معرفت انسان از او را منافی مبادی عقلی از ذات بی‌نیاز آفریدگار می‌داند، چرا که ذات واجب الوجود از هر نیازی مبُّراست. اینکه در صنع خدا آفریده‌های دهری و طبایعی را مشیت او بدانند از عدل خدا دور است و غیره. در ادامه از زبان معین‌الدین روایت می‌شود که انسان ممکن الوجود و محدود را یارای شناخت واجب الوجود و ذات نامحدود وی نیست، چرا که انسان در شناخت خود و جهانِ ممکن الوجود نیز به کمال نمی‌رسد چه رسد به شناخت ذات واجب الوجود! چون شناخت هر چیز با فرض احاطه بر آن و شناخت ترکیبات وی میسر است و بنابراین محیط شدن محدود بر نامحدود، نزدیک شدن معرفت انسان به ذات بسیط واجب الوجود امری محال است. آنچه طرفین مناظره اینجا لحظه‌ای بر آن توافق می‌ورزند، این تاکید است که با محال بودنِ شناخت ذات آفریدگار، بندگان جُز از بیان صفات وی نمی‌وانند فراتر روند. معین‌الدین زیرکانه ادامه بحث آفرینش را به

۱. این مطلب بسیار گیرا و خواندنی است و خواننده مشتاق را به نوشته دشتی (*دمی با خیام*، بخش سوم صفحات ۳۰۱ تا ۳۵۵) ارجاع می‌دهیم.

سرودهٔ دیگر خیام می‌کشاند که در آن تمثیلی از رابطه کوزه‌گر و کوزه[۱]، شاید به قیاسی از آفریدگار و آفریده، روایت می‌شود. در این بگو مگو، معین‌الدین با تصریح اینکه کار کوزه‌گر در ساختن کوزه ابدا قابل قیاس با صنع خداوندی در برپائی هستی نیست بیان می‌دارد که در همان مقیاسِ کارِ کوزه‌گری نیز با عقل جور نمی‌آید که کوزه‌گر ماهر هنرش را بدون غایت به کار گیرد یا به عمد کوزه‌ای ناقص بسازد یا با تکرار در ساختن و شکستن به کوزه‌ای بی‌نقص برسد و منتظر آفرین باری مصنوع خود بنشیند و الی آخر. معین‌الدین با این بحث نتیجه می‌گیرد که از صنعتگر ماهر، جز کار بی‌نقص بر نمی‌آید و اگر هم گوشه چشمی به ستودن دیگران داشته باشد این فقط مختص بشر نیازمند به خودنمائی است و سرانجام استدلال می‌ورزد اگر این توجیهات در صناعت کوزه‌گر ماهر و قابل جای کنکاش ندارد چطور می‌شود آن را به قیاس صناعت هستی توسط وجودی قائم به ذات و بی‌نیاز کشانید؟ با این بحث، معین‌الدین تیر آخر را در دفاع از حکیم عمرخیام رها می‌کند و خطاب به نجم‌الدین می‌گوید: «در این رباعی [رباعی طبایع آمده در کتاب *مرصاد العباد*] که شما آن را دلیل گمراهی خیام دانسته‌اید نظائر این معانی مستتر است که حیرت او را نشان می‌دهد نه اعتراض؛ پایه دانش او بدانجا رسیده که فهمیده نمی‌فهمد، ورنه او کسی نیست که از فلسفه یونانیان و نظر صوفیان درباره خلقت و ابداع اطلاعی نداشته باشد. تمام این روایت از قول معین‌الدین، در نقد محتوای کتاب نجم‌الدین و بیانات وی طی مناظره رویائی برپاشده از سوی دشتی به شکل مناظره‌ای میان یک فیلسوف نقاد و یک متکلم عوام پسند نمایش داده می‌شود (۱۷). اگر بخواهیم نکته‌ای بر این مناظره از دیدگاه علمی بیفزائیم، رسیدن به عدم قطعیت شناختِ عالم از سوی دانشمندان بسیار آموزنده است؛ با تمام دانشی که در سایه دانسته‌های اثبات شده پیشین و فنون و ابزار شناسائی جهان مادی به کار می‌روند هر صباحی دانسته‌های قبلی به زیر سوال می‌رود و جستجو و یافتن واقعیات هستی از زنده و غیرزنده افق‌های تازه‌ای را می‌گشاید که براستی خود بنوعی مایه حیرت‌اند، چه رسد به ایرادِ تسری حیرت در فلسفه عالم وجود و بدایت و نهایت هستی!

