

موضوع گزارش:

زیست شناسی مصنوعی (بیولوژی ترکیبی)

Synthetic biology

فهرست مطالب

1. مقدمه

- a. پیشگفتار
- b. تاریخچه فناوری زیست شناسی مصنوعی

2. علم سنجی زیست شناسی مصنوعی

- a. مروری بر مفهوم علم سنجی
- b. لزوم انجام علم سنجی در حوزه زیست شناسی مصنوعی
- c. هدف از علم سنجی در حوزه زیست شناسی مصنوعی
- d. روش شناسی پژوهش
- e. نتایج کلی حاصل از علم سنجی
- f. ترسیم ساختار و شبکه‌های هم‌واژگانی و هم‌کشوری در حوزه موضوعی «زیست شناسی مصنوعی»
- g. پاسخ به برخی از سوالات

3. مفاهیم و تعاریف

- a. برنامه‌ریزی DNA با استفاده از فرایندهای پایه بیومولکولی
- b. ابزارها و نرم افزارها

4. کاربردهای زیست شناسی مصنوعی

- a. بخش سلامت
 - b. محیط زیست و انرژی
 - c. تغییر جمعیت حیوانات حیات وحش
 - d. کشاورزی
 - e. کاربرد در تولیدات شیمیایی
 - f. تولید مواد خام غیر شیمیایی
5. فرصتها و تهدیدات زیست شناسی مصنوعی
6. اهمیت فناوری زیست شناسی مصنوعی
7. تحلیل بازار زیست شناسی مصنوعی
- a. اندازه بازار
 - b. حوزه های مختلف بازار
 - c. بازیگران اصلی
 - d. نمونه یابی پروژه ها در بازار
8. نتیجه گیری و پیشنهاد
9. منابع و مراجع
10. پیوستها
- a. پیوست یک - اثرات مثبت و منفی اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی زیست شناسی مصنوعی
 - b. پیوست دوم - مسائل اخلاقی مرتبط با زیست شناسی مصنوعی
 - c. پیوست سوم - ملاحظات امنیتی مربوط به زیست شناسی مصنوعی

1- مقدمه

• پیش گفتار

زیست شناسی مصنوعی¹ (که در برخی منابع به عنوان بیولوژی ترکیبی شناخته میشود) یک حوزه تحقیقاتی تلفیقی است که شامل بسیاری از علوم نظیر فناوری زیستی²، مهندسی ژنتیک³، بیولوژی مولکولی⁴، بیوفیزیک⁵، مهندسی برق، مهندسی کنترل و بیولوژی تکاملی⁶ میشود. یکی از اهداف این حوزه برنامه ریزی سلول ها⁷، از ارگانیزم های تک سلولی (همانند باکتریها) گرفته تا توده ها، بافت ها و اندام های سلولی، به منظور استفاده در کاربردهای متنوعی شامل موارد زیر میباشد:

- سلامت و پزشکی (همانند کشف روش های درمانی نوین برای سرطان و دیابت)،
- صنعت انرژی (همانند سوخت های زیستی)
- محیط زیست (همانند سنجش زیستی⁸ و ترمیم بیولوژیکی⁹)
- داروهای باززا¹⁰ (به عنوان مثال برنامه ریزی دوباره هویت سلول)

زیست شناسی مصنوعی حوزه نوظهوری است که به دنبال استفاده از اصول مهندسی در برنامه ریزی دوباره سیستم های زنده میباشد. یکی از شاخصه های مهم سیستم های بیولوژیکی، پیچیدگی بالای ژنتیکی و سلولی آنهاست. شبکه هایی که از طریق فعل و انفعالات بازخوردی پویا، غیرخطی و موازی در کنار هم فعالیت می کنند. این سیستم های پیچیده چالش های قابل توجهی را برای روش های مهندسی منطقی ایجاد کرده اند، به نحوی که قادر به انجام کارکردهایی هستند که بسیار پیچیده تر از مدارات و راه حل های ابداع شده توسط بشر هستند.

¹ Synthetic biology

² Biotechnology

³ Genetic engineering

⁴ Molecular biology

⁵ Biophysics

⁶ Evolutionary biology

⁷ Cell programming

⁸ Biosensing

⁹ Bioremediation

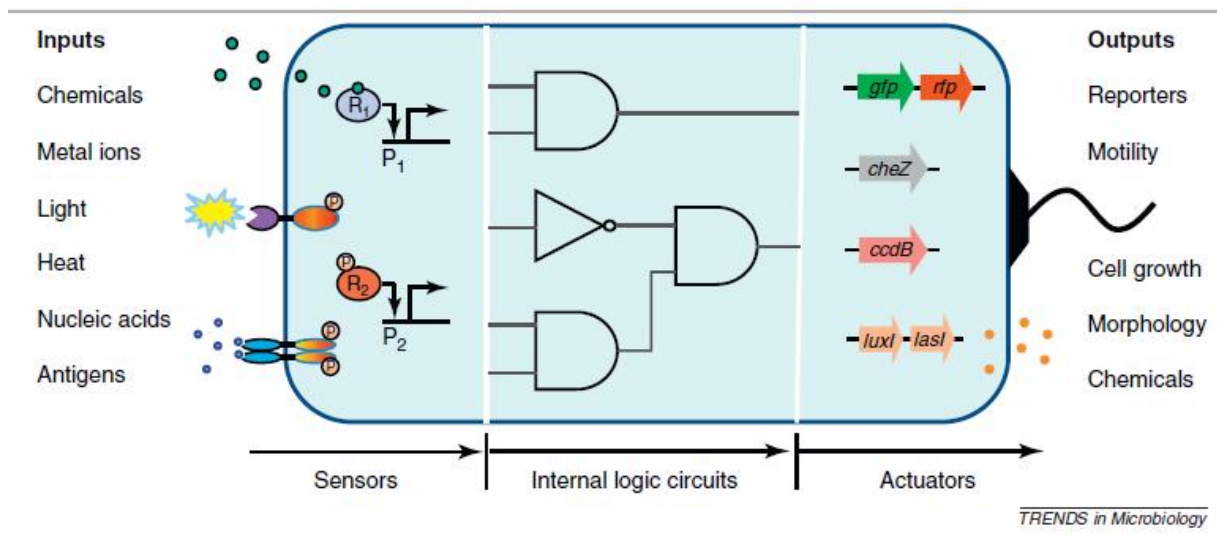
¹⁰ Regenerative medicine

مجموعه‌ای از تکنیک‌ها و فناوری‌های ژنتیکی، بیومدیkal و بیوفیزیک برای توصیف این سیستم‌های بیولوژیک به کار گرفته شده‌اند که باعث شناخت دقیق‌تر ژنوم‌های زیستی، الگوهای بیان ژن و فعالیت‌های متابولیک شده‌اند. روش‌های تصویربرداری جدید نیز این امکان را فراهم کرده‌اند تا فعالیت‌های درون ارگانیسم‌های و میکرو ارگانیسم‌های زنده به دقت رصد شده و معماری‌های سلولی مربوط به آنها با دقت بسیار بالا شبیه‌سازی شوند. علاوه بر این، فناوری سنتز DNA و ساخت آن امکان کپی‌برداری و باز تولید یک کروموزم را فراهم نموده است. از این رو تلاش محققان معطوف به برنامه‌ریزی مجدد سیستم‌های بیولوژیک و ایجاد ارگانیسم‌های جدید شده است. متأسفانه تا کنون ظرفیت سنتز DNA بسیار بیشتر از توان بشر برای طراحی سیستم‌های جدید ژنتیکی بوده است.

درحالی‌که فناوری DNA نو ترکیب¹¹ در طی 35 سال اخیر با سرعت بسیار زیادی پیشرفت کرده است، تکثیر و ترکیب زنجیره‌های مصنوعی DNA همچنان جزو چالش‌های علم بیولوژی بوده است. وضعیت این حوزه در این برهه زمانی، مشابه وضعیت مهندسی مکانیک در اوایل قرن 1800 و مهندسی میکروالکترونیک در اوایل دهه 1950 است که همگی نیاز به یک جهش داشتند. پیشرفت این علم به جایی رسیده است که اولین استانداردهای مربوط به مدارهای بیولوژیکی مبتنی بر DNA در اوایل قرن بیست و یکم پایه‌ریزی شده است. ثبت اجزای بیولوژیکی استاندارد¹² به عنوان بخشی از رقابت بین‌المللی ماشین مهندسی‌شده توسط ژنتیک (www.igem.org) در MIT پایه‌ریزی شده است. فعالیت‌های مفید دیگری که در این حوزه انجام شده است ایجاد OpenWetWare برای تسهیل تبادل پروتکل‌های استاندارد، و بنیاد BioBricks برای ایجاد چارچوب قانونی اشتراک و استفاده از اجزای استاندارد بوده است.

