



RESEARCH ARTICLE

Governing Gene Editing in the Age of Hyper-Evolution: An Analytical Framework for Assessing Biological Inequality and Policy Design in Iran

Ahmad Ashouri^{ID}

Professor of Agriculture and Natural Resources, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

* Corresponding Author's Email: ashouri@ut.ac.ir

 <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2026.107811>

Received: 17 Marc 2026

Accepted: 21 April 2026

ABSTRACT

Human gene editing, especially at the germline level, is moving beyond the treatment of hereditary diseases toward the enhancement of future generations. Without forward-looking governance, this shift may deepen biological inequality and trigger genetic competition among groups or states. This article asks which mechanisms determine whether gene editing leads to structural inequality or remains subject to effective governance. It introduces the GGC–CGA–M framework, integrating three elements: initial inequality of access (GGC), intergenerational accumulation of genetic advantage (CGA), and governance capacity (M). The analysis shows that when initial inequality is high and governance capacity is weak, biological inequality intensifies endogenously. By proposing five policy principles and applying the framework exploratorily to Iran, the article argues that the future of human gene editing depends less on technological progress than on the quality of governance.

Keywords: Genome Editing, Bio-Inequality, Science Governance, M-Index, Intergenerational Transmission, Public Policy, Iran.

Citation: Ashouri, Ahmad (2026). Governing Gene Editing in the Age of Hyper-Evolution: An Analytical Framework for Assessing Biological Inequality and Policy Design in Iran. *Iranian Journal of Public Policy*, 12 (2), 203-219.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2026.107811>

Published by University of Tehran



This Work Is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)



مقاله پژوهشی

حکمرانی ویرایش ژن در عصر فرافرگشت: چارچوب تحلیلی برای سنجش نابرابری زیستی و معماری سیاستی ایران

احمد عاشوری 

استاد کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

* رایانامه نویسنده مسئول: ashouri@ut.ac.ir

 <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2026.107811>

تاریخ دریافت: ۲۶ اسفند ۱۴۰۴
تاریخ پذیرش: ۱ اردیبهشت ۱۴۰۵

چکیده

ویرایش ژن انسانی، به‌ویژه در سطح خط زایشی، به‌تدریج از درمان بیماری‌های وراثتی فراتر می‌رود و به ابزاری بالقوه برای ارتقای ویژگی‌های نسل‌های آینده تبدیل می‌شود. این گذار، در غیاب حکمرانی پیش‌نگر، می‌تواند نابرابری زیستی را تعمیق کرده و رقابت ژنتیکی میان گروه‌ها یا دولت‌ها را فعال سازد. پرسش محوری مقاله آن است که چه سازوکارهایی مسیر تکاملی ویرایش ژن انسانی را تعیین می‌کنند و چه عواملی مشخص می‌سازند این فناوری به نابرابری ساختاری منتهی شود یا در چارچوب حکمرانی مؤثر مهار گردد. برای پاسخ به این پرسش، چارچوب سه‌مؤلفه‌ای نابرابری-انباشت-حکمرانی معرفی می‌شود که شامل: (۱) شکاف دسترسی ژنتیکی - میزان نابرابری اولیه در دسترسی به ویرایش ژن، (۲) انباشت میان‌نسلی - فرآیندی که طی آن مزایای ژنتیکی به نسل‌های بعد منتقل و تقویت می‌شوند و (۳) ظرفیت حکمرانی - توان نهادی دولت‌ها و جامعه بین‌المللی در تنظیم این فناوری. تحلیل نظری نشان می‌دهد در شرایط شکاف دسترسی بالا و ظرفیت حکمرانی پایین، نابرابری زیستی به‌صورت درون‌زا تشدید می‌شود. مقاله با پیشنهاد پنج اصل سیاستی و بررسی موردی ایران، نشان می‌دهد مسیر آینده ویرایش ژن بیش از آنکه به فناوری وابسته باشد، به کیفیت حکمرانی بستگی دارد.

واژگان کلیدی: ویرایش ژن، نابرابری زیستی، حکمرانی علم، ظرفیت حکمرانی، انتقال میان‌نسلی، سیاستگذاری عمومی، ایران.

استناد: عاشوری، احمد (۱۴۰۵). حکمرانی ویرایش ژن در عصر فرافرگشت: چارچوب تحلیلی برای سنجش نابرابری زیستی و معماری سیاستی ایران.

فصلنامه سیاستگذاری عمومی، ۱۲ (۲)، ۲۰۳-۲۱۹.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jppolicy.2026.107811>



ناشر: دانشگاه تهران

۱. مقدمه

۱-۱. زمینه مسئله

زیست‌فناوری در دهه اخیر با شتابی بی‌سابقه پیش رفته و مرز میان پژوهش علمی و امکان بالینی را به‌طور بنیادین دگرگون ساخته است (Biotechnology Development Staff, 2021-2023). ویرایش ژن انسانی — چه در قالب درمان بیماری‌های وراثتی و چه در قالب ارتقای ویژگی‌های شناختی یا فیزیکی — دیگر صرفاً چشم‌اندازی آینده‌نگرانه نیست، بلکه به گزینه‌ای قابل تصور در افق میان‌مدت تبدیل شده است (Doudna & Charpentier, 2014; Lu et al., 2020). کاهش هزینه‌ها، افزایش دقت فناوری‌های نوین ویرایش ژن و گسترش فناوری‌های کمک‌باروری، فاصله میان آزمایشگاه و بالین را به‌طور مستمر کاهش داده‌اند (Kim et al., 2017; Zhou et al., 2019). این جهش فناورانه، هم‌زمان یک مسئله بنیادین سیاستی را پیش می‌کشد. اگر امکان ارتقای ژنتیکی به‌صورت نامتوازن توزیع شود و این مزیت قابلیت انتقال بین‌نسلی داشته باشد، اختلاف‌های کوچک اولیه می‌توانند در گذر نسل‌ها به شکاف‌هایی پایدار و ساختاری بدل شوند. ازاین‌رو، پرسش محوری امروز نه آن است که «چه چیزی ممکن شده است»، بلکه آن است که «این امکان چگونه می‌تواند الگوهای نابرابری و ظرفیت‌های حکمرانی را دگرگون کند». دقیقاً از همین نقطه، ضرورت یک صورت‌بندی نظری برای فهم پیامدهای توزیعی و نهادی این فناوری آشکار می‌شود. این مقاله در چنین بستری شکل گرفته و می‌کوشد مسئله سیاستی ناشی از گسترش ویرایش ژن انسانی را در قالب یک چارچوب نظری-تحلیلی صورت‌بندی کند؛ چارچوبی که بتواند پویایی‌های نابرابری و نقش حکمرانی را به‌طور هم‌زمان و منسجم مورد بررسی قرار دهد.

۱-۲. اهمیت موضوع

ویرایش ژن انسانی دارای ویژگی منحصربه‌فردی است که آن را از بسیاری از فناوری‌های نوظهور متمایز می‌کند: قابلیت انتقال بین‌نسلی. هر مداخله در سطح خط زایشی نه‌تنها زندگی یک فرد، بلکه مسیر زیستی نسل‌های آینده را تغییر می‌دهد و پیامدهای آن در افق‌های زمانی بلندمدت انباشته می‌شود (Sparrow, 2019). همین ویژگی، ویرایش ژن را به‌طور مستقیم به حوزه سیاست عمومی پیوند می‌زند؛ زیرا تصمیم‌های امروز می‌توانند الگوی توزیع فرصت‌ها و نابرابری‌های فردا را رقم بزنند. این دینامیک، جامعه را در برابر دو مسیر بالقوه قرار می‌دهد. از یک‌سو، ارتقای ژنتیکی می‌تواند بار بیماری‌های وراثتی را کاهش دهد و کیفیت زندگی را به‌طور معناداری بهبود بخشد. از سوی دیگر، اگر دسترسی به این فناوری نابرابر باشد، مزیت ژنتیکی قابل‌وراثت می‌تواند به نابرابری‌ای ساختاری و دیرپا تبدیل شود؛ نابرابری‌ای که نه بر درآمد یا آموزش، بلکه بر ارث ژنتیکی ارتقایافته استوار است. ازاین‌رو، مسئله اصلی در حوزه ویرایش ژن نه امکان‌پذیری علمی، بلکه چگونگی طراحی معماری حکمرانی برای مدیریت پیامدهای توزیعی، اخلاقی و نهادی این فناوری است (NASEM, 2017; Jasanoff, 2019). پرسش واقعی آن است که آیا نظام‌های حکمرانی می‌توانند این فناوری را به ابزاری برای کاهش رنج و ارتقای سلامت جمعی بدل کنند، یا اینکه در غیاب طراحی نهادی مناسب، ویرایش ژن به سازوکاری برای بازتولید نابرابری تبدیل خواهد شد. اهمیت این لحظه در آن است که فرصت سیاست‌گذاری پیش‌گیرانه محدود است؛ تصمیم‌هایی که در چند سال آینده اتخاذ می‌شوند، مسیر بلندمدت نابرابری زیستی را تعیین خواهند کرد.