دفاع دشتی از مفاهیم آمده در رباعیات خیام یک دفاع کور، جانبدارانه و تعینی نیست و در بخش‌های بعدی اثر خود با به شاهد کشیدن رباعیات دیگر خیام او را چنان معرفی می‌کند که وی عقل را در توجیه و تفسیر غایت آفرینش ناتوان می‌بیند و حیران از راز هستی، همین دیدگاه را در ترسیم جهان هستی و آفرینش و غایت آن در رباعیاتش ترسیم می‌سازد، بی آنکه در هیچ یک از آنها به نفی آفریدگار دست یازد. زیباترین تصویر از باورهای قلبی خیام بنا بر روایات، صحنه وداع او با زندگی دنیوی در آخرین لحظات عمر است، آنجا که با کنار گذاردن مطالعه *شفای* ابن سینا همراهان را به نماز می‌خواند و در پایان سر به سجده با این ذکر که «خدایا من ترا به اندازه وسع فهم خود پرستیدم» زندگی را وداع می‌گوید. با این تفصیل، تهمت بی‌دینی و دهری و سبکسری و می پرستی و ... از سوی دنیاپرستان به خیام، و بسیاری از حکما و اندیشمندان دیگر مانند بیرونی، رازی و ...، در طول حیات ایشان و متعاقب آن، ریشه در تفاسیر خردستیزانه از اندیشه‌های این بزرگان دارد.

اگر خیام در میان هم عصرانش چنان صاحب عزت و کرامت است که وی را حجه الحق و امامش می‌خوانند چطور می‌شود که دهه‌ها و سده‌ها پس از آن، اشارات وی به می در رباعیات را ستودن شراب و می خوارگی تعبیر کرد؟ شاید بیتی از سعدی (که می‌فرماید هرچه کوته نظرانند بر ایشان پیمای حریفان مست مُل و من مست تاملم) به عنوان «هم پیاله» وی در مستی در معاف کردن وی از می پرستی کفایت کند و رباعی زیر از خیام هم برای پایان بخشیدن به این مقال بیراه نباشد.

یک چند به کودکی به استاد شدیم
یک چند به استادی خود شاد شدیم
پایان سخن شنو که ما را چه رسید
از خاک بر آمدیم و برباد شدیم

## مناسبت‌ها و یادمان‌های عمرخیام

آثار زیادی برای بزرگداشت و یادمان خیام (از زمین تا فلک!) به نام وی مزین شده است که به تعدادی از آنها اینجا اشاره می‌شود. نام‌گذاری بیست و هشتم اردیبهشت (روز احتمالی تولد وی) برای یادمان بزرگداشت خیام؛ نامیدن یکی از حفره‌های ماه به نام عمر خیام؛ نام‌گذاری سیارک ۳۰۹۵ به نام خیام در سال ۱۹۸۰؛ نصب تندیس وی در بنای یادبود موسوم به چهارتاق در مقابل مقر سازمان ملل در اتریش (اهدائی ایران)؛ تندیس‌های نصب شده در پارک لاله شهر تهران و آرامگاه خیام در نیشابور و چند شهر دیگر ایران از جمله ایلام، نیشابور و جزیره کیش؛ بنیان گذاری انجمنی به نام وی در سال ۱۸۹۲ میلادی در لندن؛ تاسیس کلوپ‌های موسوم به خیام برای پرداختن و معرفی خیام در امریکا و اروپا؛ نام‌گذاری خیابان خیام که از حوالی بازار، میدان ارک شروع شده، تا میدان محمدیه ادامه دارد. نام‌گذاری هتل‌ها و رستوران‌های متعدد در کشورهای گوناگون؛ نصب تندیس خیام در چندین کشور از جمله مجارستان، ونزوئلا، روسیه، بخارست رومانی و نصب تندیس ساخته حسین فخیمی در دانشگاه اوکلاهما در آمریکا؛ ساخت و نمایش دو فیلم امریکائی از زندگی خیام، در سال ۱۹۵۶ توسط کمپانی پارامونت به کارگردانی ویلیم دیتریله و دیگری به کارگردانی کیوان مشایخ به نام میراث دار: افسانه خیام به سال ۲۰۰۵ در امریکا. رمان *سمرقند*

۱. جامی است که عقل آفرین می‌زندش  صدبوسه ز مهر برجبین می‌زندش
این کوزه گر دهر چنین جام لطیف  می‌سازد و باز بر زمین می‌زندش