¹¹ Recombinant

¹² Registry of standard biological parts



• تاریخچه فناوری زیست شناسی مصنوعی

زیست شناسی مصنوعی پیشرفت خود را مدیون توسعه چشمگیر بیوتکنولوژی در 50 سال اخیر، به ویژه تکثیر¹³ و تقویت¹⁴ DNA و همچنین امکان وارد کردن DNA خارجی به داخل سلول میباشد (شکل 3). به طور خاص، کشف آنزیمهای محدودسازی¹⁵ DNA در اواخر دهه 1960 این امکان را فراهم نمود که بتوان برش و الحاق DNA را در نقاط دلخواه انجام داد. در اواخر دهه 1970، روشهای جدیدی برای تزریق DNAهای مصنوعی داخل سلولهای میزبان ابداع شد. این پیشرفتهای علمی اولین کاربرد مهندسی بیولوژی را که تولید انسولین مصنوعی بود را محقق کردند. کشف واکنش زنجیره ای پلیمری¹⁶ (PCR) و فناوری ترتیب گذاری¹⁷ DNA در دهه 1980، اصلاح DNA برای قرارگیری در داخل سلولها را بسیار سریع تر و ساده تر ساخت. ساخت اولین مدارهای ژنتیکی مصنوعی¹⁸، یک نوسان گر حلقه ای¹⁹ و سوئیچ اهرمی²⁰ در سال 2000 بر مبنای این فناوریهای پیشرفته محقق

¹³ Cloning

¹⁴ Amplification

¹⁵ DNA restriction enzymes

¹⁶ Polymeras chain reaction

¹⁷ Sequencing

¹⁸ Synthetic genetic circuits

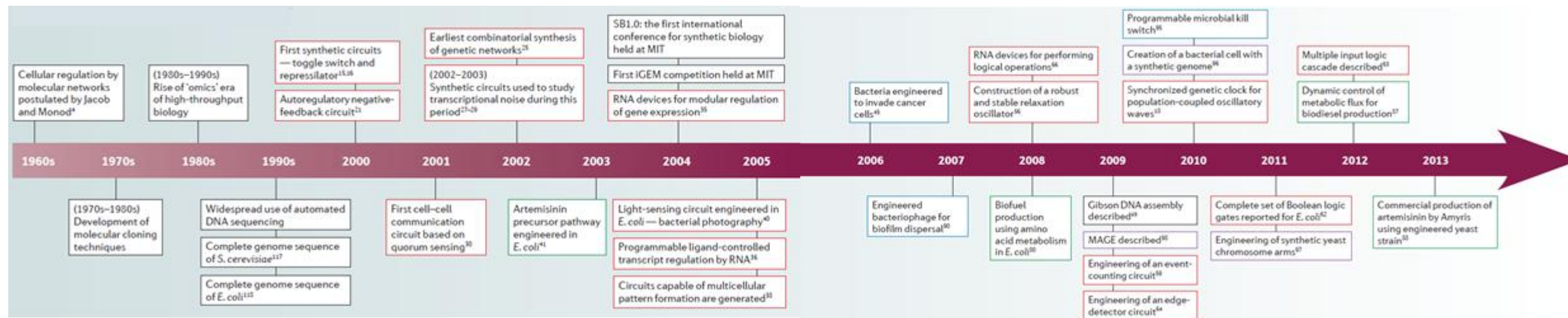
¹⁹ Ring-oscillator

²⁰ Toggle switch

گردید. در این مقطع زمانی، تمرکز اکثر فعالیتهای تحقیقاتی و عملیاتی بر ترکیب چند بخش DNA برای ایجاد مدارهای ساده‌ای بود که بتوان از طریق آنها، عملکردهای طبیعی سلولی را تشریح کرد. اخیراً پیشرفت‌های این حوزه به کسب دید سیستمی از فرایندهای بیولوژیکی و تمرکز بر ایجاد سیستم‌های بزرگتر متشکل از بخش‌ها و زیرسیستم‌های عملیاتی رسیده است. از این رو، تحقیقات بسیاری برای یافتن دستیابی به طراحی مولکولی و لایه‌ای²¹ (شکل 2 بخش عصر سیستم‌ها) در حال انجام است. این جهت‌گیری تحقیقاتی - به منظور ایجاد زیربنایی زیربنایی اصولی برای طراحی‌های منطقی سامانه‌های بکار میروند که بتوانند مشکلات دنیای ما را حل کنند- دارای اهمیت بسیار میباشند.

بنابراین، تلاش جامعه تحقیقاتی معطوف به ایجاد اجزای نوین (به عنوان مثال رگولاتورهای مبتنی بر CRISPR)، تعیین مشخصات اجزا، ایجاد عایق‌بندی بین ماژول‌ها و درنهایت بهره‌برداری از ماژول‌های مداری مجزا است. در شکل زیر نمودار زمانی سیر تحول فناوری زیست شناسی مصنوعی نشان داده شده است.

²¹ Layered design



شکل 1) نمودار زمانی سیر تکاملی فناوری زیست شناسی مصنوعی

2- علم سنجی زیست شناسی مصنوعی

• مروری بر مفهوم علم سنجی

یافته‌های حاصل از مطالعات سنجش و ارزیابی یک علم، فناوری و نوآوری از مهم‌ترین ابزارهای سیاست-گذاری توسعه علم، فناوری و نوآوری در هر کشوری به شمار می‌رود. از این رو این سنجش باید به گونه‌ای صورت پذیرد که با تکیه بر نتایج آن بتوان تصویری واقعی‌تر از وضعیت کشور در آن زمینه خاص در مقایسه با سایر کشورها به دست آورد.

به تعبیری ساده تر، علم‌سنجی عبارت است از دانش اندازه‌گیری علم که همه روش‌ها و مدل‌های کمی مرتبط با تولید و انتشار دانش و فناوری را شامل می‌شود. نخستین نقشی که مطالعات علم‌سنجی برعهده دارند، ترسیم روند توسعه و گسترش یک علم خاص در سطح ملی و حتی فراتر از آن در سطح بین‌المللی است. این مطالعات به مدیران پژوهشی در سطوح مختلف امکان می‌دهند که تصویری از جریان تولید، اشاعه و بهره‌گیری از علوم مختلف در اختیار داشته و بر اساس آن به برنامه‌ریزی در حوزه‌های پژوهشی و صنعتی بپردازند.

تحلیل هم‌واژگانی، روش مناسبی برای کشف ارتباطات بین حوزه‌های پژوهشی علم بوده و پیوندهای مهمی را نشان می‌دهد که ممکن است کشف این روابط به شیوه‌های دیگر مشکل باشد. روش تحلیل هم‌واژگانی، می‌تواند به عنوان ابزاری قدرتمند، امکان تعقیب تحولات ساختاری و تکامل شبکه ادراکی و اجتماعی در خصوص علوم مختلف را میسر سازد.

در حوزه ادبیات، هم‌واژگانی از نظر مفهومی معادل co-word دانسته شده است که گاه واژه-co-occurrence را نیز به جای آن به کار برده‌اند. در زبان فارسی واژه نخست را هم‌واژگانی و واژه دوم را هم‌رخدادی معنا کرده‌اند.

تحلیل هم‌واژگانی - که براساس هم‌رخدادی واژگان عمل می‌کند - به عنوان یکی از روش تحلیل محتوا، یکی از روش‌های علم‌سنجی است. تحلیل هم‌واژگانی نمونه‌ای از روش مدل‌سازی گرافیکی است که در آن از اندیشه‌های مربوط به تحلیل رابطه استفاده می‌شود.

تحلیل هم‌واژگانی شیوه‌ای از تحلیل محتواست که از طریق هم‌رخدادی واژه‌ها یا مفاهیم موجود در متون و منابع حاصل می‌شود و از طریق آن می‌توان مفاهیم اصلی یک زمینه یا حوزه علمی را شناسایی و به واسطه این شناخت، الگوها و رویدادهای مفهومی، ساختار علمی، شبکه مفهومی، روابط سلسله مراتبی مفاهیم، و مقولات مفهومی آن حوزه را کشف، ترسیم و مدیریت کرد. تحلیل هم‌واژگانی، ابزاری برای کشف الگوهای پنهان و رویدادهای نوظهور مفهومی است.

در تحلیل هم‌واژگانی، هم‌رخدادی کلید واژه‌ها در عنوان، چکیده یا متن مقالات بررسی می‌شود. هم‌رخدادی کلید واژه‌ها میزان ارتباط شناختی میان یک مجموعه مدارک را نشان می‌دهد. با مقایسه نقشه‌های حاصل در دوره‌های زمانی مختلف، پویایی یک علم ردیابی می‌شود. روش تحلیل هم‌واژگانی در سال‌های اخیر در پژوهش‌های پژوهشگران کشورهای مختلف به نحو قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. بسیاری از پژوهشگران با این روش حوزه‌های خاصی را به قصد تحلیل و ترسیم ساختار آن مطالعه کرده‌اند.

• لزوم انجام علم‌سنجی در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی

هدف از این بخش جمع‌آوری اطلاعات و تحلیل نظام‌مند تمامی منابع تحقیقاتی در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی است که در پایگاه علمی Scopus درج شده‌اند. برای دستیابی به این هدف، مطالعه علم‌سنجی ادبیات زیست‌شناسی مصنوعی با هدف شناسایی حوزه‌ها و متخصصین مربوطه، صورت خواهد گرفت. نتایج حاصل از سنجش علم - مرتبط با زیست‌شناسی مصنوعی - شامل شناسایی موارد ذیل است:

- نویسندگان برتر در حوزه زیست شناسی مصنوعی
- فعال ترین کشورها در حوزه زیست شناسی مصنوعی
- مفاهیم و کلیدواژه های پرکاربرد در مقالات مرتبط
- کشف ارتباطات هم‌واژگانی بین مفاهیم موجود در این علم

• هدف از انجام علم‌سنجی زیست‌شناسی مصنوعی

هدف از انجام علم‌سنجی در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی پاسخگویی به سوالات زیر خواهد بود؟

سوال	توضیحات
توزیع اسناد منتشر شده در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی در سال‌های اخیر چگونه است؟	پاسخ به این سوال می‌تواند در تعیین حجم اسناد منتشر شده و پیش‌بینی الگوهای آینده این حوزه کمک‌کننده باشد.
بر اساس تعداد اسناد مرتبط، کدام یک از زیر حوزه‌های تحقیقاتی مرتبط با زیست‌شناسی مصنوعی مورد توجه هستند؟	پاسخ به این سوال می‌تواند در شناسایی حوزه‌هایی که نیاز به تلاش تحقیقاتی بیشتری دارند یاری‌رسان باشد. همچنین می‌تواند برای شناسایی جهت‌گیری تحقیقاتی آینده موثر باشد.
کدام مقالات، اثرگذارترین مقالات حوزه زیست‌شناسی مصنوعی باشند، اثرگذاری مقاله بر اساس تعداد ارجاعات به آن می‌باشد؟	پاسخگویی به این سوال می‌تواند به محققین کمک کند که اثرگذارترین حوزه‌های تحقیقاتی در این فناوری را شناسایی نمایند.
برترین موسسات حمایت مالی از مقالات حوزه زیست‌شناسی مصنوعی کدام هستند؟	پاسخگویی به این سوال می‌تواند در شناسایی موسسات و سازمان‌هایی که بیشتر سهم در تامین بودجه تحقیقاتی مرتبط با این موضوع را دارند، یاری‌رسان باشد.
مهمترین اصطلاحات و مفاهیم مطرح در زمینه زیست‌شناسی مصنوعی چه مواردی هستند؟	پاسخ به این سوال می‌تواند ما را در شناسایی حوزه‌های جدید مرتبط کمک کند و ما را با مفاهیم مورد تمرکز محققین برتر آشنا کند.