۱-۳. شکاف پژوهشی

ادبیات موجود درباره ویرایش ژن انسانی را می‌توان در سه جریان اصلی صورت‌بندی کرد. جریان نخست، ادبیات اخلاق زیستی است که بر پرسش‌های هنجاری بنیادین، مرز میان درمان و ارتقاء، و مسئولیت اخلاقی در برابر نسل‌های آینده تمرکز دارد

(Sandel, 2007; Habermas, 2003). این بدنه نقش مهمی در حساس‌سازی نظری و صورت‌بندی دغدغه‌های اخلاقی ایفا کرده است، اما تمرکز آن عمدتاً بر ارزیابی‌های هنجاری فردمحور باقی مانده و ابزار تحلیلی لازم برای بررسی پیامدهای توزیعی و ساختاری در سطح جمعیت را توسعه نداده است. در نتیجه، اخلاق زیستی می‌تواند نشان دهد «چه چیزی نباید انجام شود»، اما قادر نیست توضیح دهد نابرابری ژنتیکی چگونه شکل می‌گیرد، انباشته می‌شود و در طول نسل‌ها تثبیت می‌گردد. جریان دوم، ادبیات زیست‌فناوری مولکولی است که بر کارایی، دقت و ایمنی سامانه‌های ویرایش ژن تمرکز دارد (Doudna & Charpentier, 2014; Kim et al., 2017). این جریان نقش تعیین‌کننده‌ای در تبدیل ویرایش ژن از یک امکان آزمایشگاهی به یک فناوری بالقوه بالینی ایفا کرده است. با این حال، تمرکز آن تقریباً به‌طور کامل بر «خود فناوری» معطوف است و نه بر «مسیر اجتماعی فناوری». در نتیجه، این ادبیات توضیح نمی‌دهد دسترسی به ویرایش ژن چگونه میان گروه‌های اجتماعی توزیع می‌شود، یا چگونه پیشرفت فنی می‌تواند—در غیاب مداخله نهادی—به تعمیق نابرابری و شکل‌گیری مزیت‌های ژنتیکی پایدار بینجامد. جریان سوم، ادبیات حکمرانی علم است که مفاهیمی چون نوآوری مسئولانه، اقتدار تنظیم‌گری و شفافیت را در کانون توجه قرار می‌دهد (Jasanoff, 2019; Stilgoe, 2020). این ادبیات نسبت به اخلاق زیستی و زیست‌فناوری به سیاست‌گذاری نزدیک‌تر است و نقش نهادها را در هدایت مسیر فناوری برجسته می‌کند. با این حال، تمرکز آن عمدتاً بر فرایندهای تصمیم‌گیری، مشروعیت نهادی و مدیریت ریسک‌های کوتاه‌مدت است و کمتر به پیامدهای تجمعی و بین‌نسلی مداخلات فناورانه می‌پردازد. آثار کلاسیک سیاست‌گذاری عمومی (Majone, 1997; Hood, 2011; Ostrom, 2010) هرچند اصول مهمی برای طراحی و کارکرد نهادها ارائه می‌دهند، اما برای تحلیل پویایی نابرابری زیستی — به‌ویژه در شرایطی که مزیت ژنتیکی قابلیت انتقال بین‌نسلی دارد — فاقد زبان تحلیلی و ابزار مدل‌سازی هستند. در نتیجه، این ادبیات می‌تواند چگونگی حکمرانی را توصیف کند، اما قادر نیست نشان دهد حکمرانی چگونه می‌تواند مسیر انباشت نابرابری زیستی را در طول نسل‌ها مهار یا معکوس سازد. شکاف اصلی دقیقاً در همین نقطه آشکار می‌شود: هیچ‌یک از این سه جریان نظری مدلی ارائه نمی‌کنند که بتواند به‌طور هم‌زمان (۱) نابرابری اولیه دسترسی، (۲) انباشت بین‌نسلی مزیت ژنتیکی و (۳) نقش ظرفیت حکمرانی در تعدیل یا مهار این پویایی‌ها را در قالب یک دستگاه نظری منسجم و مشخص تحلیل کند. مدل «چارچوب نابرابری-انباشت-حکمرانی» که در این مقاله معرفی می‌شود، پاسخی مستقیم به این خلأ است. این چارچوب با پیوند دادن سطح توزیع اولیه، منطق انباشت بین‌نسلی و کیفیت حکمرانی، امکان تحلیل ساختاری نابرابری زیستی را فراهم می‌سازد و با معرفی شاخص M (ظرفیت حکمرانی)، زمینه‌ای عملی برای سنجش‌پذیری نهادی و استخراج اصول سیاستی مبتنی بر شواهد ایجاد می‌کند.

۴-۱. پرسش‌های پژوهش

این پژوهش بر یک پرسش اصلی و سه پرسش فرعی استوار است که همگی در چارچوب نظری چارچوب نابرابری-انباشت-حکمرانی (GGC-CGA-M) صورت‌بندی شده‌اند. پرسش اصلی آن است که چه سازوکارهای توزیعی و نهادی مسیر تکاملی ویرایش ژن انسانی را شکل می‌دهند، و این سازوکارها چگونه تعیین می‌کنند که این فناوری به نابرابری زیستی پایدار بینجامد یا در چارچوب حکمرانی مؤثر مهار شود. پرسش‌های فرعی عبارت‌اند از: ۱. نابرابری اولیه دسترسی (GGC) و انباشت بین‌نسلی مزیت ژنتیکی (CGA) چگونه در شکل‌گیری و تشدید شکاف زیستی نقش ایفا می‌کنند؟ ۲. ظرفیت حکمرانی ژنتیک، در قالب ابعاد سه‌گانه شاخص M، چگونه می‌تواند مسیر تکاملی شکاف زیستی را تعدیل، کنترل یا معکوس سازد؟ ۳. به‌کارگیری چارچوب نابرابری-انباشت-حکمرانی در بستر ایران چه تصویری از وضعیت نهادی موجود و گزینه‌های سیاستی پیش رو ارائه می‌دهد؟ این پرسش‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که میان سطح نظری و سیاست‌گذاری، و نیز میان تحلیل کلان و مطالعه موردی، پیوندی تحلیلی و منسجم برقرار سازند.

مفاهیم کلیدی چارچوب تحلیلی نابرابری-انباشت-حکمرانی

چارچوب تحلیلی مقاله بر سه مفهوم اصلی استوار است که هر یک از بدنه‌ای متمایز از ادبیات نظری الهام گرفته‌اند. نابرابری اولیه دسترسی (GGC) شاخصی است برای سنجش میزان نابرابری واقعی گروه‌های اجتماعی در دسترسی به فناوری ویرایش ژن در نقطه ورود. تمرکز این شاخص بر «احتمال دسترسی واقعی» قرار دارد، نه بر توان پرداخت یا ترجیحات فردی. این مفهوم از ادبیات نابرابری فرصت الهام گرفته شده است (Roemer, 1998). انتقال‌پذیری مزیت ژنتیکی (CGA) به سازوکاری اشاره دارد که طی آن مزیت ژنتیکی اولیه در طول نسل‌ها انباشته می‌شود و الگویی تجمعی، مشابه مدل‌های انتقال سرمایه انسانی، از خود نشان می‌دهد. این مفهوم بر آثار کلاسیک مربوط به انتقال میان‌نسلی مزیت استوار است (Bowles & Gintis, 2002; Becker & Tomes, 1979). شاخص حکمرانی ژن (M-Index) شاخصی ترکیبی برای سنجش کیفیت حکمرانی ژنتیک است که سه بُعد بازدارندگی، شفافیت و عدالت در دسترسی را دربر می‌گیرد. ضعف معنادار در هر یک از این ابعاد، کل ظرفیت حکمرانی را تضعیف می‌کند. این شاخص از ادبیات تنظیم‌گری و حکمرانی علم الهام گرفته شده است (Majone, 1997; Jasanoff, 2019).

۱-۵. رویکرد روش‌شناختی

این پژوهش از رویکرد مدل‌سازی نظری-تحلیلی بهره می‌گیرد. هدف اصلی آن توضیح پویا نابرابری زیستی و تبیین نقش حکمرانی در تعدیل این فرایند است؛ نه استخراج روابط آماری یا آزمون تجربی. چارچوب پیشنهادی-متشکل از CGA، GGC و M به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند متغیرهای کلیدی را در یک ساختار منسجم گردآوری کند و امکان تحلیل مقایسه‌ای و آینده‌پژوهانه را فراهم آورد. انتخاب این روش بر دو منطق استوار است. نخست، فقدان داده‌های تجربی درباره ویرایش ژن خط زایشی که در حال حاضر امکان ساخت مدل‌های آماری را محدود می‌کند. دوم، نیاز به یک چارچوب اولیه که بتواند پژوهش‌های آینده-از جمله کالبراسیون داده‌ای، سنجش‌پذیری و تحلیل سناریو-را جهت‌دهی کند. بر این اساس، مدل ماهیتی مفهومی دارد، اما به گونه‌ای صورت‌بندی شده است که امکان عملیاتی‌سازی در آینده را نیز فراهم می‌سازد؛ برای مثال از طریق تعریف شاخص‌هایی برای ابعاد M یا گردآوری منظم داده‌ها درباره دسترسی، شفافیت و بازدارندگی. در بخش مربوط به ایران نیز از تحلیل اکتشافی و مقایسه تطبیقی استفاده شده است تا تصویری نسبی از ظرفیت حکمرانی و شکاف‌های نهادی ارائه شود، بی‌آنکه ادعای قطعیت تجربی مطرح گردد.

۱-۶. ساختار مقاله

مقاله در هفت بخش سامان یافته است. بخش دوم به مرور نظام‌مند ادبیات موجود می‌پردازد و شکاف مفهومی آن را آشکار می‌سازد. بخش سوم چارچوب نظری «نابرابری-انباشت-حکمرانی» را معرفی کرده و سازوکارهای شکل‌گیری شکاف زیستی و نقش تعدیل‌کننده حکمرانی را تبیین می‌کند. بخش چهارم، سه خطر ساختاری ناشی از نابرابری ژنتیکی را در پیوند با مدل نظری مورد تحلیل قرار می‌دهد. بر پایه این تحلیل، بخش پنجم پنج اصل سیاستی برای حکمرانی پایدار ژنتیک ارائه می‌کند. بخش ششم به بررسی کاربرست اکتشافی مدل در بستر ایران اختصاص دارد و ظرفیت‌های نهادی و مسیرهای اصلاحی محتمل را می‌سنجد. در نهایت، بخش هفتم با جمع‌بندی یافته‌ها، پیامدهای سیاستی را استخراج کرده و چشم‌انداز پژوهش‌های آینده را ترسیم می‌کند.