نوشته امین معلوف از آذربایجان (ترجمه به فارسی از زبان فرانسه توسط محمد قاضی) و رمان دیگری از هارولد آلبرت لمب[1] به نام *عمر خیام* (ترجمه مسعود برزین) از جمله داستان‌هائی از زندگی اوست که توسط نویسندگان غیر ایرانی نوشته شده‌اند؛ نمایش اُپرای عروسکی از زندگی خیام به همت دکتر بهروز غریب‌پور در سال ۱۳۹۷. این نمایشنامه پنجمین کار ارزنده این هنرمند مبتکر با محوریت چهره‌های فرهنگی و ادبی ایران‌زمین است که برای نشان دادن چهره جهانی خیام در این اپرا علاوه بر زبان فارسی، مبتکرانه دیالوگ‌هائی به چندین زبان بین المللی و برخی لهجه‌های ایرانی نیز در آن گنجانیده شده است. رویدادی دلنشین نیز روایت شده که ویلیام سیمپسون در دیدار از آرامگه خیام، از گل‌های خشکیده شاخه گل رُزی در مزار چند دانه جدا کرده، به انگلستان می‌فرستند که پس از کاشت و عمل آوردن در مزار فیتز جرالد مترجم رباعیات خیام در انگلستان کاشته می‌شود.

در پایان جای دارد که متولیان علمی و فرهنگی کشور، شاید هم خودِ فرهنگستان علوم با ارائهٔ طرحی ملی برای تاسیس اندیشکده یا پژوهشکده‌ای شایسته شامل کتابخانه‌ای از تمام آثار خود خیام و آثاری که طی سده‌ها در مورد وی منتشر شده در جوار آرامگه این حکیم ایرانی، در پاسداشت و تداوم پژوهش و شناسائی بیشتر این چهره ماندگار علم، فرهنگ و ادب این مرز و بوم پیشگام شوند.

**سه نمونه از تندیس‌های خیام:** بالا سمت راست: اثر حسین فخیمی نصب در دانشگاه اوکلاهما، نصب در مرکز زبان فارسی و ایران‌شناسی این دانشگاه؛ میانی: اثر ابوالحسن صدیقی نصب در پارک لاله، تهران؛ چپ: یکی از چهار تندیس در بنای چهارتاق در محوطه مقر سازمان ملل، وینِ اتریش. طراحی بنا توسط علیرضا ناظم الرعایایی.

**دو نمونه از تمبرهای یادبود.** پائین: راست، تمبر یادبود خیام، کشور آلبانی؛ چپ، برشی از ورق تمبر یادبود خیام – پست ایران

از استاد فاضل و گرامی جناب آقای دکتر وحیدی اصل، به پاس زحمتِ خواندن درفت مقاله و تصحیح پاره‌ای از اشتباهات آن سپاسگزارم.

## منابع

۱. همائی جلال الدین، *خیامی نامه همائی*. سلسله انتشارات انجمن آثار علمی (۱۳۴۶).

۲. فرازمند علی، مروری بر آثار ابوریحان بیرونی، شکوه یکپارچگی نخبگی و پختگی. *نامه علوم پایه* شماره ۹ و ۱۰ (بهار و تابستان ۱۴۰۲)

۳. فرازمند علی، مروری بر احوال و آثار محمدبن زکریای رازی، شکوه یکپارچگی نخبگی و پختگی در علم، طبابت، و اخلاق پزشکی. شماره ۱۱ و ۱۲ (پائیز و زمستان ۱۴۰۲).