• روش‌شناسی پژوهش (متدولوژی)

در این بخش مراحل طی شده به منظور انجام علم‌سنجی و ترسیم شبکه‌های هم‌واژگانی و هم‌کشوری در رابطه با «زیست‌شناسی مصنوعی» تشریح شده است. به همین منظور نیاز است که مهمترین واژگان در این حوزه شناسایی شده و تحلیل مربوطه در این حوزه انجام شود. در گام اول و در ابتدا باید پایگاه علمی مناسبی برای دستیابی به آمار و ارقام مستندات منتشر شده انتخاب شود. در بین پایگاه‌های داده علمی موجود همانند WoS و Google Scholar، پایگاه علمی Scopus برای انجام علم‌سنجی انتخاب شده است. دلیل این امر جامعیت این پایگاه‌های علمی است زیرا شامل تعداد بالای مقالات ژورنالی، کنفرانسی، و کتاب می‌باشند.

• نتایج کلی حاصل از علم‌سنجی

در این بخش تمرکز ما بر کلید واژه "زیست‌شناسی مصنوعی" خواهد بود. بنابراین در پایگاه استنادی Scopus جستجوی برای حوزه مذکور مطابق با عبارت زیر انجام شده است:

("synthetic biology")

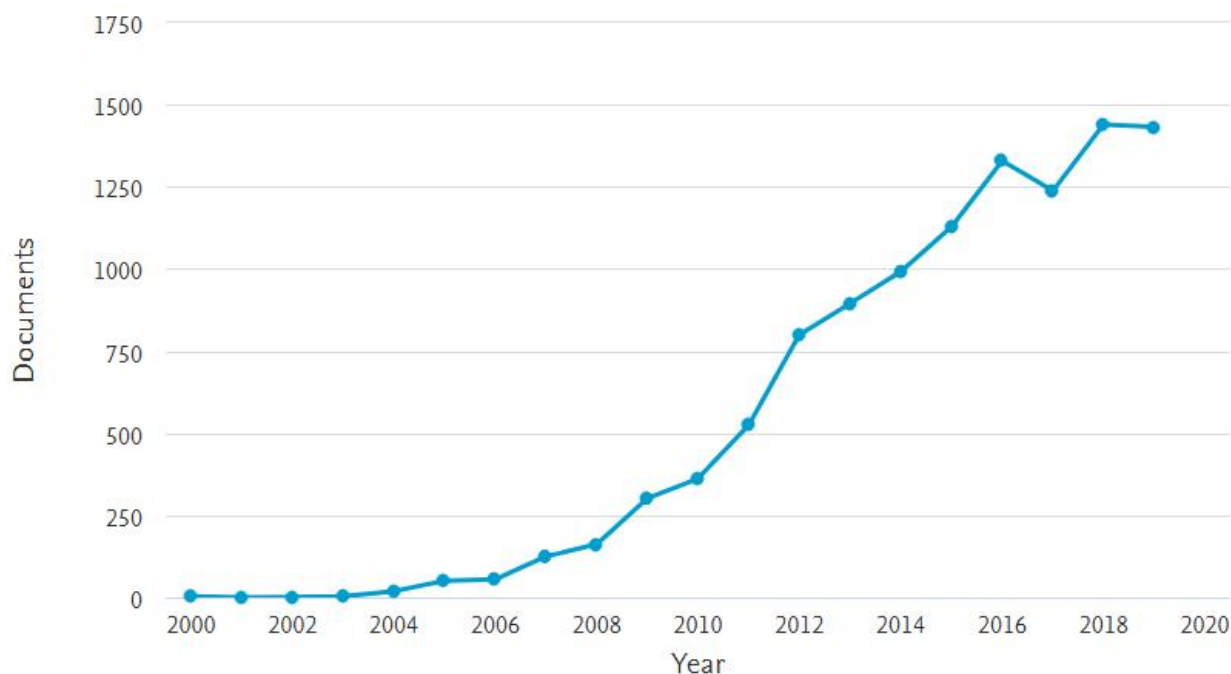
تعداد نتایج حاصل از جستجوی عبارت فوق مشتمل بر 11460 مدرک (شامل مقاله، کتاب و...) تا سال 2020

میلادی می‌باشد که از این پایگاه بازیابی شده و در ادامه به تحلیل نتایج به دست آمده خواهیم پرداخت.

تعداد مدارک منتشر شده در دنیا در این حوزه و روند آن در شکل زیر نشان داده شده است. شکل مذکور

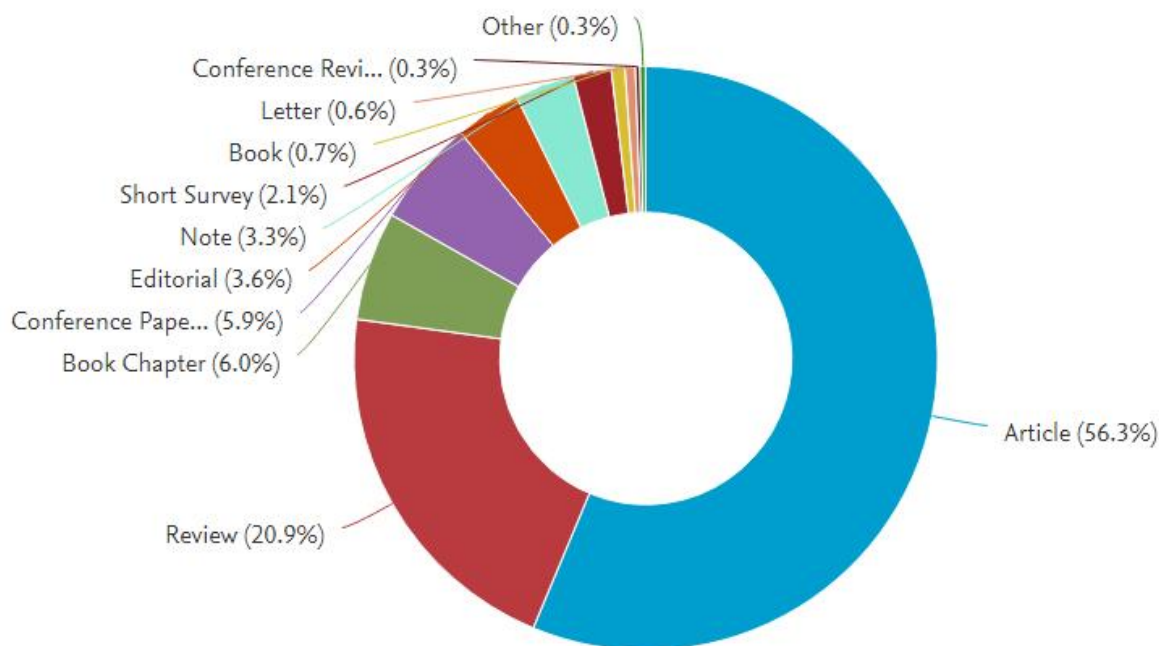
نشان می‌دهد که روند تولید مدارک در این حوزه در سال‌های اخیر به صورت نمایی رشد پیدا کرده است که موید

اهمیت بسیار بالای این حوزه از فناوری است. در این نمودار نتایج مربوط به سال 2020 از تحلیل کنار گذاشته شده‌اند.



