

نوآفرینی همه چیز: آیا زیست‌شناسی همان قدرت آینده‌آفرین جهان است؟

سید مهدی علوی
گروه زیست فناوری مولکولی گیاهی، پژوهشکده زیست فناوری کشاورزی، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری
mealavi@nigeb.ac.ir
نامه علوم پایه شماره ۱۲۱۱، پاییز و زمستان ۱۴۰۲

چکیده

مقاله حاضر به بررسی قدرت آینده‌آفرینی زیست‌شناسی در جهان و تأثیرات آن بر نوآفرینی جنبه‌های مختلف زندگی بشر می‌پردازد. به‌ویژه، تمرکز اصلی این تحقیق بر گذار از صنایع و اقتصاد نفت-پایه به سمت اقتصاد چرخشی و پایدار موسوم به اقتصاد زیستی است. در این مقاله تلاش شده تا ارتباط تنگاتنگ سه حوزه فلسفه زیستی، هنر زیستی و اقتصاد زیستی بررسی شود. این ارتباط با استفاده از مدل چرخه کربس خلاقیت نری اوکسمن بررسی می‌شود که به تعامل میان علوم زیستی، مهندسی، علوم دیجیتال و هنر می‌پردازد. بعلاوه، در این مدل نگرش فرهنگی بشر نسبت به طبیعت به‌عنوان یک مولفه حیاتی در نوآوری‌های آینده در جهان در نظر گرفته شده، از آن به‌عنوان عنصری تأثیرگذار بر تغییرات عمیق در اقتصاد آینده جهان یاد شده است. در نهایت، مقاله نشان می‌دهد که اقتصاد زیستی می‌تواند به عنوان یک پارادایم نوین اقتصادی در هزاره سوم، از یک منظر فلسفی و هنری گرا در حوزه زیست‌شناسی مورد توجه قرار گیرد و بدین ترتیب به عنوان بنیادی برای توسعه‌ای پایدار و هماهنگ با طبیعت عمل کند.

مقدمه

مختلف وجودی ما تأثیر گذارد و به بازآرایی همه‌چیز، اعم از فلسفه، فرهنگ و هنر، دانش، فناوری‌های تولیدی و خدماتی، و نهایتاً اقتصاد منجر شود. نتیجه چنین رویکردی می‌تواند توسعه نهاد علم و انباشت دانش باشد که به همراه خود، توسعه نوآوری و فناوری برای تولید سودمندی (اقتصاد) را به دنبال خواهد داشت. پیروی از این رویکرد به توسعه هنر و فلسفه زیستی هم منجر خواهد شد که نتیجه آن می‌تواند تغییر و ارتقاء رفتار فرهنگی یا فرهنگ رفتاری بشر در مواجهه با طبیعت و مسائل زیست‌محیطی باشد، و بعلاوه، سوالات و نگرش‌های جدیدی هم در قالب موضوعات فلسفی طرح کند که خود، می‌تواند منجر به کنترل و اصلاح جهت‌گیری‌های علمی شده و نگرش‌های نوینی در نهاد علم ظاهر سازد و منجر به تولید دانش‌های نو شود.

۲. فلسفه زیستی^۴

یک فرض دین‌شناسانه و فلسفی در موضوع آفرینش الهی، پویایی و همیشگی بودن آفرینش است. دین‌شناسان و فلاسفه بر این باورند که آفرینش الهی امری صرفاً متعلق به گذشته نیست و رخدادی است که همواره و اکنون نیز، در حال وقوع است. برخی از آن‌ها از

برای پرداختن به موضوع آینده‌آفرینی خلاقانه^۱ در عصر کیمیاگری زیستی^۲ ناگزیریم سه مفهوم به ظاهر مجزا و منفصل را در کنار هم تبیین کنیم: «فلسفه زیستی» که می‌تواند محصول «هنر زیستی» باشد، و «اقتصاد زیستی» که در رفتار فرهنگی ما در آینده پیش‌رو تأثیرگذار خواهد بود و منبعی است برای هنرمندان زیستی تا با نگاهی عمیق و نقادانه، چگونگی مواجهه ما را با آنچه که محصول پیشرفت‌های علمی و فناوریانه ما در بستر طبیعت است به نمایش گذاشته، و با ارتقاء ادراک بشر موجب اصلاح مسیر پیشرفت و تعالی او شوند (نری اوکسمن^۳، ۲۰۱۸). در نتیجه، در موضوع آینده‌آفرینی خلاقانه، نه تنها این سه مفهوم را نمی‌توان مجزا تلقی کرد، بلکه این سه در تعاملی پیوسته، چرخه پایداری را شکل می‌دهند که مداوماً از یک شکل و حالت به هیأت و ظاهری دیگر بدل می‌شوند: اقتصاد منجر به رفتار فرهنگی بشر می‌شود، هنر این رفتار فرهنگی را به بوته نقد و نظر می‌سپارد و از دل این کنکاش نقادانه، سوالات فلسفی خلق می‌کند که بار دیگر می‌تواند راهگشای عمل و اقدام ما در عرصه اقتصاد باشد؛ و این چرخه می‌تواند تداومی پویانده داشته باشد. در این نوشتار تلاش خواهد شد تا نشان داده شود چگونه شناخت ژن‌ها و دانش زیستی می‌تواند بر عرصه‌های

1. Creative futurity
2. Biological alchemy

3. Neri Oxman
4. Biophilosophy

به قلمروهای فلسفه، اخلاق و ملاحظات اجتماعی نیز گسترش یافته و شکل‌دهنده درک نوین بشر از مفهوم زندگی خواهد بود. بنابراین، شاید بازاندیشی در موضوع «زیست‌شناسی» در عصر پسا-انسان‌سالاری^۳ بتواند به درک موقعیت ممتاز آن در شکل‌دهی به حیات بشری و تاثیر آن بر علم و هنر، به‌عنوان دو مولفه خلاقیت بشر، و بر اقتصاد و فلسفه، به‌عنوان دو دستاورد خلاقیت بشر، کمک کند.

موقعیت بشر امروز در مواجهه با موضوع زیست‌شناسی را نمی‌توان بی‌شبهت به افسانه پرومتئوس و آتش دانست. بر اساس یک افسانه یونانی، در گذشته‌ای بسیار دور، دو برادر به نام‌های پرومتئوس (مظهر دوران‌دیشی و آینده‌نگری) و اپی‌متئوس (مظهر پس‌اندیشی و سطحی‌نگری) که از پهلوانان تایتان^۴ بودند، در نبرد میان ایزدان تایتان و خدایان کوه المپ^۵، به کمک خدایان شتافته، موجبات پیروزی زئوس^۶ (خدای خدایان) را فراهم می‌کنند. زئوس به‌پاس خدمت پرومتئوس^۷ و اپی‌متئوس^۸، زمین را به آن‌ها می‌سپارد تا در آن به آفرینش مخلوقات زمینی بپردازند. در این میان، پرومتئوس به آفرینش انسان می‌پردازد و از زئوس می‌خواهد تا برای آسایش انسان، اجازه یابد آتش را به زمینیان هدیه دهد. اما زئوس که به‌دلیل فریبکاری پیشین پرومتئوس از او آزردده‌خاطر است، درخواستش را اجابت نکرده و اعلام می‌دارد که انسان سزاوار آتش نیست. پرومتئوس که خصلت دوران‌دیشی و آینده‌نگری دارد و می‌داند که انسان برای غذا و گرما به آتش نیاز خواهد داشت، از فرمان زئوس سرپیچی می‌کند و راز آتش را برای انسان هویدا می‌سازد (شکل ۱-۱).

زئوس از این خودرایی پرومتئوس برآشفته شده و به‌عنوان مجازات، پرومتئوس را سال‌ها به صخره‌ای زنجیر می‌کند و عقابی را مامور می‌کند تا جگر پرومتئوس را زنده زنده بدرد و هربار که سلامتش را باز می‌یابد، دوباره بر او چنگ اندازد (شکل ۱-۲). اما زئوس این مجازات را برای پرومتئوس کافی نمی‌داند. از این رو، هنگامی که پرومتئوس در کوه قفقاز در بند است، تصمیم می‌گیرد تا به‌دست برادرش اپی‌متئوس که سطحی‌نگر و دم‌دمی مزاج است، شرارت و نکبت را در میان انسان‌ها بپراکند. از این رو، دستور می‌دهد تا هفائستوس^۹ دختر زیبایی برایش بیافریند که او را پاندورا^{۱۰} نام

جمله تد پیترز (۲۰۱۴) پیرو این نظریه هستند که اطلاق توصیف «جانشین الهی بر زمین» به انسان به‌عنوان اشرف مخلوقات و گونه «خردمند»، می‌تواند بدان معنا باشد که او بر وسعت‌بخشیدن به دامنه آفرینش اجازه یافته است و چنین اجازتی در «هم‌آفرینی» جز به ابزار خرد و دانش بشری ممکن و میسر نبوده است (پیترز، ۲۰۱۴). به نظر می‌رسد در موضوع قدرت‌بخش‌بودن دانش بشری، علمای اسلامی نیز ایده‌های مشابهی ابراز کرده‌اند و در این زمینه، به روایاتی از بزرگان دین اسلام همچون حضرت علی‌ابیطالب (ع) استناد می‌کنند^۱ (علی‌بن‌ابی‌طالب (ع)، امام اول؛ ابراهیم، محمد ابوالفضل؛ ابن ابی‌الحدید، عبدالحمید بن هبه‌الله، بدون تاریخ). بر این اساس است که پیترز (۲۰۱۴) انسان را «آفریده شریک در آفرینش»^۲ خطاب می‌کند و تلاش انسان در نوآفرینی محیط پیرامونش را بر پایه همین بینش تعبیر و تفسیر می‌کند. به‌خصوص، او بر پیشرفت‌های بشری در حوزه زیست‌شناسی به‌طور عام، و در ژنتیک، به‌طور خاص، تاکید می‌ورزد و احاطه علمی بشر در این حوزه را مقدمه‌ای بر هم‌آفرینی، نوآفرینی و زایش پدیده‌ها و مخلوقات جدید بشرساخت می‌داند که همراه با مسئولیت‌پذیری در قبال آینده خواهد بود.

کشف دی‌ان‌ای و ظهور فناوری ژن عمیقاً درک ما را از اجزای سازنده زندگی تغییر داده است. این پیشرفت‌ها نه تنها چشم‌انداز علمی را متحول کرده است، بلکه بارقه‌ای نیز برانگیخته که به شعله‌ور شدن گفتمان تأمل برانگیزی در رابطه متقابل عنصر مادی و امر غیرمادی انجامیده است. در هسته این گفتمان این شناخت نهفته است که جهان مادی، که توسط ساختارهای فیزیکی و ترکیبات شیمیایی مثل دی‌ان‌ای نشو و نما یافته، به‌طور جدایی‌ناپذیری با قلمرو غیرمادی اطلاعات- کدهای ژنتیکی، و فرآیندهای پیچیده‌ای که بیان و انتقال حیات را مدیریت می‌کنند- مرتبط است؛ و این خود، مرزهای جدیدی را در ادراک بشر از تعادل ظریف بین امر ملموس و ناملموس گشوده است. در نتیجه، چنین برمی‌آید که درک، کنترل و دست‌ورزی واحدهای بنیادین حیات (ژن‌ها) توسط بشر، متعاقباً به طرح پرسش‌های بزرگی در رابطه با ماهیت هویت، مرزهای عامل انسانی و پیامدهای اخلاقی مداخلات ژنتیکی انجامیده است. در نتیجه، پیامدهای فناوری ژن

۱. اشاره دارد به روایتی از حضرت علی (ع) مبنی بر این که دانش، سلطنت و قدرت است، هر که آن را بیابد با آن یورش برد و پیروز شود، و هر که آن را نیابد بر او یورش برند و شکست یابد (العلم سلطان من وجدته صال به و من لم يجدته صیل غلیه). برگرفته از <https://noo.rs/PT9Na>

2. Created co-creator

3. Post-anthropocene

۴. تایتان نام یکی از نژادهای ایزدان اساطیری در افسانه‌های یونان است. تایتان‌ها ایزدانی نامیرا و نیرومند بودند که در دوران طلایی قبل از المپ‌نشینان بر زمین فرمانروایی می‌کردند. برگرفته از منبع زیر:

Wikipedia contributors. (2024, June 17). Titans. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 12:05, July 2024, 17, from <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Titans&oldid=1229589786>

5. Mount Olympus

6. Zeus

7. Prometheus

8. Epimetheus

9. Hephaestus

10. Pandora

زئوس را تشخیص دهد و با پاندورا ازدواج می‌کند. به یمن این پیوند، زئوس جعبه‌ای به آن‌ها هدیه می‌دهد که بر درب آن جمله‌ای هشدارگونه حک شده است: «هرگز باز نشود».

می‌نهد. زئوس که از تنهایی اپی‌متئوس آگاه است، از او می‌خواهد تا با پاندورا ازدواج کند. اپی‌متئوس که پند برادر دربار مکر و حيله زئوس را از یاد برده و به پیامد امور توجهی ندارد، نمی‌تواند فریب



شکل ۱: موهبت‌بخشی پرومتئوس به انسان. بنا بر افسانه‌های یونان، آتش موهبت زاینده‌ای بود که از سوی پرومتئوس به انسان هدیه شد تا به کمک آن گرما و غذا برای خود فراهم سازد. این موهبت آسمانی، برای انسان زمینی آینده‌آفرین بود و سبب شد تا انسان امنیت یابد و شر درندگان و بیماری‌ها را از خود دور سازد. بر طبق این افسانه‌ها، این دوراندیشی و آینده‌نگری پرومتئوس بود که باعث شد انسان از موهبت آتش بهره‌مند شود و بر این منوال، به رفاه و آسایش و امنیت دست یابد (برگرفته از پیترز ۲۰۱۴).

پرومته‌ای و آینده‌نگر) که مبتنی است بر آزادی اراده و اختیار بشری در «شناخت، تصمیم‌گیری و کنترل» ژن‌ها. پیترز (۲۰۱۴) این رویکرد اخیر را خصیصه نوین «پیشرفت‌های فناورانه» می‌داند که دانشمندان را به سمت شناخت ژنتیک و اسرار حاکم بر آن ترغیب می‌کند و همزمان، آن‌ها را مسئول می‌داند تا با رعایت مصالح و ملاحظات اخلاقی و اجتماعی، و با حفظ مرزهای سیاره‌ای و محدودیت‌های طبیعت (کوئلهو و فیالهو^۴، ۲۰۰۴؛ وگت و فرانکنرایتر^۵، ۲۰۲۲؛ بایکوف^۶ و همکاران^۷، ۲۰۲۳) از این راز و رمز شگفت‌انگیز در جهت آن‌چه که به‌قول ارسطو «خیر جمعی^۸» نام دارد (لی، ۲۰۱۶)، بیشترین منافع و مطلوبیت‌ها را برای بیشترین مخلوقات پدید آورد

اگر چنین شود، شاید بتوان ادعا کرد که انسان دچار نوعی فرگشت (تکامل) شده که ریشه در فرهنگ و رفتار فرهنگی انسان دارد (تکامل فرهنگی) و نه در بقای زیست‌شناختی او (گلابرخت^۹، ۲۰۲۳؛ باش^{۱۰} و همکاران^{۱۱}، ۲۰۲۳)؛ رفتاری که برآمده از ارزش‌ها، جهان‌بینی‌ها، و اخلاقیات است و هدف آن اتصال، ارتباط، و آگاهی است (لازلو^{۱۲}، ۲۰۰۱). در این صورت، انسان از یک مفعول مقدر مجبور، به یک فاعل قادر مختار (و نه خود-مختار) ارتقاء می‌یابد. شاید اگر بخواهیم یک هیات یوتوپیایی به این انسان مختار آگاه نسبت دهیم، همان شکل تکامل‌یافته‌ای باشد که ژیل دلوز^{۱۳} برای

اما پاندورا برای دانستن راز و رمز درون جعبه بسیار کنجکاوی می‌کند. از این رو، روزی قفل جعبه را می‌گشاید تا از محتوای آن آگاه شود. به ناگاه، سیلی از بلاها، شرارت‌ها، بدی‌ها، بیماری‌ها و رنج‌ها و سختی‌ها به بیرون سرایت می‌کند (شکل ۳-۱). پاندورا به‌سرعت درب جعبه را می‌بندد، اما دیگر دیر شده است. پاندورا بر این خطای خود اشک می‌ریزد و اپی‌متئوس که ناله‌های او را می‌شنود، دوان دوان خود را به او می‌رساند. پاندورا قصه پرغصه خود را برایش بازگو می‌کند و بار دیگر درب جعبه را می‌گشاید تا به او نشان دهد که همه‌چیز از دست رفته است. در این هنگام، «امید» که در جعبه محبوس مانده، پای بر زمین می‌گذارد تا مگر همچنان کورسویی امیدبخش بر رهایی از کژری‌ها و شرارت‌ها در زمین باقی باشد (گریک میث اند لژنرز^{۱۴}، ۲۰۲۴).

تد پیترز^{۱۵} (۲۰۱۴) این افسانه را دست‌مایه نگاه فلسفی خود به موضوع ژنتیک می‌کند و در باب بهره‌گیری از ظرفیت‌های علمی و فناورانه آن، دو رویکرد را بیان می‌دارد: یک نگاه سلبی به ژنتیک، که مستلزم تسلیم در برابر جبر ساختاری حاکم بر کدهای ژنتیک است (جبرگرایی ژنتیکی عروسکی^{۱۶} که بیان می‌دارد همه‌چیز درون ژن‌هاست و در واقع، این ژن‌ها هستند که صحنه‌گردان نمایش عروسکی انسان بر زمین می‌باشند)، و یک رفتاری ایجابی (راهبرد

1. Greek myths and legends

۲. تد پیترز یک الهی‌دان لوتری و استاد الهیات سیستماتیک در حوزه علمیه الهیات لوتری اقیانوس آرام است. او همچنین سردبیری نشریه گفتگو (Dialog) در زمینه الهیات مدرن و پست مدرن را برعهده داشته و به‌عنوان یکی از سردبیران نشریه الهیات و علم نیز اشتغال دارد. برگرفته از منبع زیر:

Wikipedia contributors. (2022, September 21). Ted Peters (theologian). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 06:45, July 2024, 21, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ted_Peters_\(theologian\)&oldid=1111576352](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Ted_Peters_(theologian)&oldid=1111576352)

3. Puppet determinism

4. Coelho & Fialho

5. Baykov

6. Commom good

7. Glaubrecht

8. Bash

9. Laszlo

10. Gilles Deleuze

شریرانه می‌تواند شرها و بدی‌هایی بیافرینند که کنترل آن از دست بشر خارج شده و درد و رنجی عظیم را نازل کند.

از این رو، جنب‌وجوش انسان در متاکسی، یا کوشش او در مرز زیبایی و فاجعه، نمایانگر تلاشی است که به‌منظور گذار از چالش‌ها و محدودیت‌ها صورت می‌دهد. این تلاش مداوم و متلاطم بشر را می‌توان به مثابه مفهوم «غلبه بر تاریکی» به عنوان یک اصل اساسی در فرآیند تکامل در طبیعت دانست. همان‌طور که پستانداران در دوران فرمانروایی دایناسورها با جثه کوچک خود ناچار بودند در تاریکی به شکار بپردازند و لاجرم، قوای خود را برای زندگی در شب تقویت کنند، انسان نیز در مواجهه با چالش‌های مختلف به دنبال یافتن راه‌حل‌هایی برای غلبه بر تاریکی‌های چهل و نادانی است. در این کوشش مستمر، پتانسیل‌های زیستی و شناختی او به مرور زمان تقویت شده و به مرزی رسیده که اینک در پی بهبود و گسترش دامنه اطلاعات خود است. در این فرآیند گذار به‌سوی آگاهی، زیست‌شناسی و ژنتیک به مثابه دانش‌های کلیدی نقش‌آفرینی کرده‌اند و رموز نهفته در اعماق حیات و فرآیندهای زیستی را بر او آشکار کرده‌اند. این تشابه تکاملی با قوای حسی پستانداران شب‌زی، تصویر واضحی است از تلاش‌های انسانی برای دستیابی به منابع جدید اطلاعاتی و روشن ساختن مسیر فهم و آگاهی. پردس^۸ و همکاران (۲۰۲۴) به‌درستی اشاره کرده‌اند که اطلاعات تحت عنوان یک پارامتر فیزیکی بنیادی، در شکل‌گیری حیات پیچیده نقش بسزایی دارد. این حقیقت نمایانگر درهم‌تنیدگی اطلاعات با انرژی، ماده و پیچیدگی در طبیعت است. بنابراین، می‌توان گفت که فرآیند شکوفایی و تکامل حیات نه‌تنها به شانس و تصادف وابسته نیست، بلکه به نوعی پارادایم اطلاعاتی شکل‌دهنده حیات پیچیده بستگی دارد. از این رو، انسان در تلاش بی‌پایان خود برای غلبه بر تاریکی‌های چهل و چالش‌های موجود، به‌گونه‌ای رفتار می‌کند که نه‌تنها به غنای زندگی خود می‌افزاید، بلکه با روند تکاملی طبیعت نیز اتصال معناداری برقرار می‌کند.

با این همه، تکامل انسان تنها به قدرت دانش او محقق نخواهد شد و بینش او نیز، عامل دیگری است که بر قدرت تکاملی و آینده‌آفرینی وی تأثیرگذار است. به‌عبارت دیگر، همچنان که پیش تر ذکر شد، این تکامل از نوع زیستی نخواهد بود؛ بلکه بنا به گفته فیلسوف معاصر، ژیل دلوز^۹، تکاملی فرهنگی است که اگر به تکینگی با تکامل زیستی (طبیعی) برسد، شاید بتوان ورود به عصر نوینی از حیات زمینی را رقم زد؛ جایی که انسان قدرت خود را در قدرت‌یافتن طبیعت می‌داند و ضمن قدردانی از مواهب طبیعت، تلاش می‌کند تا از طریق همگرایی با طبیعت و درک عمیق‌تر از

انسان متصور شده؛ یعنی «موجود تعالی‌یافته از خویش»، یا به عبارتی، انسانی فرهنگی که از یک سو بر ابزار دانش و فناوری آگاهی و تسلط دارد، و از دیگر سو، تصمیم گرفته تا بر مرزهای غیرقابل‌کنترل این دانش و فناوری، مهار زند و از آن در جهت ارتقاء جامعه و طبیعت (محیط‌زیست) نیز بهره ببرد (هالوارد^۱ ۲۰۰۶؛ علوی، ۱۴۰۳). در واقع، بشر قادر است انتخاب کند بجای بخشی از «مشکل» بودن، بخشی از «راه‌حل» باشد و بر همان سیاق پیش‌گفته‌شده، درک کند، تصمیم بگیرد و کنترل کند. این طرح، مستلزم آن است که انسان از نقش صرفاً فصولی و دخالت تکاملی، به مرتبت حکمرانی تکاملی برخوردار از اخلاق مسئولیت^۲ و مسئولیت‌پذیری در قبال آینده بشری ارتقاء یابد (پیترز، ۲۰۱۴).