۲. مرور ادبیات: خطوط نظری و شکاف مفهومی

ادبیات مرتبط با ویرایش ژن انسانی طی چهار دهه گذشته به تدریج شکل گرفته و امروزه در قالب سه جریان اصلی قابل تمایز است: اخلاق زیستی، زیست فناوری مولکولی، و حکمرانی علم. هر یک از این جریان‌ها بینش‌های معتبری ارائه کرده‌اند، اما در تبیین پویایی نابرابری زیستی — به‌ویژه در نسبت آن با ظرفیت‌های نهادی — با کاستی‌های جدی مواجه‌اند. افزون بر این سه بدنه، مجموعه‌ای از پژوهش‌ها در حوزه نابرابری و انتقال میان‌نسلی وجود دارد که اگرچه به‌طور مستقیم به ژن‌ویرایش نمی‌پردازند، برای فهم منطق انباشتی و بازتولیدشونده شکاف‌های ژنتیکی اهمیت بنیادین دارند. این بخش با مرور انتقادی چهار جریان یادشده، شکاف مفهومی میان آن‌ها را برجسته می‌سازد.

۲-۱. اخلاق زیستی و مرز درمان — ارتقا

ادبیات اخلاق زیستی نخستین بستری بود که ویرایش ژن انسانی در آن به‌طور جدی مسئله‌مند شد. تمرکز اصلی این حوزه بر پرسش‌های هنجاری بنیادین است: چه مداخله‌ای را می‌توان «درمان» تلقی کرد؟ مرز میان بهبود و ارتقا کجاست؟ و انسان امروز چه مسئولیتی در قبال نسل‌های آینده بر عهده دارد؟ آثاری همچون (2003) Habermas و (2007) Sandel با برجسته کردن این پرسش‌ها، حساسیت‌های نظری مهمی نسبت به پیامدهای اخلاقی ارتقای ژنتیکی ایجاد کرده‌اند و نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌دادن به چارچوب‌های هنجاری این بحث داشته‌اند. با این حال، ادبیات اخلاق زیستی در تحلیل پیامدهای توزیعی و ساختاری ویرایش ژن با محدودیت‌های جدی روبه‌روست. این بدنه نمی‌تواند نشان دهد نابرابری اولیه در دسترسی چگونه شکل می‌گیرد، مزیت‌های ژنتیکی چگونه در طول نسل‌ها انباشته می‌شوند، یا این فرایندها چه نسبت معناداری با ساختارهای نهادی دارند. افزون بر این، زبان و ابزار تحلیلی لازم برای سنجش ظرفیت نهادی — آن‌گونه که در شاخص M مورد نیاز است — در این ادبیات توسعه نیافته است. اخلاق زیستی اگرچه بستری هنجاری و ضروری برای فهم مخاطرات ویرایش ژن فراهم می‌کند، اما به‌تنهایی قادر به توضیح پویایی‌های نابرابری زیستی و سازوکارهای بازتولید آن نیست.

۲-۲. زیست فناوری مولکولی و پیشرفت‌های فنی کریسپر

جریان دوم بر بنیان‌های علمی و فنی ویرایش ژن متمرکز است. پژوهش‌های مرتبط با قیچی ژنتیکی (کریسپر) از بهبود دقت برش و کاهش خطاهای خارج از هدف گرفته تا پیشرفت‌های حاصل در مداخلات جینی — نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش کارآمدی و قابلیت اتکای این فناوری داشته‌اند (Doudna & Charpentier, 2014; Kim et al., 2017). هم‌زمان، توسعه ابزارهای درمانی و تشخیصی ژن‌محور، مسیر انتقال این دستاوردها از آزمایشگاه به بالین را به‌طور محسوسی هموار کرده است. با این همه، این بدنه پژوهشی تقریباً نسبت به پیامدهای توزیعی و اجتماعی فناوری بی‌اعتناست. ادبیات زیست فناوری به‌ندرت توضیح می‌دهد دسترسی به ویرایش ژن چگونه میان گروه‌های مختلف اجتماعی توزیع می‌شود یا فرایندهای تجاری‌سازی چه اثری بر تعمیق یا تعدیل شکاف‌ها دارند. تمرکز غالب این جریان بر «خود فناوری» است، نه بر «مسیر اجتماعی فناوری»؛ از این‌رو، ابزار مفهومی لازم برای تحلیل اینکه چرا شکاف اولیه دسترسی می‌تواند از همان نقطه آغاز بالا باشد، در آن توسعه نیافته است.

۲-۳. حکمرانی علم و چالش سنجش‌پذیری

جریان سوم به ادبیات حکمرانی علم تعلق دارد؛ حوزه‌ای که بر مفاهیمی همچون نوآوری مسئولانه، اقتدار تنظیم‌گری و نقش شفافیت در هدایت فناوری تمرکز می‌کند (Jasanoff, 2019; Stilgoe, 2020). این جریان، در قیاس با اخلاق زیستی و زیست فناوری، پیوند نزدیک‌تری با سیاستگذاری عمومی دارد و به‌صراحت بر اهمیت نهادها در جهت‌دهی به مسیرهای فناوریانه

تأکید می‌گذارد. در همین راستا، آثار کلاسیک سیاستگذاری عمومی — از جمله (Majone (1997)، Ostrom و Hood (2011) — اصول و منطق‌هایی برای طراحی و کارکرد نهادهای تنظیم‌گر فراهم کرده‌اند. با وجود اهمیت مفاهیمی که این ادبیات مطرح می‌کند، ابزارهای سنجش‌پذیر و تحلیلی لازم برای واکاوی پویا نابرابری زیستی در آن به‌طور کافی توسعه نیافته است. این جریان نمی‌تواند به‌صورت نظام‌مند نشان دهد ظرفیت نهادی یک کشور تا چه حد برای مهار شکاف ژنتیکی کفایت دارد، یا چه سطوحی از شفافیت و بازدارندگی قادر است از انباشت میان‌نسلی مزیت‌های ژنتیکی جلوگیری کند. مفاهیمی مانند «نوآوری مسئولانه» و «شفافیت» بی‌تردید ضروری‌اند، اما در غیاب شاخص‌های عملیاتی و مدل‌های ساختاری، توان توضیح پویایی‌های تجمعی و میان‌نسلی را ندارند. در نتیجه، ادبیات حکمرانی علم بیش از آنکه زبانی برای تحلیل پویا فراهم آورد، در سطح توصیف هنجاری و نهادی باقی می‌ماند.

۲-۴. نابرابری زیستی و انتقال میان‌نسلی

ادبیات اقتصاد سیاسی، جامعه‌شناسی و مطالعات نابرابری اگرچه به‌طور مستقیم بر ویرایش ژن متمرکز نیست، مفاهیمی در اختیار می‌گذارد که برای فهم شکاف زیستی حیاتی‌اند. آثاری چون (Becker (1975)، Bowles & Gintis (2002) و Piketty (2014) نشان می‌دهند هر نوع مزیت قابل‌وراثت — فارغ از منشأ آن — می‌تواند شکاف‌های کوچک اولیه را در گذر زمان به نابرابری‌های پایدار و ساختاری تبدیل کند. ایده محوری در این ادبیات آن است که مزیت موروثی ماهیتی تجمعی دارد و هم‌زمان، با هر نسل، هزینه بازگشت به وضعیت متعادل افزایش می‌یابد. این بدنه نظری برای صورت‌بندی مفهوم CGA نقشی تعیین‌کننده دارد؛ شاخصی مفهومی که انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی را توضیح می‌دهد. منطق اصلی CGA از همین آثار الهام می‌گیرد: اگر نرخ انتقال مزیت (t) مثبت باشد، شکاف زیستی تمایل طبیعی به رشد فزاینده دارد، مگر آنکه مداخله‌ای نهادی بتواند این مسیر را مهار کند.

۲-۵. ادبیات ایران و چالش ظرفیت حکمرانی

پژوهش‌های مرتبط با ایران عمدتاً حول دو محور شکل گرفته‌اند: اخلاق زیستی در چارچوب فقه و اندیشه اسلامی، و توسعه فناوری‌های کمک‌باروری و ژنتیک پزشکی (Sadeghi, 2019; Mousavi Meshkini, 2022). این مطالعات نشان می‌دهند ایران از منظر فنی، به‌ویژه در حوزه باروری خارج از رحم (IVF) و پژوهش‌های ژنتیکی، جایگاهی پیشرو در سطح منطقه دارد (Ministry of Health and Medical Education, 2022). در کنار این توانمندی‌ها، مجموعه‌ای از چالش‌های حکمرانی نیز به‌طور مکرر برجسته شده‌اند؛ از جمله فقدان قانون‌گذاری صریح درباره ویرایش ژن خط زایشی، نبود ثبت ملی، و توزیع نابرابر دسترسی به خدمات پیشرفته ژنتیکی. با وجود ارزش توصیفی این ادبیات، ابزار تحلیلی لازم برای سنجش ظرفیت نهادی در آن توسعه نیافته است. این مطالعات توضیح نمی‌دهند چرا مؤلفه‌هایی چون بازدارندگی، شفافیت و عدالت برای حکمرانی ژنتیک حیاتی‌اند، یا چگونه می‌توان آن‌ها را در قالب یک چارچوب منسجم و قابل تحلیل کنار هم نشان داد. از این رو، برای درک مسیر محتمل ایران در مواجهه با عصر ویرایش ژن، اتکا به یک چارچوب نظری ساختاری اجتناب‌ناپذیر است.