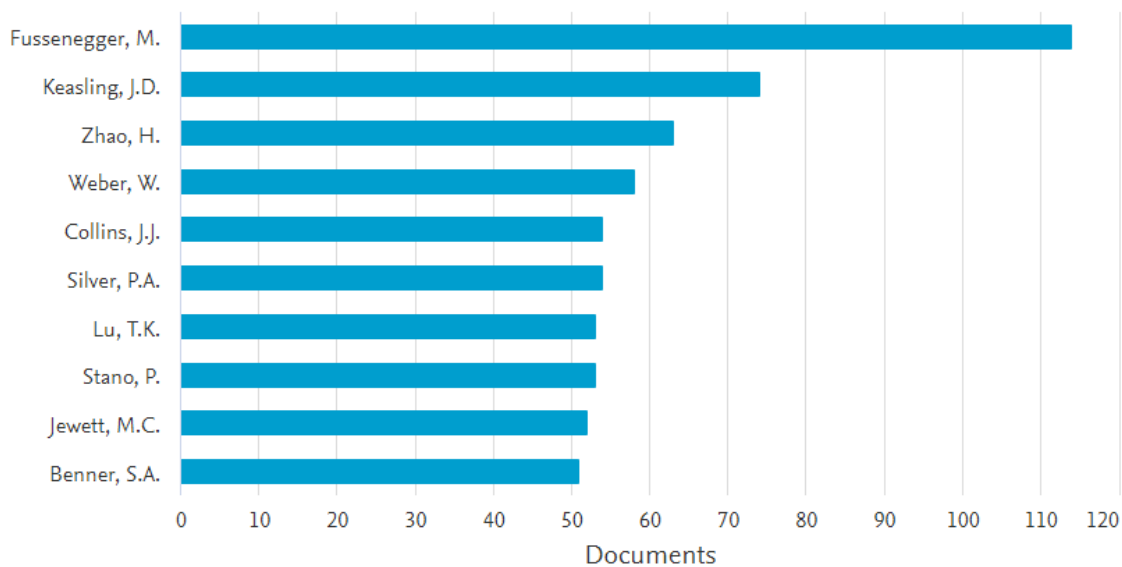
شکل 2 (تعداد و روند مدارک منتشر شده در دنیا در حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

وضعیت نوع مدارک منتشر شده (مقاله کنفرانسی، مقاله ژورنال، کتاب، فصل از کتاب، ...) در دنیا و همچنین درصد مدارک مربوطه در این حوزه نیز در شکل زیر (شکل 3) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، مقالات ژورنالی در این حوزه با 56 درصد (حدود 6000 عنوان) بیشترین میزان مدارک منتشر شده را به خود اختصاص داده‌اند. قابل توجه است که در این زمینه 81 عنوان کتاب نیز به چاپ رسیده است.



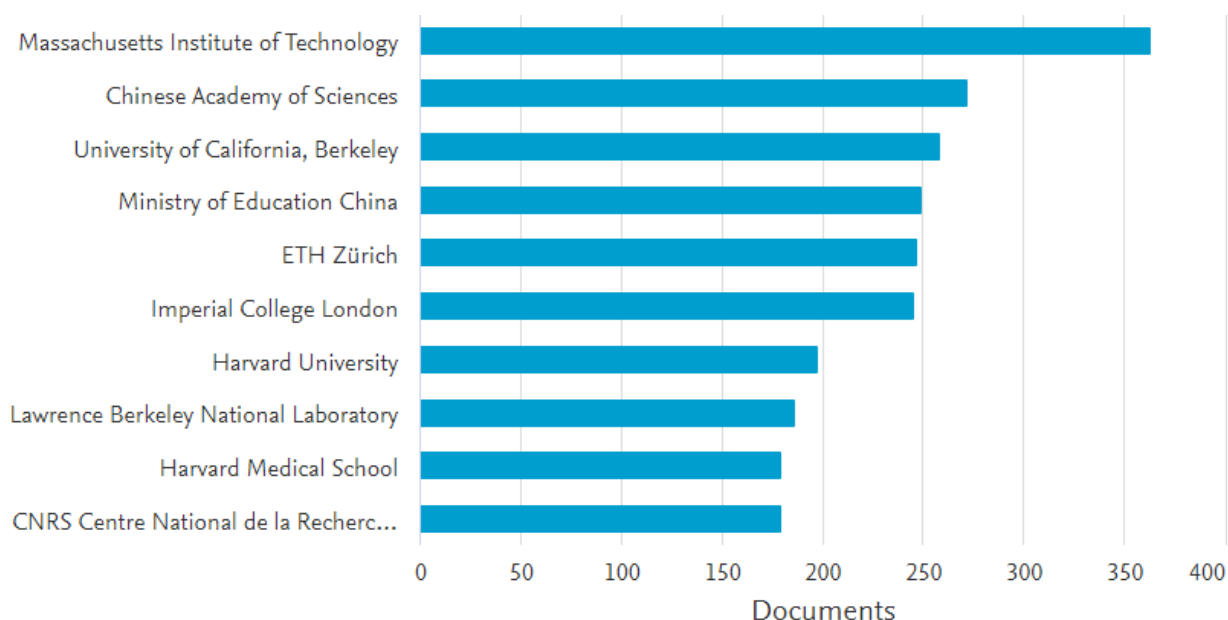
شکل 3) وضعیت مدارک منتشر شده در دنیا در حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

نویسندگان این حوزه در دنیا، با بیشترین تعداد مدرک منتشر شده (10 نویسنده برتر) در شکل زیر نشان داده شده است. بیشترین تعداد مقالات منتشر شده با 114 عنوان متعلق به دانشمند سوئیسی Martin Fussenegger است.



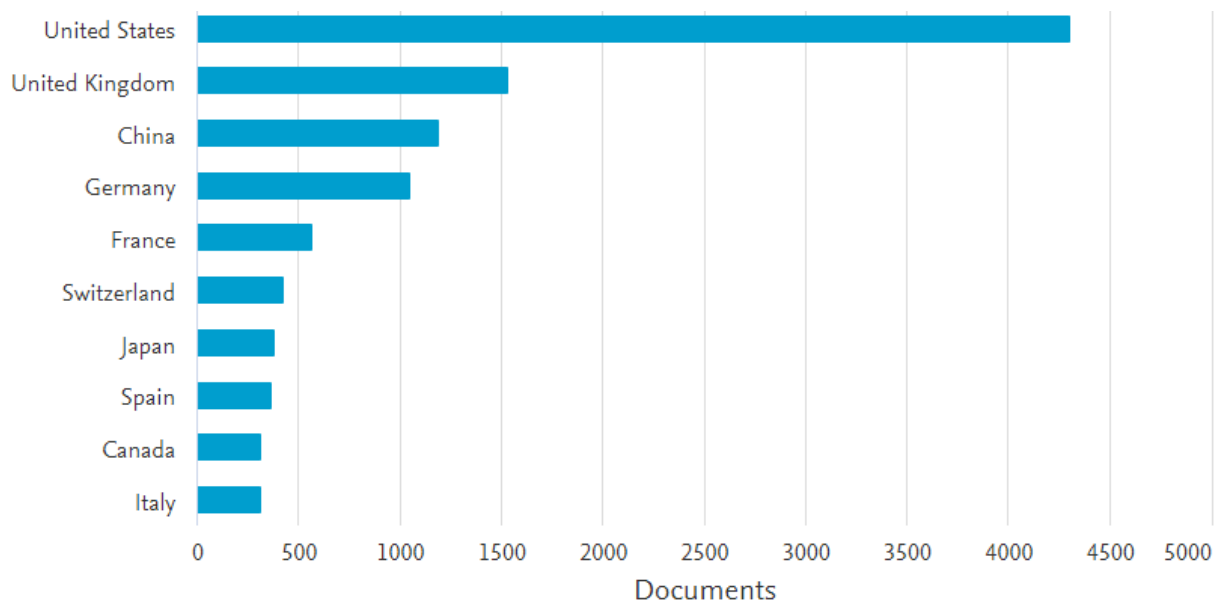
شکل 4) نویسندگان برتر در حوزه «زیست شناسی مصنوعی» در دنیا

همچنین 10 موسسه/دانشگاه/مرکز تحقیقاتی در دنیا که بیشترین تعداد مدارک را در این زمینه منتشر نموده‌اند در شکل زیر نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، دانشگاه MIT، آکادمی علوم چین، دانشگاه برکلی کالیفرنیا، وزارت آموزش چین، دانشگاه ETH زوریخ و کالج سلطنتی لندن، در رده‌های برتر قرار گرفته‌اند.



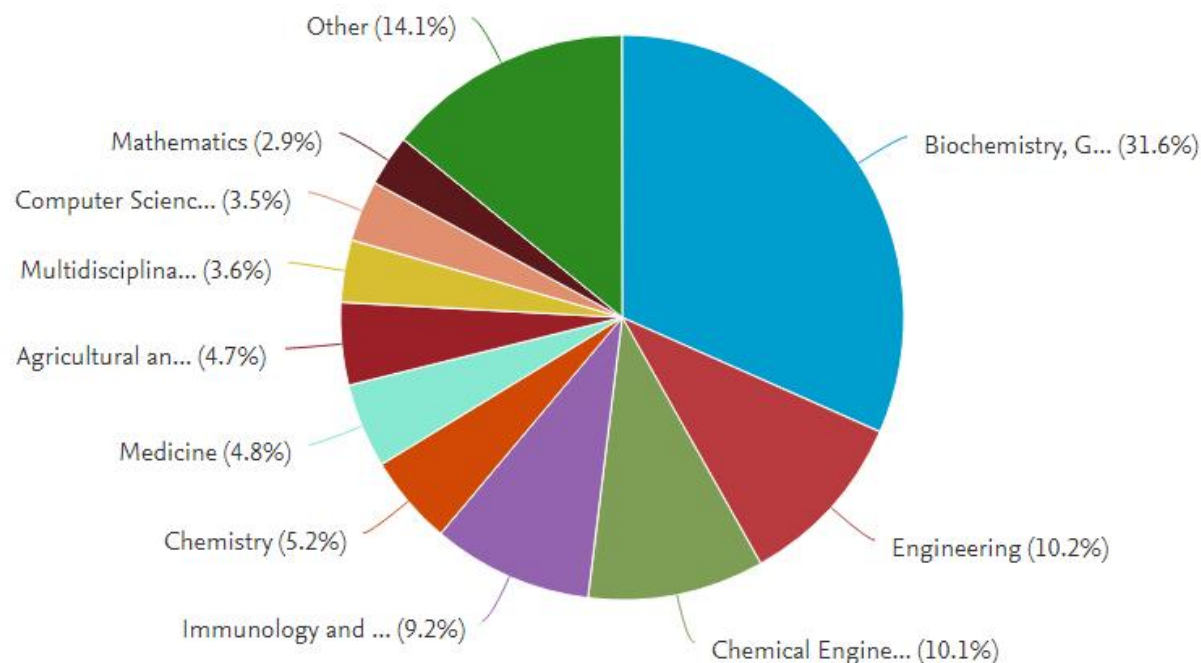
شکل 5) مراکز تحقیقاتی برتر دنیا در حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

وضعیت رتبه‌بندی کشورهای دارای بیشترین مدرک منتشر شده در جهان نیز در شکل زیر نشان داده شده است. همانگونه که مشخص است آمریکا، انگلستان، چین و آلمان به ترتیب با انتشار 4300، 1528، 1190 و 1044 سند علمی با فاصله قابل توجه نسبت به سایر کشورها در رده‌های اول تا چهارم قرار گرفته‌اند. در رده بعدی کشورهای فرانسه، سوئیس، ژاپن، اسپانیا، کانادا و ایتالیا قرار گرفته‌اند.