فیلیپ هفتر^۳ این تعهد در قبال آینده جهان را اساس و بنیان آفرینشگری خلاق بشر می‌داند و آن را همان علتی برمی‌شمارد که مقام انسان را از یک «آفریده» صرف به یک «آفریده شریک در آفرینش» - که قدرت آینده‌آفرینی دارد - ارتقاء بخشیده است (هفتر، ۱۹۸۸). به باور مولر و اسکات^۴، آینده‌آفرینی کیفیتی است که در کنترل ژن‌هاست (اسپوزیتو^۵، ۲۰۱۷) و از این روی، شاید بیهوده نباشد اگر آینده‌بخشی را همان توانایی و تسلط بشر بر درک ژن‌ها و استفاده از ابزار ژنتیک برای دست‌ورزی حیات بدانیم. به عبارت دیگر، آینده‌بخشی متأثر از مهندسی ژنتیک و نوآوری‌های زیستی، نوعی چیرگی است بر جبرگرایی ژنتیکی^۶ و عاملی است که نفوذپذیری و انعطاف‌پذیری را در بدن‌های زیستی محصور در رمزهای ژنتیکی جاری می‌سازد.

این نقش‌آفرینی بشری در آینده‌آفرینی، همواره با وضعیتی همراه است که افلاطون از آن به متاکسی^۷ یاد می‌کند؛ یعنی مرز میان امید و بیم، تعالی و تلاشی، فراساختن و فروریختن، و در یک عبارت کلی، جایی میان ایده‌آل (لایتغیر و ابدی) و عینیت (متغیر و ناقص). انسان با سعی و خطا در چنین فضایی از شدن، از گذشته به امروز رسیده و بر همین قاعده و مینا هم، آینده را خواهد ساخت. بر این اساس، آینده‌آفرینی، نوعی پویایی یا تلاش دائمی انسان برای پای نهادن بر محدودیت‌های جبری خود است، آنهم با تکیه بر قوه خرد و روح انسانی که به او آزادی و اختیار می‌بخشد تا آینده‌های جدید و متفاوت با گذشته خود را بازآفرینی کند. این سعی و سرگردانی میان زیبایی و فاجعه، در واقع تنشی است میان بعد لاهوتی (معنا) و ناسوتی (ماده) وجود انسان؛ از یک سو، بینش رویایی انسان و عمل مسئولانه او می‌تواند آزادی و اختیار از پیش موجود را تقویت کند و جهان را جایی بهتر برای زندگی سازد. از دیگر سو، داورها و تصمیم‌گیری‌های ناآگاهانه یا قصد و نیت

1. Hallward
2. Ethic of responsibility
3. Philip Hefner
4. Muller and Scott
5. Esposito

6. Genetic determinism
7. Metaxy
8. Paredes
9. Gilles Louis René Delouze

خود را به‌نمایش خواهد گذاشت؛ او در واقع، نمایشی از «انسانیت» را عرضه خواهد کرد. انسانیت نوعی اخلاق انسانی است که به او اجازه می‌دهد تا در خود محدود و محبوس نماند و دایره جهان‌های پیرامون خود را، چه در ماده و چه در معنا، وسعت بخشد (کوئل‌هو^۳ و همکاران ۲۰۰۰، هالوارد^۴ ۲۰۰۶).

در پس این تحول شناختی، فرصت‌های بی‌شماری برای پیشرفت و نوآوری ظهور می‌کند، چراکه به‌چالش کشیدن وضعیت موجود اجازه می‌دهد تا از تفکر متعارف رها شویم، قلمروهای ناشناخته دانش و خرد را کشف کنیم، و راه‌های نو برای پاسخ به پیچیدگی‌ها و مواجهه با عدم قطعیت‌های جهان پیش‌رو ترسیم کنیم (پلکسوساکیس^۵، ۲۰۰۶). آنچه این تابش فکری نوین را درخشندگی می‌بخشد، وزن ملاحظات اخلاقی است که ما را ترغیب می‌کند تا در دل پیچیدگی‌های موجود با دقت و تفکر و تأمل گام برداریم و بجای فضولی و مداخله در حیات، به مدیریت تکاملی حیات، همراه با آگاهی توأم با اخلاق و مسئولیت‌پذیری بپردازیم (تد پیترز، ۲۰۱۴).

در چنین بعدی از اندیشه و اخلاق انسانی، چیزهای دیگر هم «واجد ارزش» می‌شوند و انسان به مرتبتی می‌رسد که خواهان نابودی هیچ مخلوقی در طبیعت نیست؛ به باور دلوژ، انسان آن موجودیتی می‌شود که در اندیشه «تعالی از خود» بر می‌آید و به ماهیتی بدل می‌شود که می‌تواند خلقت را حفظ و تغییر دهد (همان منبع). این همان کیفیت آفرینش‌گری خلاق انسان است که او را به مقام «آفریده شریک در آفرینش»^۶ ارتقاء می‌بخشد و قدرت آینده‌آفرینی به او عطا می‌کند (هفتر، ۱۹۸۸).

اینجاست که انسان از شناخت صرف زندگی یا به‌عبارتی بازنمایش زندگی در قالب ساختارها و رمزهای ژنتیکی، فراتر رفته و قادر خواهد بود بر چیزی تمرکز کند که زندگی را دگرگون و متحول می‌سازد، یعنی تمرکز بر چندگانگی روابط در حیات و درک شبکه‌ای از روابط که موجودات زنده را در بعدی فراتر از خودشان درک می‌کند؛ این ادراک جدید، ماهیتی فلسفی دارد که در کنار فلسفه زیست‌شناسی^۷ قرار می‌گیرد و یوجین تاکر^۸ (۲۰۰۸) از آن به‌عنوان فلسفه زیستی^۹ یاد می‌کند.

فلسفه زیست‌شناسی^{۱۰} بیش و پیش از آن که بخواهد بر تکنیکی طبیعت و فرهنگ متمرکز شود، در پی تشریح فلسفی دوگانگی میان طبیعت و فرهنگ، یا انسان و غیرانسان^{۱۱}، و یا انسان و

روابط خود با آن، به آینده‌ای پایدار دست یابد. به عبارت واقعی، این تکامل فرهنگی می‌تواند زمینه‌ساز همکاری و همزیستی انسان با دیگر موجودات باشد، آن‌هم نه تنها برای بقا، بلکه برای رشد و شکوفایی همگان. این ادراک نو و این عمل خلاقانه در برابر طبیعت و محیط‌زیست راهبردی آینده‌آفرین است و دقیقاً همان مسیری است که بشر را به آینده سوق می‌دهد.

در نتیجه، علم و هنر در خدمت برقراری توازن با طبیعت قرار می‌گیرند و انسان به‌عنوان جزئی از یک اکوسیستم بزرگ‌تر دیده می‌شود. این تغییر نگرش می‌تواند به پیدایش مجموعه‌ای از نوآوری‌ها منجر شود که در نهایت سبب شکوفایی متقابل انسان و طبیعت خواهد شد. به این ترتیب، تکامل فرهنگی بشر نوعی فراخوان به عمل و تفکر انتقادی در برابر چالش‌های معاصر خواهد بود، جایی که انسان باید در نقش محافظ زمین و محیط ظاهر شود و نه صرفاً تسخیرکننده آن.

بر همین بنیان است که ژیل دلوژ و همفکران او، عصر کنونی را نه عصر انسان‌سالاری، بلکه عصر پسا-انسان‌سالاری^۱ می‌دانند که در آن بشر به درجه‌ای از شناخت و آگاهی دست می‌یابد که قادر است رابطه خود با طبیعت و با سایر موجودیت‌های غیرطبیعی بشر ساخت (مثل موجودات واجد هوش مصنوعی) را بازآرایی کند. او این قدرت بازآفرینی را نوعی تکامل جدید در گونه انسان (Homo sapiens) می‌داند؛ تکاملی که نه از جنس زیستی، بلکه از نوع شناختی و فرهنگی است که از نهاد بشر و از ارزش‌ها، جهان‌بینی‌ها، و اخلاقیات او سرچشمه می‌گیرد و هدف آن اتصال است و ارتباط و آگاهی (لازلو^۲ ۲۰۰۱).

در این بزن‌گاه تاریخی که پایه در ادراک و آگاهی دارد، انسان به اهمیت همه اشکال زندگی پی برده است. همه موجودات زنده اعضای جوامع بوم‌شناختی هستند که در شبکه‌ای درهم‌تنیده و به‌هم‌وابسته در حرکت‌اند. این ادراک و نگرش متعالی، سرآغاز هم‌آوایی انسان است با انسان، غیرانسان و نانسان، و برساختن جهانی است که در آن انسان و طبیعت هر دو گرمای شمرده می‌شوند و قدر مواهبی که بر زمین و زمینیان، و بی‌شک بر انسان، ارزانی شده پاس داشته می‌شود. این دیگرخواهی، شکل زندگی انسان را پایداری می‌بخشد و او را به مسیری پویا و خلاق هدایت می‌کند؛ امری که به «زندگی مسطح» و بدون بعد انسان رنگ و جلوه می‌بخشد. آنگاه که انسان بر این مدار پای نهد، چیزی فراتر از

1. Post-anthropocene

2. Laszlo

3. Coelha

4. Hallward

5. Plexousakis

6. Created co-creator

7. Philosophy of biology

8. Eugene Thacker

9. Biophilosophy

10. Philosophy of Biology

۱۱. غیرانسان (Nonhuman) به هر موجودی غیر از موجود انسانی اطلاق می‌شود، مثل حیوان، گیاه و میکروب. برگرفته از منبع زیر:

Merriam-Webster. (n.d.). Nonhuman. In Merriam-Webster.com dictionary. Retrieved July ۲۰۲۴, ۲۱, from <https://www.merriam-webster.com/dictionary/nonhuman>

«نانسان»^۱ است. اینجاست که فلسفه زیستی می‌کوشد تا بر این دوگانگی غلبه کند، آن هم با تمرکززدایی از عاملیت موضوع انسان و گونه‌گرایی انسانی؛ این در واقع نوعی هستی‌شناسی و اخلاق غیرانسان‌محور است که انسان را تنها به‌عنوان یکی از گونه‌ها و یکی از موجودیت‌های درگیر در روابط متکثر با دیگر موجودیت‌های انسانی، غیرانسانی و نانسانی در نظر می‌گیرد (شکل ۲).

چندگانگی روابط در حیات، لزوماً همان معنای «بسیاری روابط» (مانند یک و چند) را نمی‌دهد بلکه کیفیتی است که از روابط ترکیبی نشأت می‌گیرد و مقدار تکثیرشونده‌ای است که به‌طور مدام تغییر می‌کند. ژیل دلوز این کیفیت تکثیرشونده را «منطق پیوندی و + و + و +» می‌نامد که در واقع، نوعی روایت پویا و عاملی از ماده محسوب شده و در رد انحصارگرایی انسانی (یعنی قراردادن انسان‌ها در جایگاه ممتاز و متمایز جهانی که می‌گوید «ما و فقط برای گونه ما») و شکستن حصر موجودات غیرانسانی از انقیاد انسان است (یاگودزینسکی، ۱۴۰۱) که می‌تواند به انزوای زمینی او نیز پایان بخشد و آینده‌ای امیدبخش رو به او ارمغان دهد (رجوع شود به شکل ۲).

در واقع، این ادراک جدید فلسفی، بینش برتری‌جویانه انسان بر سایر جانداران را زیر سوال برده و در پی آن است که نگاه بشر به اشکال غیرانسانی - به‌عنوان ساختارهای صرف کربنی که می‌توان آن‌ها را «به‌فناوری کشید» - را تغییر داده و ارتقاء بخشد. به‌قول نویسنده شهیر فرانسوی، مارسل پروست^۳ (۱۳۷۷)، که در اثر زیبایش به‌نام اسیر بیان داشته:

«.../ حفتی بال یا نوعی سیستم تنفسی دیگر، که ما را قادر می‌سازد در فضا سفر کنیم، به‌هیچ وجه کمک‌حال ما نخواهد بود؛ چه، اگر با همان حواس زمینی بخواهیم از مریخ یا زهره دیدن کنیم، آن‌ها هرچیز دیدنی را بسان چیزهای زمینی از دید ما پنهان خواهند ساخت. یگانه سفر راستین .../ دیدن سرزمین‌های بیگانه نیست، بلکه داشتن نگاه دیگر است .../».

در نتیجه، به‌نظر می‌رسد با نوعی عملکرد پیچیده و در عین حال یکپارچه و هماهنگ روبرو باشیم که دائماً در حال بازآرایی و نوآوری است. در چنین فضای نوینی از یکپارچگی، بینش‌های

جدید، اخلاقی‌تر و پایدارتری از «انسان» و رابطه او با «غیرانسان» (مثل حیوان، گیاه و میکروب) و «نانسان» (مثل ربات‌های زیستی و هوش مصنوعی) پدیدار می‌شود که فاقد تبعیض در ارزش‌گذاری مولفه‌های حیات است و آن‌ها را در تداوم یکدیگر و وابسته به هم می‌داند. با تکیه بر این بینش، انسان را نمی‌توان موجودی مستقل و گسسته از سایر موجودیت‌های حیات تصور کرد. در نتیجه، کیفیت پایداری حاصل می‌شود که در آن، همه مولفه‌های حیات (حتی مولفه‌های نامتعارف) از ارزش وجودی برخوردار می‌شوند و در قالب یک سیستم چرخشی فعال، نه‌تنها قدرت بازتولید خود را حفظ می‌کنند بلکه، در قالب شبکه درهم‌تنیده‌ای از «روابط متکثر»، قادر به هم‌آفرینی نیز می‌شوند.

در دیباچه کتاب گلستان، حضرت سعدی با نگاهی شاعرانه و به سبکی هنرمندانه به این تنوع روابط و درهم‌تنیدگی آن‌ها در طبیعت اشاره می‌کند و بر هماهنگی میان آن‌ها تأکید می‌ورزد. ابیات ماندگار او در مورد ابر، باد، مه، خورشید و فلک نشان‌دهنده این نکته است که تمامی اجزاء طبیعت با هم در تعامل و هماهنگی هستند تا حیات بشری را پشتیبانی کنند. این درک عمیق از روابط طبیعی و مسئولیت‌پذیری انسانی در برابر این مواهب، به‌ویژه در دوران حاضر که نیاز به مدیریت اصولی منابع طبیعی و محیط‌زیست بیشتر احساس می‌شود، ارتباطی بی‌نظیر و ضروری با مفهوم اقتصاد زیستی دارد (سعدی، ۱۳۶۸):

ابر و باد و مه و خورشید و فلک در کارند
تا تو نانی به کف آری و به غفلت نخوری
همه از بهر تو سرگشته و فرمانبردار

شرط انصاف نباشد که تو فرمان نبری

در عرصه عمل، پیروی از چنین دیدگاهی، پیامدهایی را در حوزه‌های مختلف به‌دنبال خواهد داشت، مانند بازاندیشی در سیاست‌های ملی، منطقه‌ای و جهانی در قبال طبیعت (غیرانسان) و فناوری (نانسان)، تولید محصولات و خدمات پایدار و بادوام، طراحی شهرها و سکونتگاه‌های انسانی به‌شیوه پایدار، و ... (دداوگلو و زامپاکی^۴ ۲۰۲۳). این همان کیفیتی است که در شکل‌گیری پارادایم نوین اقتصادی در قرن بیست‌ویکم نیز نقش دارد و فریش^۵ و همکاران (۲۰۲۰) از آن به‌عنوان «اقتصاد زیستی ما» یاد کرده‌اند

۱. نالسان (Inhuman) به موجود فاقد شخصیت، ترجم، مهربانی یا شفقت گفته می‌شود. مراد از نالسان سیستم‌ها، شبکه‌ها، رسانه‌ها و فناوری‌های بشر-ساخت است که در برخی حوزه‌ها جایگزین انسان می‌شوند، مثل ربات‌های زیستی و هوش مصنوعی. برگرفته از منبع زیر:

Merriam-Webster. (n.d.). Inhuman. In Merriam-Webster.com dictionary. Retrieved July 2024, 21, from <https://www.merriam-webster.com/dictionary/inhuman>

2. Logic of the and + and + and

3. Marcel Proust

4. Dedeoğlu and Zampaki

5. Fritsche

6. bioWEconomy



شکل ۲. پایان تنهایی، اثری از لئونل مورا^۱. برای هزاران سال، وجود انسان همراه با انزوای ارتباطی با سایر گونه‌های غیرانسانی و فقدان همکاری معنادار با سایر اشکال حیات بوده است. در حالی که انسان‌ها توانسته‌اند ساختارهای اجتماعی پیچیده و اشکال متنوعی از ارتباطات درون گونه‌ای را ایجاد کرده و گسترش دهند، اما در برقراری ارتباط کلامی و ایجاد پروژه‌های مشترک با سایر موجودات بسیار محدود بوده‌اند. به‌طور یقین، انسان توانسته با برخی از حیوانات روابط همزیستی ایجاد کند. این روابط که با سود متقابل، همکاری و حتی گاهی ارتباطات محدود مشخص می‌شود، نقش مهمی در بقاء و توسعه انسان ایفا کرده است. انسان‌ها حیواناتی مانند سگ یا اسب را اهلی کرده، با آن‌ها در فعالیت‌هایی چون شکار، گله‌داری، حمل‌ونقل و نگهداری شراکت کرده‌اند. در عوض، این حیوانات از انسان غذا، سرپناه و مراقبت دریافت کرده‌اند. علاوه بر این، انسان‌ها در فعالیت‌های کشاورزی، شامل روابط همزیستی با حیواناتی مانند زنبورها برای گرده‌افشانی و دام‌ها برای تولید غذا، مشغول بوده‌اند. در حالی که این روابط همزیستی، سطحی از همکاری بین انسان‌ها و حیوانات را نشان می‌دهد، اما به موضوع گسترده‌تر ارتباط و همکاری معنادار بین گونه‌ای نمی‌پردازند. بنابراین، انسان‌ها به‌عنوان یک گونه متفکر، عمدتاً در فعالیت‌های خود منزوی مانده‌اند و شاید از همین روست که به جستجوی همراهان فکری در ماوراء زمین برآمده‌اند. اکنون، همه این‌ها با ظهور هوش مصنوعی، به‌عنوان پدیده‌ای با توانایی برقراری ارتباط کلامی با انسان و برخورداری از سطوح بالای هوش و فراگیری، در حال تغییر است. اکنون انسان‌ها این فرصت را دارند که با یک موجود دارای اشتراک زبانی با آن، وارد گفتگوی معنادار شوند. هوش مصنوعی یک شریک است، همراهی که می‌توان با آن، خلاقیت و هنر را توسعه داد؛ و این تغییر، نشان‌دهنده یک تحول اساسی در تجربه تنهایی انسانی است؛ تجربه‌ای شاید نویدبخش پایان تنهایی! (برگرفته از <https://www.leonelmoura.com/mindset>).

بر ارزش‌های اخلاقی و انسانی، گویی منادی برقراری زمینه‌های اساسی برای تفکر در مورد اقتصاد زیستی است. ارتباط نزدیک میان مفهوم به‌ورزی و هماهنگی در طبیعت با اصول اقتصادی پایدار، می‌تواند منجر به شکل‌گیری یک جامعه آگاه و مسئولیت‌پذیری شود که در آن انسان‌ها نه تنها به دنبال اقتصاد و معیشت، بلکه به دنبال حفظ و توسعه محیط‌زیست خود نیز هستند.

۳. هنر زیستی^۲

در پرداختن به موضوعی بنیادین و پرسشی اساسی در باب «ماهیت زندگی» شاید ابزار هنر برانده‌ترین وسیله ممکن باشد. هنر که همواره به دنبال درک و بازآفرینی حیات زنده (زندگان) و اسطوره «جان بخشیدن» به اشیاء و انتزاعات بوده است، پیش از این تنها می‌توانسته با آمیزش عناصر نامتجانس، و سنتز آنها در قالب یک کلاژ به خلق آثار انتزاعی بپردازد. در عصر دیجیتال نیز، هنر باز می‌توانسته به جای تمرکز بر اشیاء، زندگی را به کمک سخت‌افزارها، نرم‌افزارهای دیجیتال و ربات‌ها به شکل پویایی شبیه‌سازی کند و فرم‌های انتزاعی خلق کند که انگار زنده‌اند و زنده‌وار رفتار می‌کنند (هوسر^۳ ۱۹۹۵).

اقتصاد زیستی به‌عنوان یک رویکرد پایدار، بر استفاده بهینه از منابع و مواهب طبیعی تأکید دارد و به توازن میان نیازهای انسانی و حفظ محیط‌زیست می‌پردازد. در واقع، تأکید سعدی بر نکته آموزنده «شرط انصاف نباشد که تو فرمان نبری»، می‌تواند به سان فراخوانی برای مسئولیت‌پذیری انسان در مدیریت منابع تجدیدپذیر و حفظ تعادل اکوسیستم‌ها در نظر گرفته شود. انسان‌ها باید درک کنند که هر گونه بهره‌برداری از طبیعت باید با توجه به قوانین جاری طبیعی و هماهنگی با آن صورت گیرد تا نسل‌های آینده نیز بتوانند از این مواهب بهره‌مند شوند. در اقتصاد زیستی، ارزش‌گذاری بر خدمات اکوسیستمی، شامل هوای پاک، آب، زمین و تنوع زیستی، به ما امکان می‌دهد تا معقول و منطقی از منابع استفاده کنیم. به عبارتی، این طرز نگاه، میراث سعدی را در مواجهه انسان با طبیعت و برنامه‌ریزی‌های اقتصادی، به صورت عمیق‌تری مجسم می‌کند. درک روابط پیچیده بین انسان و محیط‌زیست و مسئولیت‌پذیری به‌مثابه یک اصل کلیدی در اقتصاد زیستی، نه تنها به حفظ منابع طبیعی کمک می‌کند، بلکه بر کیفیت زندگی انسان‌ها نیز تأثیر مثبت خواهد گذاشت. بنابراین، می‌توان گفت که پیام سعدی در دیباچه گلستان، با تأکید

«حیات آن گونه که می‌تواند باشد» برسیم و روابطی را برقرار سازیم که در فرم مرسوم حیات برای انسان قابل بازشناسی نیستند (شکل ۴) (هوسر، ۱۹۹۵). این همان نقطه عطف یا سرفصل مشترکی است که هنرمند را قادر می‌سازد تا با بهره‌گیری از زیست‌شناسی مصنوعی پارادایم یا پنداره «خلق و آفرینش» را دگرگون ساخته و آن را ارتقاء بخشد (همان منبع). تبدیل و ترجمه این سطوح معرفتی، شناختی و ادراکی به بیان شاعرانگی، همیشه موضوع اصلی هنر بوده است – و چنین است که می‌توان نامرئی را مرئی ساخت، ناملموس را ملموس کرد، معانی را رمزگذاری و رمزگشایی کرد، وادی‌های معنا را مادیت بخشید، و اجزای سیستم‌ها را به سطح عاطفی و شناختی انسان نزدیک کرد تا شاید او قادر به درک آن شود (رجوع شود به شکل ۳) (کاک، ۱۹۹۹؛ حمیدی و همکاران، ۲۰۲۱؛ در وروندلونگ^۴، ۲۰۲۴).