۲-۶. جمع‌بندی شکاف پژوهشی

جریان‌های مرور شده هر یک بخشی از مسئله ویرایش ژن را روشن می‌کنند، اما هیچ‌کدام به‌تنهایی قادر نیستند پویا شکاف زیستی را در مقیاس میان‌نسلی توضیح دهند. اخلاق زیستی زمینه هنجاری لازم را فراهم می‌کند، اما از ابزار تحلیلی محروم است. زیست‌فناوری مولکولی پیشرفت‌های فنی را شرح می‌دهد، اما نسبت به پیامدهای توزیعی آن‌ها خاموش می‌ماند. ادبیات حکمرانی

علم بر نقش نهادها تأکید می‌گذارد، اما سازوکار سنجش ظرفیت نهادی را صورت‌بندی نمی‌کند. ادبیات نابرابری میان‌نسلی منطق انباشت و بازتولید مزیت‌های موروثی را توضیح می‌دهد، اما این منطق را به‌طور مستقیم به فناوری‌های ژنتیکی پیوند نمی‌زند. و ادبیات ایران، هرچند تصویر روشنی از وضعیت موجود ارائه می‌کند، فاقد دستگاه تحلیلی لازم برای پیش‌بینی مسیر آینده است. مدل $GGC-CGA-M$ با هدف پرکردن این خلأ شکل گرفته است. این چارچوب امکان تحلیل هم‌زمان نابرابری اولیه، انباشت میان‌نسلی مزیت‌های زیستی و ظرفیت حکمرانی را فراهم می‌سازد و پلی مفهومی میان اخلاق زیستی، زیست‌فناوری، حکمرانی علم و اقتصاد سیاسی بازتولید نابرابری‌های موروثی برقرار می‌کند. از این منظر، مدل پیشنهادی نقطه عزیمت مناسبی برای استخراج اصول سیاستی و تحلیل سناریوهای محتمل در عصر ویرایش ژن به دست می‌دهد.

۳. چارچوب نظری: مدل شکاف زیستی و حکمرانی ژنتیک

۳-۱. منطق چارچوب

این بخش مدلی مفهومی-تحلیلی ارائه می‌کند که هدف آن روشن‌ساختن پویایی شکل‌گیری نابرابری ژنتیکی در مقیاس میان‌نسلی است؛ از مسیرهای آغازین شکل‌گیری گرفته تا عوامل تسریع‌کننده و نقش حکمرانی در تغییر یا مهار این روند. منطق بنیادی مدل ساده است، اما پیامدهای آن عمیق‌اند. اگر در لحظه ورود فناوری ویرایش ژن به جامعه، نابرابری اولیه دسترسی بالا باشد و اگر مزیت‌های ژنتیکی قابلیت انتقال میان‌نسلی داشته باشند، شکاف اولیه در طول زمان به‌صورت تجمعی و شتاب‌گیر رشد می‌کند و به فرایندی از انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی (CGA) بدل می‌شود. با این حال، این مسیر اجتناب‌ناپذیر نیست، سطح و کیفیت حکمرانی ژن — که با متغیر M نشان داده می‌شود — می‌تواند این روند را کند سازد، در سطحی معین تثبیت کند یا حتی مسیر آن را معکوس نماید. از این منظر، شکاف زیستی پیامد مستقیم و خطی فناوری نیست، بلکه حاصل برهم‌کنش سه متغیر ساختاری است: نابرابری اولیه دسترسی (GGC)، انباشت میان‌نسلی مزیت‌های ژنتیکی (CGA) و ظرفیت حکمرانی (M). این چارچوب، مسئله ویرایش ژن را از سطحی صرفاً اخلاق‌محور یا تکنیکی فراتر می‌برد و آن را در سطح تحلیل دینامیک‌های ساختاری و میان‌نسلی صورت‌بندی می‌کند.

۳-۲. مؤلفه نخست: ضریب شکاف ژنتیک اولیه (GGC)

نسخه پولیش‌شده و یک‌دست با لحن مقاله، با حداقل دست‌کاری و حفظ دقیق معنا، به این صورت پیشنهاد می‌شود:

نقطه آغاز مدل، ضریب شکاف ژنتیک اولیه است؛ شاخصی که میزان نابرابری در دسترسی واقعی گروه‌های اجتماعی به فناوری ویرایش ژن را در لحظه ورود آن به جامعه می‌سنجد.

مفهوم GGC بر نسبت احتمال دسترسی واقعی گروه‌های برخوردار به گروه‌های کم‌برخوردار استوار است. ویژگی متمایز این شاخص آن است که نه توان مالی بالقوه و نه میل فردی به ارتقا را اندازه‌گیری می‌کند، بلکه به‌طور مشخص بر «احتمال دسترسی واقعی» تمرکز دارد. همین ویژگی، GGC را مستقیماً به حوزه سیاستگذاری پیوند می‌زند، زیرا مداخلات سیاستی دقیقاً از طریق تغییر این احتمال عمل می‌کنند.

تفسیر شاخص

52. $GGC = 1$ بیانگر دسترسی برابر است.

53. $GGC > 1$ نشان‌دهنده وجود شکاف اولیه و آغاز واگرایی بالقوه است.

نسخه پولیش شده، دقیق و هم‌لحن با متن پیشین، با حداقل مداخله:
نابرابری اولیه در دسترسی شرط لازم برای شکل‌گیری شکاف زیستی در مقیاس میان‌نسلی به‌شمار می‌آید.

۳-۳. مؤلفه دوم: انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی (CGA)

انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی بازنمایی مفهومی فرایندی است که طی آن شکاف اولیه دسترسی، در نتیجه انتقال به نسل‌های بعدی، تشدید و تثبیت می‌شود. این مؤلفه از منطق تجمعی پیروی می‌کند: میزان انباشت در هر نسل برابر است با انباشت نسل پیشین ضرب در «یک بعلاوه نرخ انتقال میان‌نسلی». این نرخ (r) پارامتری الهام‌گرفته از ادبیات سرمایه‌انسانی است که معمولاً در بازه‌ای میان ۰.۰۴ تا ۰.۰۷ برآورد می‌شود. هرچند این مقادیر در زمینه ویرایش ژن هنوز از قطعیت تجربی برخوردار نیستند، نقش مفهومی r در چارچوب مدل روشن و تعیین‌کننده است. نکته کانونی مدل در همین‌جا قرار دارد: حتی اگر شکاف اولیه کوچک باشد، وجود نرخ انتقال مثبت آن را به مسیری شتاب‌گیر و شبه‌نمایی سوق می‌دهد، مگر آنکه متغیری نهادی بتواند این روند را مهار کند. در شرایطی که GGC بزرگ‌تر از یک و نرخ انتقال مثبت باشد، شکاف ژنتیکی به‌صورت تجمعی افزایش می‌یابد.

۳-۴. مؤلفه سوم: ضریب نابرابری دسترسی (M-Index)

سومین مؤلفه مدل، کیفیت حکمرانی ژنتیک را در قالب یک شاخص ترکیبی خلاصه می‌کند که با عنوان M-Index معرفی می‌شود. این شاخص سه بُعد حداقلی اما حیاتی حکمرانی را در بر می‌گیرد: (۱) بازدارندگی، قابلیت کنترل و امکان پیگرد؛ (۲) شفافیت، رصدپذیری و گزارش‌دهی؛ (۳) عدالت در دسترسی. شاخص M از میانگین هندسی سه بُعد بازدارندگی، شفافیت و عدالت محاسبه می‌شود. انتخاب میانگین هندسی عامدانه است؛ زیرا ضعف جدی در هر یک از این ابعاد می‌تواند کل نظام حکمرانی را تضعیف کند. این ویژگی، حساسیت ذاتی فناوری ویرایش ژن را بازتاب می‌دهد؛ فناوری‌ای که آسیب‌پذیری در یک نقطه، قادر است کل معماری حکمرانی آن را بی‌اثر سازد. انتخاب این سه بُعد نیز از همین منطق پیروی می‌کند. بدون بازدارندگی، تخلف، فرار نظارتی و شکل‌گیری بازارهای غیررسمی محتمل می‌شود؛ بدون شفافیت، بی‌اعتمادی اجتماعی افزایش می‌یابد و منازعات سیاسی مستعد رادیکال‌شدن می‌شوند؛ و بدون عدالت، نابرابری ساختاری تشدید شده و حرکت به‌سوی لایه‌بندی زیستی شکل می‌گیرد. در این چارچوب، شاخص M نقش یک متغیر تعدیل‌کننده را ایفا می‌کند؛ بدین معنا که مسیر و شدت انباشت میان‌نسلی مزیت‌های ژنتیکی (CGA) به سطح و کیفیت حکمرانی ژن وابسته است.

۳-۵. حلقه نظری مدل

در یک نگاه کلی، مدل دو مسیر متمایز را ترسیم می‌کند. مسیر نخست، مسیر رشد شکاف است: افزایش ضریب شکاف ژنتیک اولیه (GGC) به افزایش انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی (CGA) می‌انجامد و در نهایت به لایه‌بندی زیستی منتهی می‌شود. مسیر دوم، مسیر مهار شکاف است: ارتقای شاخص حکمرانی ژن (M) می‌تواند شدت CGA را کاهش دهد یا رفتار آن را از حالت شتاب‌گیر به مسیری خطی و کنترل‌پذیر منتقل کند و بدین‌ترتیب به پایداری بینجامد. نکته بنیادین آن است که CGA ذاتاً گرایشی نامی دارد. هدف سیاست‌گذاری حذف کامل این فرایند نیست، بلکه تغییر شکل آن است: انتقال CGA از رشد نامی به رشد خطی و سپس به سطحی تثبیت‌شده. در این معنا، سیاست‌گذاری نه متغیری حاشیه‌ای یا مداخله‌ای مقطعی، بلکه پارامتری ساختاری است که مسیر تکاملی شکاف زیستی را تعیین می‌کند.