1. Harold Lamb

۴. رضوی مهدی امین (ترجمه مجدالدین کیوانی)، *صهبای خرد، شرح احوال و آثار حکیم عمرخیام نیشابوری*. انتشارات سخن (۱۳۸۵)
۵. ترجمه محمد بن حسین خلیفه نیشابوری (و تصحیح و تعلیقات شفیعی کدکنی)، *تاریخ نیشابور*، نشر آگه ( ۱۳۷۵).
۶. نوذری عزت اله، *تاریخ اجتماعی ایران*. انتشارات خجسته (چاپ پنجم، ۱۳۸۸).
۷. آقایانی چاوشی جعفر، *سیری در افکار علمی و فلسفی حکیم عمرخیام نیشابوری*. انتشارات انجمن فلسفه ایران (۱۳۵۸).
۸. فرشاد مهدی، *تاریخ علم در ایران* (جلد ۱ و۲). موسسه انتشارات امیرکبیر (۱۳۶۵).
۹. قنبری محمدرضا، *خیام‌نامه، روزگار، فلسفه و شعر خیام*. انتشارات زوار (۱۳۸۴)
۱۰. میرافضلی سیدعلی. *رباعیات خیام و خیامانه‌های فارسی*. انتشارات سخن (۱۳۹۹)
۱۱. خیام مسعود، *خیام و ترانه‌ها*. انتشارات نگاه (۱۳۹۷).
۱۲. فولادوند مهدی، *خیام شناسی*. موسسه فرهنگی هنری الست فردا (۱۳۷۸).
۱۳. ذکاوتی قراگزلو علیرضا، *عمرخیام نیشابوری*. طرح نو (۱۳۷۷).
۱۴. دانش، حسین و توفیق، رضا (ترجمه و توضیح شیخ ابراهیم زنجانی)، *عمرخیام نیشابوری،زندگی، افکار و رباعیات*. انتشارات نیلوفر (۱۴۰۰).
۱۵. فرزانه محسن، *خیام شناخت*،. سازمان خوشه (۱۳۵۳)
۱۶. روشن محمد، *ترانه‌های خیام*. انتشارات صدای معاصر (۱۳۷۶)
۱۷. دشتی علی، *دمی با خیام*. انتشارات اساطیر، چاپ دوم (۱۳۷۷).
۱۸. معینی کرمانشاهی، [مقدمه] *رباعیات خیام*، به کوشش ابولفضل میرباقری، کتاب‌سرای تندیس (چاپ چهارم، ۱۳۸۵)
۱۹. بهروز ذبیح، *تقویم و تاریخ در ایران. از رصد زرتشت تا رصد خیام*. انتشارات انجمن ایرانویج. (۱۳۳۱).
۲۰. محمد قاسم وحیدی اصل (ترجمه). *آشنائی با تاریخ ریاضیات*، مرکز نشر دانشگاهی (چاپ چهارم ۱۳۸۵).
۲۱. مصاحب، غلامحسین. حکیم *عمرخیام به عنوان عالم جبر*، انجمن آثار و مفاخر فرهنگی و همکاری کمسیون ملی یونسکو در ایران (ویراست دوم،۱۳۷۷).
۲۲. جعفری محمدتقی، *تحلیل شخصیت خیام*. انتشارات موسسه کیهان، چاپ چهارم (۱۳۷۵).
۲۳. یاراحمدبن حسین رشیدی تبریزی (به تصحیح علامه استاد جلال همائی) *رباعیات خیام* (*طربخانه*). موسسه نشر هما (۱۳۶۷).
۲۴.همایونفر فتح الله، *سیمای خیام*. انتشارات فروغی (۱۳۵۵).
۲۵. اذکائی پرویز، *طبیعیات خیام*. مجله آینه میراث، شماره ۲۶ (۱۳۸۹).
۲۶. *دائره المعارف بزرگ اسلامی*، مدخل خیام. جلد ۲۳ (۳۲۷–۳۰۵).
۲۷. *دانشنامه زبان و ادب فارسی*، مدخل خیام. جلد سوم (۱۰۸–۱۰۵).
۲۸. *دانشنامه جهان اسلام*، مدخل خیام، جلد ۱۶ (۵۷۹–۵۶۴).
۲۹. *دوره مختصر تاریخ فرهنگ ایران*، عیسی صدیق. شرکت سهامی طبع کتاب (چاپ شانزدهم، ۱۳۵۵)
۳۰. *تاریخ ایران، آغاز تا انقراض قاجاریه*، حسن پیرنیا، عباس اقبال آشتیانی. انتشارات کتابخانه خیام
۳۱. *تاریخ سلسله سلجوقی: زبده النصره و نخبه العصره*، اثر بنداری اصفهانی، ترجمه محمد حسین جلیلی کرمانشاهی. بنیاد فرهنگ ایران (۱۳۵۶).
۳۲. *سلجوقنامه*، ظهیرالدین ظهیری نیشابوری، به تصحیح میرزا اسماعیل افشار، نشر اساطیر (۱۳۹۰)
۳۳. *تاریخ کامل ایران*، نوشته سرجان ملکم، ترجمه میرزا ابراهیم حیرت. انتشارات افسوس (۱۳۸۰)
34. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Umar Khayam (2023 revision).

در سرتاسر این نوشته (که البته پژوهشی به حساب نمی‌آید) از بیشتر منابع معرفی شده استفاده شده، صرفا در موارد برداشت‌های مبسوط ارجاعات نیز داخل متن آمده است. بدون بهره مندی از این منابع ارزشمند بی‌شک نگارنده نمی‌توانسته در باب شخصیت ویژه و بی‌مثالی چون خیام چیزی بنویسد. با آنکه آثار بسیار زیادی در مورد خیام (بیشتر در مورد رباعیات وی) انتشار یافته و می‌یابد، کتابنامه‌ای روزآمد از این آثار به فارسی فراهم نیست که برای پژوهشگران خیام می‌تواند بسیار مفید باشد.