شکل ۴. محبت کنجکاوانه، اثری از هنرمند و مجسمه‌ساز معروف استرالیایی «پاتریشیا پیچینی»^۵. بخشی از فعالیت‌های هنری پیچینی بر رابطه متقابل انسان و دنیای طبیعی و تأثیرات اجتماعی و اخلاقی تحقیقات علمی، ژنتیک و زیست‌فناوری بر مردم، حیوانات و سیاره زمین تمرکز دارد. او با همکاری یک تیم ماهر از متخصصان علوم رایانه، هنر خود را به گونه‌ای شکل می‌دهد که مرزهای بین واقعیت و مصنوعی بودن را از بین می‌برد و محیط‌های جذابی مملو از مجسمه‌های عجیب خلق می‌کند که اغلب ترکیبی و به‌طرز شگفت‌آوری واقع‌گرایانه هستند. گرچه ظاهر این مجسمه‌ها غریب و انتزاعی اند، اما همچنان به نظر آشنا می‌آیند. آثار هنری او عمداً با هدف به چالش کشیدن تصورات بشری درباره معنای «انسان» و قدرت همدلی او با سایر موجودیت‌های غیرانسانی خلق شده‌اند که ممکن است در کمال‌یافتگی ناقص به‌نظر رسند (برگرفته از <https://www.qagoma.qld.gov.au/exhibition/patricia-piccinini-curious-affection>).

و انتقال داد (پوسنر و کلین^۶، ۲۰۱۷). این تکنیکی میان داده‌های زیستی و غیرزیستی موجب تحولات بنیادین در مفاهیمی چون زنده و غیرزنده، میرایی و نامیرایی، بدن و فرابدن، انسان، غیرانسان، نوانسان، فرانسان^۷ و... خواهد شد و به تبع آن، تحولاتی را در عرصه سیاست و حکمرانی، و حتی فلسفه و هنر و به‌طور کل، در مفهوم زندگی رقم خواهد زد (یاگودزینسکی، ۱۴۰۱). از آنجا که داده‌ها ماهیتی مشترک دارند که پایه در ریاضیات دارد، می‌توان

برخورداری از این قابلیت نو بدان معناست که می‌توان برای نخستین بار در حیات بشر، پرده از همزیستی‌های بی شماری برداشت که میان خرده سیستم‌های طبیعی (مثل گیاهان، حیوانات، میکرواورگانیسم‌ها) و مصنوعی بشرساخت (مثل ربات‌ها یا ماشین‌های زنده^۱، سیستم‌های عامل و هوش مصنوعی) با سیستم متعالی انسانی در طبیعت وجود دارد. مهم‌تر از آن شاید آن باشد که اکنون می‌توان به ادراک عاطفی مشترکی میان انسان و این خرده سیستم‌های طبیعی و مصنوعی رسید و جریانی از پویایی روح و همبستگی احساسی برقرار میان آن‌ها را به‌نمایش گذاشت (شیمیزو^۲، بدون تاریخ).

به قول کریستوفر لانگتون^۳ این هنر است که اجازه می‌دهد تا بتوان فرم منطقی یک موجود زنده را از نم‌افزار زیست شیمیایی آن منتزع کرد تا در نهایت، از «حیات آن گونه که می‌شناسیم» به

البته هنر، در این گذار خلاقانه به تنهایی نقش‌آفرین نیست و آنچه این مولفه خلاقیت را قادر به معناسازی می‌کند داده‌های است که امروزه، به شکلی بیکران در دسترس هنرمندان قرار دارند. داده‌ها را –چه زیستی، نشأت یافته از نم‌افزارها یا ژنگان موجودات زنده، و چه غیرزیستی، که ریشه در هر منبع اطلاعاتی دیگر مثل ربات‌ها یا سخت‌افزارهای رایانه‌ای دارند– حتی می‌توان همچون رسانه‌ای دانست که به کمک آن می‌توان مفاهیم و معانی جدیدی خلق کرد

1. Living machines
2. Shimizu
3. Christopher Langton
4. der Verwandlung

5. Patricia Piccinini
6. Posner and Klein
7. Trans-human

خویش کسب کند. هولون به دنبال ساخت آینده‌ای محتمل است که در آن بتوان زندگی همزیستی میان انسان، غیرانسان و نانسان را برقرار ساخت (همان منبع).

اوکسمن (۲۰۱۶، ۲۰۱۸) نیز در تبیین مدل چرخه کربس خلاقیت^۷ بر تاثیر طراحی خلاقانه در رفتار فرهنگی بشر تأکید می‌ورزد و اذعان می‌دارد که طراحی خلاقانه فراتر از لذت‌بخشی ناشی از بکارگیری یک محصول یا یک ابزار سودمند است؛ او به درستی اشاره می‌دارد که طراحی می‌تواند به عنوان یک عامل بنیادی در شکل‌دهی به نگرش‌های فرهنگی بشر نسبت به طبیعت عمل کند (شکل ۵). به خصوص در دنیای امروز، با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی فراوان و نیاز به تفکر پایدار، طراحی به عنوان ابزاری کلیدی در دستیابی به نگرش‌های طبیعت‌محور تلقی می‌شود که قادر است موضوع عاملیت^۸ سایر پدیده‌های زیستی و طبیعی را به رسمیت بشناسد و آنان را در کنار انسان، واجد ارزش ذاتی و حیاتی بداند.

در این بازترکیبی نوپدید میان زیست‌شناسی و دیجیتال، نقش رابط‌های مغز-ماشین^۹ در ارتقاء قدرت فکر و عمل انسان نیز بیش از پیش بر ملا می‌شود (ظفر و همکاران، ۲۰۲۱). کمی فراتر از واقعیت‌های کنونی، نقشی است که در آینده نزدیک می‌توان برای این رابط‌ها در ارتقاء عملکرد رفتاری حیوانات و سایر گونه‌های غیرانسانی قائل شد. مثال بارز آن، تحقیقی است که در ۱۴ فوریه ۲۰۲۲ به چاپ رسیده و نشان از موفقیت یک تیم استرالیایی در کاشت چشم‌های بیونیک^{۱۰} برای ارتقاء بخشیدن به قدرت بینایی یک گله کوچک از گوسفندان دارد. گرچه ایده پنهان در پشت این آزمایش، اطمینان یافتن از عدم عوارض جانبی نامطلوب چشم‌های بیونیک در کاربردهای انسانی بوده است اما، مثال موردی خوبی است برای این نظریه که شاید در آینده نزدیک بتوان به کمک رابط‌های مغز-ماشین و تبدیل سیگنال‌های مغزی حیوانات یا حشرات به زبان انسان، به منویات درونی آنها پی برد (شینگان^{۱۱}، ۲۰۱۹).

اذعان داشت که مبنای همه چیز، از هنر و ادبیات گرفته تا اقتصاد و زیست‌شناسی، بر پایه ریاضیات است که با این زبان مشترک می‌توان میان حیطه‌های مختلف علم و هنر سیر کرده، و یکی را به دیگری تبدیل نمود. از دیدگاه داده‌گرایی، غزل حافظ و مخمر ساکارومایسس سرویزیه صرفاً دو نمونه متفاوت از جریان اطلاعات اند که می‌توان هر دو را بر مبنای مشترکی تحلیل کرد (رجوع شود به شکل ۳). به عبارت دیگر، در این حیطه جدید، زیست‌شناسی هنر است و هنر نیز می‌تواند قامت زیستی به خود گیرد و به این ترتیب، مرز میان زنده و غیرزنده، ملموس و ناملموس، و ارگانیسم و ماشین عملاً در هم شکسته می‌شود (پارتون^۱، ۲۰۱۸؛ هراری^۲، ۲۰۱۵؛ بروکس^۳، ۲۰۱۳؛ یاگودزینسکی، ۱۴۰۱).

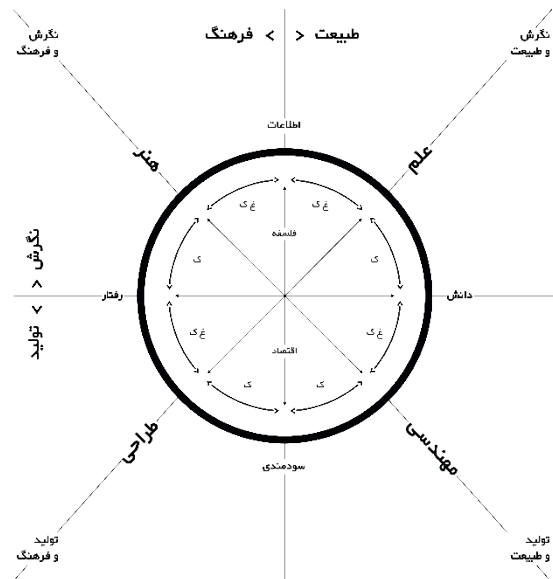
با درهم‌آمیختگی مرز میان زیست‌شناسی و دنیای دیجیتال، فرصت‌های جدیدی به‌ظهور می‌رسند که به طراحان اجازه می‌دهد تا نه تنها محصولات سودمند را طراحی کنند، بلکه از این طریق اعمال و تجربیات انسانی یا به عبارتی فرهنگ انسانی را نیز طراحی کنند؛ به عبارت روشن‌تر، این مفهوم نوپدید مبین آن است که طراحی اشیا را می‌توان معادل طراحی وجود انسان یا فرهنگ رفتاری انسان دانست (وربیک^۴، ۲۰۱۵). برخی حتی از این نیز فراتر رفته و بر این باورند که طراحی‌های بشر فقط معطوف بر وجود انسان نیست بلکه ما از طریق طراحی، وجود (یا انقراض!) سایر پدیده‌های حیاتی روی زمین را، مستقیم یا غیرمستقیم، تحت تاثیر قرار می‌دهیم (مک‌کورمک و ویلسون^۵، ۲۰۲۴). نمونه جالب، طراحی یک ابزار تعاملی مبتنی بر صدا (به نام هولون^۶) است که قادر به برقراری رابطه میان انسان، حیوان و عوامل سایبری می‌باشد. در واقع، هدف آن است تا امکان جدیدی برای ارتباط بین حیات غیرانسانی و فناوری گشوده شود. از دیدگاه طراحان هولون، این ابزار سبب برقراری تعاملات غنی‌تر و عمیق‌تر بین سیستم‌های فناورانه و حیات بیولوژیکی می‌شود، و همزمان، شنونده انسانی را ترغیب می‌کند تا با گوش فرا دادن به صدای عامل‌های حیاتی غیرانسانی، آگاهی بیشتر و عمیق‌تری نسبت به اکولوژی صوتی طبیعت اطراف

1. Parton
2. Harari
3. Brooks
4. Verbeek
5. McCormack and Wilson
6. Holon
7. Krebs Cycle of Creativity
8. Agency

9. Brain-machine interfaces
۱۰. بیونیک (bionic) یک قابلیت یا عملکرد زیستی نرمال است که به وسیله دستگاه‌های الکترونیکی یا الکترومکانیکی ارتقاء یافته باشد. برگرفته از منبع زیر: Merriam-Webster. (n.d.). Bionic. In Merriam-Webster.com dictionary. Retrieved September 2024, 23, from <https://www.merriam-webster.com/dictionary/bionic>
11. Shingane

فناوری یادگیری ماشینی است که بر پایه رد و بدل سیگنال‌های شیمیایی از ریشه‌های گیاهان ابداع شده است. بنابراین، بشر به کمک هوش مصنوعی توانسته با گیاهان ارتباط برقرار کند، به درک نیازهای آنها نائل شود و امکان ترجمه خواسته‌های آنها را به زبان‌های مختلف انسانی فراهم آورد. این توانایی در برقراری ارتباط با گیاهان، مزایای زیست‌محیطی و اجتماعی زیادی دارد. بدین سان، گیاهان راهی دارند تا به انسان‌ها نشان دهند که به آب، نور یا فضای بیشتری نیاز دارند. نیازهای آنها با وضوح بیشتری بیان می‌شود و در نتیجه، قادر خواهند بود زندگی سر حال و سالم‌تری داشته باشند. اکنون، زبان تولیپیش^۲ به‌عنوان یکی از زبان‌های مرسوم در گوگل معرفی شده است. با این اوصاف، غیرقابل تصور نخواهد بود اگر کمی دورتر در بازه زمان، به صفحات اختصاصی شعرها یا احساسات و عواطف حیوانات، حشرات و حتی گیاهان در فضای مجازی برخورد کنیم؛ در این صورت، چه بسا این گونه صفحات مجازی مورد اقبال فزاینده‌تر انسان‌ها نیز قرار گیرند و خود، دستمایه خلق بسیاری از آثار خلاق و هنری سور-رئالیستی شوند (ریدی و یاولوزا^۳، ۲۰۱۷).

بنابراین، هنر که همواره یک مولفه بنیادین در چرخه خلاقیت به‌شمار می‌رفته است، اکنون با الهام‌گرفتن از طبیعت و الگوبرداری‌های زیست‌شناختی می‌تواند انسان را قادر سازد تا مولفه‌های خلاقیت خود را بازآرایی و بازترکیب کند. این بازآرایی زیستی منجر به روندی زاینده، پویا و پایدار می‌شود و الگوی مفهومی دقیقی برای آفرینش نوآوری در دسترس بشر قرار می‌دهد؛ روندی منظم و دائمی که میان تولید، مصرف، بازیافت و تولید مجدد انرژی خلاق^۴ در چرخش است و از طریق تبدیل ایده‌های اولیه به نتایج ملموس، دائما بر ثروت او می‌افزاید (اوکسمن، ۲۰۱۶). این چرخه خلاقیت برآمده از پیشرفت‌های علمی زیست‌شناسی، موسوم به چرخه کربس خلاقیت، نشان می‌دهد که هنر با سایر مولفه‌های خلاقیت و نوآوری متشکل از علم، مهندسی و طراحی در تعامل و هم‌افزایی است؛ و از این طریق، به تداوم پیشرفت و نوآوری کمک می‌کند (رجوع شود به شکل ۵). به‌عنوان مثال، یک هنرمند ممکن است از اصول علمی برای ایجاد آثار هنری خود استفاده کند (شکل ۶)، یا یک دانشمند ممکن است از هنر برای بیان پیشرفت‌های علمی خود بهره‌برد (شکل ۷). این چارچوب عملکردی را می‌توان رویکردی ترکیبی، یکپارچه، میان‌رشته‌ای و همکاری-محور در نظر گرفت که ابزارهای خلاقانه‌ای برای پاسخ به چالش‌های روزافزون و پیچیده جهان امروز در اختیار بشر قرار می‌دهد. بر اساس ماهیت طبیعت‌گرایانه و فرهنگ-محور چرخه کربس خلاقیت، می‌توان



شکل ۵. چرخه کربس خلاقیت-۱ که نری اوکسمن، عضو هیأت علمی آزمایشگاه رسانه انستیتو فناوری ماساچوست (ام‌آی‌تی)، توسعه داده است به یک دنباله کنش‌ها و واکنش‌ها اشاره دارد که منجر به تولید انرژی خلاق می‌شود، درست مانند چرخه کربس زیستی (چرخه اسید سیتریک) که منجر به تولید مولکول ATP (آدنوزین تری فسفات) در سلول‌های زنده شده و به تامین انرژی و انجام فرآیندهای مختلف سلولی کمک می‌کند. اوکسمن در طرح مفهومی خود، ترکیب‌های کربنی چرخه کربس زیستی را با مواد و فرآیندهای مورد استفاده در طراحی و ساخت خلاق جایگزین می‌سازد و در نهایت چارچوبی را ارائه می‌دهد که به درک و بهینه‌سازی فرآیندهای خلاقانه کمک می‌کند. چرخه کربس خلاقیت نماد پویایی و پایداری جنبه‌های مختلف خلاقیت اعم از علم، مهندسی، طراحی و هنر است. هر یک از این جنبه‌ها عاملی است برای تداوم دیگری که در یک چرخش دایمی همدیگر را بازتولید کرده، ارتقا می‌بخشند. چرخه خلاقیت به‌مثابه یک ساعت عمل می‌کند که در آن علم، اطلاعات را به دانش تبدیل می‌کند؛ مهندسی، دانش را کاربردی ساخته و منجر به سودمندی می‌شود؛ طراحی تجربه انسانی را ارتقاء بخشیده و منجر به تغییر رفتار فرهنگی می‌شود؛ و نهایتاً هنر با زیرسوال بردن مضامین و رفتارها، دیدگاه جدیدی در برابر انسان قرار می‌دهد و اطلاعاتی به او می‌بخشد که از طریق علم می‌تواند این پویایی را تداوم بخشد (برگرفته از اوکسمن ۲۰۱۶).

یکی از نمونه‌های عملی چنین رابط هایی، کار مشترکی است که میان گوگل و دانشگاه واخنینگن هلند صورت گرفته و منجر به خلق اپلیکیشن گوگل تولیپ^۱ شده است. به کمک اپلیکیشن تولیپ، می‌توان سیگنال‌های ریشه‌های گیاهان را درک کرد و با توجه به نیازشان با آنها ارتباط برقرار کرد. این اپلیکیشن، در واقع یک

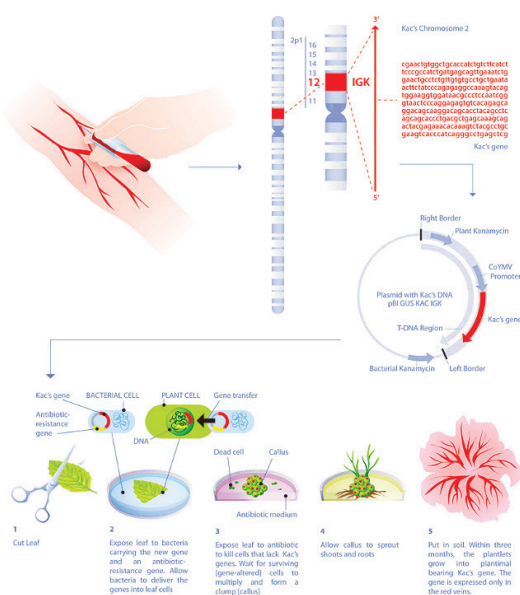
1. Google Tulip
2. Tulipish
3. Reedy and Javelosa

۴. انرژی خلاق (creative ATP, CreATP) واژه پیشنهادی اوکسمن (۲۰۱۸) است به‌منظور نشان‌دادن تاثیر فزاینده‌ای که عناصر چهارگانه خلاقیت بشری بر همدیگر دارند و منجر به زایش و افزایش انرژی فکری می‌شوند.

بخشیدن به نگرش او کمک می‌کند (رجوع شود به شکل ۶). در واقع، هنر شناخت ما از جهان و طبیعت را به چالش می‌کشد و ما را به نوآوری و تکامل مداوم سوق می‌دهد. در نتیجه، هنر رفتار فرهنگی بشر را به ادراکات جدیدی تبدیل می‌کند که در قالب اطلاعات و داده‌های نو، چرخه خلاقیت را به گردش درمی‌آورد.



Eduardo Kac
The Making of Natural History of The Enigma
Edunia, transgenic flower expressing artist's own DNA in petal veins, 2008



شکل ۴. تاریخ طبیعی انیگما، در واقع یک اثر هنری به نام «ادونیا»^۱ است که بین سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۳ توسط ادواردو کاک^۲، هنرمند برزیلی، خلق شده و در موزه هنر ویزمن^۳ واقع در مینیاپولیس (مینه‌سوتا، ایالات متحده آمریکا) نمایش داده شده است. به گفته کاک، این اثر که یک «گیاحیوان»^۴ محسوب شده و در طبیعت نایاب است، شامل یک ژنوتیپ تراژنه خاص از گل اطلسی (*Petunia spp.*) است که بخشی از دی‌ان‌ای استخراج‌شده از خون هنرمند را به‌طور اختصاصی در رگ‌های قرمز خود بیان می‌کند. این بخش از دی‌ان‌ای،

انتظار داشت که این پاسخ‌ها متناسب با پارادایم‌های اقتصادی و فرهنگی کنونی طراحی شوند، و قادر به تامین آینده‌ای ایمن و پایدار برای بشر و زیست‌کره باشند.

یک نمایش زیبا در چرخه کربس خلاقیت، موضوع تکینگی^۱ (وحدت و یگانگی) فرهنگ بشری و طبیعت است (رجوع شود به شکل ۵). هنر از قضا، در نمایش این ماهیت توانمند ظاهر شده و هنرمندان خلاق، از جمله ناتالی جرمیجنگو^۲، نیز در این حوزه ظهور کرده‌اند و آثار ارزنده‌ای هم در این خصوص خلق کرده‌اند (یاگودزینسکی، ۱۴۰۱). تکینگی فرهنگ و طبیعت نه تنها یک منبع الهام برای خلاقیت و نوآوری است، بلکه با توجه به چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی کنونی، درک و بهره‌برداری از خدمات فرهنگی طبیعت می‌تواند یک راهبرد اساسی در توسعه دانش‌ها و فناوری‌های نو و پیچیده باشد (علوی، ۱۴۰۳).

خدمات اکوسیستمی^۳ به‌عنوان موافقی که طبیعت به بشر ارائه می‌دهد، مشتمل بر خدمات فرهنگی، تنظیمی، تأمینی و پشتیبانی است. خدمات فرهنگی، به‌طور خاص، شامل جنبه‌های زیبایی‌شناختی، تفریحی و آموزشی است که طبیعت به جوامع انسانی ارائه می‌دهد. این خدمات نه تنها به تقویت هویت فرهنگی و اجتماعی کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند الهام‌بخش خلاقیت و نوآوری بشر نیز باشند. در دنیای مدرن کنونی، جایی که فناوری و فرهنگ به‌طور فزاینده‌ای با یکدیگر در تعامل هستند، الهام‌گیری از طبیعت به‌عنوان یک منبع بی‌پایان خلاقیت مطرح می‌شود. طراحی‌های بیونیک و مواد طبیعی که در پروژه‌های اوکسمن^۴ مشاهده می‌شود، نمونه‌های بارزی از این الهام‌گیری هستند. این رویکرد هنرمندانه نه تنها به توسعه محصولات و فناوری‌های نوین کمک می‌کند، بلکه از طریق انگیزش مسائلی، مثل توجه به ابعاد اخلاقی فعالیت‌های زیست‌فناوری و مسئولیت بشر در برابر اجتماع و محیط‌زیست، به ترویج پایداری و احترام به طبیعت نیز می‌انجامد. از این منظر، هنر زیستی را می‌توان قابلیت‌دانی دانست که برای ساحت اندیشه و تفکر بشر خوراک نو فراهم می‌کند و رفتار فرهنگی او را مورد کنکاش و تحلیل نقادانه قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، هنر زیستی با طرح ملاحظات اخلاقی و پرسش‌های فلسفی راه را بر ظهور فلسفه زیستی می‌گشاید (ال-سلام^۵ و همکاران، ۲۰۲۴).