۳-۶. محدودیت‌ها و قلمرو کاربرد

مدل حاضر ماهیتی مفهومی دارد و با هدف روشن‌سازی سازوکارهای ساختاری طراحی شده است، نه ارائه برآوردهای تجربی. از این رو، روابط میان متغیرها به صورت مفهومی صورت‌بندی شده‌اند و بر داده‌های تجربی تکیه ندارند. مقادیر نرخ انتقال و آستانه‌های مرتبط با شاخص M نمونه‌وار تلقی می‌شوند و در پژوهش‌های آتی نیازمند کالیبراسیون و آزمون تجربی‌اند. چارچوب پیشنهادی آگاهانه بطور حداقلی طراحی شده و تنها متغیرهایی را دربر می‌گیرد که برای توضیح پویا شکاف زیستی ضروری‌اند. بدیهی است که پویایی‌های فناورانه و تحولات نهادی می‌توانند در آینده برخی از پارامترهای مدل را دستخوش تغییر کنند. با این حال، می‌توان این مدل را نوعی صورت‌بندی حداقلی دانست؛ به اندازه‌ای ساده که قابلیت کاربست تحلیلی داشته باشد، و به اندازه‌ای ساختاری که بتواند منطق درونی شکل‌گیری و تداوم شکاف زیستی را توضیح دهد.

۴. تحلیل خطرات ساختاری: سه پیامد نظام‌مند شکاف ژنتیکی

ورود و ویرایش ژن به سطح خط زایشی صرفاً یک تحول علمی نیست، بلکه آغاز یک پویا توزیعی جدید است. در جامعه‌ای که ضریب شکاف ژنتیک اولیه در نقطه شروع بالا باشد، این نابرابری از طریق انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی تقویت شود و هم‌زمان ظرفیت حکمرانی در سطحی پایین باقی بماند، سه پیامد نظام‌مند تقریباً به صورت خودکار فعال می‌شوند. این پیامدها نه تصادفی‌اند و نه صرفاً اخلاقی، بلکه مستقیماً از منطق درونی مدل برمی‌خیزند.

۴-۱. خطر نخست: شکل‌گیری طبقات زیستی (Bio-Stratification)

نخستین پیامد، امکان شکل‌گیری «طبقات زیستی» است؛ وضعیتی که در آن مزیت‌های ژنتیکی — از سلامت و طول عمر گرفته تا توان شناختی یا ویژگی‌های ارتقایی — در گروه‌های خاص متمرکز می‌شوند و از طریق وراثت تثبیت و بازتولید می‌گردند. این فرایند از نظر منطق اقتصادی به انباشت سرمایه شباهت دارد، با این تفاوت بنیادین که مزیت ژنتیکی موروثی، غیرقابل استهلاک و به مراتب بادوام‌تر است. منطق این مسیر کاملاً مکانیزمی است. هنگامی که GGC بالا باشد، گروه‌های برخوردار نخستین استفاده‌کنندگان مداخلات ارتقایی خواهند بود. این مزیت با نرخ انتقال مثبت به نسل بعد منتقل می‌شود. با هر نسل، و هم‌زمان با کاهش هزینه‌ها و افزایش یادگیری فناورانه، دسترسی برای همان گروه‌ها آسان‌تر و فراگیرتر می‌شود. نتیجه، شکل‌گیری یک مسیر تجمعی است که پس از فعال شدن، بازگرداندن آن بسیار دشوار خواهد بود، مگر آنکه مداخله‌ای نهادی در کار باشد. نمونه‌های تطبیقی این منطق را روشن‌تر می‌سازند. در بریتانیا، نظام نظارتی HFEA طی سه دهه توانسته است با کنترل دقیق خدمات باروری خارج از رحم، شکاف دسترسی را محدود و GGC را در سطحی مدیریت‌پذیر نگه دارد. در مقابل، در ایالات متحده، بخشی از خدمات لقاح خارج‌رحمی با اهداف ارتقایی عمدتاً در میان طبقات پردرآمد متمرکز مانده و روند واگرایی آشکارتری شکل گرفته است. در شرایطی که GGC بالا، نرخ انتقال مثبت و شاخص M پایین‌تر از آستانه مؤثر باقی بماند، شکل‌گیری طبقات زیستی نه یک احتمال دور، بلکه پیامدی قابل‌پیش‌بینی است. در این مسیر، شاخص M تنها ترمز نهادی قابل‌اعتماد به‌شمار می‌آید.

۴-۲. خطر دوم: مسابقه ژنتیکی

دومین پیامد، شکل‌گیری «مسابقه ژنتیکی» است؛ وضعیتی که در آن خانوارها، شرکت‌ها یا دولت‌ها برای حفظ موقعیت نسبی خود — حتی در صورت نبود تمایل اولیه — ناچار به ورود به رقابت ارتقایی می‌شوند. در چنین الگویی، مزیت نسبی بر مزیت مطلق تقدم می‌یابد؛ مشابه آنچه در رقابت‌های تسلیحاتی یا رقابت‌های موقعیتی در اقتصاد سیاسی مشاهده می‌شود. مکانیزم فعال‌سازی این

مسابقه روشن است. گروهی کوچک فرایند ارتقا را آغاز می‌کند. سایرین، نگران از دست دادن جایگاه نسبی، به تدریج وارد رقابت می‌شوند. آنچه در ابتدا «انتخاب فردی» بود، به «اجبار اجتماعی» تبدیل می‌شود. دولت‌ها نیز برای جلوگیری از عقب‌ماندگی نسبی، به رقابت بین‌المللی کشیده می‌شوند. از این نقطه به بعد، کنترل روند به تدریج از دست حکمرانی خارج می‌شود. این وضعیت معمولاً در شرایطی رخ می‌دهد که شفافیت و بازدارندگی — به عنوان دو بُعد کلیدی شاخص M — در سطح پایینی قرار داشته باشند؛ یعنی ساختار حکمرانی توان رصد، نظارت و اعمال قانون را از دست بدهد. شواهد تطبیقی از حوزه‌های مختلف این منطق را تأیید می‌کنند. در حوزه هسته‌ای، نبود سازوکارهای بازرسی مؤثر جهان را به سوی مسابقه‌ای مهارنشده سوق می‌داد. در هوش مصنوعی، ضعف شفافیت به شکل‌گیری یک «مسابقه باز» انجامیده است. در شرق آسیا نیز رقابت دولت‌ها برای جذب «توریسم باروری» نمونه‌ای از مسابقه موقعیتی در حوزه باروری خارج از رحم به‌شمار می‌آید. در چنین شرایطی، فناوری‌های ارتقای به‌طور ساختاری به مسابقه موقعیت تبدیل می‌شوند. تنها تقویت هم‌زمان شفافیت و بازدارندگی می‌تواند این مسیر را از «رقابت» به «همکاری» تغییر دهد.

۴-۳. خطر سوم: فرسایش مشروعیت اجتماعی (Erosion of Social Legitimacy)

سومین پیامد، فرسایش مشروعیت اجتماعی است؛ وضعیتی که در آن جامعه احساس می‌کند فناوری‌های ارتقایی در خدمت گروهی خاص قرار گرفته‌اند، اطلاعات به صورت گزینشی منتشر می‌شود یا خطرات واقعی کوچک‌نمایی می‌گردد. مکانیزم نهادی این فرسایش، یک چرخه خودتقویت‌کننده منفی است. شفافیت پایین به داده‌های ناقص، شایعه‌سازی و شکل‌گیری روایت‌های غیررسمی می‌انجامد. این وضعیت بی‌اعتمادی اجتماعی را افزایش می‌دهد. بی‌اعتمادی به مقاومت سیاسی و مطالبه ممنوعیت یا محدودیت‌های شدید تبدیل می‌شود. ممنوعیت‌های سختگیرانه فناوری را به زیرزمین می‌رانند، زیرزمینی شدن خطر را افزایش می‌دهد و در نهایت مشروعیت بیش از پیش فرسوده می‌شود. در حوزه ژنتیک، مشروعیت صرفاً یک ملاحظه اخلاقی نیست، بلکه شرط لازم برای اجرای مؤثر بازدارندگی و عدالت است. بدون مشروعیت، ابزارهای حکمرانی عملاً کارایی خود را از دست می‌دهند. نمونه‌های تطبیقی این الگو را تأیید می‌کنند. مخالفت گسترده با موجودات دستکاری شده ژنتیکی (GMO) در اروپا بیش از آنکه بر شواهد علمی استوار باشد، نتیجه فقدان شفافیت تاریخی بود؛ در حالی که باروری خارج از رحم، با وجود حساسیت‌های اخلاقی، به دلیل شفافیت نهادی و چارچوب‌های نظارتی روشن، پذیرش اجتماعی پیدا کرد. هر کاهش معنادار در شفافیت، مشروعیت فناوری ویرایش ژن را تضعیف می‌کند و اجرای بازدارندگی و عدالت را دشوار می‌سازد. بدون شفافیت، حکمرانی ژنتیک عملاً فرو می‌پاشد.