# A Review of the Life and Works of Omar Khayyam Nīshābūrī (1048-1124 AD): The Glory of Unity in Elite and Maturity in Science, Philosophy and Literature

**Ali Farazmand**

Faculty of Biology, University of Tehran
Biology Branch of the Iran Academy of Sciences

afarazmand@ut.ac.ir

## Abstract

This article reviews the works and life of the sage Omar Khayyam Neyshaburi (439-517 AH), a thinker with brilliant works in science, literature and philosophy. Most of his life was spent during the Seljuk rule over Iran, and he was highly respected and held in high esteem in the courts of the kings of this dynasty due to his scientific abilities. Khayyam was a thinker and an expert in astronomy, mathematics, geometry, medicine, music, physics, and meteorology, and left a valuable legacy in the history of science with his numerous works. Under the supervision of a team of astronomy experts of the time during the reign of Malekshah Seljuk in the Isfahan Observatory, he established the solar calendar, which is still considered the most accurate calendar in terms of overlapping with the seasons of nature. In geometry and mathematics, by examining and criticizing the work of previous scientists, long before Descartes, Pascal, and Newton, he introduced principles that only centuries later recognized his genius and knowledge in these fields, and his works were respected. George Sarton called the second half of the 12th century the Era of Khayyam. He also wrote works in other scientific fields such as physics and music. He also showed his attachment to Iranian culture with a work called Nowruznameh. In addition to scientific works, Khayyam wrote numerous philosophical treatises on the creation (development) of the universe and the individual and social life of man. His treatises are all short, but ultimately written with maturity and authority, which shows his lofty thought in his philosophical view of things. Another valuable legacy of Khayyam is his Rubaiyat, in which each of his original Rubaiyats is full of thought, and their translation into English by Edward Fitzgerald in the first half of the 19th century not only made his fame worldwide but also caused renewed attention among Iranian scholars. While Khayyam›s fame in his time was solely due to his excellence in scientific and philosophical works, in the contemporary world, especially after the publication of his Rubaiyat in many languages, he is famous as a poet, although his scientific and philosophical aspects in the art of poetry are also quite evident due to the profound themes that are composed in the form of questions and answers.

**Keywords:** Omar Khayyam, Khayyam Neyshaburi, Rubaiyat, Jalali Calendar, Khayyaam-Pascal, Khayyam-Newton.

article adopts an interdisciplinary and interpretive approach to revisit Hannah Arendt's concept of the Human Condition in relation to contemporary AI users, placing it in dialogue with Jorge Luis Borges's metaphor of the "Library of Babel," Markus Gabriel's New Realism, and the biblical narrative of the Tower of Babel. The article argues that when artificial intelligence is treated as an authority of truth and meaning, it risks undermining human action, eroding the public sphere, triggering a crisis of meaning, and fostering new forms of digital totalitarianism. Conversely, when AI is understood as a tool subordinate to human judgment and situated within a plurality of fields of sense, it does not threaten the human condition but may instead enable new possibilities for responsibility, action, and meaning-making.

**Keywords:** Hannah Arendt, Generative Artificial Intelligence, Library of Babel, Marcus Gabriel, Philosophy of Technology

## The Strategic Role of Southern Gulf Countries' Investment in Artificial Intelligence and the Uncertain Place of the Islamic Republic of Iran in the New Technological Order

**Abbas Pourkhessalian**

Former Researcher at Parliament Research Center (IPRC),
Master of Network Maintenance and Operation at Telecommunication Infrastructure Company

apurkhess@gmail.com

### Abstract

This study examines the formation of a new world order under the influence of emerging powers from AI technology and examines the technological competition of the southern Persian Gulf countries (Saudi Arabia, Qatar, the United Arab Emirates, and Oman) with each other to secure a suitable place in one of the two AI-based power pyramids led by the United States or China; and the impact of digital power hierarchies on the redefinition of the world geopolitical order. Focusing on the large investments of these countries in leading American companies and, to some extent, in Chinese high-tech companies, the aim of this study is to analyze the transition of these countries› role from being a technology consumer to an active actor in the field of digital power and to explain their role as mediators in the region. In contrast, this article criticizes and examines the unknown and passive position of the Islamic Republic of Iran in this huge technological transformation. The findings indicate that strategic cooperation, especially between Saudi Arabia and the United States, such as the strategic cooperation between Israel and the United States, takes the form of "asymmetric AI transactions," which leads to the consolidation of the US-led power pyramid and the increasing technological dependence of the southern Persian Gulf countries and other countries party to the hyper-technological agreements on the centralized digital power located at the top of the pyramid. In the process of the formation of these two global structures of digital power, the Islamic Republic of Iran lacks a grand and practical strategy for positioning itself in one of these two pyramids of digital power, while it does not have the necessary ability to create a third pyramid of digital power, independent of the two mentioned pyramids, consisting of non-aligned countries and playing a role in the future technological order of the world.

interdisciplinary scientific approach of mathematics-biology as briefly and usefully as possible in simple and usable words for all those interested in this field.