شکل 6) کشورهای دارای بیشترین مدارک منتشر شده در جهان در حوزه «بیولوژی مصنوعی»

وضعیت و میزان مدارک منتشر شده در حوزه‌های موضوعی مختلف نیز در نمودار زیر نشان داده شده است. همانگونه که در شکل زیر نشان داده شده است، حوزه «بیوشیمی» بیشترین میزان مدارک را در این حوزه به خود اختصاص داده است و در رتبه‌های بعدی حوزه مهندسی (10,2%)، مهندسی شیمی (10,1%)، ایمنونولوژی و میکروبیولوژی (9,2%) قرار گرفته‌اند.



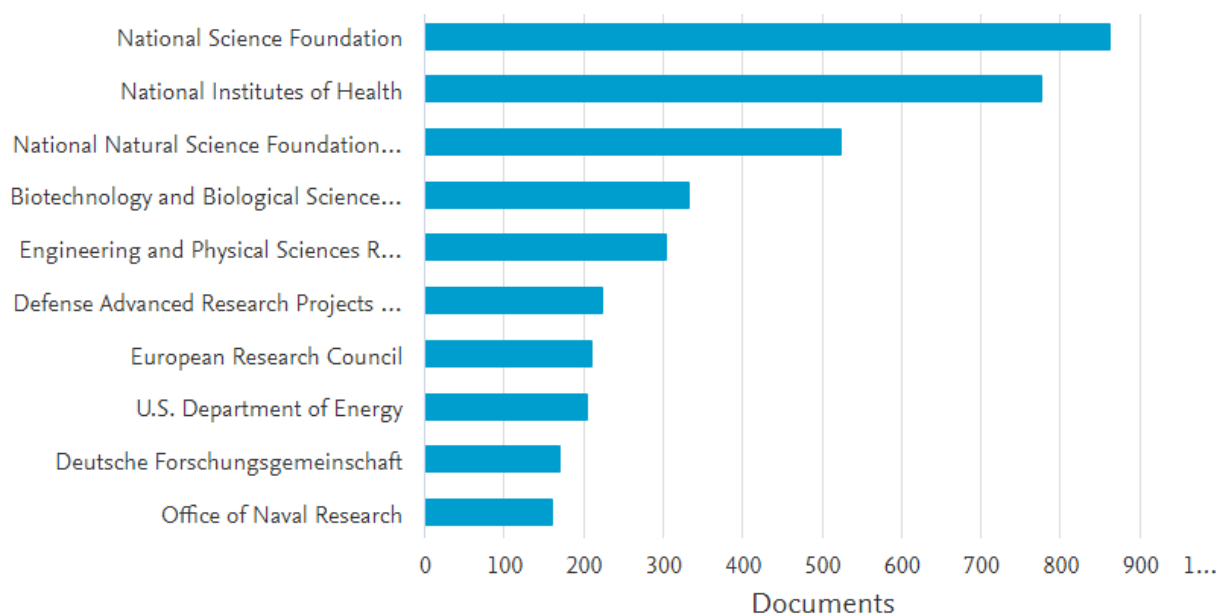
شکل 7) وضعیت و میزان مدارک منتشر شده در زمینه‌های موضوعی مختلف در حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

یکی دیگر از اطلاعات بسیار ارزشمند در زمینه مقالات علمی منتشر شده شناسایی موسسات مالی است که حامی تحقیقات انجام شده در این حوزه میباشند. با بررسی مدارک استخراج شده، مشخص شد که بنیاد ملی علوم²² با حمایت از 862 مقاله علمی در جایگاه اول قرار گرفته است و در رده‌های بعدی انجمن ملی سلامت²³ و بنیاد ملی علوم طبیعی چین²⁴ گرفته‌اند. رتبه‌بندی مربوط به این موسسات تامین مالی در شکل زیر نشان داده شده است.

²² National science foundation

²³ National institute of health

²⁴ National natural science foundation of China



شکل 8) برترین موسسات تامین مالی حامی پروژه‌های حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

در ادامه و به منظور ترسیم ساختار این حوزه در دنیا، در ابتدا با استفاده از خروجی‌های حاصل از پایگاه «اسکوپوس» و با بهره‌گیری از نرم‌افزار Bibexcel، تحلیل واژگان مربوطه در مدارک انجام شده است.

• ترسیم ساختار و شبکه‌های هم‌واژگانی و هم‌کشوری در حوزه «زیست شناسی

مصنوعی»

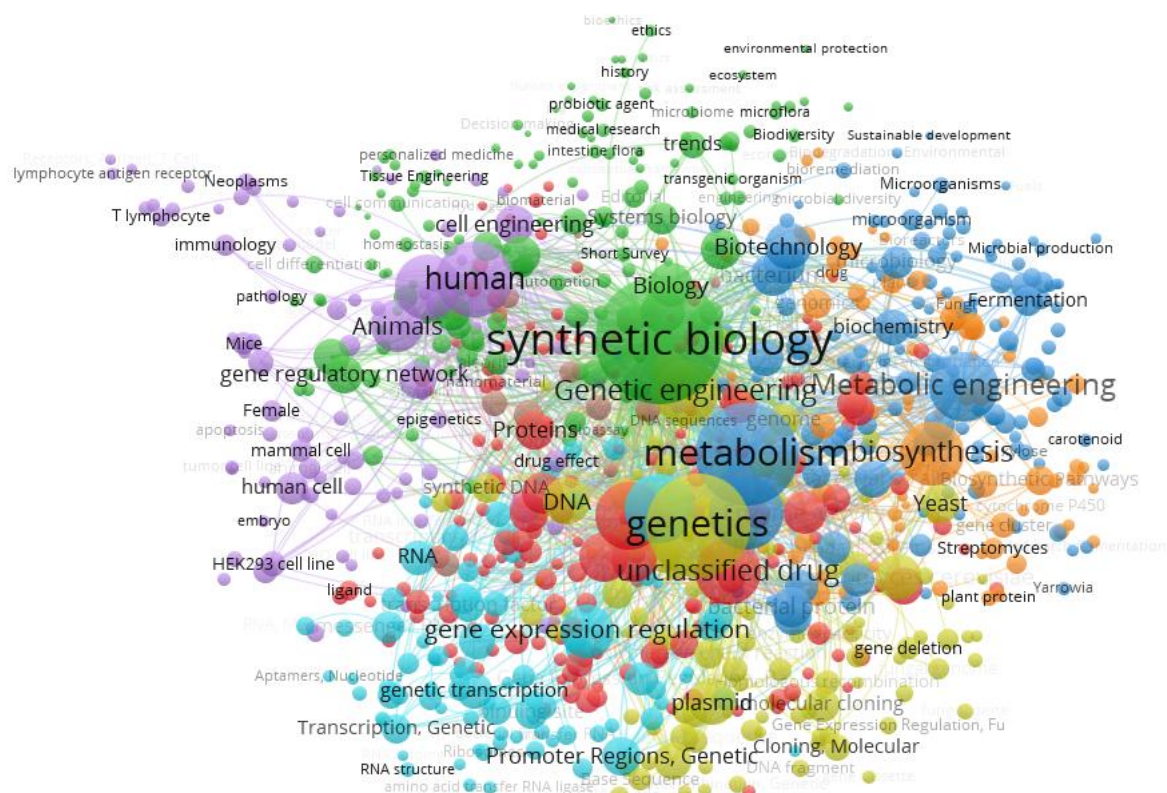
در این قسمت لغات موجود در مدارک استخراج و مرتبط‌ترین واژگان از میان آن‌ها جهت نمایش در شبکه انتخاب شده‌اند. اینکار باعث می‌شود که لغاتی که از اهمیت کمتری در این مدارک برخوردار هستند حذف شده و شبکه نیز فقط بر روی نمایش لغات مهم در این حوزه متمرکز شود.

در گام بعدی باید خروجی به‌دست آمده از نرم‌افزار Bibexcel را وارد نرم‌افزار VOSViewer نماییم و تحلیل‌های مربوطه را انجام دهیم. اولین خروجی که از این نرم‌افزار به‌دست آمده است مطابق شکل زیر است.