۴-۴. جمع‌بندی خطرات: مسیر درون‌زای شکاف زیستی

سه خطر پیش‌گفته پدیده‌هایی مجزا و مستقل نیستند، بلکه مراحل پی‌درپی یک پویا واحد را شکل می‌دهند. افزایش ضریب شکاف ژنتیک اولیه (GGC) به تشدید انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی (CGA) می‌انجامد؛ این انباشت، لایه‌بندی زیستی را تثبیت می‌کند، سپس زمینه‌ساز شکل‌گیری مسابقه ژنتیکی می‌شود و در نهایت به فرسایش مشروعیت اجتماعی و تضعیف یا فروپاشی حکمرانی می‌انجامد. در برابر این مسیر شتاب‌گیر، شاخص M نقش ترمز نهادی را ایفا می‌کند. اگر M پایین‌تر از آستانه لازم باقی بماند، رشد شکاف ماهیتی‌نمایی پیدا می‌کند؛ اما اگر M در سطح آستانه یا بالاتر از آن تثبیت شود، مسیر تحول شکاف قابل کنترل و پایدار خواهد شد. در این چارچوب، M تنها متغیری است که می‌تواند حلقه تجمعی میان GGC و CGA را بشکند. بدون مداخله نهادی مؤثر، هر جامعه‌ای — صرف‌نظر از نظام ارزشی یا نیت‌های اعلامی سیاست‌گذاران — به‌طور ساختاری به سوی شکل‌گیری طبقات زیستی و ورود به مسابقه ژنتیکی سوق داده می‌شود.

۵. معماری سیاستی: پنج اصل برای حکمرانی پایدار ژن

پس از تبیین پویا شکاف ژنتیکی در قالب GGC و CGA و نشان‌دادن اینکه کیفیت حکمرانی چگونه می‌تواند این پویا را کند، خطی یا شتاب‌گیر کند، پرسش محوری آن است که چه نوع معماری نهادی قادر است مسیر فناوری را از «انباشت نابرابری زیستی» به‌سوی «نوآوری مسئولانه» هدایت کند. پنج اصل زیر مجموعه‌ای یکپارچه از ابزارهای سیاستی را تشکیل می‌دهند که به‌طور مستقیم سه خطر ساختاری — لایه‌بندی زیستی، مسابقه ژنتیکی و فرسایش مشروعیت — را مهار می‌کنند و هم‌زمان سه بُعد بازدارندگی، شفافیت و عدالت را در شاخص حکمرانی ژن تقویت می‌سازند.

۵-۱. تمایز پویا: جلوگیری از لغزش هنجاری از درمان به ارتقا

یکی از چالش‌های بنیادین در حکمرانی ژن، فرسایش تدریجی مرز میان «درمان» و «ارتقا» است؛ فرایندی که تجربه تاریخی باروری خارج از رحم نشان داده غالباً بی‌صدا، تدریجی و بدون نقطه گسست آشکار رخ می‌دهد. در غیاب تمایز روشن، مداخلات ارتقایی به تدریج عادی‌سازی می‌شوند و مسیر سیاستی به سمت افزایش ضریب شکاف ژنتیک اولیه (GGC) و سپس شتاب‌گیری انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی (CGA) حرکت می‌کند. راهکار محوری، طراحی یک نظام طبقه‌بندی پویا و سه‌سطحی برای انواع مداخلات ژنتیکی است که به‌صورت منظم — ترجیحاً سالانه — بازنگری شود. این نظام می‌تواند شامل: لایه نخست برای درمان بیماری‌های شدید و تهدیدکننده حیات مانند SMA و تالاسمی؛ لایه دوم برای کاهش ریسک بیماری‌های چندعاملی نظیر استعداد ابتلا به آلزایمر؛ و لایه سوم برای ارتقای ویژگی‌های غیرپزشکی همچون قد، حافظه یا توان شناختی باشد. اهمیت این لایه‌بندی در آن است که به‌مثابه ابزار اصلی کنترل GGC عمل می‌کند. آزادسازی زود هنگام یا بی‌ضابطه لایه سوم، شکاف اولیه دسترسی را به‌طور معناداری افزایش می‌دهد و پویایی تجمعی CGA را در نسل‌های بعد فعال می‌سازد. اجرای مؤثر این اصل مستلزم سازوکارهای نهادی روشن است: ایجاد سامانه ملی ثبت مداخلات ژنتیکی، الزام ثبت هر پروژه پیش از آغاز، و بازنگری منظم تصمیمات توسط یک کمیته بین‌رشته‌ای. تجربه چند دهه‌ای نهاد HFEA در بریتانیا نشان می‌دهد چنین معماری نظارتی می‌تواند به‌طور عملی از لغزش هنجاری جلوگیری کند. چنین معماری‌ای، به‌طور هم‌زمان شفافیت فرایندها و ظرفیت بازدارندگی حکمرانی ژنتیک را تقویت می‌کند.

۵-۲. شفافیت بازدارنده: معماری رصد جهانی برای مهار رقابت ژنتیکی

در غیاب شفافیت فراملی، فناوری‌های ارتقایی می‌توانند جامعه و دولت‌ها را به‌سوی یک مسابقه ژنتیکی سوق دهند؛ رقابتی که فشار ناشی از آن نه تنها بازدارندگی و شفافیت را تضعیف می‌کند، بلکه مشروعیت کل نظام حکمرانی را نیز به خطر می‌اندازد. برای جلوگیری از فعال‌شدن این مسیر، سه اقدام کلیدی ضروری است: ایجاد یک سامانه ثبت جهانی برای مداخلات خط‌زایی و ارتقایی؛ مشروط‌سازی همکاری‌های علمی، اشتراک داده و دسترسی به تجهیزات پیشرفته به رعایت الزامات شفافیت؛ و اعمال تحریم‌های هدفمند علمی — تجهیزات علمی علیه مراکز و بازیگران غیرشفاف. منطق این سازوکار ساده و نظام‌مند است. شفافیت، سازوکار ضمانت‌اجرا را بازتوزیع می‌کند؛ هزینه پنهان‌کاری را افزایش می‌دهد و در مقابل، مشروعیت رفتار مسئولانه را تقویت می‌کند. تجربه‌هایی مانند نقش آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) در حوزه هسته‌ای یا پروتکل مونترال در مهار مواد مخرب لایه ازون نشان می‌دهند که رصد الزام‌آور و همکاری نهادمند جهانی می‌تواند فناوری‌های دوگانه را در مسیری پایدار نگه دارد.

۵-۳. عدالت پیشگیرانه: مهار شکاف پیش از تثبیت میان‌نسلی

اگر فناوری‌های ارتقای در مرحله نخست تنها برای دهک‌های پردرآمد قابل دسترس باشند، ضریب شکاف ژنتیک اولیه افزایش می‌یابد و فرایند انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی به‌عنوان یک حلقه تجمعی فعال می‌شود. در چنین وضعیتی، عدالت دیگر صرفاً یک فضیلت اخلاقی نیست، بلکه نقشی مکانیزمی پیدا می‌کند؛ تنها ابزاری که می‌تواند از فعال‌شدن چرخه CGA جلوگیری کند. سه مداخله کلیدی در این زمینه عبارت‌اند از: ایجاد صندوق عدالت ژنتیک برای پوشش کامل مداخلات لایه نخست در دهک‌های ۱ تا ۴؛ تخصیص یارانه‌های پلکانی برای لایه دوم؛ و اعمال مالیات‌های تنظیمی بر لایه سوم با هدف تأمین مالی سیاست‌های عدالت‌محور. هدف سیاستی در اینجا تعیین یک مقدار عددی ثابت برای GGC نیست، بلکه حفظ آن در محدوده‌ای کنترل‌پذیر و جلوگیری از ورود سیستم به مسیر تجمعی و شتاب‌گیر است.

۵-۴. دموکراسی زیستی: مشارکت عمومی در تصمیم‌های ژنتیکی

ویرایش ژن پروژه‌ای صرفاً علمی یا فنی نیست، بلکه تصمیمی اجتماعی است که دوام و ثبات آن به مشروعیت عمومی و سرمایه اجتماعی وابسته است. نهادهای سیاست‌گذار تنها زمانی می‌توانند بازدارندگی و عدالت را به‌طور مؤثر اعمال کنند که جامعه این تصمیم‌ها را «مربوط به خود» بداند. سه سازوکار مکمل برای تقویت دموکراسی زیستی عبارت‌اند از: ایجاد مجمع شهروندی ژنتیک با ترکیب تصادفی-طبقه‌بندی‌شده؛ برگزاری دوره‌های مشورت عمومی ۹۰ روزه پیش از هر تغییر در طبقه‌بندی مداخلات؛ و اختصاص بخشی معنادار از کرسی‌های نهادهای مشورتی به نمایندگان جامعه مدنی و گروه‌های بیمار. مشارکت عمومی به‌طور هم‌زمان شفافیت را افزایش می‌دهد، مقاومت نهادی را کاهش می‌دهد و مشروعیت تصمیم‌گیری را تثبیت می‌کند. تجربه‌های نهادهایی مانند Nuffield Council و فرآیندهای اجماع‌سازی در دانمارک نشان می‌دهد که این سازوکارها در مسائل حساس زیستی می‌توانند اعتماد اجتماعی را تقویت کنند.

۵-۵. حق انتخاب و نوع ژنی: حفاظت در برابر استانداردسازی نسلی

با گسترش فناوری‌های ارتقای، خطر دیگری پدیدار می‌شود: فشار اجتماعی برای داشتن کودکان «بهینه». این فشار می‌تواند به کاهش تنوع ژنتیکی و فعال‌شدن مسیر استانداردسازی نسلی بینجامد؛ مسیری که در نهایت ضریب شکاف اولیه را افزایش داده و حلقه انباشت میان‌نسلی را تقویت می‌کند. برای جلوگیری از این روند، چهار مداخله ضروری است: به‌رسمیت‌شناختن حق امتناع از مداخله ژنتیکی؛ تصویب قوانین منع تبعیض ژنتیکی؛ ممنوعیت استفاده از داده‌های ژنتیکی در بیمه و استخدام؛ و محدودسازی تبلیغات ارتقای توسط کلینیک‌ها و ارائه‌دهندگان خدمات. حفاظت از تنوع ژنی صرفاً یک ملاحظه اخلاقی نیست، بلکه پایه‌ای برای پایداری بلندمدت حکمرانی ژنتیک به‌شمار می‌آید.