**Keywords:** Parasitoid, Population Dynamics, Mathematical Model, Integrated management, Equilibrium Point.

## The Philosophy of Shortening Academic Program Durations in Higher Education: A Systematic Analysis of Educational, Economic, and Policy Dimensions

**Ahmad Shaabani**

Faculty of Chemistry, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Associate Member of the Chemistry Branch of the Academy of Sciences, Tehran, IRAN

a-shaabani@sbu.ac.ir

### Abstract

In recent years, the reduction of program duration at the bachelor's, master's, and doctoral levels has emerged as a global trend in higher education systems. This transformation has been shaped by multiple factors, including changes in labor markets, requirements of educational equity, economic considerations, the emergence of new technologies (particularly artificial intelligence), the need for alignment with international standards, and a shift from credential-oriented education toward skills-oriented education. This article adopts an analytical–policy approach to examine the philosophy of shortening academic programs across five key dimensions: educational, research, economic, social, and policy. The findings indicate that under conditions of declining national resources and increasing economic pressures, shortening program duration—while maintaining educational quality—can serve as an effective instrument for advancing educational equity. Specifically, by reducing time-to-degree, admission capacity for tuition-free students can be increased, and the financial burden on households can be alleviated. Nevertheless, the success of this policy depends on a fundamental revision of curricula, the elimination of repetitive and non-essential courses, and systematic coordination between general education and higher education levels. Emphasizing the necessity of evidence-based decision-making, this study seeks to foster informed dialogue among scholars, policymakers, and higher education planners to support the design and implementation of policies for reducing academic program duration in Iran.

**Keywords:** higher education; curriculum revision; curriculum planning; program duration; educational equity; educational technologies; skills-based education.

## Artificial Intelligence Users Reading the Attitudes of Hannah Arendt, Jorge Luis Borges, Marcus Gabriel, and the Old Testament

**Abbas Pourkhessalian**

Former Researcher at Parliament Research Center (IPRC),
Master of Network Maintenance and Operation at Telecommunication Infrastructure Company

apurkhess@gmail.com

### Abstract

The rapid expansion of artificial intelligence technologies, particularly generative AI platforms, has profoundly affected fundamental dimensions of the human condition, including action, meaning, and plurality. This

## From Resistance to Tolerance:
## Distinguishing Two Key Concepts in Plant Responses to Herbicides

**Rouzbeh Zangoueinejad[1], Eskandar Zand[2]**

1. East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)

2. Department of Weed Science, Research Institute of Plant Protection, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO)

r.zangoueinejad@areeo.ac.ir

### Abstract

The overlap and interference of meanings of certain terms in some scientific fields sometimes make it difficult to distinguish the concepts behind them. One such case in the field of weed science is the use of the two terms; herbicide resistance and herbicide tolerance. Although in many agricultural science communities these two expressions are often considered synonymous, in reality, there is a profound difference between them, and they should by no means be used interchangeably. In fact, herbicide resistance refers to the emergence of a special condition within weed populations that develops over time as a result of human activity, specifically through the repeated application of one or more particular herbicides. In contrast, herbicide tolerance reflects the presence of an inherent trait within a specific plant species that has existed and will continue to exist regardless of human agricultural practices. Based on this distinction, herbicide-resistant weeds, herbicide-tolerant weeds, herbicide-resistant crops, and herbicide-tolerant crops are each independent phenomena that cannot be considered overlapping events. Each carries its own specific significance within agricultural systems and can have entirely different constructive or destructive impacts. However, so far, only herbicide-resistant weeds and herbicide-resistant crops have attracted significant attention in both scientific and practical agricultural communities. In the present article, an attempt will be made to clarify the differences between herbicide resistance and herbicide tolerance based on the actual nature of their occurrence, and to examine the importance of each within the mechanisms of agricultural systems.

**Keywords:** Herbicide Resistance, Herbicide Tolerance, Weeds, Crops.

## Basic Science and Plant Pest Control:
## A Physically Inspired Mathematical Model

**Mahmood Soufbaf**

Plant Protection Group, Nuclear Agricultural Research School, Nuclear Sciences and Technology Research Institute (NSTRI), Karaj, Iran

msoufbaf@aeoi.org.ir

### Abstract

As a brief description of the beautiful and wonderful interactions of mathematics and biology, the current article, using two precise excerpts from the fundamental methods of modeling and stability analysis of a model from two key articles in the field of the application of mathematical models in integrated pest management, explains interdisciplinary details. In one section explains the process of mathematical model construction of a pest insect (host)-parasitoid (natural enemy) dynamical system based on the causal relationships existing between various independent and dependent variables, and in the other section provides an objective example in this regard. The main purpose of this article is to express this

## The Backward Gene's-Eye View by Richard Dawkins

**Mahmood Karami**

Faculty of Biology, University of Tehran, Tehran, Iran.

mkarami@ut.ac.ir

### Abstract

Cuckoos are undoubtedly one of the wonders of the world, because they are brood parasites who trick nesting birds of other species into rearing their young. Their eggs mimic the color and patterning of other eggs in the particular foster nest in which they sit. Immediately after hatching, the cuckoo chick destroys remaining host eggs by tossing them out of the nest one by one. This reproductive strategy raises many questions that evolutionary biologists have tried to answer. For example, how female cuckoos are able to mimic the shape, color and patterning of the eggs of different host species; why the host bird does not reject the foreign egg? Does cuckoo chick know what it is doing? Why the host bird does not recognize and continue feeding the parasitic chick, which is many times its own size? Also, how the emergence of such deceptive, ruthless, and immoral behavior in nature, which is considered a symbol of harmony and order can be explained? This article presents answers to these questions from an evolutionary perspective.