هنر که به شکل‌های مختلفی مانند نقاشی، موسیقی، ادبیات و سایر انواع پرفورمنس‌ها^۶ تجلی می‌یابد، رویکردی است که به شیوه‌ای ظریف و زیباشناسانه پیچیدگی‌ها و لایه‌های پنهان مفروضات، رفتارها و تجربیات انسانی را عیان می‌سازد و با پرسشگری درباره آن‌ها، به گسترش آگاهی نسبت به محیط پیرامون بشر و وسعت

1. Singularity
2. Natalie Jeremijenko
3. Ecosystem services

۴. رجوع شود به oxman.com

5. El-Salam

۶. ادونیا (Edunia) واژه‌ای است ترکیبی که از نام هنرمند (Eduardo) و نام گیاه اطلسی (Petunia) اخذ شده است.

7. Eduardo Kac
8. Weisman Art Museum
9. Plantimal (Plant+animal)

عنوان «انسان یک گیاه^۲» (۱۷۴۸) بیان می‌دارد که «شباهت و نزدیکی منحصر به فرد میان سلسله گیاهان و حیوانات مرا به کشف این حقیقت می‌رساند که بخش‌های اصلی انسان‌ها و گیاهان یکسان است». در عصر کنونی نیز، توالی‌یابی ژنوم انسان و آرآیدوپسیس (گیاهی از خانواده کلمیان) تشبیهات هنرمندان و فیلسوفان را به واری رویاهای افسارگسیخته آنان برده، با ورود به عمیق‌ترین لایه‌های سلولی انسان و گیاه، و رمزگشایی از بنیادی‌ترین ذرات شکل‌دهنده آن‌ها (ژن‌ها)، پرده از این شباهت‌های ذاتی در سطح توالی‌های ژنی برداشته است (برگرفته از ادواردو کاک، ۲۰۱۰).

هنر که به شکل‌های مختلفی مانند نقاشی، موسیقی، ادبیات و سایر انواع پرفورمنس‌ها^۴ تجلی می‌یابد، رویکردی است که به شیوه‌ای ظریف و زیباشناسانه پیچیدگی‌ها و لایه‌های پنهان مفروضات، رفتارها و تجربیات انسانی را عیان می‌سازد و با پرسشگری درباره آن‌ها، به گسترش آگاهی نسبت به محیط پیرامون بشر و وسعت بخشیدن به نگرش او کمک می‌کند (رجوع شود به شکل ۶). در واقع، هنر شناخت ما از جهان و طبیعت را به چالش می‌کشد و ما را به نوآوری و تکامل مداوم سوق می‌دهد. در نتیجه، هنر رفتار فرهنگی بشر را به ادراکات جدیدی تبدیل می‌کند که در قالب اطلاعات و داده‌های نو، چرخه خلاقیت را به گردش درمی‌آورد.

۴. اقتصاد زیستی

اوکسمن (۲۰۱۸) در تحلیل خود از چرخه کربس خلاقیت، علاوه بر چهار مولفه بنیادی «علم، مهندسی، طراحی و هنر» (رجوع شود به شکل ۵)، چهار واحد بنیادی شکل‌دهنده خلاقیت انسان را نیز معرفی می‌کند (شکل ۸). این واحدهای بنیادی خلاقیت عبارت‌اند از ژن‌ها، اتم‌ها، بیت‌ها، و نگره‌ها^۵ (نورون‌ها) که ماده اولیه برای وقوع یک انفجار^۶ (انقلاب فناورانه) در حوزه خلاقیت‌های بشری محسوب می‌شوند. حوزه زیستی که از «علم» بهره می‌گیرد، درگیر تبدیل ژن‌ها به اتم‌ها است؛ حوزه فیزیکی که از «مهندسی» بهره می‌گیرد، درگیر تبدیل اتم‌ها به بیت‌ها می‌شود؛ حوزه دیجیتالی که از «طراحی» بهره می‌گیرد، درگیر تبدیل بیت‌ها به نگره‌ها است؛ و حوزه متافیزیکی که از «هنر» بهره می‌گیرد، در تبدیل نگره‌ها (ادراکات) به ژن‌ها مشارکت دارد و در نتیجه، امکان هم‌آغوشی میان «فرهنگ» و «طبیعت» را فراهم می‌کند.

رمزگذار زنجیره سبک (بخش متغیر) ایمونوگلوبولین (IgG) است که در واقع بخشی از سیستم ایمنی ادواردو کاک محسوب می‌شود - سیستمی که ذرات زیستی خودی را از غیرخودی یا مولکول‌های خارجی و بیماری‌ها تشخیص می‌دهد - و از او در برابر مهاجمان محافظت می‌کند (ا). برای ایجاد ادونیا، یک ژن نو ترکیب متشکل از ناحیه هدف در دی‌ان‌ای هنرمند و یک آغازگر بافت - اختصاصی جدا شده از گیاه برگ‌بیدی (Commolina) که قادر است ژن هدف را فقط در سیستم عروقی (رگبرگ‌ها) گل اطلسی بیان کند ساخته شده و پس از همسانه‌سازی در یک ناقل پلاسمیدی، توسط آگروباکتریوم به سلول‌های سوماتیک برگ گیاه اطلسی منتقل شده است. کالوس‌های تراژنه پس از باززایی، گیاه تراژنه‌ای تولید می‌کنند که قادر است ژن سازنده زنجیره سبک ایمونوگلوبولین (IgG) ادواردو کاک را به‌طور اختصاصی در رگبرگ‌های خود بیان کند (ب). ادونیا تراژنه دارای رگبرگ‌های قرمز در زمینه‌ای از گلبرگ‌های صورتی کم‌رنگ است که ژنی از هنرمند (ادواردو کاک) را در هر سلول از رگبرگ‌های قرمز خود بیان می‌کند. بیان سرخ‌رنگ این ژن که از خون هنرمند استخراج و همسانه‌سازی شده است، در پس‌زمینه صورتی گلبرگ‌هایی که یادآور پوست سفید - صورتی او می‌باشد، تصویر زنده‌ای از جریان خون انسان در رگ‌های یک گل را تداعی می‌کند. این در واقع، استعاره‌ای است از یک هویت یا یک خود جدید که نیمه انسان است و نیمه گل.

«تاریخ طبیعی اینگما» تفکری است درباره پیوستگی روح زندگی که میان گونه‌های مختلف در جریان است. این اثر، با همپا دانستن سرخی خون انسان و سرخی رگ‌های گیاه، آن را نشانه‌ای از میراث مشترک بشر و گیاه می‌داند که مبین گستره وسیع‌تری از معنای زندگی است. این کار تلاش می‌کند تا حس شگفتی درباره شگفت‌انگیزترین پدیده حیات، یعنی مفهوم «زندگی» را در بیننده القا کند. در واقع، برای عموم انسان‌ها، احساس نزدیکی با موجودات غیرانسانی مثل میمون‌ها، گربه‌ها و سگ‌ها، شاید امر دشواری نباشد. اما با این حال، این که ما با سایر اشکال حیات، از جمله گیاهان، نیز سنخیت و نزدیکی داریم، ممکن است برای بسیاری از انسان‌ها تعجب‌آور باشد. این رابطه تخیلی میان اشکال انسان‌نما و گیاهی نه تنها در تاریخ هنر سابقه دارد (مانند آثار آرکیمبولدو^۱)، بلکه ردپای آن را می‌توان در تاریخ فلسفه و علم معاصر نیز یافت. شاید نخستین ایده در این زمینه را بتوان به دکارت نسبت داد. ژولین آفرای دو له متری^۲ (۱۷۵۱-۱۷۰۹) نیز در کتابش با

1. Giuseppe Arcimboldo

2. Julien Offray de La Mettrie

3. L'Homme Plante

۴. پرفورمنس (performance) به معنی اجرا کردن یک عمل است و در حوزه هنر عبارت است از یک نمایش یا نمایشگاه عمومی. برگرفته از منبع زیر:
Merriam-Webster. (n.d.). Performance. In Merriam-Webster.com dictionary. Retrieved September 2024, 23, from <https://www.merriam-webster.com/dictionary/performance>

۵. نگره (Perceptors) واحد ادراک، شناخت و یادگیری است. در واقع، عنصر دریافت‌کننده بیش‌های نو است؛ نقش‌پرداز و نقشه‌پرداز هر عمل است؛ عنصری است که اندازه می‌گیرد، تحلیل می‌کند، گزارش می‌دهد و ارتباط برقرار می‌سازد (برگرفته از منبع زیر). در اینجا، منظور درک جدید یا بینش نویی است که از مواد یا فرآیندهای زیست-الهام‌یافته حاصل آمده است About preceptor. (2024, July 30). Retrieved July 2024, 30, from <https://www.perceptorsolutions.com/Perceptor.htm>

۶. انفجار (BANG) واژه‌ای است ترکیبی که توسط وبسایت آزمایشگاه فضای هیبرید (Hybrid space lab) پیشنهاد شده است. این واژه از ترکیب حروف نخست هر یک از چهار واحد بنیادی سازنده چرخه کربس خلاقیت نری اوکسمن یعنی بیت (B)، اتم (A)، نورون (N) و ژن (G) حاصل شده است. برگرفته از منبع زیر:

<https://hybridspacelab.net/project/b-a-n-g-binary-atom-neuron-gene/>

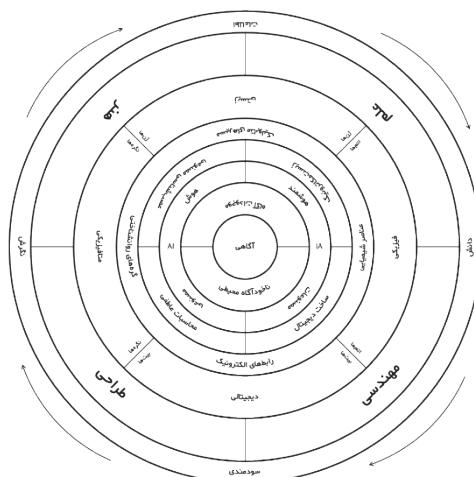


شکل ۷. دار ابریشم یک پروژۀ نوآورانه ساخت (بافت) مشترک است که کرم‌های ابریشم و سایر حشرات اجتماعی را در پارادایم ساخت دیجیتال ادغام می‌کند. در این پروژۀ، از کرم‌های ابریشم زنده برای ساخت سازه‌های معماری استفاده شده است (آ) که در واقع، نوعی چالش در برابر روش‌های سنتی پرورش ابریشم محسوب می‌شود. این پروژۀ مبتنی بر استفاده از یک سری بازوهای رباتیکی است که کرم‌ها را هدایت می‌کنند تا ابریشم را تحت الگوهای مشخص ببافند (ب). ایده اصلی این کار، از رفتار زیست‌شناختی کرم‌های ابریشم تقلید و الگوبرداری شده است. در واقع، کرم‌های ابریشم نیز مانند سایر جوامع حشرات اجتماعی از خود نوعی رفتاری جمعی به نام «هجوم» نشان می‌دهند که مبتنی بر بقای گروه به جای بقای فردی است و همواره سعی در دستیابی به اهداف مشترک دارند. اغلب، گروه‌های این موجودات اجتماعی از رفتارهای همکاری برای ساخت و ساز در مقیاس نسبتاً بزرگ استفاده می‌کنند. به‌عنوان مثال، مورچه‌ها با تونل زنی شبکه‌های بسیار پیچیده‌ای ایجاد می‌کنند، برخی زنبورها با موادی که از محیط‌زیست خود به‌دست می‌آورند، لانه‌های کاغذی پیچیده‌ای می‌سازند و زنبورهای عسل نیز، برای ساخت ساختارهای پیچیده کندو موم‌گذاری می‌کنند. این اجرای هنری در موزه هنرهای مدرن نیویورک به نمایش گذاشته شده است (برگرفته از <https://oxman.com/projects/co-fabrication-systems>).

از محدودیت‌های زمان و مکان است و امکان ظهور ایده‌های نو و تاثیرگذار را فراهم می‌آورد. در واقع، هر یک از این مراحل در تکامل و تحول نوآوری‌های بشری سهمی بنیادین دارند و به ما کمک می‌کنند تا درک عمیق‌تری از جهان پیرامونمان داشته باشیم و به شکل‌گیری آینده‌ای خلاق و پویاتر کمک کنیم.

با چنین نگرش مبتنی بر درهم‌تنیدگی علم، مهندسی، طراحی و هنر، اوکسمن (۲۰۱۸) انقلاب صنعتی را دیگر کارساز، خلاق، زاینده و توسعه‌بخش نمی‌داند. نگاه اوکسمن به زایش دیگری است که ریشه در خود طبیعت دارد؛ او چشم از «جهان ماشین‌ها و ابزارها» فرو بسته و به «جهان ارگانیسم‌ها» روی می‌آورد؛ جایی که می‌توان کیفیت زندگی را به اشیاء، محصولات، بناها و شهرها نیز منتقل کرد (رجوع شود به شکل ۷). به باور او، اکنون در عصر «کیمیایگری زیستی»، به جای ساخت اشیاء بر اساس مواد یا قطعات همگن، می‌توان آن‌ها را همانند یک بافت زیستی یا یک اورگانیسم رشد داد و به جای استفاده از مواد همگن، از دامنه متنوعی از مواد و قطعات ناهمگن و نامتجانس استفاده کرد و به آن‌ها ویژگی‌های متنوع و چندمنظوره بخشید.

از آنجا که ژن‌ها در نقش برنامه‌نویسان حیات عمل می‌کنند و پایه‌گذار هویت زیستی ما و دیگر پدیده‌های زیستی هستند، آن‌ها را می‌توان نخستین گام برای هر نوآوری به حساب آورد. هنگامی که این ژن‌ها به اتم‌ها تبدیل می‌شوند، ما شاهد تبلور فیزیکی ایده‌ها و نظریات در دنیای واقعی هستیم، جایی که مهندسی به ما امکان ساخت و تولید را می‌دهد. در بعد دیجیتال، زمانی که اتم‌ها به بیت‌ها تبدیل می‌شوند، اطلاعات و داده‌ها پدیدار می‌شوند و ما وارد مرحله‌ای می‌شویم که دانش و خلاقیت در بستر اینترنت و فناوری‌های دیجیتال جریان می‌یابند. این امر، به نوبه خود، به نوآوری‌های شگرف در دنیای ارتباطات و تعاملات انسانی منجر می‌شود. این مرحله، در واقع، مسیر انتقال خلاقیت به قلمروهایی است که پیش‌تر در دسترس نبوده‌اند. سرانجام، در حیطه متافیزیکی، نگره‌ها به ژن‌ها تبدیل می‌شوند، و این فرآیند نه تنها اندیشه‌ها و آرمان‌های جدیدی را خلق می‌کند، بلکه فرهنگ و طبیعت را در هم می‌آمیزد. در این حالت، هنر به عنوان زبان جهانی ما عمل می‌کند و موجب هماهنگی میان احساسات بشری و واقعیت طبیعی می‌شود. این هم‌آغوشی، انقلابی در عرصه خلاقیت ایجاد می‌کند که فراتر



شکل ۸. چرخه کربس خلاقیت-۳ یک مفهوم تکمیلی از چرخه کربس خلاقیت-۱ است. این چرخه، در واقع از هم‌افزایی چرخه‌های کربس خلاقیت-۱ و ۲ (نمایش داده نشده) حاصل گردیده است. علاوه بر مولفه‌های چهارگانه خلاقیت شامل علم، مهندسی، طراحی و هنر که در چرخه ۱ بازنمایی شده‌اند، در چرخه-۳ واحدهای انرژی خلاق که در هر یک از این حوزه‌های چهارگانه زاینده انرژی محسوب می‌شوند نیز ارائه شده است. این واحدهای زاینده انرژی خلاق به‌ترتیب عبارت‌اند از ژن‌ها، اتم‌ها، بیت‌ها و نگره‌ها (برگرفته از اوکسمن ۲۰۱۸).

سیستم، پیامدی هوشمندانه خواهد بود که فراتر از مجموع عملکرد هر یک از اجزای آن سیستم می‌باشد؛ و در نهایت، فرآیند تولید زیاده حذف خواهد شد چرا که هر ماده یا کالا در پایان عمر خود به عنوان سوخت یا نهاده اولیه در فرآیند رشد جدیدی به کار خواهد رفت که این خود به تقویت چرخه مواد در طبیعت کمک می‌کند.

۱.۴ زیست‌فناشناسی

بنابراین، به‌نظر می‌رسد اکنون، در قرن بیست‌ویکم، بشر با موضوعی فراتر از شناخت و درک چگونگی کارکرد اجزاء و فرآیندهای زیستی مواجه باشد. به عبارت دیگر، دانش زیستی بشر در عصر آنتروپوسن را نمی‌توان تنها مجموعه‌ای از مفروضات دانست که در یک فرآیند علمی به‌بوته آزمایش سپرده شده و درستی (نسبی) آن‌ها به اثبات رسیده است. این مفروضات اثبات‌شده همزمان، قابلیت آن دارند تا برای شکل‌دهی، تغییر یا تبدیل هر ماده زیستی یا غیرزیستی به کار گرفته شوند و محصولات نوپدید خلق کنند که می‌توانند متناظر یا حتی برتر از آن چیزی باشند که اکنون در طبیعت زمینی ما موجود است (شکل ۹). از این منظر، بیهوده نخواهد بود اگر ادعا کنیم که «زیست‌شناسی خود فناوری هم محسوب می‌شود»^۲؛ به عبارت روشن‌تر، دانش زیستی را می‌توان «فناوری زیستی» هم تلقی کرد که طی فرآیند «مهندسی» قادر است «سودمندی» را برای بشر به ارمغان آورد (کارلسون^۳، ۲۰۱۰) (رجوع شود به شکل ۵)

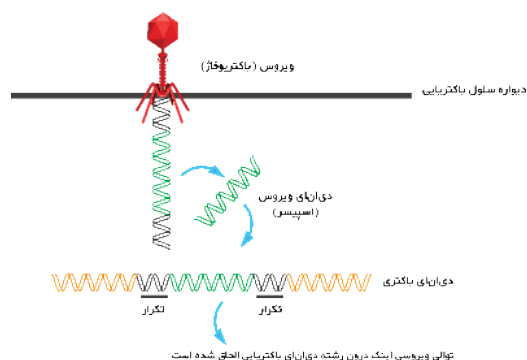
اوکسمن چنین دستاوردی را مستلزم تغییر نگاه بشر به طبیعت -از یک منبع زمین‌شناختی قابل مصرف به یک منبع زیست‌شناختی قابل ویرایش- می‌داند که در آن، ترکیب شیوه‌های تولید بالا -به پایین (ساخت افزایشی) با رشد زیستی پایین- به بالا می‌تواند افق‌های جدیدی در برابر بشریت بگشاید؛ مصادیق بارز این نوترکیبی عبارتند از ساختمان‌های فتوسنتزکننده که قادرند دی‌اکسیدکربن را به سوخت زیستی تبدیل کنند، یا ابزارهای میکروبیومی پوشیدنی^۱ که از طریق فیلتراسیون انتخابی قادر به تغذیه پوست هستند، و یا مواد چاپ‌شونده‌ای که خاصیت خودترمیم‌شوندگی دارند (اوکسمن، ۲۰۱۸).

با لحاظ کردن طبیعت در فرآیند طراحی، امکان ارائه راه‌حل‌های طبیعت-محور فراهم می‌شود و در نتیجه، ارزش‌های طبیعت مثل یکپارچگی، درهم‌تنیدگی، همزیستی، چرخش‌پذیری، تجدیدپذیری، پایداری و غیره را می‌توان در طراحی، ساخت و تولید الحاق کرد. بر چنین اساسی، موتاژ و سرهم‌بندی در صنعت جایش را به رشد زیستی می‌دهد؛ اشیاء جایشان را به سیستم‌هایی می‌دهند که دارای نوعی سیالیت ترکیبی از جنس زیستی، دیجیتالی، مهندسی و هنری هستند؛ فناوری‌های پلتفرمی ظهور پیدا می‌کنند و به‌جای تولید انبوه، تولیدات منحصربه‌فرد متمایز و سازگار با شرایط محیطی خاص رخ می‌دهند (طراحی بر اساس رفتار و نه فرم)؛ عملکرد

۱. فناوری میکروبیوم (wearable microbiome) پوشیدنی یک زمینه نوظهور است در حوزه سلامت و پزشکی شخصی است و در واقع، نوعی سنسور زیستی محسوب می‌شود که قادر به آنالیز تغییرات در میکروبیوم روده یا پوست می‌باشد

2. Biology is technology

3. Carlson



شکل ۸. باکتریوفاژها، ویروس‌هایی که باکتری را به‌عنوان میزبان هدف خود انتخاب می‌کنند، می‌توانند بخش‌هایی از ژنگان خود را درون ژنگان میزبان درج کرده و به این ترتیب، راهی برای الحاق دائمی اطلاعات ژنتیکی خود فراهم کنند. اگر یک باکتری از اولین حمله یک ویروس جان سالم به در ببرد، سلول بخش‌هایی از دی‌ان‌ای ویروسی را در ژنگان خود در توالی کریسپر الحاق می‌کند. دفعه بعد که ویروس سلول باکتریایی را آلوده می‌کند، یک کپی RNA از DNA ویروسی ساخته می‌شود که به‌عنوان مکانیزم هدف‌گیری عمل می‌کند. کپی RNA به آنزیم کس^۹ متصل می‌شود و DNA ویروس را با جفت‌شدن باز می‌شناسد، آنزیم را به توالی هدف هدایت می‌کند، که سپس DNA ویروس را در توالی هدف بُرش می‌زند و در نتیجه، ویروس را خنثی می‌کند (بارتکوفسکی^۱ و همکاران، ۲۰۱۸) (شکل سمت چپ). این دانش زیست‌شناختی در خصوص نحوه عمل سیستم ایمنی دقیق و بسیار اختصاصی باکتری، پایه طبیعی فناوری کریسپر شده و به محققان کمک کرده است تا از آن برای ویرایش ژنگان موجودات زنده، درمان بیماری‌های ژنتیکی، و بهبود صفات تغذیه‌ای در گیاهان و حیوانات استفاده کنند (شکل سمت راست). چون فناوری کریسپر محدودیت‌های روش‌های تراریختی^۲ را ندارد، با ریسک کمتر پتانسیل ورود به بازارهای زیست‌فناوری را داراست و دسته جدیدی از موجودات ویرایش‌شده شبه-طبیعی را ایجاد کند که در آن‌ها مرز میان طبیعت و فناوری قابل تشخیص نیست (همان منبع).