۵-۶. جمع‌بندی معماری سیاستی

ترکیب این پنج اصل، پیش‌شرط دستیابی به حکمرانی ژنتیک پایدار است. هیچ‌یک از این اصول به‌تنهایی کفایت نمی‌کند و اجرای تک‌بعدی آن‌ها حتی می‌تواند پیامدهای معکوس به همراه داشته باشد. قدرت این معماری نه در هر ابزار منفرد، بلکه در یکپارچگی آن نهفته است؛ یکپارچگی‌ای که امکان مهار هم‌زمان لایه‌بندی زیستی، مسابقه ژنتیکی و فرسایش مشروعیت را فراهم می‌سازد.

۶. کاربست اکتشافی مدل در ایران: ظرفیت‌ها، شکاف‌ها و مسیر پیش‌رو

هدف این بخش، به‌کارگیری اکتشافی "مدل کنترل شکاف میان‌نسلی" در بستر ایران است؛ نه برای ارائه برآوردهای تجربی دقیق، بلکه برای نشان‌دادن اینکه این چارچوب چگونه می‌تواند در تحلیل یک نظام واقعی حکمرانی ژن به کار آید. ایران نمونه‌ای شاخص در میان کشورهای با درآمد متوسط به‌شمار می‌رود؛ کشوری برخوردار از زیرساخت‌های علمی معتبر و شبکه‌ای گسترده از مراکز ناباوروری، اما فاقد معماری حکمرانی منسجم برای مواجهه با ویرایش ژن. تحلیل حاضر نشان می‌دهد که ایران از منظر توان فنی در وضعیت نسبتاً مطلوبی قرار دارد، اما در ابعاد بازدارندگی و عدالت دسترسی با چالش‌های ساختاری مواجه است؛ چالش‌هایی که در صورت ورود فناوری‌های ارتقایی می‌توانند پویا GGC-CGA را فعال سازند.

۶-۱. ظرفیت فنی و شفافیت: نقطه قوت و نقطه ابهام

ایران طی دو دهه گذشته شبکه‌ای قابل‌توجه از مراکز باروری خارج از رحم و پژوهشکده‌های ژنتیک ایجاد کرده است. این شبکه — از پژوهشگاه رویان تا مراکز تخصصی منطقه‌ای — امکان انجام طیفی متنوع از مداخلات ژنتیکی درمانی و پژوهشی را فراهم کرده و ایران را به یکی از بازیگران پیشرو در خاورمیانه بدل ساخته است. این توانمندی توضیح می‌دهد چرا بُعد شفافیت در شاخص M بالقوه می‌تواند در سطحی بالا قرار گیرد. با این حال، این ظرفیت فنی هنوز با سازوکارهای نهادی پایدار برای شفافیت همراه نشده است. اطلاعات مربوط به حجم، نوع و پیامدهای مداخلات ژنتیکی به‌صورت پراکنده منتشر می‌شود و سامانه‌ای منسجم برای ثبت و انتشار داده‌ها در سطح ملی وجود ندارد. در نتیجه، شفافیت در سطح بالقوه قوی است، اما در سطح عملیاتی همچنان شکننده باقی می‌ماند. زیرساخت علمی ایران یک نقطه اتکای مهم محسوب می‌شود، اما نبود سازوکارهای نظام‌مند رصد و انتشار داده، مانع تبدیل این ظرفیت به شفافیتی پایدار و قابل اتکا می‌شود.

۶-۲. بازدارندگی و تنظیم‌گری: عدم قطعیت نهادی و پیامدهای آن

ایران در سال‌های اخیر گام‌هایی در حوزه تنظیم اخلاق زیستی و پژوهش ژنتیک برداشته است؛ از جمله مصوبات شورای ملی اخلاق زیستی و برخی دستورالعمل‌های وزارت بهداشت. با این حال، قانون جامع، شفاف و الزام‌آوری درباره مداخلات ژنتیکی خط‌زایشی وجود ندارد و همین خلأ، بُعد بازدارندگی در شاخص M را تضعیف می‌کند. این عدم قطعیت نهادی دست‌کم دو پیامد دارد. نخست، پژوهشگران و کلینیک‌ها با مرزبندی نامشخص میان «درمان» و «ارتقا» مواجه می‌شوند. دوم، نبود ضمانت‌اجراهای روشن احتمال شکل‌گیری فعالیت‌های غیررسمی یا پروژه‌های خارج از نظارت را افزایش می‌دهد؛ وضعیتی که تجربه کشورهایی با چارچوب‌های حقوقی مبهم نیز آن را تأیید کرده است. در منطق مدل، ضعف بازدارندگی اهمیت ویژه‌ای دارد: حتی در شرایطی که شفافیت نسبی وجود داشته باشد، نقص در بازدارندگی می‌تواند رقابت موقعیتی یا شکل‌گیری یک مسابقه ژنتیکی را، دست‌کم در مقیاس داخلی، فعال کند.

۶-۳. عدالت در دسترسی: شکاف‌های ساختاری و خطر فعال‌شدن GGC

دسترسی به فناوری‌های کمک‌باروری و ژن‌درمانی در ایران به‌شدت تابع توان مالی و موقعیت جغرافیایی است. هزینه‌های بالای خدمات باروری خارج از رحم و فقدان پوشش بیمه‌ای گسترده برای مداخلات ژنتیکی درمانی سبب شده است که گروه‌های پردرآمد نخستین بهره‌برداران این فناوری‌ها باشند. اگر همین الگو به حوزه ویرایش ژن با اهداف ارتقایی تسری یابد، ضریب شکاف ژنتیک اولیه در نقطه آغاز بالا خواهد بود. در چنین شرایطی، بُعد عدالت در شاخص M نقشی تعیین‌کننده پیدا می‌کند. اگر حمایت‌های بیمه‌ای و سازوکارهای مالی برای لایه نخست و بخشی از لایه دوم طراحی نشود، حلقه تجمعی CGA در نسل‌های بعدی فعال

خواهد شد؛ حلقه‌ای که پس از آغاز، مهار آن به مراتب دشوارتر است. در این چارچوب، عدالت دسترسی صرفاً یک دغدغه اخلاقی نیست، بلکه متغیری ساختاری است که مسیر آینده شکاف زیستی را تعیین می‌کند.

۴-۶. برآورد اکتشافی شاخص M برای ایران

این مقاله صرفاً یک برآورد مفهومی ارائه می‌دهد، نه محاسبه‌ای تجربی. با اتکا به شواهد موجود، وضعیت سه بُعد شاخص M به صورت اکتشافی چنین ارزیابی می‌شود: شفافیت در حدود ۰.۸، به واسطه زیرساخت پژوهشی و درمانی نسبتاً قوی، اما بدون سامانه ثبت شفاف و عمومی؛ بازاریابی در حدود ۰.۶، به دلیل وجود دستورالعمل‌ها در کنار فقدان قانون الزام‌آور و ضمانت‌اجراه‌های مشخص؛ و عدالت در حدود ۰.۷، با وجود ظرفیت بالقوه، اما همراه با شکاف‌های مالی و منطقه‌ای محسوس. بر اساس این مقادیر، شاخص M در مجموع در حدود ۰.۷ برآورد می‌شود؛ سطحی پایین‌تر از آستانه‌ای که برای مهار پویا انباشت میان‌نسلی مزیت ژنتیکی ضروری است. این نتیجه به معنای ناکارآمدی نیست، بلکه نشان می‌دهد ایران در موقعیتی قرار دارد که با اصلاحات هدفمند نهادی می‌تواند به آستانه پایداری نزدیک شود.

۵-۶. سناریوهای محتمل بر اساس مدل

با قرار دادن ایران در چارچوب نظری مدل، دست‌کم دو مسیر محتمل قابل ترسیم است. مسیر نخست، تداوم وضعیت موجود است. در غیاب قواعد صریح و الزام‌آور، اگر فناوری‌های ارتقایی وارد شوند و دسترسی به آن‌ها محدود به دهک‌های پردرآمد باقی بماند، ضریب شکاف ژنتیک اولیه افزایش خواهد یافت، حلقه انباشت میان‌نسلی فعال می‌شود، شکاف زیستی در نسل‌ها تثبیت می‌گردد و ویژگی‌های ارتقایی به تدریج در طبقات خاص متمرکز خواهند شد. مسیر دوم، مسیر اصلاحات پنج‌گانه است. اجرای اصول سیاستی پیشنهادی — از لایه‌بندی پویا و شفافیت نهادی گرفته تا عدالت پیشگیرانه و مشارکت عمومی — می‌تواند ضریب شکاف ژنتیک اولیه را در محدوده‌ای کنترل‌پذیر نگه دارد، نرخ انتقال میان‌نسلی مزیت ژنتیکی را تعدیل کند و شاخص M را از سطحی حدود ۰.۷ به ناحیه پایداری نهادی منتقل سازد. در چنین وضعیتی، ایران این امکان را خواهد داشت که به یکی از نخستین نمونه‌های حکمرانی پایدار ژنتیک در میان کشورهای با درآمد متوسط تبدیل شود.