**Keywords:** Arms race, Brood parasitism, Egg mimicry, Evolutionary biology, Genomic imprinting

## The Shifting Role of Embryonic Development Studies in Evolutionary Biology

**Ata Kalirad**

Max-Planck-Institut für Biologie Tübingen, Germany.

ata.kalirad@tuebingen.mpg.de

### Abstract

The role of the developmental process in modern evolutionary biology is very weak, and almost all common evolutionary models eliminate development from their formulation in order to simplify it. However, the history of evolutionary biology and genetics until the middle of the twentieth century gave a strong role to development, and many considered understanding the developmental process to be the key to understanding heredity. In the following note, I discuss the historical change that led to the weakening of development in evolutionary biology and point out the change in the meaning of terms due to this change in attitude. It seems that current research on the interaction of developmental processes in the production of biodiversity has paved the way for the integration of evolutionary biology and development.

**Keywords:** Evolutionary biology, Embryonic development, Epigenetics, Central Dogma of Molecular biology

## Manifolds and the Universe

**Ali Kamalinejad**

Department of Mathematics, Statistics and Computer Science, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran.

School of Mathematics, The Institute for Research in Fundamental Sciences (IPM), Tehran, Iran.

Kamalinejad.a@ut.ac.ir

### Abstract

3-dimensional Euclidean space is one of the simplest examples of 3-dimensional spaces (manifolds). It is also a model (though not the only model) for the -3dimensional universe. Although all 3-dimensional manifolds are locally «look like» a 3-dimensional Euclidean space, they are not globally so. Therefore, a 3-dimensional model of the universe does not necessarily have to be 3-dimensional Euclidean space. So, we can ask what the global (topological) properties of the universe are? In this text, we will first review mathematical introductions, including material on 3-manifolds, which can help us formulate the above question more precisely. Then, we will briefly review physical introductions, including the Friedmann equation, Hubble›s law, and the expansion of the universe, which provide a way to study experimentally possible answers to questions about the topology and geometry of the universe.

## Stratified Approximations

**Mehdi Radjabalipour*[1] & Pouya. Karimi[2]**

1. Academy of Sciences of the Islamic Republic of Iran, Tehran, Iran;
Research Group of Technology and Applied Mathematics Pardis, Kerman, Iran.

2. Department of Mathematics, Faculty of Mathematics and Computer, Shahid Bahonar University of Kerman  Mahani Math Center, Afzalipour Research Institute, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

radjabalipour@ias.ac.ir

### Abstract

The step-by-step approximations introduced in this article as «Stratified approximations» are a type of scientific method in which each new step adds to the accuracy of the approximation by simply adding more details, without removing or changing information from previous steps. Numerous examples of this structure can be seen throughout the history of science and mathematics: from the binary, sexagesimal, and decimal expansions of fractions in ancient civilizations, to the correction of planetary paths with epicycle-on-epicycle models in Ptolemaic astronomy, and from Taylor and Maclaurin expansions in approximating the local twist of curves and surfaces, to Fourier analysis and wavelet multiresolution processing in contemporary science. Each of these methods is based on a hierarchical and incremental structure that approaches the ultimate goal by adding new layers without rewriting previous approximations. Here, using a historical and analytical approach, we examine the evolutionary path of this layered perspective in mathematics, astronomy, and signal processing, and show how this step-by-step logic has expanded from ancient empirical observations to precise modern modeling in wavelet theory and signal processing. Ultimately, even seemingly simple concepts such as approximation can have profound historical, philosophical, and technological foundations and continue to inspire novel scientific reflections.