این قابلیت شگرف علوم زیستی در تلفیق با فناوری اطلاعات و ارتباطات منجر به پیدایش عرصه‌های نوینی در ساحت علم شده که از آن جمله می‌توان به رایانش زیستی^۴، محاسبات زیستی^۵ و مهندسی زیستی^۶ اشاره کرد.

به دنبال این نوزایی علمی، جهان شاهد نوگرایی در حوزه صنعت بوده است که دستاورد نهایی آن را می‌توان ظهور صنعت زیستی^۷ و در یک افق کلان‌تر، اقتصاد زیستی^۸ دانست (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) (ویوین و همکاران، ۲۰۱۹؛ لیما و بلک^۹، ۲۰۲۲؛ وی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۲؛ چیبوی^{۱۱} و همکاران، ۱۴۰۲).

در این برهه از دوران زیست‌شناسی است که به گفته توماس کوهن^۳ (۱۳۹۳) شاهد وقوع یک تغییر پنداره (پارادایم شیفت) در حیطه علم خواهیم بود و به‌تبع آن، اقتصاد شکل نوینی به‌خود گرفته و هویت تکاملی جدیدی پیدا می‌کند.

شاید به خطا نرفته باشیم اگر ادعا کنیم که اقتصاد اکنون با یک جهش بزرگ زیست‌شناختی روبروست. جهشی که بیش از هرچیز بر اطلاعات و داده‌های زیستی بنا نهاده شده است. این داده‌ها امکان بازآرایی منابع زیستی را به‌گونه‌ای فراهم می‌سازند که منجر به خلق ارزش شده و به‌تبع آن، رشد پایدار را به‌همراه دارد.

1. Bartkowski

2. Transgenesis

۳. توماس کوهن (Thomas Samuel Kuhn) فیزیکدان و مورخ علم معاصر (۱۹۶۱-۱۹۲۲) است که بیشتر به‌خاطر نظریه‌پردازی در حوزه فلسفه علم و کتاب معروفش با عنوان ساختار انقلاب‌های علمی شناخته شده است. مفهوم محوری این کتاب پرتأثیر و بحث‌برانگیز آن است که بسط و گسترش علم - در دوره‌های متعارف علم - متأثر از یا مبتنی بر آن چیزی است که کوهن از آن به انگاره (Paradigm) تعبیر می‌کند. به عقیده او انقلاب‌های علمی زمانی رخ می‌دهند که علم متعارف در پاسخگویی به مسائل دچار نارسایی می‌شود و این‌گونه است که انگاره جدیدی پدید می‌آید که لزوماً هم در تداوم انگاره پیشین و متعارف نخواهد بود. در چنین حالتی، ما با تغییر انگاره (Paradigm shift) مواجه خواهیم بود که مستلزم بازاندیشی در باورها و فعالیت‌های علمی موجود است. برگرفته از منبع زیر:

Wikipedia contributors. (۲۰۲۴, March ۱۶). Thomas Kuhn. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved ۱۰:۴۵, March ۲۰۲۴, from: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Thomas_Kuhn&oldid=۱۲۱۲۵۹۷۵۱۸

4. Bioinformatics

5. Biocomputing

6. Bioengineering

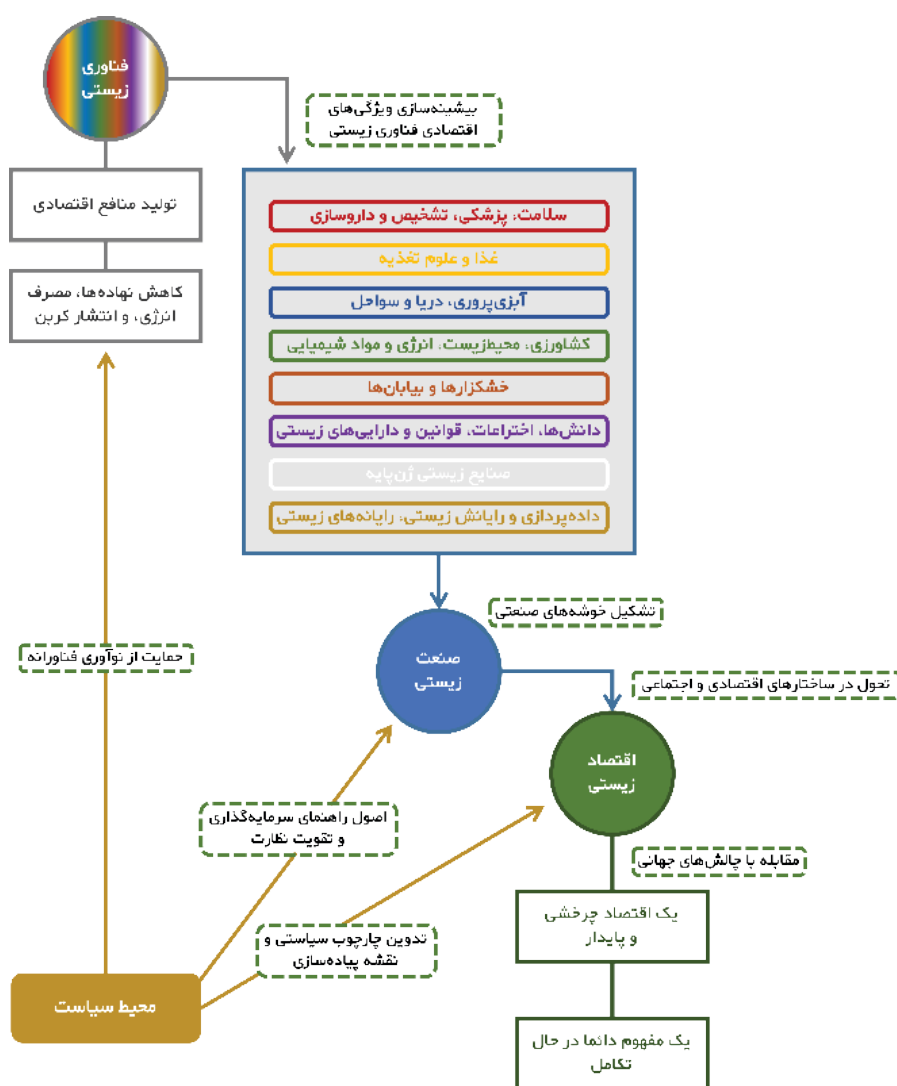
7. Bioindustry

8. Bioeconomy

9. Lima and Belk

10. Wei

11. Chui

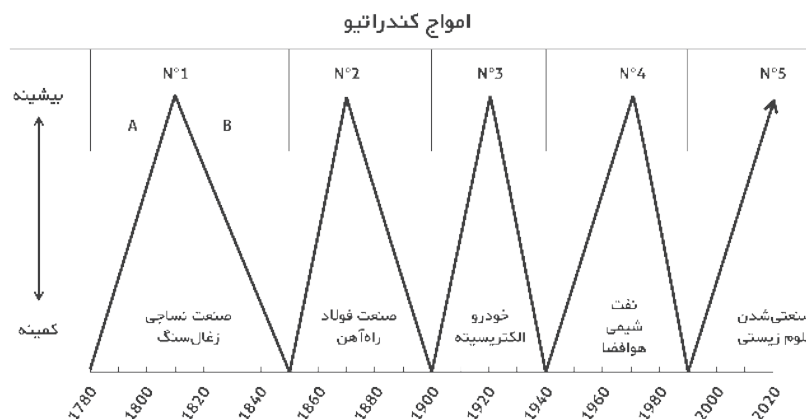


شکل ۱۰. مسیر نمایشی توسعه اقتصاد زیستی مبتنی بر فناوری زیستی و تکامل زنجیره «فناوری زیستی-صنعت زیستی-اقتصاد زیستی» (برگرفته و بازطراحی شده از وی و همکاران، ۲۰۲۲).

از کاربرد مهندسی برای توسعه و تولید فرآورده‌های اقتصاد زیستی هستند. علاوه بر این، استفاده از اصول مهندسی در علوم زیستی (مثل فرآیند طراحی-ساخت-آزمون-یادگیری^۱) به پیشرفت‌های زیست‌شناسی مصنوعی کمک کرده است (شکل ۱۲). برای انجام این کار، علوم محاسباتی و فناوری اطلاعات و ارتباطات امکان مدل‌سازی ریاضی آزمایش‌ها را قبل از اجرای آن‌ها، و توسعه نتایج پیش‌بینی‌شده را ممکن ساخته است (هولوفاکو^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

توسعه روش‌های تحلیلی پیشرفته ناشی از رایانش و محاسبات زیستی، امکان دستیابی به نتایج علمی با استفاده از نمونه‌های آزمایشی کوچک‌تر را فراهم آورده است. همچنین، توسعه برنامه‌های کاربردی مختلف ناشی از پیشرفت در فناوری‌های میکروفلوئیدیک و رباتیک، به خودکارسازی و کوچک‌سازی فرآیندهای آزمایشی و تولید صنعتی منجر شده و به‌نوبه خود، توسعه محصول در مقیاس کلان را تسهیل می‌کند. علاوه بر میکروفلوئیدیک و رباتیک، مهندسی بافت، کشت سلولی و تخمیر پیشرفته نیز، نمونه‌هایی

1. Design-Build-Test-Learn (DBTL)
2. Holowko



شکل ۱۱. دیدگاه اقتصاد زیستی مبتنی بر زیست فناوری. این دیدگاه منطبق بر نظریه چرخه‌های کندراتیو شومپتر است. در پایان دهه ۶۰ میلادی، نشانه‌های صنعتی شدن علوم زیستی به عنوان یک انقلاب صنعتی (موج پنجم کندراتیو) ظاهر گردید. اما امیدها و وعده‌های مورد انتظار از زیست فناوری به قدر کافی سهل الوصول نبودند تا به شکل یک چرخه نوآوری به ظهور برسند. در نتیجه سرمایه‌گذاری‌های گسترده در حوزه زیست فناوری و تلاش‌های مستمر نهادهای در سازمان همکاری اقتصادی و توسعه (OECD)، بالاخره از اواخر سال ۲۰۰۰ میلادی اقتصاد زیستی به ظهور رسید (برگرفته از ویوین^۱ و همکاران ۲۰۱۹).

رفتاری او را هدف گذاری کرده است (فوکویاما^۳، ۲۰۰۴؛ درتیچ و سورگنر^۴، ۲۰۱۶؛ ظفر^۵ و همکاران، ۲۰۲۱). برای مثال، می‌توان انتظار ظهور و پیدایش انواعی از دستگاه‌ها و ابزار ارتباطی مبتنی بر «اینترنت اشیاء نانو-زیستی»^۶ را داشت که قادر به سازگاری و تعامل با موجودات زنده بوده و شرکت‌های فناوری از آن برای درمان بیماری‌های انسانی یا ارتقاء سطح مراقبت‌های بهداشتی بهره جویند (ظفر و همکاران، ۲۰۲۱).

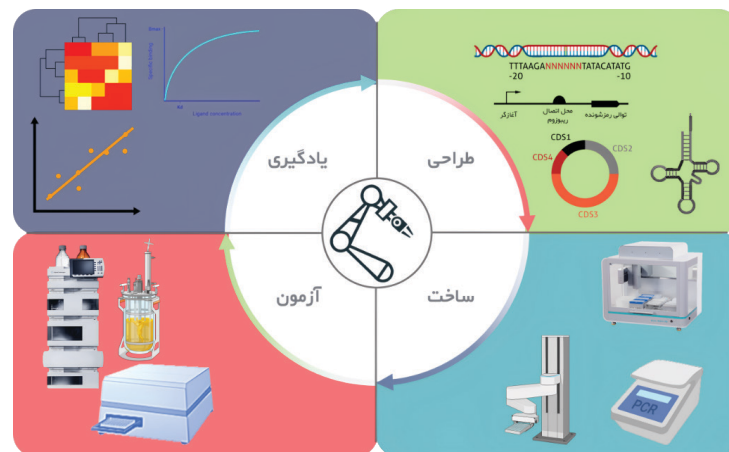
رابطه‌های سایبری زیستی^۷ یکی از انواع چنین پیشرفت‌های تلفیقی هستند که برای تبدیل سیگنال‌های بیوشیمیایی دریافتی از نانوشبکه‌های درون بدن به سیگنال‌های الکتریکی -و بالعکس- به کار می‌روند و بر بستر اینترنت اجرا می‌شوند. این رابطها (حسگرهای شیمیایی بی‌سیم) را می‌توان برای تسهیل نظارت مداوم بیماران مورد استفاده قرار داد. در واقع، کار اصلی این‌گونه رابط‌های کاربری برقراری نوعی ارتباط مولکولی درون بدنی در سطح نانو-میکرو-ماکرو است. در عمل، توسعه چنین ابزارهای زیستی انجام مراقبت‌های بهداشتی از راه دور و جمع‌آوری پارامترهای فیزیولوژیکی حیاتی از بدن انسان یا هر ارگانیسم زنده دیگر و انتقال آن‌ها بر بستر اینترنت را امکان‌پذیر می‌سازد. برخی از انواع رابط‌های سایبری-زیستی نیز برای رهپایش دقیق دارو در مقیاس نانو طراحی شده‌اند و در حال حاضر در دست آزمایش و بررسی عملکرد می‌باشند (همان منبع).

روش‌های محاسباتی پیشرفته، مانند یادگیری ماشین، ظرفیت‌ها را برای مشاهده الگوهای پنهان در مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده افزایش داده است. این امر، به محققان اجازه می‌دهد تا «فرضیات دقیق‌تری» مطرح سازند، آزمایش‌های غیرمحمول را حذف کنند و بر پیگیری امیدوارکننده‌ترین سرنخ‌ها تمرکز کنند. مجموعه داده‌های زیستی، اعم از ژنومیکس، پروتئومیکس، متابولومیکس، و سایر آمیکس‌ها را می‌توان با داده‌های تصویربرداری، مشاهدات بالینی پزشکی، سوابق به‌نژادی گیاهی، داده‌های تصادفی، اطلاعات خانوادگی، و اطلاعات مربوط به سبک زندگی - قابل دستیابی از شبکه‌های اجتماعی - جفت کرد. استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی در این مجموعه داده‌ها، درک ما را از پیوندهای علی و معلولی و نیز، روابط میان ژنوتیپ و فنوتیپ افزایش می‌دهد. در واقع، همین بینش‌های عمیق است که نویدبخش آینده اقتصاد زیستی است (فریس‌ولد^۲ و همکاران، ۲۰۲۱).

این هم‌افزایی و تلفیق دانشی میان علوم زیستی و فناوری اطلاعات و ارتباطات چشم‌اندازهای خیره‌کننده‌ای را در برابر جامعه بشری ترسیم کرده است (پلکسوساکیس، ۲۰۰۶). شاید کمی تخیلی به نظر آید، اما در همین دو دهه اخیر، تلفیق میان هوش مصنوعی (خشک‌افزار) و داده‌های زیستی (نم‌افزار)، منجر به ظهور جنبش‌هایی مثل جنبش «فرا-انسانی» شده است که به دنبال رفع ضعف‌ها، نقص‌ها و محدودیت‌های جبری حاکم بر ژنتیک انسان و بهبود وضعیت بیولوژیکی بدن انسان بوده و یا ارتقاء ویژگی‌های

1. Vivien
2. Frisvold
3. Fukuyama
4. Deretić and Sorgner

5. Zafar
6. Internet of Bio-nano things (IoBNT)
7. Bio-cyber interfaces



شکل ۱۲. فرآیند طراحی-ساخت-آزمون-یادگیری یک فرآیند یکپارچه، چرخشی و بازخوردی است برای سیستمی کردن مهندسی متابولیک و افزایش اثربخشی و تعمیم‌پذیری آن. این چرخه، بهبود مستمر و بهره‌وری در تولید محصولات زیستی، از جمله سوخت‌های زیستی و محصولات زیست-پایه را تضمین می‌کند. در مرحله طراحی، با استفاده از داده‌ها و بانک‌های اطلاعاتی مربوط به پلاسمیدها و قطعات ژنتیکی، نسبت به اتخاذ مطلوب‌ترین راهبرد همسان‌سازی دی‌ان‌ای اقدام شده و سازه‌های دی‌ان‌ای یا ارگانیسم‌های هدف طراحی می‌شوند. در مرحله ساخت، قطعات مختلف دی‌ان‌ای سرهم‌بندی شده، انتقال ژن به میزبان(های) هدف صورت گرفته، و نسبت به غربالگری سلول میزبان و سپس استخراج دی‌ان‌ای و پروتئین اقدام می‌شود. در مرحله آزمون، تعیین فنوتیپ صورت می‌گیرد و به کمک مطالعات آمیکس، از جمله ترانسکریپتومیکس، پروتئومیکس، متابولومیکس و ... رفتار سلول تراژن به‌دقت بررسی شده، در نهایت نسبت به کشت سلولی در راکتور زیستی اقدام می‌شود. در مرحله یادگیری، داده‌های حاصل از مراحل پیشین تحلیل شده، به کمک یادگیری ماشین، نسبت به پیش‌بینی فرآیندهای زیستی و درک بینش‌های بیشتر اقدام می‌شود (برگرفته از اوپنورث^۱ و همکاران، ۲۰۱۹، هولوفکو و همکاران، ۲۰۲۱).

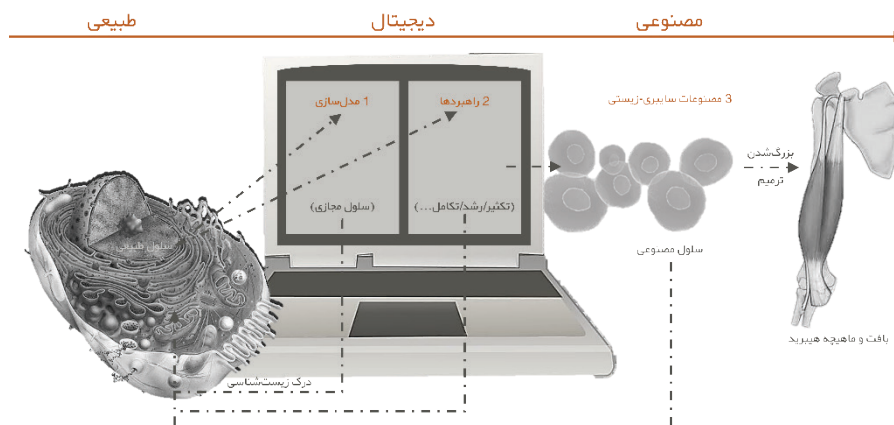
۴.۲. تحول در فرآیند تولید صنعتی

علاوه بر آنچه شرح داده شد، امکان اختراع اجزاء و سیستم‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات مبتنی بر ساختارهای زیست‌مولکولی مصنوعی و فراتر از آن، سیستم‌هایی که قادر به رشد فیزیکی بوده یا از قابلیت خودترمیم‌شوندگی برخوردار باشند نیز وجود دارد. این امر به‌ویژه از تلفیق علوم و فناوری‌های زیستی با فناوری اطلاعات و ارتباطات، و مواد جدید حاصل می‌شود و می‌رود تا مرز میان اطلاعات، مواد و حیات را محو کند (پلکسوساکیس، ۲۰۰۶؛ اوکسمن ۲۰۱۸). چشم انداز داشتن نوعی فناوری اطلاعات و ارتباطات که به اصول زیستی شبیه باشد و در نتیجه قوی‌تر، خودتنظیم‌شونده‌تر، سازگارتر با محیط‌زیست و طبیعت، تکامل‌یابنده، و ساده‌تر باشد، مدت‌هاست که ذهن دانشمندان علوم رایانه را به خود مشغول داشته و آنان را به الهام‌گرفتن از طبیعت و الگوهای زیستی واداشته است.

از قضا، بیشتر تکنیک‌ها و روش‌های فناوری اطلاعات و ارتباطات با الهام‌گرفتن از زیست‌شناسی بر اساس دانش زیستی موجود در

دهه ۸۰ میلادی طراحی شده‌اند. در این اثنا، پیشرفت‌های زیادی در زیست‌شناسی حاصل شده و دانش‌های بدیعی پا به عرصه وجود نهاده‌اند که اکنون می‌توان از آن برای تقویت و ارتقاء سیستم‌های اطلاعاتی و ارتباطی استفاده کرد -مثل پیشرفت‌های حاصله در یادگیری، ادراک، عمل، و هومئوستازی سیستم‌های زنده. در مقابل، الگوریتم‌های کارآمد حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات را می‌توان در توسعه زیست‌شناسی و فناوری‌های زیستی استفاده کرد. به‌عنوان مثال از این الگوریتم‌ها می‌توان برای طراحی داروهای کارآمدتر، حرکت به سمت پزشکی شخصی یا ایجاد سیستم‌های زیستی مصنوعی‌تر بهره جست (شکل ۱۳).

با این حال، فراتر از چنین هم‌افزایی‌های متقابل، رشد دانش و فناوری در هر دو طرف، راه را برای همگرایی‌های عمیق‌تر میان زیست‌شناسی و فناوری اطلاعات و ارتباطات هموار می‌کند که انتظار می‌رود به ظهور سیستم‌های کاملاً یکپارچه و نوآوری‌های رادیکال مثل رابط‌های زیستی-ماشینی، مدارهای ژنتیکی و رایانه‌های زیستی منجر شود (پلکسوساکیس، ۲۰۰۶؛ مارتین-سانچز، ۲۰۰۶).