کوچک یا بزرگ بودن دایره‌ها در شکل زیر نشان‌دهنده این موضوع است که در حوزه «زیست‌شناسی مصنوعی»، هر واژه به چه اندازه تکرار شده است. همانطور که در شکل زیر مشخص است واژه‌های زیر به دلیل بیشترین تکرار در مدارک دارای دایره‌های بزرگتری هستند:

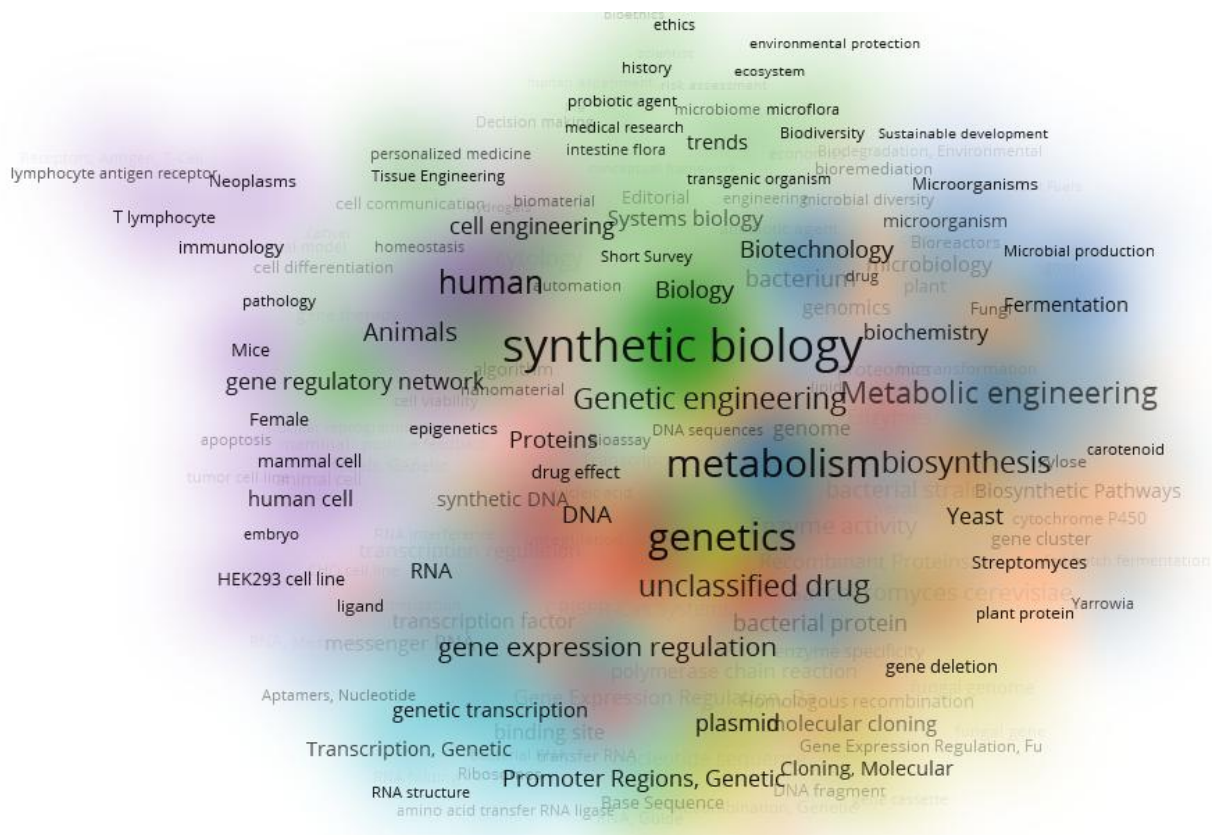
- زیست شناسی مصنوعی
- مهندسی ژنتیک
- ژنتیک
- مقررات بیان ژن
- E-Coli

در این نقشه هر یک از رنگ‌های به‌کار رفته، معرف یک خوشه موضوعی می‌باشد. همانطور که مشخص است واژگان مورد نظر در 8 خوشه مختلف دسته‌بندی شده‌اند.



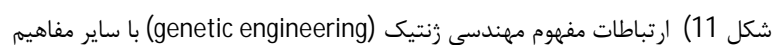
شکل 9) شبکه هم‌واژگانی در حوزه «زیست‌شناسی مصنوعی»

با توجه به اینکه در این شکل لغات زیادی به کار رفته است (870 کلیدواژه) و به جهت آنکه هر بخش از شکل به صورت شفاف تر و مشخص تری قابل مشاهده باشد در ادامه با بزرگ نمایی شکل های، جایگاه هر لغت و ارتباطات آن ها در شبکه به صورت خواناتری نشان داده شده است. خوشه های 8 گانه به صورت دقیق تر و تصویر سازی شده در شکل زیر نمایش داده شده است.

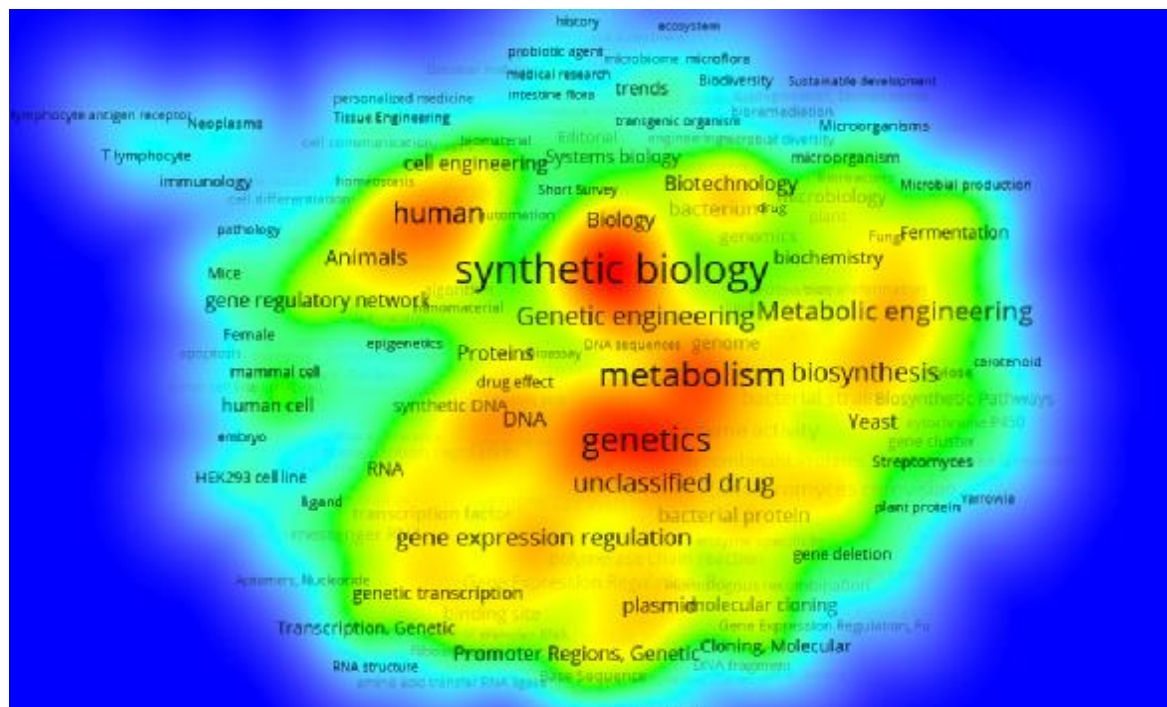


شکل 10) خوشه‌های 8 گانه شبکه هم‌واژگانی در حوزه «زیست‌شناسی مصنوعی»

با استفاده از تحلیل هم‌وابستگی می‌توان ارتباط بین کلیدواژه‌های مختلف را نیز مشاهده کرد. در شکل‌های زیر ارتباط بین مفهوم "مهندسی ژنتیک"، "بیولوژی مصنوعی"، "مدارات ژنتیکی" با دیگر مفاهیم نشان داده شده است.



همچنین وضعیت تراکم (چگالی) و پراکندگی واژگان در این حوزه نیز در شکل نشان داده شده است.

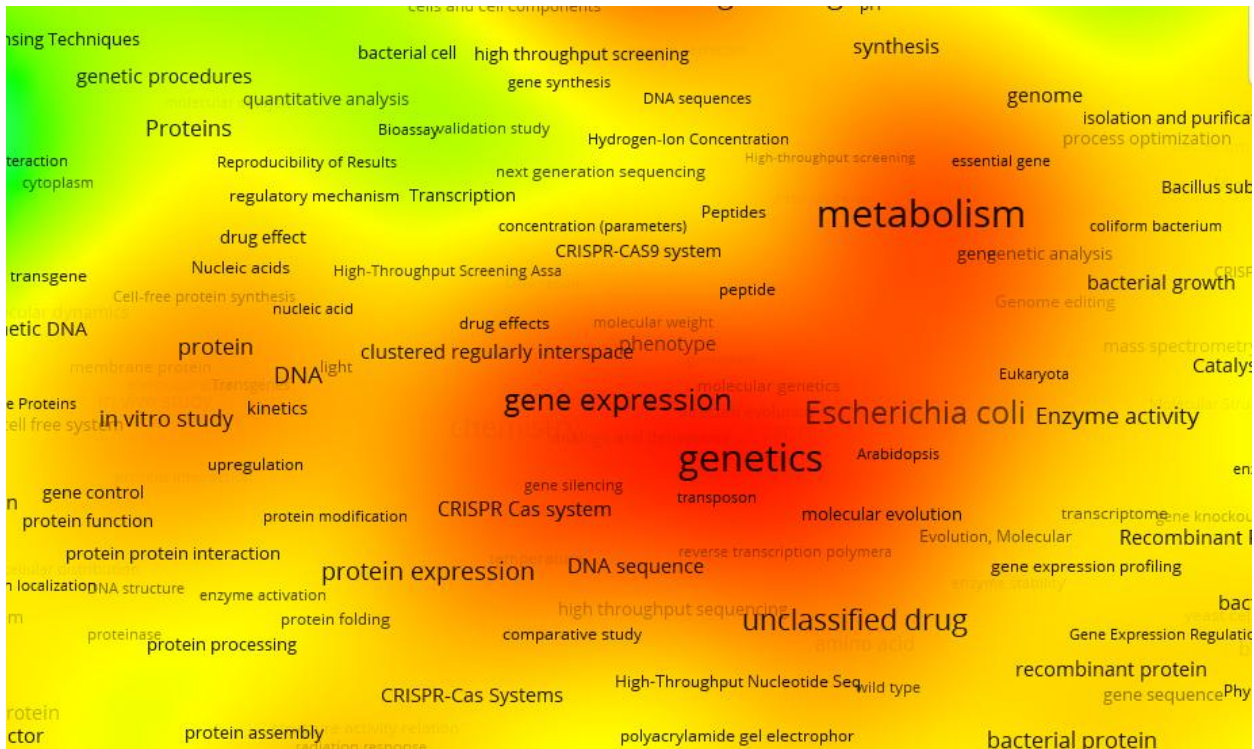


شکل 14) وضعیت تراکم (چگالی) و پراکندگی واژگان شبکه هم واژگانی در حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