۶-۶. جمع‌بندی: جایگاه ایران در آستانه گذار ژنتیکی

تحلیل اکتشافی نشان می‌دهد ایران در موقعیتی میانه قرار دارد: نه فاقد توان فنی و علمی، و نه برخوردار از معماری حکمرانی کامل و تثبیت‌شده. همین ترکیب است که کیفیت حکمرانی را به متغیر تعیین‌کننده تبدیل می‌کند. در صورت فقدان اصلاحات نهادی، احتمال فعال شدن حلقه GGC-CGA بالا خواهد بود؛ اما در صورت اجرای اصول سیاستی پیشنهادی، مسیر تحولات به سوی نوآوری مسئولانه و پایداری نهادی هدایت می‌شود. ایران در نقطه‌ای از انتخاب ایستاده است: مسیر حرکت به سوی نابرابری زیستی، یا مسیر استقرار حکمرانی پایدار ژنتیک. مدل GGC-CGA-M نشان می‌دهد نتیجه این انتخاب نه محصول اجتناب‌ناپذیر فناوری، بلکه برآیند سیاست‌گذاری و حکمرانی است.

۷. نتیجه‌گیری: انتخابی میان دو مسیر تکاملی

پیشرفت‌های اخیر در ویرایش ژن، به‌ویژه در سطح خط زایشی، پرسشی بنیادین پیش روی سیاست‌گذاران قرار داده است: آیا فناوری‌های ارتقایی به ابزاری برای کاهش رنج و ارتقای سلامت بدل خواهند شد، یا به مسیری برای شکل‌گیری طبقات زیستی،

مسابقه ژنتیکی و فرسایش مشروعیت اجتماعی؟ استدلال محوری این مقاله آن است که پاسخ این پرسش را باید نه در ماهیت فناوری، بلکه در معماری حکمرانی جست‌وجو کرد؛ حکمرانی‌ای که سه متغیر کلیدی آن: شکاف دسترسی ژنتیکی (GGC)؛ نباشت میان‌نسلی (CGA) و ظرفیت حکمرانی (M) مسیر تکاملی فناوری را شکل می‌دهند. شکاف زیستی محصول یک تعامل ساختاری است. اگر در لحظه ورود فناوری، نابرابری اولیه دسترسی بالا باشد و مزیت‌های ارتقایی قابلیت انتقال میان‌نسلی داشته باشد، شکاف اولیه در نسل‌های بعد تشدید می‌شود و رفتاری شتاب‌گیر و شبه‌نمایی پیدا می‌کند. این پویایی همان منطق انباشت در اقتصاد سیاسی نابرابری است، اما با شدتی بیشتر؛ زیرا سرمایه ژنتیکی، برخلاف بسیاری از اشکال سرمایه، استهلاک‌پذیر نیست. در چنین شرایطی، فناوری به‌خودی‌خود نه یک فرصت، بلکه به سازوکاری برای بازتولید نابرابری بدل می‌شود — مگر آنکه عامل سومی وارد عمل شود. این عامل سوم، حکمرانی ژن است؛ شاخصی که در این مقاله با ظرفیت حکمرانی (M) صورت‌بندی شده و سه بُعد بازدارندگی، شفافیت و عدالت را در خود تلفیق می‌کند. تحلیل نشان داد چرخه تجمعی انباشت میان‌نسلی (CGA) تنها زمانی کُند، خطی یا قابل مهار می‌شود که ظرفیت حکمرانی به آستانه‌ای پایدار برسد. پایین‌تر از این سطح، پویایی شکاف از کنترل نهادهای خارج می‌شود و جامعه را به‌سوی لایه‌بندی زیستی و مسابقه ژنتیکی سوق می‌دهد.

در سطح سیاست‌گذاری، پیام روشن است: مسیر آینده را حکمرانی تعیین می‌کند، نه فناوری. پنج اصل سیاستی پیشنهادی — از تمایز پویا میان درمان و ارتقا، تا معماری شفافیت فراملی، عدالت پیشگیرانه، مشارکت عمومی و حفاظت از تنوع ژنی — تنها در صورتی می‌توانند ظرفیت حکمرانی ژنتیک را به سطحی برسانند که با سرعت نوآوری فنی هم‌قدم باشد که به‌صورت یک بسته یکپارچه اجرا شوند. تجربه‌های موفق در حوزه لقاح خارج‌رحمی، نظارت هسته‌ای و سازوکارهای اجماع‌سازی عمومی نشان می‌دهد چنین حکمرانی‌ای نه آرمانی دوردست، بلکه کاملاً قابل تحقق است، مشروط بر آنکه طراحی نهادی از ابتدا روشن، شفاف و مشارکتی باشد. برای کشورهایی مانند ایران، تحلیل اکتشافی مقاله نشان داد که شکاف میان توان فنی و توان حکمرانی می‌تواند به یک «نقطه چرخش» تبدیل شود. زیرساخت‌های علمی کشور قوی است و بُعد شفافیت ظرفیت رشد بالایی دارد؛ اما فقدان قانون‌گذاری الزام‌آور و نابرابری در دسترسی، خطر فعال‌شدن چرخه — "شکاف دسترسی ژنتیکی" — "انباشت میان‌نسلی" (CGA_GGC) را افزایش می‌دهد. ایران — همچون بسیاری از کشورهای در حال توسعه — در لحظه‌ای قرار دارد که تصمیم‌های امروز آن، مسیر چند دهه آینده را شکل می‌دهد. اجرای اصلاحات پیشنهادی می‌تواند ایران را به یکی از نمونه‌های پیشرو حکمرانی پایدار ژنتیک در منطقه بدل کند؛ و در غیر این صورت، شکاف زیستی ممکن است در نسل‌های آینده تثبیت شود. در نهایت، پیام اصلی مقاله چنین است: ویرایش ژن ذاتاً نه عادلانه است و نه نابرابر؛ این معماری حکمرانی است که مسیر آن را تعیین می‌کند.

آینده را فناوری نمی‌نویسد؛ این ساختارهای نهادی‌اند که تصمیم می‌گیرند ویرایش ژن به ابزاری برای کاهش رنج انسانی تبدیل شود یا به سازوکاری برای بازتولید نابرابری‌های پایدار. این انتخاب دیگر صرفاً یک بحث نظری نیست، بلکه ضرورتی فوری در سیاست‌گذاری معاصر است.

تعارض منافع

متن حاضر فاقد هرگونه تعارض منافع است.

References

1. Becker, G. S. (1975). Human capital: A theoretical and empirical analysis, with special reference to education. University of Chicago Press.
2. Becker, G. S., & Tomes, N. (1979). An equilibrium theory of the distribution of income and intergenerational mobility. *Journal of Political Economy*, 87(6), 1153-1189. <https://doi.org/10.1086/260831>
3. Biotechnology Development Staff. (2021-2023). Annual reports. Vice Presidency for Science and Technology. [In Persian]
4. Bowles, S., & Gintis, H. (2002). The inheritance of inequality. *Journal of Economic Perspectives*, 16(3), 3-30. <https://doi.org/10.1257/089533002760278797>
5. Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213), 1258096. <https://doi.org/10.1126/science.1258096>
6. Habermas, J. (2003). The future of human nature. Polity Press.
7. HFEA. (1990). Human Fertilisation and Embryology Act 1990. UK Parliament.
8. Hood, C. (2011). The blame game: Spin, bureaucracy, and self-preservation in government. Princeton University Press.
9. IAEA. (2019-2023). Annual Reports. International Atomic Energy Agency.
10. Jasanoff, S. (2019). Can science make sense of life? Polity.
11. Kim, Y. B., Komor, A. C., Levy, J. M., et al. (2017). Increasing the genome-targeting scope and precision of base editing with engineered Cas9-cytidine deaminase fusions. *Nature Biotechnology*, 35, 371-376. <https://doi.org/10.1038/nbt.3803>
12. Lu, Y., Xue, J., Deng, T., et al. (2020). Safety and feasibility of CRISPR-edited T cells in patients with refractory non-small-cell lung cancer. *Nature Medicine*, 26, 732-740. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0840-5>
13. Majone, G. (1997). From the positive to the regulatory state: Causes and consequences of changes in the mode of governance. *Journal of Public Policy*, 17(2), 139-167. <https://doi.org/10.1017/S0143814X00003524>
14. Ministry of Health and Medical Education. (2022). Statistics of IVF and assisted reproduction centers in Iran. Office of Population, Family and School Health. [In Persian]
15. Mousavi Meshkini, S. A. (2022). Jurisprudential issues of modern biotechnology. Qom University Press. [In Persian]
16. NASEM (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine). (2017). Human genome editing: Science, ethics, and governance. National Academies Press.
17. Nuffield Council on Bioethics. (2018). Genome editing and human reproduction: Social and ethical issues.
18. Ostrom, E. (2010). Beyond markets and states: Polycentric governance of complex economic systems. *American Economic Review*, 100(3), 641-672. <https://doi.org/10.1257/aer.100.3.641>
19. Piketty, T. (2014). Capital in the twenty-first century. Harvard University Press.
20. Roemer, J. E. (1998). Equality of opportunity. Harvard University Press. <https://doi.org/10.4159/9780674042872>
21. Sadeghi, R. (2019). Bioethics and gene therapy from the perspective of Islamic jurisprudence. Institute of Culture and Islamic Thought. [In Persian]
22. Sandel, M. J. (2007). The case against perfection: Ethics in the age of genetic engineering. Harvard University Press.
23. Sparrow, R. (2019). Yesterday's child: How gene editing for enhancement will produce obsolescence—and why it matters. *American Journal of Bioethics*, 19(7), 6-15. <https://doi.org/10.1080/15265161.2019.1618943>
24. Stilgoe, J. (2020). Who's driving innovation? Technologies of the self in the age of automation. Palgrave Macmillan.
25. Zhou, C., Sun, Y., Yan, R., et al. (2019). Off-target RNA mutation induced by DNA base editing and its elimination by mutagenesis. *Nature*, 571, 275-278. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1314-0>