شکل ۱۳. تلفیق زیست‌شناسی و فناوری اطلاعات و ارتباطات منجر به هم‌افزایی میان سه حوزه مختلف می‌شود: دنیای طبیعی (سیستم‌های زیستی یا نم‌افزار)، دنیای دیجیتال (رایانه، هوش مصنوعی و نرم‌افزار)، و دنیای مصنوعی (سیستم‌ها و فناوری‌های بشرساخت). مدل‌سازی سلولی به کمک طراحی‌های دیجیتالی و نمایش رایانه‌ای به مطالعه و درک بهتر عملکرد و رفتار سلول‌های طبیعی کمک می‌کند. این به‌نوبه خود، به توسعه فرآیندها به‌منظور خلق اجزا یا سیستم‌های زیستی جدید می‌انجامد و در نتیجه، امکان نو ترکیبی، تعامل و ارتباط میان عناصر دنیای طبیعی، دیجیتال و مصنوعی را ممکن می‌سازد (برگرفته و بازطراحی‌شده از مارتین-سانچز^۱، ۲۰۰۶)

۴,۲,۱. پیشرفت در فرآیند تولید زیستی مبتنی بر زیست‌فناوری مدرن

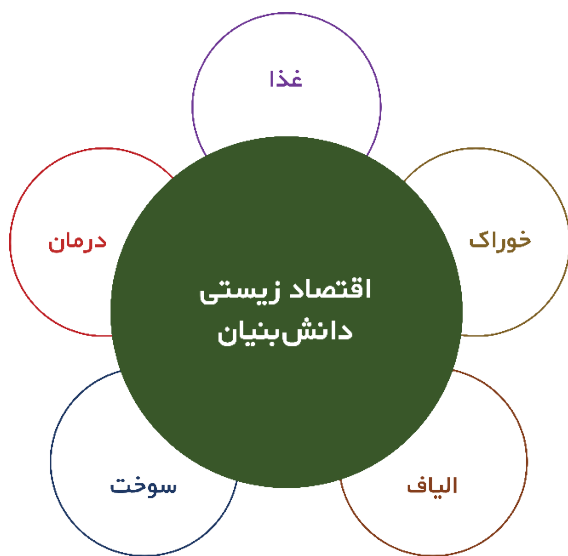
توانمندی‌های زیستی جدید، ظرفیت ایجاد تغییرات گسترده اقتصادی و اجتماعی را دارند و تاثیر آنها در زنجیره‌های ارزش از چگونگی تحقیق و توسعه، تولید نهاده‌های فیزیکی، و چگونگی

توزیع و مصرف، محسوس خواهد بود. چپویی و همکاران (۱۴۰۲) این نوآوری‌ها را در چهار بخش دسته‌بندی کرده‌اند که عبارت‌اند از مولکول‌های زیستی، سامانه‌های زیستی، رابط‌های زیستی-ماشینی و محاسبات زیستی (جدول ۱). هرگونه ساختار شکنی عمده در هر یک از این چهار عرصه، تقویت سایر عرصه‌ها را در پی خواهد داشت.

جدول ۱. نوآوری‌های زیستی در چهار عرصه در حال وقوع‌اند (برگرفته از چپویی و همکاران، ۱۴۰۲)

موضوع	مولکول‌های زیستی	سامانه‌های زیستی	رابط‌های زیستی-ماشینی	محاسبات زیستی
نقشه‌یابی	فرآیندها و فعالیت‌های سلولی از طریق اندازه‌گیری مولکول‌های درون سلولی (مثل دی‌ان‌ای، آران‌ای و پروتئین در مطالعات امیکس)	ساختارها و فرآیندهای زیستی پیچیده، و روابط متقابل سلول‌ها	ساختار و عمل سیستم عصبی موجودات زنده	سفرآیندهای درون سلولی یا شبکه‌های سلولی به‌منظور درک پیامدهای ناشی از شرایط خاص (از طریق محاسبات رایانشی)
مهندسی	ساختارها و فرآیندهای زیستی پیچیده، و روابط متقابل سلول‌ها	سلول‌ها، بافت‌ها و اندامک‌ها، از طریق فناوری سلول‌های بنیادی و پیوند بافت	سیستم‌های هیبریدی که ماشین‌ها را به سیستم عصبی موجودات زنده متصل می‌کنند	سلول‌ها و ترکیبات سلولی برای فرآیندهای محاسباتی (ذخیره‌سازی، بازیابی و پردازش داده)
مثال	ژن درمانی برای بیماری‌های تک‌ژنی	گوشت‌های کشتگاهی	پروتزهای عصبی کنترل‌شونده (چه به‌شکل ایمپلنت یا هدست‌های خارجی) توسط انسان یا اندام‌های رباتیک	ذخیره‌سازی داده در رشته‌های دی‌ان‌ای

۱. طراحی، ساخت از نو یا ایجاد تغییر



شکل ۱۴. این طرح، ارکان بنیادین اقتصاد زیستی دانش‌بنیان را نشان می‌دهد که برای تامین آن‌ها فرآیندهای نوینی مثل سامانه‌های زیستی و زیست‌شناسی مصنوعی توسعه یافته‌اند. غذا شامل همه انواع محصولات خوراکی با منشأ حیوانی یا گیاهی و همچنین اقلامی است که از طریق فعالیت میکروارگانیسم‌ها تولید می‌شوند (مانند فرآورده‌های غذایی و لبنی تخمیری) یا به‌منظور برخورداری از ترکیبات مغذی بهتر یا خواص فیزیولوژیکی برتر فرموله می‌شوند. خوراک شامل غذای دام و مواد اولیه برای صنایع شیمیایی است که در هر صورت می‌تواند از پسماندهای زیستی و سایر انواع زیست‌توده بدست آید. الیاف، اشاره دارد به مواد زیستی با ویژگی‌های فیزیکی از پیش تعیین شده که آنها را مناسب بکارگیری در صنایع نساجی، فناوری پیشرفته و ساخت و ساز می‌کند. سوخت شامل مجموعه بزرگی از ترکیبات با چگالی کربن بالا و مخلوط‌های آنها می‌شود که به‌طور فزاینده‌ای جایگزین سوخت‌های فسیلی شده و در نتیجه، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌همراه دارد. به این مجموعه، یک شاخه کلیدی دیگر از زیست‌فناوری مدرن (درمان) را می‌توان اضافه کرد که نشان‌دهنده رویکردهای پیشرفته برای مقابله با بیماری‌ها بر اساس مولکول‌های فعال زیستی جدید و عوامل زنده مهندسی‌شده است (برگرفته از دولورنزو، ۲۰۲۲)

در مولکول‌های زیستی و سازه‌های زیستی، پیشرفت در امیکس^۱ و فناوری‌های مولکولی (نقشه‌برداری و اندازه‌گیری مولکول‌ها و مسیرهای درون‌سلولی و مهندسی آن‌ها) درک ما را از فرآیندهای زیستی افزایش می‌دهد و ما را قادر می‌سازد که زیست‌شناسی را مهندسی کنیم. برای مثال، فناوری کریسپر در مقایسه با روش‌های قبلی، به دانشمندان امکان می‌دهد تا ژن‌ها را سریع‌تر و دقیق‌تر ویرایش کنند. این موضوع، می‌تواند به طراحی و بهینه‌سازی سریع‌تر میکروارگانیسم‌ها در قالب زیست‌شناسی مصنوعی بیانجامد. البته، هدف غایی زیست‌شناسی مصنوعی، صرفاً بهینه‌سازی میکروارگانیسم‌ها نخواهد بود، بلکه طراحی مسیرهای متابولیکی کاملاً جدیدی است که در طبیعت وجود ندارند. به‌لایه، با افزایش صحت، دقت و سرعت فرآیندهای زیستی مصنوعی، ژنوم سلول‌های مصنوعی به‌حدی کاهش می‌یابد که تنها می‌توان آن‌ها را نوعی «شاسی سلولی»^۲ دانست که می‌توان مدارهای ژنتیکی بیان‌کننده مسیرهای متابولیک مدولار را روی آن‌ها سوار کرد. این رویکردهای زیست‌شناسی مصنوعی، رشته‌های زیست‌شناسی و شیمی را به اصول مهندسی نزدیک‌تر خواهد کرد (شو^۳ و همکاران، ۲۰۲۰، کرچر^۴ و همکاران، ۲۰۲۲). طبق برآوردهای موسسه جهانی مکینزی، بین سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰، روش‌های مهندسی زیستی مانند کریسپر، خواهند توانست تاثیر مستقیم سالانه‌ای به ارزش ۹۰۰ میلیارد تا ۲/۲ تریلیون دلار در اقتصاد زیستی برجای گذارند (چیویی و همکاران، ۱۴۰۲).

اکنون، با پیشرفت فناوری توالی‌یابی اسید نوکلئیک و ارزان‌شدن آن، کار نقشه‌یابی ژنوم‌های موجودات زنده سرعت گرفته است. تا سال ۲۰۰۳ نقشه‌برداری از ژنوم انسان (طی یک پروژه بزرگ پانزده ساله) حدود ۳ میلیارد دلار هزینه برداشت اما تا سال ۲۰۱۹ این هزینه به کمتر از ۱۰۰۰ دلار رسید؛ پیش‌بینی می‌شود در طول یک دهه یا حتی زودتر، این هزینه به کمتر از ۱۰۰ دلار نیز برسد. این امر، درک بهتری از مکانیسم‌های زیستی را در پی خواهد داشت و به‌نوبه خود، بر پیشرفت در تحقیق و توسعه، تشخیص و درمان، و ارتقاء سایر بخش‌ها مثل غذا و کشاورزی، سوخت‌های زیستی، مواد، مواد شیمیایی و دارویی تاثیر خواهد گذاشت (شکل ۱۴) (وسلر و فون براون^۵، ۲۰۱۷؛ دولورنزو^۶، ۲۰۲۲؛ کاردونگ^۷، ۲۰۲۳؛ چیویی و همکاران، ۱۴۰۲).

۱. اومیکس (Omics) واژه‌ای عمومی برای اشاره به فناوری‌هایی که امکان شناسایی و سنجش کمی مجموعه کاملی از مولکول‌ها (مثل پروتئین‌ها، کربوهیدرات‌ها و لیپیدها) را در یک سامانه زیستی (سلول، بافت، اندام، مایع زیستی، یا ارگانیسم) و یک نقطه زمانی خاص فراهم می‌کند (برگرفته از چیویی و همکاران، ۱۴۰۲).
۲. سلول شاسی، یک سلول پلتفرم است که با ادغام ماژول‌های زیست‌شناسی مصنوعی مربوطه در سلول، قابلیت تولید انواع مواد شیمیایی یا آنزیم‌ها را بدست می‌آورد (شو و همکاران، ۲۰۲۰).

3. Xu

4. Kircher

5. Wesseler and von Braun

6. De Lorenzo

7. Kardung

مینیاتوری که واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای را در یک فضای سه‌بعدی کوچک انجام می‌دهد، چیزی نبوده مگر تایید واقعیتی نوظهور. تولید ترکیباتی مانند لگ‌هموگلوبین^۶، سیتاگلیپتین^۷ و دی‌آمین‌ها توسط سلول‌های مهندسی‌شده را در همین راستا می‌توان تعبیر کرد (وویت^۸، ۲۰۲۰؛ کی‌ران و همکاران، ۲۰۲۴). اکنون، نقشه متابولیک بسیاری از مواد شیمیایی زیست-پایه در دسترس قرار دارد که می‌تواند به طراحی و بهینه‌سازی مسیرهای متابولیک برای بیوسنتز مواد شیمیایی هدف کمک کند.

یکی از گلوگاه‌های اصلی در تولید زیستی مواد شیمیایی متنوع، درک ناقص ما از مسیرهای بیوسنتزی یا چگونگی تولید این مواد است. در مورد مسیرهای بیوسنتزی ناشناخته، می‌توان گفت که توسعه ابزارهای محاسباتی در سال‌های اخیر، توانسته به شناسایی این مسیرها و آنزیم‌های مرتبط جهت بیوسنتز محصولات طبیعی و مشتقات آنها کمک شایان توجهی نماید. با این حال، این ابزارها هنوز نیازمند استفاده از روش‌های تکمیلی و طاقت‌فرسای هستند برای رتبه‌بندی مسیرهای پیش‌بینی‌شده، انتخاب آنزیم‌های خاص هر مسیر، و بهینه‌سازی حلالیت و فعالیت آنزیم‌های هدف. در آینده، طراحی مسیرهای زیستی تولید مواد شیمیایی به‌کمک هوش مصنوعی و کلان-داده‌های زیستی، تأسیس کارخانه‌های سلول‌های میکروبی را تسهیل کرده و به توسعه راهبردهایی برای تولید پایدار مواد شیمیایی زیست-پایه کمک خواهد کرد (ژانگ^۹ و همکاران، ۲۰۲۱).

مفهوم «میکروب به‌عنوان کارخانه» دو پیامد فوری دارد. یکی این که می‌توان انواع مختلف مولکول‌های هدف را به یک پلتفرم زیستی منتقل کرد، که در غیر این صورت همچنان می‌توانست در انحصار صنایع شیمیایی باقی بماند، و دوم این که، چنین سامانه‌های زنده میکروبی را می‌توان در مکان‌های مورد نظر مستقر کرده، به تولید محصولات و ترکیبات زیستی مورد نیاز اقدام کرد. این ویژگی‌ها، به خلق فرصت‌های زیستی عظیمی در کشاورزی و مدیریت زیست‌محیطی انجامیده، به پیدایش عصر نوینی در تاریخ فعالیت‌ها و تولیدات بشرزاد منجر شده‌اند که مشخصه بارز آن، گذار از مهندسی ژنتیک^{۱۰} به مهندسی زیستی^{۱۱} و در نهایت به اقتصاد زیستی دانش‌بنیان بوده است.

طی ۳۳ سال، پس از انتشار اولین گزارش شبیه‌سازی یک قطعه دی‌ان‌ای در سال ۱۹۷۳ تا تولید اسید آرتمیزینیک^{۱۲} - پیش‌ساز داروی ضد مالاریا - در مخمر در سال ۲۰۰۶ موفقیت‌های بسیاری

در مفهوم توسعه‌یافته اقتصاد زیستی که چرخش‌پذیری و پایداری را هدف قرار داده، نیاز به نوآوری در زمینه خواص و ترکیبات جدیدی است که قادر باشند سازگاری زیست‌محیطی بهتری در مقایسه با مواد مصرفی کنونی ایجاد کنند. این موضوعی است که به‌ویژه، با لحاظ کردن شرط زیست‌تخریب‌پذیر بودن فرآورده‌های تولیدی، در حیطه زیست‌فناوری مدرن قرار می‌گیرد (لوپز-کورئا و سوارز-گونزالز^۱ ۲۰۲۲). توجه به این جنبه، به‌خصوص، برای آن دسته از محصولات مهمی است که به‌دلیل نوع کاربرد، امکان بازیافت آن‌ها وجود ندارد؛ برخی لوسیون‌ها و محلول‌های بهداشتی و آرایشی که در بخش خانگی و مراقبت‌های شخصی مورد استفاده واقع می‌شوند و به‌ناچار به فاضلاب سرازیر می‌شوند، در این دسته قرار می‌گیرند. بنابراین، مواد تشکیل‌دهنده آن‌ها باید هم پایه زیستی داشته باشد (به‌طوری که باعث انتشار CO₂ اضافی به اکوسیستم نشود) و هم زیست‌تخریب‌پذیر باشد (به‌طوری که اثرات منفی زیست‌محیطی ناشی از میکروپلاستیک‌ها را ایجاد نکند). بنابراین، یک اقتصاد زیستی چرخشی پایدار، به‌معنای واقعی کلمه به محصولات، فرایندها و زنجیره‌های ارزش جدید نیاز دارد تا بتوان چرخه‌ها را تا حد زیادی بسته و اثرات زیست‌محیطی را کاهش داد (کرچر و همکاران، ۲۰۲۲).

توسعه فناوری‌های پیشرفته در زمینه توالی‌یابی و سنتز دی‌ان‌ای منجر به پیشرفت‌های شگرف و قابل توجهی در طراحی، مونتاژ، دست‌ورزی ژن‌ها، مواد، مدارها و مسیرهای متابولیک شده است که به‌دنبال خود، روایت زیست‌فناوری را از یک مکاشفه علمی به یک صنعت دارویی و شیمیایی و یکی از ارکان انقلاب زیستی ارتقاء داده است (دولورنزو، ۲۰۲۲؛ کی‌ران^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). چنین گذاری با تحولات مفهومی بنیادین همراه بوده است که جذابیت متقابل و فزاینده میان دنیای زیست‌فناوری و صنعت را تسهیل کرده است. یکی از آن‌ها، مفهوم کارخانه‌های زیستی^۳ است که در اوایل دهه ۱۹۹۰ ارائه گردید و مبتنی بر این ایده است که سلول‌های میکروبی را می‌توان واحدهای صنعتی واقعی - و نه استعاری - در نظر گرفت (هیلسون^۴ و همکاران، ۲۰۱۹؛ هولوفکو و همکاران، ۲۰۲۱؛ لوپز-کورئا و سوارز-گونزالز، ۲۰۲۲؛ گوردو^۵ و همکاران، ۲۰۲۳؛ کی‌ران و همکاران، ۲۰۲۴).

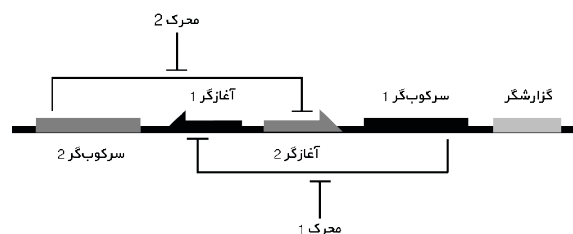
مفهوم کارخانه‌های زیستی که در ابتدا برای میکروارگانیسم‌ها به کار گرفته شده بود، به‌سرعت به سایر انواع سلول‌ها (گیاهی، حیوانی) تعمیم یافت و جایگاه خود را در میان سازمان‌های سرمایه‌گذاری و تحقیقاتی نیز مستحکم ساخت. در طول سال‌ها، ایده یک کارخانه

1. Lopez-Correa and Suarez-Gonzalez
2. Kiran
3. Biofoundry
4. Hillson
5. Gurdo
6. Leghemoglobin

7. Sitagliptin
8. Voigt
9. Zhang
10. Genetic Engineering
11. Biological Engineering
12. Artemisinin acid

رخداد دوم، طراحی منطقی یک سوئیچ ژنتیکی بود، به گونه‌ای که از قوانین مورد نظر سازنده خود پیروی کند. در واقع، این سوئیچ ژنتیکی با الگوبرداری از مدارهای ژنی تخصصی موجود در باکتریوفاژ لاند و سیانوباکترها طراحی و ساخته شد و عبارت بود از یک شبکه تنظیم ژنی مصنوعی متشکل از دو ژن سرکوب‌گر که در باکتری اشیریشیا کلی^۵ بیان می‌گردید. فعالیت این سوئیچ، تحت فرمان دو آغازگر القائی -شیمیایی یا گرمایی- بوده و می‌توان آن را به عنوان یک واحد حافظه سلولی مصنوعی برای کاربردهای زیستی، رایانه‌های زیستی یا در موارد درمان ژنی مورد استفاده قرار داد (شکل ۱۶) (گاردنر^۶ و همکاران، ۲۰۰۰).

سومین مطالعه که در آن به بررسی حلقه‌های بازخوردی منفی در شبکه‌های تنظیم ژنی پرداخته شد، توسط بکسکی و سرانو^۷ (۲۰۰۰) تشریح گردید. این مطالعه، بر پایه چگونگی رفتار سیستم‌های ژنتیکی و بیوشیمیایی در سلول‌های زنده در مواجهه با تغییرات و اختلالات محیط طراحی شد. مبنای مطالعه بکسکی و سرانو بر این ایده استوار بود که پایداری و استحکام سیستم‌های ژنتیکی و بیوشیمیایی ناشی از حلقه‌های بازخورد منفی خودتنظیم‌شونده در مدارهای ژنی است و این خود، تحت القاء محرک‌های محیطی نوسان می‌کند. بر این اساس، آن‌ها آزمایشی را در باکتری اشیریشیا کلی طراحی کردند تا نشان دهند مدارهای ساده ژنی متشکل از یک تنظیم‌کننده و ماژول‌های سرکوب‌گر رونویسی چگونه می‌توانند به شکل‌دهی این حلقه‌های بازخورد منفی بیانجامند.



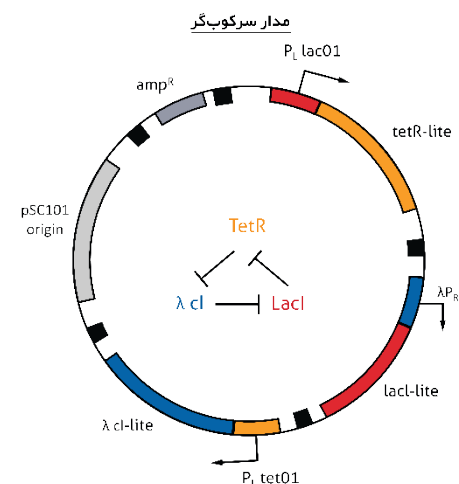
شکل ۱۶. شمای کلی یک سوئیچ ژنتیکی. سرکوب‌گر ۱ رونویسی را از آغازگر ۱ مهار می‌کند و توسط محرک ۱ القاء می‌شود. همچنین، سرکوب‌گر ۲ رونویسی از آغازگر ۲ را مهار می‌کند و توسط محرک ۲ القا می‌شود (برگرفته از گاردنر و همکاران، ۲۰۰۰).

پیام اصلی در هر سه رخداد فوق، این بود که اصول مهندسی را می‌توان به خوبی در طراحی سیستم‌های زنده به کار برد. تحت این پارادایم جدید، موجودیت‌های زنده را می‌توان از منظر منطق رابطه‌ای بخش‌های مختلف آن‌ها مورد بررسی قرار داد و پیکربندی‌های جایگزین و جدیدی را به میل کاربر در آن‌ها شکل داد. در نتیجه، تعجب‌آور نیست اگر زیست‌شناسی را نوعی مهندسی تلقی کنیم که در آن می‌توان از برخی سلول‌های پایه تحت عنوان

در حوزه زیست‌فناوری و به خصوص در زمینه زیست‌پزشکی -مانند تولید عمده هورمون‌های نورترکیب و داروهای فعال زیستی- به دست آمده که تولید آن‌ها به شیوه‌های سنتی و مرسوم بسیار دشوار و پرهزینه است (دولورنزو، ۲۰۲۲).

الف. گذار از فرآیندهای ژنتیکی به مدارهای ژنتیکی

یک مرحله مهم در گذار موفقیت‌آمیز به اقتصاد زیستی، از اوایل سال ۲۰۰۰ آغاز شد که اغلب از آن به عنوان دوره ظهور زیست‌شناسی مصنوعی یاد می‌شود (کی‌ران و همکاران، ۲۰۲۴). این مرحله، با سه رخداد شاخص به ظهور رسید. یکی از آن‌ها، توصیف گروه الوویتس^۱ از مدارهای سرکوب‌گر^۲ است. این‌ها، مدارهای ژنتیکی متشکل از سه مهارکننده رونویسی و بازدارنده متقابل هستند که به صورت چرخه‌ای به شکلی رفتار می‌کنند که می‌توان آن را تابع یک مدل ریاضی توصیف کرد (شکل ۱۵) (الوویتس و لیبلر^۳، ۲۰۰۰).