در شکل بالا، بیشترین میزان توجه به واژگان با رنگ قرمز نشان داده شده است. بنابراین مفاهیمی همچون «زیست شناسی مصنوعی»، «ژنتیک» و «بیان ژن» دارای بیشترین توجه در این حوزه است و در نتیجه در ناحیه قرمز قرار دارد. از طرفی واژگانی همچون «چیدمان پروتئین²⁵»، «سنتز پروتئین» و موارد متعدد دیگر چون در ناحیه زرد رنگ هستند دارای میزان توجه نسبتاً بالایی هستند. به همین ترتیب رنگ‌های سبز و آبی بیشترین میزان توجه را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین دوری و نزدیکی لغات نیز در این شکل دارای معنی و مفهوم می‌باشد. به این صورت که مثلاً اگر فاصله دو واژه نسبتاً کم باشد در نتیجه می‌توان بیان نمود که این دو واژه در مدارک زیادی با هم بکار رفته‌اند. همچنین اگر فاصله دو واژه از هم زیاد باشد به این معنی است که در مدارک

²⁵ Protein assembly

کمی این دو واژه با یکدیگر به کار رفته‌اند. نمای بزرگ شده بخش اصلی شکل که مفاهیم اصلی این حوزه را در بر می‌گیرد در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل 15) قسمت مرکزی و داغ نمودار حرارتی شبکه هم واژگانی در حوزه «زیست شناسی مصنوعی»

• پاسخ به برخی سوالات

با توجه به تحلیل علم‌سنجی انجام شده و شکل‌های رسم شده، در این بخش به سوالات معمول در این حوزه

پاسخ داده میشود:

سوال	توزیع اسناد منتشر شده در حوزه بیولوژی مصنوعی در سال‌های اخیر چگونه است؟
جواب	با توجه به شکل 2 مشاهده می‌شود که تعداد مقالات در حوزه بیولوژی مصنوعی در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته است و در این میان عبارت "بیولوژی مصنوعی" بیشتر مورد توجه جامعه تحقیقاتی قرار گرفته است. همانطور که دیده می‌شود، در سال 2019 تعداد مدارک منتشر شده در زمینه بیولوژی مصنوعی به عدد 1432 رسیده است که نشان دهنده اهمیت و ضرورت گرایش به سمت این فناوری و مفهوم می‌باشد.

سوال	بر اساس تعداد اسناد مرتبط، کدام حوزه‌های تحقیقاتی در موضوع بیولوژی مصنوعی مورد توجه بیشتری هستند؟
جواب	با توجه به شکل 7 دیده می‌شود که موضوع بیوشیمی دارای بیشترین تعداد مقالات در این حوزه و با سهم حدود 31% درصد می‌باشد و در رده های بعد از آن حوزه مهندسی با 10,2 درصد، حوزه مهندسی شیمی با 10,1 درصد قرار گرفته‌اند. همچنین حوزه‌های ایمنونولوژی و میکروبیولوژی و شیمی و علوم دارویی نیز بخش مهمی از تحقیقات مربوط به بیولوژی مصنوعی را در خود جای داده‌اند.

سوال	اثرگذارترین مقالات در حوزه بیولوژی مصنوعی بر اساس تعداد ارجاع کدام می‌باشند؟
جواب	با بررسی حدود 11400 سند مستخرج از پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس تعداد ارجاع، جدول زیر حاصل می‌شود. همانطور که مشخص است، پرارجاع‌ترین مقالات در زمینه هستند.

سوال	لیست مقالات با بیشترین ارجاع کدام هستند؟
جواب	جدول زیر لیست نشان دهنده لیست مقالات با بیشترین ارجاع می‌باشد.

ردیف	عنوان مقاله	سال چاپ	میزان ارجاع
1	<u>Drug discovery and natural products: End of an era or an endless frontier?</u>	2009	1208
2	<u>High-level semi-synthetic production of the potent antimalarial artemisinin</u>	2013	935
3	<u>Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement</u>	2011	879
4	<u>How antibiotics kill bacteria: From targets to networks</u>	2010	854
5	<u>Growth factor delivery-based tissue engineering: General approaches and a review of recent developments</u>	2011	774
6	<u>Improving photosynthetic efficiency for greater yield</u>	2010	759

744	2009	<u>The second wave of synthetic biology: From modules to systems</u>	7
732	2010	<u>Synthetic biology: Applications come of age</u>	8
713	2009	<u>An ER-mitochondria tethering complex revealed by a synthetic biology screen</u>	9
713	2008	<u>A fast, robust and tunable synthetic gene oscillator</u>	10
7011	2011	<u>A hybrid ANFIS model for business failure prediction utilizing particle swarm optimization and subtractive clustering</u>	11
689	2006	<u>Synthetic biology: New engineering rules for an emerging discipline</u>	12
649	2012	<u>Potential applications of enzymes immobilized on/in nano materials: A review</u>	13
643	2012	<u>Microbial engineering for the production of advanced biofuels</u>	14
609	2010	<u>A synchronized quorum of genetic clocks</u>	15
606	2006	<u>Essential genes of a minimal bacterium</u>	16
600	2005	<u>Tuning genetic control through promoter engineering</u>	17
591	2007	<u>Harnessing homologous recombination in vitro to generate recombinant DNA via SLIC</u>	18
581	2008	<u>Bistability, epigenetics, and bet-hedging in bacteria</u>	19

سوال	برترین موسسات حمایت مالی از مقالات بیولوژی مصنوعی کدام موسسات هستند؟
جواب	با توجه به نتایج ارائه شده در شکل 8، دیده می‌شود که در بین مقالات منتشر شده در این حوزه، بنیاد ملی علوم (national science foundation) آمریکا بیشترین حمایت را از تحقیقات بیولوژی مصنوعی داشته است. در رده‌های بعدی انجمن ملی سلامت آمریکا، بنیاد علوم طبیعی چین، شورای تحقیقات علوم فناوری زیستی و شورای تحقیقات علوم مهندسی گرفته‌اند.

سوال	مهمترین اصطلاحات و مفاهیم مطرح در زمینه بیولوژی مصنوعی چه مواردی هستند؟
جواب	برای جهت‌گیری مناسب در زمینه تحقیق و توسعه بیولوژی مصنوعی، شناسایی مهمترین مفاهیم مطرح در این حوزه می‌تواند بسیار کمک کننده باشد. یکی از توانایی‌های تحلیل علم‌سنجی این است که می‌تواند کلیدواژه‌های پرکاربرد تحقیقات انجام شده را شناسایی کرده و ارتباطات بین آن‌ها را نشان دهد. همانطور که دیده می‌شود پرکاربردترین کلیدواژه‌ها در مقالات منتشر شده چندساله اخیر عبارتند از: • بیولوژی مصنوعی (synthetic biology)

<ul style="list-style-type: none"> • ژنتیک (genetics) • باکتری ای-کولی (E-coli) • مهندسی متابولیک (metabolic engineering) • بیان ژن (gene expression) • مهندسی ژنتیک (genetic engineering) • بیوسنتز (biosynthesis) • مقررات بیان ژن (gene expression regulation) • بیان پروتئین و مهندسی پروتئین (protein expression and engineering) • باکتری (bacteria) • فعالیت آنزیم (enzym activity) • یاخته‌شناسی یا سلول‌شناسی (cytology) • شبکه رگولاتوری ژنی (gene regulatory network) • ویرایش ژن (gene editing) • سنتز پروتئین (protein synthesis) • مدارات ژنی (genetic circuits) 	
---	--

• مدارات ژنی مصنوعی (synthetic genetic circuits)

• اسیلاتورهای ژنتیکی (genetic oscillators)

• مدارات منطقی ژنتیکی (logical genetic circuits)

3- مفاهیم و تعاریف

• برنامه‌ریزی DNA با استفاده از فرایندهای پایه بیومولکولی

تحقق کارکرد یک مدار ژنتیکی مبتنی بر کدگذاری و برنامه‌ریزی سلولی و واکنش‌های بیومولکولی (همانند پروتئین‌ها) بر روی زنجیره DNA است. مدارهای ژنتیکی اولیه توسط مقررات رونویسی²⁶ عمل می‌کردند، به نحوی که به عنوان مثال پروتئین x ، نرخ پروتئین y ژن دیگر را دچار تغییر می‌کند (شکل 2). پروتئین x می‌تواند نرخ تولید پروتئین y را متوقف (t) یا فعال (\rightarrow) سازد، بنابراین می‌توان مدار ژنتیکی را به عنوان شبکه‌ای از سیستم‌های دینامیکی (پویا) دارای ورودی/خروجی (I/O) تصور کرد.