**Keywords:** Stratified Approximation, Expansion of Mathematical Series, Binary Fractions, Wavelets, History of Mathematics

# Abstract of Contents

## Persian Patient Writer and Mathematician

**Esmaeel Asadi**

Department of Mathematics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, 45137–66731, Iran

Department of Mathematics and Statistics, Brock University, St. Catharines, Canada

easadi@iasbs.ac.ir

### Abstract

«One has to ignore the low-hanging fruit, which can be a bit tricky.» Indeed, what is the territory in which the essence and appearance of a forest's bounty must be categorized by «Is» and «Is-Not» or by «Up-and-Down»? In what realm, in pursuit of the ripened fruits brought into Being upon the «Up» (higher) branches, must one—with a drunkard's indifference—disregard the offerings of the «Down» (lower) limbs? This paper is an exploration of the scientific praxis of the contemporary Persian mathematician, Maryam Mirzakhani. It further casts a glance at parallel evidence found in the lives of scientific and literary luminaries—such as Khayyam, Al-Khwarizmi, Rumi, and Hafez, as well as modern figures—who may have found themselves, through such intellectual pursuits, becoming one with Yesterday's Seven Thousand Years.

**Keywords:** Khayyam, Maryam Mirzakhani, KDV Equation, Empirical Intuition, Geometric Intuition

## A Glimps at the History of Mathematics and its Impact on Civilization: A Pave of the Meaning

**Khosro Tajbakhsh*, S. M. B. Kashani**

Department of Mathematics, Shahid Modares University, Tehran, Iran

khtajbakhsh@modares.ac.ir

### Abstract

. In this article, we take a look at the meaning and features of mathematics, its history, and impact on human civilization. The journey, progress, and profound direct and indirect influence of mathematics on human intellectual development, and on the advancement of other sciences and technology are examined through a review of ancient, the Greek and Roman, the Islamic and the modern civilizations.

**Keywords:** Mathematics, Ancient Civilizations, Iranian Civilization, Greek Civilization, Modern Europe, Intellectual revolutions, Conjectures

# Nāme-ye-Oloom-e Pāye

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 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**

تصویرِ زیب جلد تندیسی از خیام، نصب شده در محوطه آرامگاه وی در نیشابور است. مقاله آخر این شماره مروری است بر آثار و احوال حکیم عمرخیام نیشابوری (۵۱۷–۴۳۹ هجری قمری)، اندیشمندی با آثاری درخشان در علم، ادب و فلسفه. بیشتر عمر وی در دوران حکمرانی سلجوقیان بر ایران سپری شده، به خاطر توانائی‌های علمی در دربار سلاطین این سلسله ارج و منزلتی والا داشته است. خیام در نجوم، ریاضیات، هندسه، طب، موسیقی، فیزیک، هوا شناسی صاحب اندیشه و نظر بوده، با آثار متعددی که نوشت میراث ارزشمندی در تاریخ علم به جای گذاشت. با سرپرستی تیمی از زبدگان نجوم زمان در دوران ملکشاه سلجوقی در رصدخانهٔ اصفهان، تقویم خورشیدی (ملکشاهی یا جلالی) را بنا نهاد که همچنان دقیق‌ترین تقویم دنیااز نظر همپوشانی با فصول طبیعت به حساب می‌آید. در هندسه و ریاضیات، با بررسی و نقد کار دانشمندان پیشین، خیلی پیش از دکارت، پاسکال، نیوتون اصولی را معرفی کرد که فقط سده‌ها بعد به نبوغ و دانش وی در این زمینه‌ها پی برده، و کارهای او را پاس داشتند. جورج سارتون نیمه اول سده دوازده میلادی را عصر خیام نامیده است. او در زمینه‌های علمی دیگر مانند فیزیک و موسیقی نیز صاحب آثار است. همچنین با اثری به نام *نوروزنامه* دلبستگی خود را به فرهنگ ایرانی نشان داده است. علاوه از آثار علمی، خیام رساله‌های فلسفی متعددی در زمینه‌های تکوین عالَم و زندگی فردی و اجتماعی انسان تحریر کرده است. رسالات وی همه کوتاه، ولی در نهایت پختگی و ایجاذ نوشته شده‌اند که اندیشه والای وی را در نگاه فلسفی به امور نشان می‌دهند. میراث ارزشمند دیگر خیام رباعیات اوست که در تک تک رباعیات اصیل وی اندیشه موج می‌زند و ترجمه آنها توسط ادوارد فیتز جرالد به انگلیسی در نیمه اول سده نوزده میلادی شهرت وی را نه تنها جهانگیر کرد بلکه موجب توجهی دوباره در میان محققین ایرانی شد. در حالی که شهرت خیام در زمانه وی صرفا به پاس نخبگی در کارهای علمی و فلسفی اوست در دنیای معاصر، بویژه پس از انتشار رباعیاتش به بسیاری از زبان‌های دنیا آوازه شاعری دارد، هرچند وجوه علمی و فلسفی وی حتی در هنر شعر– به خاطر مضامین ژرفی که به شکل پرسش و پاسخ‌هائی سروده می‌شوند– نیز کاملا آشکار است.

نامه علوم پایه

دوفصلنامه تخصصی گروه علوم پایه فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

ISSN 2783-3666