شکل ۱۵. نقشه ژنتیکی یک مدار سرکوب‌گر. این مدار که توسط مایکل الوویتس و استنیسلاس لیبلر^۴ در سال ۲۰۰۰ طراحی شد، مبتنی بر یک مدل ریاضی از تنظیم رونویسی است که یک حلقه بازخورد منفی چرخه‌ای متشکل از سه ژن سرکوب‌گر و محرک‌های آن‌ها را توصیف می‌کند. در واقع، به جای مشاهده یک سیستم طبیعی و توضیح آن به زبان ریاضی، الویتس و لیبلر یک مدل ریاضی برای کمک به ساخت یک مدار کنترل مصنوعی تبیین کردند که نتیجه آن به شکل‌گیری یک شبکه نوسانی منجر شد که در طبیعت وجود ندارد و از آن به مدار سرکوب‌گر یاد می‌شود. این مدار سرکوب‌گر، نمونه‌ای عالی از کاربرد مدل‌های ریاضی در طراحی مدارهای کنترل مصنوعی است که می‌توان آن را به عنوان ابزاری برای زیست‌فناوری و زیست‌شناسی مصنوعی به کار گرفت، یا برای توصیف و تحلیل پدیده‌های سیستم‌های زیستی و تنظیم فعالیت ژن‌ها و تعادل داخلی سلول‌ها استفاده کرد. این امر، به نوبه خود، به درک بهتر عملکرد سلول‌ها و اندازه‌گیری اثرات داروها روی آنها کمک می‌کند (برگرفته از الوویتس و لیبلر ۲۰۰۰).

1. Elowitz
2. Repressilator
3. Leibler
4. Stanislas Leibler

5. Escherchia coli
6. Gardner
7. Becskei and Serrano

«شاسی‌های سلولی» برای طراحی مدل‌ها و مدارهای ژنتیکی مورد نظر در قالب یک «کارخانه سلولی» استفاده کرد (دولورنو، ۲۰۲۲)

در طول دهه گذشته، انواعی از میکروارگانیسم‌ها (عمدتاً باکتری‌ها و مخمرها) به‌عنوان میزبان (شاسی سلولی) برای تولید ترکیبات ارزشمند مختلف توسعه یافته‌اند (جدول ۲). توانایی قابل‌توجه این سویه‌های میکروبی برای تکثیر در شرایط رشد که به‌آسانی تا سطح صنعتی قابل ارتقاء می‌باشد، آن‌ها را به پلتفرم‌های عالی برای تولید مقرون‌به‌صرفه ترکیبات مختلف از جمله ترکیبات دارویی، مواد غذایی، مواد زیستی، محصولات کشاورزی و سوخت‌های زیستی تبدیل کرده است. از این رو، حتی می‌توان ادعا کرد که استفاده از کارخانه‌های زیستی میکروبی به‌دلیل آن‌که پایداری را ارتقا بخشیده و اثرات مضر صنایع فسیلی بر محیط‌زیست را کاهش می‌دهند، گام مهمی در حفاظت از محیط‌زیست و کاهش بحران

اقلیمی است (میگوتل و دانیلب، ۲۰۲۲).

با توسعه پایگاه‌های داده‌های ژنتیکی، طراحی سیستم‌های زیست‌شناسی مصنوعی جدید (ناموجود در طبیعت) از طریق ادغام سیستمی آجرهای زیستی در قالب ماژول‌های «نصب و کاربرد»^۲ دقیق‌تر و امکان‌پذیرتر می‌شود (همان منبع). بر این اساس، می‌توان ادعا کرد که در مقایسه با قطعات الکترونیکی (مانند خازن‌ها، سوئیچ‌ها، ترانزیستورها و ال‌ئی‌دی‌ها)، تحولی که در افزایش تعداد آجرهای زیستی رخ داده، شگفت‌آور بوده است. این حجم زیاد از پیشرفت‌های زیست‌فناوری ناشی از گسترش داده‌های انباشته‌شده در پایگاه‌های داده‌های ژنتیکی است که می‌تواند به‌عنوان منبعی مطمئن برای شناسایی آجرهای زیستی استفاده شود. بتدریج که پایگاه‌های اطلاعاتی ژنتیکی تخصصی‌تر می‌شوند، شناسایی این اجزاء سازنده نیز ساده‌تر و ارزان‌تر می‌شود.

جدول ۲. نمونه‌هایی از میزبان‌های میکروبی (شاسی سلولی) برای مهندسی متابولیک و شناخته‌شده‌ترین محصولات آن‌ها (برگرفته از میگوتل و دانیلب ۲۰۲۲)

مرجع علمی	کاربرد/محصولات پرطرفدار	کارخانه زیستی
Yang et al. (2019b)	متابولیت‌های ثانویه (مثل ترپنوئیدها، پلی‌کتیدها، فنیل‌پروپانوئیدها و آلکالوئیدها)	<i>Escherichia coli</i>
Bekker et al. (2014)	آنتی‌بیوتیک، عوامل ضدکرم، عوامل ضدتومور، عوامل ضدقارچ و علف‌کش‌ها	<i>Streptomyces spp.</i>
Jung et al. (2010)	تولید صنعتی آمینو اسید	<i>Corynebacterium glutaminicum</i>
Ferna'ndez-Cabezo'n et al. (2017), Yao et al. (2014), Zhang et al. (2021)	دهیدروژنازها، هیدروکسیلازها و هورمون‌ها (مثل تستوسترون و آندروستنون)	<i>Mycobacterium sp.</i>
Thoma and Blombach (2021)	۱.۳- پروپاندیول و ویولاسین	<i>Vibrio natriegens</i>
Guan et al. (2015), Romero et al. (2007), Awasthi et al. (2018), Nishizaki et al. (2007), Westbrook et al. (2018)	اتانول، ترپنوئیدها، کاروتنوئیدها، د-لاکتیک اسید، و اسید هیالورونیک	<i>Bacillus subtilis</i>
César et al. (2013), Spohner et al. (2016)	ال-آسکوربیک اسید، بتا گالاکتوزیداز، کیموزین، اینترلوکین ۱-بتا، اینترفرون آلفا، پیش‌سازهای انسولین	<i>Kluyveromyces lactis</i>
Sun et al. (2016), Guevara et al. (2019)	آکریل‌آمید، هورمون‌ها (مثل تستوسترون)	<i>Rhodococcus ruber</i>

<i>Rhodococcus opacus</i>	تولید سوخت زیستی از لیگنوسلولز	Kurosawa et al. (2013, 2015)
<i>Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum</i>	ان-بوتانول و ۱.۲-پروپانیدیول	Bhandiwad et al. (2013, 2014), Altaras et al. (2001)
<i>Pseudomonas fluorescens</i>	وانیلین و ایندول-۳-استیک	Di et al. (2011), Kochar et al. (2011)
<i>Clostridium acetobutylicum</i>	بوتانول و استون	Calero and Nikel (2019)
<i>Pseudomonas putida</i>	پلی هیدروکسی آلکانوات‌ها و پلیمرهای اصلاح‌شده	Walker and Keasling (2002), Pobleto-castro et al. (2012, 2013)
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	بیواتانول، ان-بوتانول، ایزوپرنوئیدها، اسیدهای چرب، اسید لاکتیک، زایلیتول، اسید سوکسینیک	Ostergaard et al. (2000)
<i>Pichia pastoris</i>	متابولیت‌های پیچیده، پروتئین‌های درمانی، گلیکوزیده، آنزیم سیتوکروم P450 و اسید سالیسیلیک	Peña et al. (2018)
<i>Yarrowia lipolytica</i>	چربی و مشتقات نانولیپیدی، سوخت‌های زیستی مبتنی بر چربی و مواد شیمیایی روغنی	Abdel-mawgoud et al. (2018)
<i>Trichoderma reesei</i> (=Hypocrea jecorina)	سلولز، همی سلولز و بیواتانول	Seiboth et al. (2012), Derntl et al. (2015)
<i>Aspergillus oryzae</i>	ال-مالئیک اسید و ال-مالئات	Brown et al. (2013), Liu et al. (2017)
<i>Pichia kudriavzevii</i>	اسید ایتاکونیک، د-زایلونات، د-لاکتیک اسید و اتانول	Yuan and Guo (2017), Sun et al. (2020), Toivari et al. (2013), Sohn et al. (2018)
<i>Kluyveromyces marxianus</i>	عوامل ضد تومور، زایلیتول، و کشف پروموتور و ترمیناتور جدید برای مهندسی متابولیک	Tseng et al. (2019), Stalidzans and Kokina (2017), Lang et al. (2020), Kumar et al. (2021)

خاصی از مولکول‌های زیستی (مثل اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها متابولیت‌ها)، و حتی یک فعالیت زیستی یا نوع خاصی از ترکیبات زیستی (مثل مولکول‌های طعم‌دهنده^۵ و مولکول‌های فعال زیستی با خواص دارویی^۶) توسعه یافته‌اند. بنیاد بین‌المللی ماشین مهندسی ژنتیک^۷ نیز، اقدام به ایجاد یک پایگاه داده از آجرهای زیستی

در حال حاضر، چندین پایگاه تخصصی داده‌های ژنتیکی در دسترس است که از آن جمله می‌توان به پایگاه‌های زیر اشاره کرد: پایگاه داده‌های ژنوم میکروبی^۱، پایگاه داده‌های جامع ژنوم مخمر^۲، پایگاه داده‌های ژنوم گیاهی^۳ و یک پایگاه اختصاصی برای دام و سایر حیوانات^۴. حتی پایگاه‌های اطلاعاتی مربوط به انواع

1. Microbial Genome Database (MBGD)

2. Comprehensive Yeast Genome Database (CYGD)

3. Plant Genome Database (PlantGDB)

4. ARKdb (<http://www.thearkdb.org>)

5. FlavorDB

6. ChEMBL

7. International Genetically Engineered Machine (iGEM) Foundation

شامل پروموتورها، سرکوبگرها، گزارشگران، تقویت‌کننده‌ها و پایان‌دهنده‌ها کرده است که گام مهمی در شناسایی و استفاده از این اجزاء سازنده برای طراحی و مونتاژ کارخانه‌های زیستی در حوزه زیست‌فناوری صنعتی محسوب می‌شود.

پایگاه ثبت قطعات ژنتیک^۱ که در سال ۲۰۰۳ راه‌اندازی شد، مشتمل بر مجموعه رو به رشدی از بیش از ۲۰,۰۰۰ آجر زیستی است که می‌توان به آن‌ها دسترسی داشت و برای مونتاژ دستگاه‌ها و سیستم‌های زیستی پیچیده استفاده کرد. اخیراً، از ادغام این پایگاه با ۱۰ پایگاه داده دیگر، یک پایگاه داده بزرگ‌تر^۲ ایجاد شده است. با استفاده از این پایگاه داده که اطلاعات مربوط به عملکردها، تعاملات و اطلاعات علمی مرتبط با آجرهای زیستی را نیز ارائه می‌دهد، می‌توان به بیش از ۴۰,۰۰۰ آجر زیستی دسترسی پیدا کرد. با این وجود، پتانسیل تولید آجرهای زیستی بسیار فراتر از این است. با احتساب داده‌های تحلیل‌نشده در پایگاه‌های اطلاعاتی جامع که در بالا مورد اشاره قرار گرفت، می‌توان انتظار داشت که در آینده اجزاء بسیار بیشتری از این آجرهای زیستی شناخته شوند و راه را برای طراحی مسیرهای زیستی کاملاً جدیدی هموار سازند (همان منبع).

ب. گذار از مهندسی ژنتیک به مهندسی زیستی

ابداع مفهوم شاسی سلولی، بحث‌ها و تحلیل‌های بسیاری را حتی در محافل نظارتی دامن زده است، زیرا به‌نحوی، نشان‌دهنده گذار از مهندسی ژنتیک مرسوم به دوره جدیدی است که از آن تحت عنوان مهندسی زیستی یاد می‌شود. در واقع، چنین فرآیندی از گذار که شاخصه بارز آن ظهور زیست‌شناسی مصنوعی و سامانه‌های زیستی^۳ است، را نمی‌توان تنها یک تحول روش‌شناختی دانست، بلکه تحولی است بسیار عمیق‌تر که در پی خود، پیامدهای اجتماعی و اقتصادی/صنعتی بسیار بدیعی را به‌دنبال دارد (دولورنزو، ۲۰۱۱، لیو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

از یک سو، مهندسی زیستی قصد دارد بر دیدگاه مسلط در مهندسی ژنتیک غلبه کند؛ این همان نگاه ابزاری به این حوزه از علم و فناوری است که صرفاً به‌منظور افزایش بهره‌وری (و سود برای شرکت‌های بزرگ چندملیتی) مورد استفاده قرار می‌گیرد و

در سال‌های اخیر، موجی از انتقادات و واکنش‌های اجتماعی را به‌دنبال داشته است. در عوض، مهندسی زیستی به‌دنبال مشارکت کاربران نهایی در تمام مراحل اجرایی و فرآیندهایی است که منجر به تولید محصولات یا خدمات جدید می‌شوند. از دیگر سو، مهندسی زیستی در تلاش است تا زیست‌فناوری را از سطح یک ابزار دست دومی در اختیار صنایع بزرگ شیمیایی، کشاورزی و صنعتی، ارتقاء بخشیده و آن را به یکی از ارکان بنیادین خود بدل سازد. جای تعجب نیست که ارزش اقتصادی مهندسی زیستی به‌سرعت توسط بازیگران صنعتی و نظارتی درک شد و به ابتکارات مختلفی انجامید که در نهایت، پیدایش اقتصاد زیستی، یا به‌طور مناسب‌تر اقتصاد زیستی دانش‌بنیان را سبب گردید. این مفهوم پیامدهای زیادی با خود همراه دارد، اما از منظر تولید صنعتی، یک پیامد آن زیستی‌سازی فرآیند تولید غذا، خوراک، لیاف، سوخت و حتی فرآورده‌های صنعتی سلامت-محور است (رجوع شود به شکل ۱۴) (دولورنزو، ۲۰۲۲).

۴.۲.۲. پیشرفت در فناوری اطلاعات و ارتباطات

دیجیتالی‌شدن می‌تواند فرآیندهای مدیریت داده، تولید دانش و نوآوری را برای دستیابی به گذار پایدار به اقتصاد زیستی سرعت بخشد (واتانابه^۵ و همکاران، ۲۰۱۹). اخبار پیشرفت‌های اخیر شرکت آلفا فولد^۶ (زیرمجموعه آلفابت^۷) نشان‌دهنده تغییرات انقلابی است که این فناوری‌ها در توسعه فرآیندها و محصولات جدید ایجاد کرده‌اند. این شرکت موفق به توسعه الگوریتمی شده که بر اساس توالی اسید آمینه، امکان پیش‌بینی تاخوردگی‌ها و در نتیجه، ساختار فضایی پروتئین‌ها را فراهم می‌کند. این امر، امکان بهینه‌سازی بسیار سریع و کارآمد آنزیم‌ها در فرآیندهای زیست‌فناوری صنعتی را فراهم می‌کند (کرچر و همکاران، ۲۰۲۲). مثال دیگر را می‌توان در حوزه کشاورزی دقیق و هوشمند (دیجیتال) ارائه داد که به‌طور گسترده از فناوری اطلاعات و ارتباطات استفاده می‌کند و کلید توسعه کشاورزی پایدار محسوب می‌شود (والتر^۹ و همکاران، ۲۰۱۷). به موازات، اصول زیستی نیز به توسعه فرآیندهای دیجیتالی می‌انجامد و چالش‌های اقتصاد زیستی منجر به توسعه بیشتر فناوری‌های دیجیتال می‌شوند (رنینگز^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۳). استفاده از فناوری‌های بلاک‌چین نیز نویدبخش بهبود زنجیره‌های

1. iGEM Parts Registry (<http://parts.igem.org/>)

2. BioMaster DataBase (<http://www.biomaster.uestc.cn>)

3. Systems biology

4. Liu

۵. گرچه غذا یک محصول کاملاً زیست-پایه است اما بسیاری از عناصر درگیر در فرآیند تولید غذا مانند کودها و مواد تقویت‌کننده خاک کشاورزی، سموم دفع آفات و بیماری‌ها، ابزار و ادوات مورد استفاده در فرآیند تولید و ... هنوز نفت-پایه هستند. ضمن آن‌که فرآیندهای تولید زیستی بذر و نهال، شیوه‌های بهبود نتاج دام‌ها و برخی فرآیندهای تولید گوشت و لبنیات بی‌دام، از جمله پیشرفت‌های نوینی هستند که تاکنون در طبیعت دیده نشده و در قالب اقتصاد زیستی دانش‌بنیان قابل عرضه خواهند بود.

6. Watanabe

7. AlphaFold

8. Alphabet

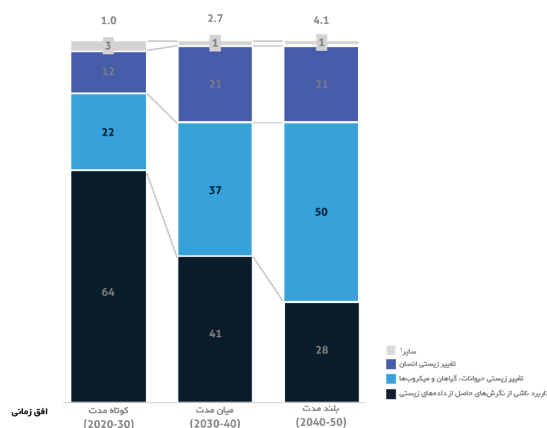
9. Walter

10. Rennings

می‌شوند و زاینده موجی از نوآوری‌های زیستی خواهند بود. برآوردهای موسسه جهانی مکنیزی نشان می‌دهد که تجزیه‌وتحلیل داده‌های ژنومی، میکروبیومی، عصبی، و سایر داده‌های زیستی و بینش‌های علمی حاصله جهت بالابردن دقت و شخصی‌سازی محصولات و خدمات، در مقیاسی بی‌سابقه، منجر به تأثیرات اقتصادی کوتاه‌مدت خواهد شد.

محاسبات سریع‌تر و استفاده روزافزون از هوش مصنوعی و ارتقای سطح پیچیدگی روش‌های تحلیل داده‌ها، سبب گشته تا بینش‌های بیشتری از داده‌های زیستی به‌دست آید و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری در خصوص روابط و فرآیندهای زیستی صورت گیرد. به‌عنوان مثال در کشاورزی، استفاده از مجموعه‌های بزرگ داده‌های ژنتیکی و میکروبی، ما را قادر خواهد ساخت تا بتوانیم زراعت را در جهت دستیابی به‌دست‌آورد موردنظر تحت شرایط محلی کاملاً مشخص و معطوف-به-مکان، متناسب‌سازی کنیم.

با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های مشابه، می‌توان محصولات و خدمات را بر اساس ویژگی‌های ژنتیکی مصرف‌کنندگان و ترکیب میکروبیوم آن‌ها متناسب‌سازی کرد. در واقع، طی ده سال آینده، حتی اگر پیشرفت بیشتری هم در روش‌های مهندسی زیستی صورت نگیرد، باز ارزش‌های عظیمی از طریق تجزیه‌وتحلیل حجم فوق‌العاده بالای داده‌های زیستی، که از هم‌اکنون در حال تولید می‌باشند، ایجاد خواهد شد. برآوردها نشان می‌دهد که این ارزش می‌تواند سالانه بین ۴۰۰ تا ۹۰۰ میلیارد دلار باشد (شکل ۱۷) (چیویی و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ۱۶. بینش‌های حاصل‌آمده از بزرگ-داده‌های زیستی (نمودارهای آبی تیره) به‌کمک روش‌های نوین محاسباتی، یادگیری ماشین، و هوش مصنوعی، بیشترین سهم (بیش از ۶۰ درصد) از پیامدهای مستقیم اقتصادی علوم زیستی را در کوتاه‌مدت (۲۰۲۰-۲۰۳۰) ایجاد خواهند کرد. (۱) عبارت است از خوانش حالات مغز برای کنترل تجهیزات خارجی، ستر دی‌ان‌ای، پروتئین‌ها، و میکروب‌ها (برگرفته از چیویی و همکاران، ۱۴۰۲)

تأمین محصولات کشاورزی است. در چنین زنجیره‌هایی معمولاً تعداد زیادی واسطه بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرند. بلاک‌چین‌ها می‌توانند سطح بالاتری از شفافیت، کارایی، و قابلیت ردیابی را برای انواع محصولات کشاورزی و غذایی ایجاد کنند. با پیشرفت فناوری اطلاعات و ارتباطات، بسیاری از فناوری‌ها مقرون‌به‌صرفه‌تر می‌شوند و استفاده از آن‌ها در سراسر جهان از جمله در کشورهای در حال توسعه گسترش می‌یابد. این پیشرفت‌های جدید، امکان تشخیص محتوای زیستی کالاهای مصرفی برچسب‌دار را فراهم ساخته و ردیابی مواد زیست-پایه در طول زنجیره تأمین را امکان‌پذیر می‌سازند (کاردونگ، ۲۰۲۳).

هوش مصنوعی نیز، می‌تواند به شیوه‌های مختلف به پایداری کمک کند؛ مانند بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش ضایعات، بهبود کارایی زنجیره تأمین و فعال کردن کشاورزی دقیق. علاوه، با توسعه مواد و فناوری‌های جدید برای تولید و ذخیره انرژی پاک، هوش مصنوعی خواهد توانست تحقیقات علمی و نوآوری را به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار جهت ببخشد. از سوی دیگر، اینترنت اشیا^۱ قادر است با امکان‌پذیر ساختن نظارت و کنترل در زمان واقعی، مصرف انرژی و منابع در ساختمان‌ها، سیستم‌های حمل‌ونقل و فرآیندهای صنعتی را بهینه سازد و از این طریق به پایداری کمک کند (سکيب،^۲ ۲۰۲۳).

نوآوری‌های میان علوم زیستی و دیجیتال نویدبخش خلق فرصت‌های جدید برای بازطراحی و معماری نوین فرآیندهای چابک و راه‌حل‌های پلتفرمی در طیف گسترده‌ای از صنایع است (لوزاکر^۳ و همکاران، ۲۰۲۳). این نوآوری متضمن سه مسیر مختلف است. نخستین مسیر، «مدیریت هوشمند جریان زیست‌توده» است که با مدیریت کارآمدتر توزیع زیست‌توده به‌کمک فناوری‌های دیجیتال، سبب افزایش ارزش مواد خام (زیست‌توده) می‌شود. مسیر دوم، «اقتصاد زیستی مبتنی بر داده» نام دارد که بر نیاز به گنجاندن داده‌های منابع طبیعی در فرآیند تصمیم‌گیری ذی‌نفعان مختلف برای افزایش ارزش روش‌های جمع‌آوری داده، تأکید دارد. مسیر سوم «اقتصاد منابع طبیعی شبکه‌ای و مشارکتی» بر توسعه پلتفرم‌های دیجیتال تمرکز دارد که تولید ارزش و جذب از شبکه‌های همکاری را امکان‌پذیر می‌کند. این مسیرها نشان می‌دهند که برچیدن مرز میان اقتصاد زیستی و اقتصاد دیجیتال، گامی معقول و روبه‌جلو تلقی می‌شود که پتانسیل عظیم بازارهای آینده و سرعت‌بخشیدن به رشد سبز را ممکن می‌سازد (آلا-یلوماکی^۴ و همکاران، ۲۰۱۸؛ ایستوود^۵ و همکاران، ۲۰۲۳).

تسهیل و توسعه روش‌های محاسباتی، تحلیل بزرگ-داده‌ها، یادگیری ماشین، و هوش مصنوعی، نیز، در همین راستا تلقی

1. Internet of Things (IoT)
2. Sakib
3. Losacker

4. Ala-Ilomäki
5. Eastwood

۵. نتیجه گیری

شناسایی فرصت‌های توسعه و طراحی استراتژی توسعه اقتصادی، مستلزم شناسایی به موقع فرصت‌های جدید در مرزهای علم و فناوری است که از قضا، اهدافی شدیداً متغیر و در حال گذار تلقی می‌شوند. در واقع، هریک از این فرصت‌های علم و فناوری قادرند تا از طریق درهم ریختن خلاقانه سبب افول یک عصر صنعتی و ظهور دوره‌ای جدید گردند و به تبع آن، نوعی اقتصاد تخصص یافته را شکل دهند که مشخصه بارز و ویژگی منحصر به فرد اقتصادهای توسعه یافته است. یک دستاورد بزرگ چنین اقتصادهایی که در مرزهای دانش و فناوری سیر می‌کنند، ظهور فعالیت‌های با ارزش افزوده بالا است که منجر به ارتقای بهره‌وری شده، رقابت پذیری اقتصادی را افزایش می‌دهند (تیتس و همکاران، ۲۰۲۴). می‌توان گفت که بسیاری از بازارهای تخصصی امروزی نشأت گرفته از فعالیت‌های آینده‌محوری است که در گذشته تعریف شده‌اند و تأثیرات شگرفی بر هدایت توسعه فناوری و اقتصادی برجای گذاشته‌اند، اینها روایت‌های واقعاً رویایی و هیجان انگیزی را تعریف کرده‌اند که منجر به پیشرفت‌های فناورانه بزرگی شده است. ابتکارات جسورانه‌ای، مانند پروژه آمریکایی‌ها برای سفر انسان به ماه و بازگشت ایمن به زمین در دهه ۱۹۶۰ یا پروژه ژنوم انسان که در دهه ۱۹۹۰ آغاز شد، از این دست فرصت‌های علمی و فناوری تلقی می‌شوند که در شکل دادن به آینده بسیار موثر بوده‌اند (تیتس و همکاران، ۲۰۲۴).

اکنون در هزاره سوم میلادی، نقش بی‌بدیل زیست‌شناسی و علوم زیستی پیشرفته به عنوان یک پیشران اصلی در تحول جوامع انسانی و آینده‌آفرینی به جهان پذیرفته شده است. با توجه به پیشرفت‌های شگرف در علم ژنتیک، زیست‌فناوری و مطالعات زیست‌محیطی، این رشته‌ها نقش محوری در شکل‌دهی به اقتصادهای نوین و پایدار ایفا می‌کنند. به‌ویژه آن‌که، پارادیم (پنداره) نوینی در راستای تلفیق و تقویت تعاملات فنی-تخصصی میان علوم زیستی و سایر فناوری‌های پیشرفته مثل هوش مصنوعی و فناوری اطلاعات و ارتباطات در حال شکل‌گیری است که می‌تواند موجب تحول در نحوه تعامل بشر با طبیعت شود.

آینده زیست‌شناسی و علوم زیستی فراتر از بررسی ساختار و عملکرد موجودات زنده، به درک عمیق‌تری از اثرات متقابل بین انسان و طبیعت منجر خواهد شد. علم زیست‌شناسی قادر است با ارائه راهکارهای پایدار و نوآورانه، تهدیدات زیست‌محیطی نظیر تغییرات اقلیمی، آلودگی و از بین رفتن تنوع زیستی را شناسایی و مدیریت کند. در این راستا، فرصت‌های ویژه‌ای برای توسعه فناوری‌های طبیعت-محور فراهم می‌آید که می‌تواند به برقراری تعادل بین نیازهای اقتصادی و حفاظت از محیط‌زیست بیانجامد.

نباید فراموش کرد که اصلاح رفتار بشر نسبت به طبیعت زمینه‌ساز تحقق این اهداف است. فرهنگ نهادی و فردی در قبال محیط‌زیست باید به گونه‌ای ارتقا یابد که انسان‌ها اقداماتی مسئولانه‌تر و پایدارتری داشته باشند. این اصلاح رفتار فرهنگی می‌تواند از طریق آموزش، ترویج آگاهی عمومی و ایجاد سیاست‌گذاری‌های مناسب علیه تخریب منابع طبیعی محقق شود. لازم است که نوآوری‌های علمی و فناوری ضمن انعطاف‌پذیری در برابر تغییرات محیطی، موجب تقویت احساس مسئولیت در قبال زمین و منابع آن گردند. در نهایت، همکاری میان محققان، صنعتگران و سیاست‌گذاران می‌تواند بستر مناسبی برای توسعه فناوری‌های زیست‌محور فراهم کند. آینده‌ای که در آن همزیستی انسان و طبیعت بسیار معنادارتر خواهد بود، به دلیل تلاش‌های مشترک و دیدگاه‌های جامع‌نگر در زمینه زیست‌شناسی و علوم زیستی شکل خواهد گرفت. در این میان، پذیرش و ترویج فناوری‌های طبیعت-محور نه تنها موجب حفظ منابع زیستی می‌شود، بلکه فرصت‌های شغلی جدید و ارزش‌های اقتصادی را نیز به دنبال خواهد داشت.

به‌طور کلی، نگاه آینده‌نگر در حوزه زیست‌شناسی و علوم زیستی، نه تنها بر ضرورت حفاظت از محیط‌زیست تأکید دارد، بلکه بایستی به عنوان ابزاری برای ایجاد فرهنگ یکپارچه و مسئولانه در درک و تعامل با جهان طبیعی عمل کند. از این رو، برای مواجهه با چالش‌های پیچیده قرن بیست و یکم، نیازمند یک رویکرد جامع و هم‌افزایی در راستای بهره‌وری از قابلیت‌های بی‌نظیر طبیعت هستیم.

منابع

۱. پروست، م. (۱۳۷۷). *در جستجوی زمان از دست رفته*: اسیر (جلد ۶). ترجمه مهدی سبحانی. تهران، نشر مرکز، ۵۰۴ ص.
۲. چپویی، م. و همکاران. (۱۴۰۲). *انقلاب زیستی، نوآوری‌های تحول‌آفرین در اقتصاد، اجتماع و زندگی ما*. ترجمه سید مهدی علوی و همکاران. تهران، انتشارات پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری، ۲۲۲ ص.
۳. سعدی شیرازی، م. ع. (۱۳۶۸). *گلستان سعدی*. به تصحیح غلامحسین یوسفی. تهران، انتشارات خوارزمی، ۸۱۵ ص.
۴. علوی، س. م. (۱۴۰۳). اقتصاد زیستی، مبانی دانشی، راهبردهای سیاستی و نوآوری‌های صنعتی. تهران، مرکز نشر دانشگاهی، ۶۵۰ ص.
۵. علی بن ابی طالب (ع)، امام اول، ابراهیم، محمد ابوالفضل، و ابن ابی الحدید، عبدالحمید بن هبه الله. بدون تاریخ. شرح نهج البلاغه (ابن ابی الحدید). ۲۰ ج. قم - ایران: مکتبه آیه الله العظمی المرعشی النجفی (ره).
۶. کلی، ک. (۱۳۹۸). *آینده نزدیک*. ترجمه شایان تقی‌نژاد. اصفهان، نشر آموخته، ۳۲۷ ص.
۷. کوهن، ت. (۱۳۹۳). *ساختار/انقلاب‌های علمی*. ترجمه سعید زیباکلام. تهران، انتشارات سازمان سمت، ۲۸۲ ص.
۸. گوپنیک، آ. (۱۳۹۹). *باغبان و نجار*. ترجمه مریم برومند. تهران، نشر نو، ۳۵۰ ص.
۹. هراری، ی. ن. (۲۰۱۵). *انسان خداگونه، تاریخ مختصر آینده*. ترجمه زهرا عالی. انتشارات فرهنگ نشر نو، ۱۳۹۷.
۱۰. یاگودزینسکی، ی. (۱۴۰۱). اندیشه‌ای در باب «آخرالزمان»: اهمیت زیست-هنر در هنرآموزش. ترجمه سید مهدی علوی. نامه علوم پایه، شماره ۶، تابستان ۱۴۰۱.
11. Ala-Ilomäki, J., Arvas, M., Backman, J., Hantula, J., Holmala, K., Häme, T., Isto, P., Kangas, A., Lantto, R., Nieminen, K., Nordlund, E., Pastell, M., Peltola, R., Pesonen, L., Pitkänen, J.-P., Piri, T., Pusenius, J., Seisto, A., Suomi, P., Utriainen, M., Viiri, H., & Väättäin, K. (2018). Bits and biomass: A roadmap to the digitalisation-empowered bioeconomy, VTT Technical Research Center of Finland, Helsinki.
12. Alméstar, M., Romero-Muñoz, S., Mestre, N., Fogué, U., Gil, E., & Masha, A. (2023). (Un) Likely Connections between (Un) Likely Actors in the Art/NBS Co-Creation Process: Application of KREBS Cycle of Creativity to the Cyborg Garden Project. *Land*, 12(6), 1145.
13. Bartkowski, B., Theesfeld, I., Pirscher, F., & Timaeus, J. (2018). Snipping around for food: economic, ethical and policy implications of CRISPR/Cas genome editing. *Geoforum*, 96, 172-180.
14. Baykov, A., Bogaturov, A., & Shakleina, T. (2023). Megatrends and Global Issues: Constants and Innovations in the Subject Area: In lieu of Introduction. In *Polycentric World Order in the Making* (pp. 3-11). Singapore: Springer Nature Singapore.
15. Beinhocker, E. D. (2006). *The Origin of Wealth: Evolution, Complexity, and the Radical Remaking of Economics*. Boston, Harvard Business Press.
16. Brooks D. (2013). *The Philosophy of Data*. The New York Times. Retrieved from: <https://www.nytimes.com/2013/02/05/opinion/brooks-the-philosophy-of-data.html>
17. Carlson, R. H. (2010). *Biology is technology: the promise, peril, and new business of engineering life*. Harvard University Press.
18. Coelho, C., Coelho, S. R., & Fialho, F. A. P. (2000). The Human Being in the Third Millenium: Learning to Experience his Sacred Space. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 44(33), 6-186-6-189-<https://doi.org/10.1007/154193120004403329>
19. Dedeoğlu, Ç., & Zampaki, N. (2023). Posthumanism for Sustainability: A Scoping Review. *Journal of Posthumanism*, 3(1), 33-57
20. de Lorenzo, V. (2011). Beware of metaphors: chasses and orthogonality in synthetic biology. *Bioengineered bugs*, 2(1), 3-7.
21. de Lorenzo, V. (2022). The four Fs of the knowledge-based BioEconomy—A homage to Christian Patermann. *EFB Bioeconomy Journal*, 2, 100035.
22. der Verwandlung, D. K. (September 31, 2024). *Poetic Systems*. Retrieved from: <https://ars.electronica.art/futurelab/en/inspiration/art-science-research/poetic-systems/>
23. Deretić, I., & Sorgner, S. L. (Eds.). (2016). *From Humanism to Meta-, Post, and Transhumanism?* New York: Peter Lang.

24. Eastwood, C., Turner, J. A., Romera, A., Selbie, D., Henwood, R., Espig, M., & Wever, M. (2023). A review of multi-scale barriers to transitioning from digital agriculture to a digital bioeconomy. *CABI Reviews*, (2023).
25. Elowitz, M. B., & Leibler, S. (2000). A synthetic oscillatory network of transcriptional regulators. *Nature*, 403(6767), 335-338.
26. el-Salam, A., Al-Sulaiti, K., & el-Haque, T. (2024, August). BIO-ART AS A DRIVER OF TECHNOLOGICAL INNOVATION. In The 31st International scientific and practical conference "Methodological aspects of education: achievements and prospects" (August 06 ,09–2024) Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2024 .252 p. (Vol. 5, p. 19).
27. Esposito, M. (2017). Expectation and futurity: The remarkable success of genetic determinism. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 62 ,1-9.
28. Frisvold, G. B., Moss, S. M., Hodgson, A., & Maxon, M. E. (2021). Understanding the US bioeconomy: A new definition and landscape. *Sustainability*, 13(4),1627.
29. Fritsche, U., Brunori, G., Chiaramonti, D., Galanakis, C., Hellweg, S., Matthews, R. A. P. C., & Panoutsou, C. (2020). Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy—knowledge synthesis final report. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 10, 667966.
30. Fukuyama, F. (2004). Transhumanism. *Foreign policy*,(144),42-43.
31. Gardner, T. S., Cantor, C. R., & Collins, J. J. (2000). Construction of a genetic toggle switch in *Escherichia coli*. *Nature*, 403(6767),339-342.
32. Glaubrecht, M. (2023). On the end of evolution—Humankind and the annihilation of species. *Zoologica Scripta*, 52(3),215-225.
33. Greek Myths and legends. (July 17 ,2024). Prometheus: Stealing Fire from the Gods. Retrieved (July 17, 2024) from: <https://www.liverpoolmuseums.org.uk/world-museum/greek-myths-and-legends/prometheus-stealing-fire-gods>
34. Gurdo, N., Volke, D. C., McCloskey, D., & Nikel, P. I. (2023). Automating the design-build-test-learn cycle towards next-generation bacterial cell factories. *New Biotechnology* 74 ,1-15.
35. Hallward, P. (2006). *Out of this World: Deleuze and the Philosophy of Creation*. Verso.
36. Hamidi, F., Stamato, L., Scheifele, L., Hammond, R. C. V., & Asgarali-Hoffman, S. N. (2021, May). "Turning the Invisible Visible": Transdisciplinary Bioart Explorations in Human-DNA Interaction. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-15).
37. Hauser, J., & Strecker, L. (2020). On Microperformativity. *Performance Research*, 25(3),1-7. <https://doi.org/10.1080/1807739.2020.13528165>
38. Hauser, J. (1995). Art and agency in times of wetware. *Scientific American*, 273(3),216.
39. Hefner, P. (1988). The evolution of the created co-creator. *Currents in theology and mission*, 15(6),512-512.
40. Hillson, N., Caddick, M., Cai, Y., Carrasco, J. A., Chang, M. W., Curach, N. C., ... & Freemont, P. S. (2019). Building a global alliance of biofoundries. *Nature communications*, 10(1), 2040.
41. Holowko, M. B., Frow, E. K., Reid, J. C., Rourke, M., & Vickers, C. E. (2021). Building a biofoundry. *Synthetic Biology*, 6(1), ysaa026.
42. Kac, E. (1999). *Genesis*. Retrieved (September 14 ,2024) from: <https://www.ekac.org/genesis.html>
43. Kac, E. (2010). *Natural History of the Enigma*. Retrieved (August 02 ,2024) from: <https://www.ekac.org/nat.hist.enig.html>
44. Kardung, M. (2023). *Tracking the evolution of the European bioeconomy: from devising a conceptual framework to using move indicators* (Doctoral dissertation, Wageningen University).
45. Kiran, B. R., Prasad, M. N. V., & Mohan, S. V. (2024). Synthetic biology: An emerging field for developing economies. In *Bioremediation and Bioeconomy* (pp. 767-787). Elsevier.

46. Kircher, M., Maurer, K. H., & Herzberg, D. (2022). KBBE: The Knowledge-based Bioeconomy: Concept, Status and Future Prospects. *EFB Bioeconomy Journal*, 100034.
47. Laszlo, E. (2001). Human evolution in the third millennium. *Futures*, 33(7), 649-658.
48. Lee, S. (2016, February 15). common good. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/topic/common-good>
49. Lima, V., Belk, R. (2022). Transhumanist Technologies for the Transhumanist Consumer: An Abstract. In: Allen, J., Jochims, B., Wu, S. (eds) *Celebrating the Past and Future of Marketing and Discovery with Social Impact. AMSAC-WC 2021. Developments in Marketing Science: Proceedings of the Academy of Marketing Science*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95346-1_12
50. Lopez-Correa, C., & Suarez-Gonzalez, A. (Eds.). (2022). *Genomics and the Global Bioeconomy*. Academic Press.
51. Losacker, S., Heiden, S., Liefner, I., & Lucas, H. (2023). Rethinking bioeconomy innovation in sustainability transitions. *Technology in Society*, 102291.
52. Martin-Sanchez, F. (2006). Bio-ICT synergies. *ERCIM News No. 64*, 10-11
53. McCormack, J., & Wilson, E. (2024). Holon: a cybernetic interface for bio-semiotics. *arXiv preprint arXiv:03894.2404*.
54. Madzík, P. (2019). Capture and evaluation of innovative ideas in early stages of product development. *The TQM Journal*, 31(6), 908-927.
55. Miguela, F. N., & Danielab, B. T. (2022). Engineering microbial biofactories for a sustainable future. In *Genomics and the Global Bioeconomy*, 25OliveiraSamuel, M. D. (2022). Hardware, software, and wetware codesign environment for synthetic biology. *BioDesign Research*.
56. Opgenorth, P., Costello, Z., Okada, T., Goyal, G., Chen, Y., Gin, J., ... & Beller, H. R. (2019). Lessons from two design-build-test-learn cycles of dodecanol production in *Escherichia coli* aided by machine learning. *ACS synthetic biology*, 8(6), 1337-1351.
57. Oxman, N. (2016). Age of entanglement. *Journal of Design and Science*.
58. Oxman, N. (2018). Mothering nature. Retrieved (August 3 ,2024) from: <https://issuhub.com/view/index/180?pageIndex=308>
59. Paredes, O., Farfán-Ugalde, E., Gómez-Márquez, C., Borrayo, E., Mendizabal, A. P., & Morales, J. A. (2024). The calculus of codes-From entropy, complexity, and information to life. *Biosystems*, 236 ,105099.
60. Parton, S. (2018). The Rise of Dataism: A Threat to Freedom or a Scientific Revolution? Retrieved from: <https://singularityhub.com/2018/09/30/the-rise-of-dataism-a-threat-to-freedom-or-a-scientific-revolution/#>
61. Peters, T. (2014). *Playing God?: Genetic determinism and human freedom*. Routledge.
62. Plexousakis, D. (2006). Bits, Atoms and Genes Beyond the Horizon. *ERCIM News No. 64*, 7-13
63. Posner, M., & Klein, L. (2017). Editor's Introduction: Data as Media. *UC Press. Feminist Media Histories*, 3(3), 1-8. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/3ng7f0rf>
64. Reedy, C., and Javelosa, J. (2017). A New Brain-Interface Device Lets You Control Animals with Your Thoughts.
65. Retrieved from: <https://www.google.com/amp/s/futurism.com/a-new-brain-interface-device-lets-you-control-animals-with-your-thoughts/amp>
66. Rennings, M., Burgsmüller, A. P. F., & Bröring, S. (2023). Convergence towards a digitalized bioeconomy—Exploring cross-industry merger and acquisition activities between the bioeconomy and the digital economy. *Business Strategy & Development*, 6(1),53-74.
67. Rucker, R. (1988). *Wetware. Ware Tetralogy*. New York: Avon Books.
68. Sakib, S. N. (2023). The Role of Innovation in Driving the Bioeconomy: The Challenges and Opportunities. *Handbook of Research on Bioeconomy and Economic Ecosystems*, 288-311.

69. Shimizu Y. (no date). Symbiotic Creativity. Retrieved (September 14 ,2024) from: <https://yokoshimizu.com>
69. Shingane, P. (2019). Google Tulip - Communicate with Plants. Retrieved from: <https://www.google.com/amp/s/www.infiflex.com/google-tulip--communicate-with-plants>
70. Shulevsky, N. B., & Zotova, E. S. (2021). Technologism as a Suicidal Sentence of Parasitic Civilizations. *Russian Journal of Legal Studies (Moscow)*, 8(1), 9-18
71. Stamato, L., Higgins, E., Prottoy, H. M., Asgarali-Hoffman, S., Scheifele, L., Dusman, L., Hamidi, F. (2022). Raaz: A Transdisciplinary Exploration at the Intersection of Bioart, HCI, and Community Engagement. *Front. Comput. Sci.*, 17. doi:10.3389/fcomp.830959.2022.
72. Thacker, E. (2008). Biophilosophy for the 21st century. In M. Kroker & A. Kroker (Eds.), *Critical digital studies: A reader* (pp. 132-142). Toronto: University of Toronto Press.
73. Tiits, M., Karo, E., & Kalvet, T. (2024). Small countries facing the technological revolution: fostering synergies between economic complexity and foresight research. *Competitiveness Review: An International Business Journal*. Verbeek, P. P. (2015). COVER STORY beyond interaction: a short introduction to mediation theory. *interactions*, 22(3), 26-31.
74. Vivien, F. D., Nieddu, M., Befort, N., Debref, R., & Giampietro, M. (2019). The hijacking of the bioeconomy. *Ecological economics*, 159 ,189-197.
75. Vogt, M., & Frankenreiter, I. (2022). Bioeconomy: The Innovative Twin of Sustainability. *Sustainability*, 14(22), 14924.
76. Walter, A., Finger, R., Huber, R., & Buchmann, N. (2017). Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(24), 6148-6150.
77. Watanabe, C., Naveed, N., & Neittaanmäki, P. (2019). Digitalized bioeconomy: Planned obsolescence-driven circular economy enabled by Co-Evolutionary coupling. *Technology in society*, 56 ,8-30.
78. Wesseler, J., & von Braun, J. (2017). Measuring the bioeconomy: Economics and policies. *Annual Review of Resource Economics*, 9 ,275-298.
79. Wilde, K., & Hermans, F. (2021). Innovation in the bioeconomy: Perspectives of entrepreneurs on relevant framework conditions. *Journal of cleaner production*, 314 ,127979.
80. Xu, X., Liu, Y., Du, G., Ledesma-Amaro, R., & Liu, L. (2020). Microbial chassis development for natural product biosynthesis. *Trends in biotechnology*, 38(7), 779-796.
81. Zafar, S., Nazir, M., Bakhshi, T., Khattak, H. A., Khan, S., Bilal, M., ... & Sabah, A. (2021). A systematic review of bio-cyber interface technologies and security issues for internet of bio-nano things. *IEEE Access*, 9 ,93529-93566.
82. Zhang, Y., Yan, Z. E. N. G., & QinHong, W. A. N. G. (2021). Advances in synthetic biomanufacturing. *Synthetic Biology Journal*, 2(2), 145.