ورودی‌ها و خروجی‌ها نشان‌دهنده میزان پروتئین‌ها (یعنی x و y) و هر زیرسیستم (گره) در شبکه بیانگر فرایند پویای تولید پروتئین توسط DNA است (شکل 2 بخش عصر ماژول‌ها). تمامی ژن‌ها، اعم از آن‌هایی که به صورت مصنوعی ساخته شده‌اند، از مکانیزم ماشینی داخل سلول برای تولید پروتئین استفاده می‌کنند. در ابتدا پلیمرازهای RNA (به اصطلاح RNAPها) دنباله ژن را خوانده و یک RNA پیام‌رسان آینه‌ای شده²⁷ (mRNA) را طی فرایندی که رونویسی²⁸ نامیده می‌شود، می‌سازند. سپس این mRNA توسط آنزیم سلولی دیگری که ریبوزوم²⁹ نامیده می‌شود خوانده شده و زنجیره آمینواسیدی را تولید می‌کند که پروتئین‌ها را تشکیل می‌دهند؛ این فرایند اصطلاحاً ترجمه mRNA نامیده می‌شود. این فرایند پویای تولید پروتئین توسط DNA زیربنای بیولوژی مولکولی است. فرایند مقررات رونویسی از گذشته به طور کامل مورد بررسی و شناسایی قرار گرفته است و مدل‌های ریاضی آن به خوبی بر اساس معادلات دیفرانسیلی معمولی توسعه پیدا کرده‌اند. همانگونه که در شکل زیر نشان داده شده است سیر تحول زمانی زیست‌شناسی مصنوعی، شامل سه دوره زمانی مختلف به شرح ذیل می‌باشد:

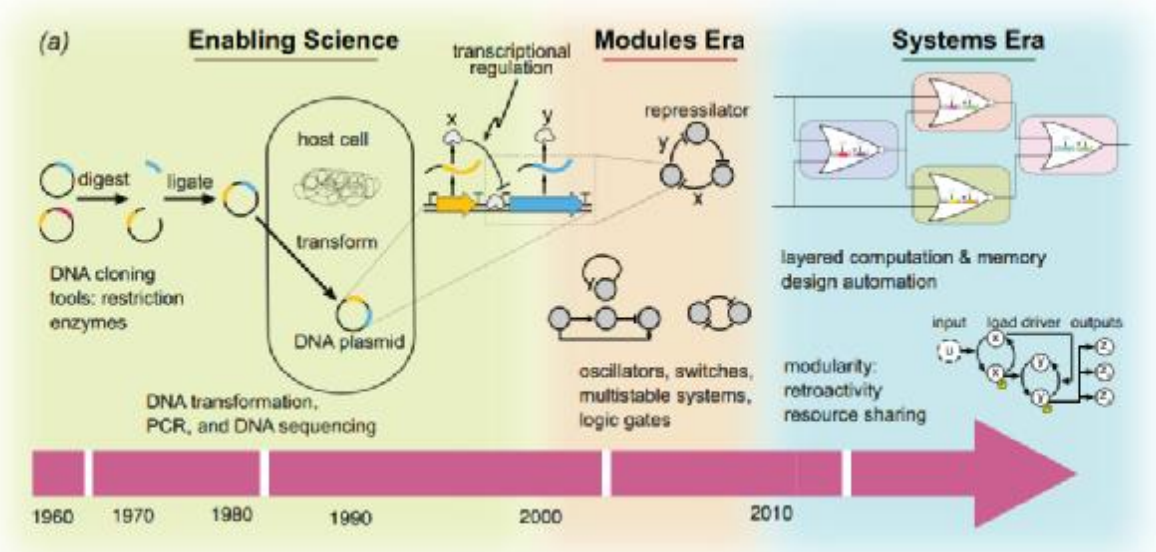
²⁶ Transcriptional regulation

²⁷ Mirrored messenger RNA

²⁸ Transcription

²⁹ Ribosome

- دوره (علوم توانمندساز) : علم تکثیر امکان برش و الحاق اجزای DNA و تشکیل یک مدار را در پلاسمید DNA فراهم می کند.
- دوره ماژول ها : اولین سیستم های مصنوعی ایجاد شده ماژول های ساده ای بودند که کارکردهایی نظیر نوسان و سوئیچینگ را شبیه سازی می کردند.
- دوره سیستم ها : ساخت مدارهای پیچیده تر بر اساس رویکرد طراحی ماژولار / لایه بندی شده



شکل 2- محور زمانی توسعه صنعت زیست شناسی مصنوعی

علاوه بر مقررات رونویسی، مکانیزم های متعدد دیگری برای تنظیم فعالیت های پروتئینی در طبیعت وجود دارند که اخیرا در کاربردهای زیست شناسی مصنوعی شبیه سازی شده اند. بخش قابل توجهی از این مقررات توسط فعل

و انفعالات پروتئین-پروتئین نظیر اصلاح آلوستریک¹ و اصلاح کووالانس² انجام می‌شوند. یکی از مهمترین گونه‌های اصلاح کووالانس، فرایند فسفریلاسیون³ است که در شکل 3 نشان داده شده است. فرآیندهای بیوملوکولی اصلی شامل مقررات رونویسی، فعل و انفعالات پروتئین-پروتئین و RNA-RNA - که می‌توانند برای مدارهای ژنتیکی استفاده شوند- میباشند.

در این فرایند، آنزیم کیناز⁴ Z به گروه فسفات موجود در زیرلایه x انتقال یافته و باعث می‌شود که این زیرلایه به صورت فعال (x^*) مبدل شود. در سمت دیگر فرایند مکمل دیفسفریلاسیون⁵، با حذف یک گروه فسفات از زیرلایه فعال توسط آنزیم فسفاتاز⁶ (y) انجام می‌پذیرد. فرایند فسفریلاسیون و دیفسفریلاسیون بسیار سریع‌تر از تولید پروتئین بوده و می‌توانند در مدارهای ژنتیکی که نیازمند سرعت پاسخ بالایی هستند مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال، این ویژگی برای ادوات عایق‌بندی بیومولکولی مورد استفاده و بهره‌برداری قرار گرفته است. از دیگر انواع فعال و انفعالات پروتئین-پروتئین که به خوبی مورد بهره‌برداری دانشمندان قرار گرفته است می‌توان به مقررات آلوستریک، فسفوترانسفر⁷ و مقررات تخریب پروتئین⁸ اشاره کرد.

¹ allosteric modification

² covalent modification

³ Phosphorylation

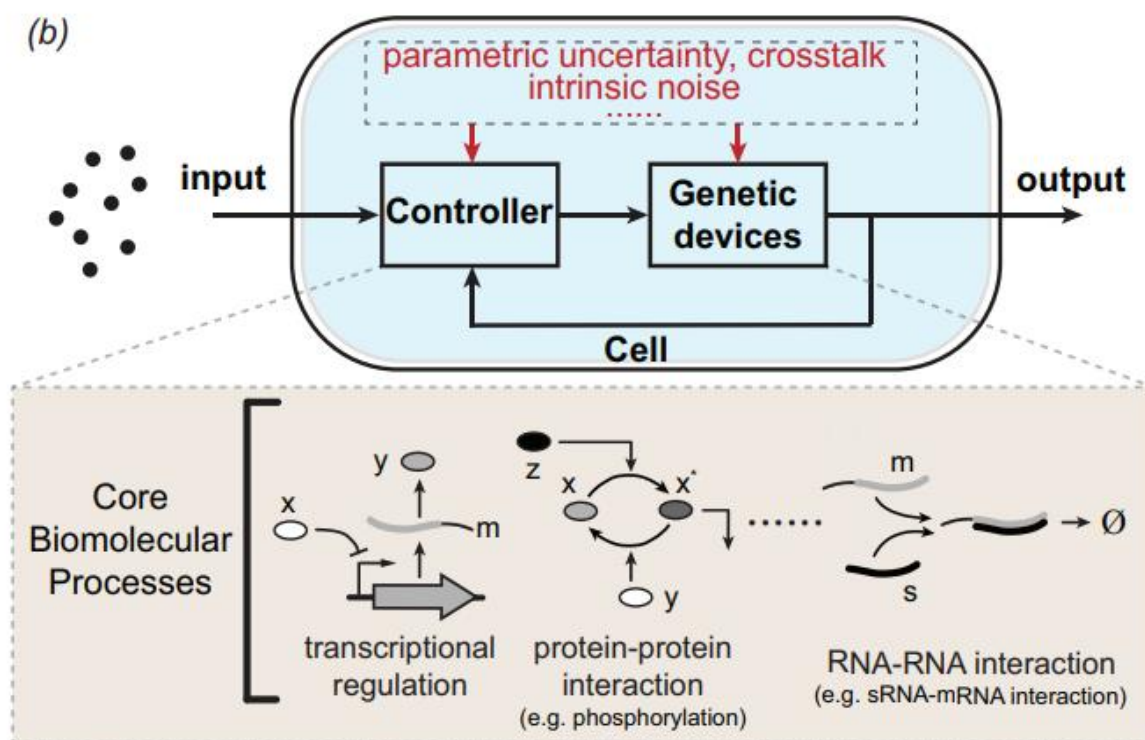
⁴ Kinase

⁵ Dephosphorylation

⁶ phosphatase

⁷ Phosphotransfer

⁸ protein degradation



شکل 3- فرایندهای بیومولکولی

آزمایش‌های تجربی انجام پذیرفته از دهه 1990 نشان دادند که RNA ها تنها به عنوان پیام‌رسان بین DNA و پروتئین عمل نمی‌کنند، بلکه رگولاتورهای مهمی برای بیان ژن⁹ هستند. به عنوان مثال بسیاری از RNA های کوچک رگولاتوری (sRNA ها) در باکتری‌ها شناسایی شده‌اند که در طیف وسیعی از پاسخ‌های تطبیقی باکتری‌ها دخیل هستند. با رجوع به شکل 1b، sRNA ها می‌توانند با متصل شدن به mRNA های هدف، تخریب آن‌ها را سرعت بخشیده یا باعث ممانعت از ترجمه شوند. مدل‌سازی این رفتار نشان دهنده این بوده است که مقررات sRNA ها به نسبت مقررات رونویسی، دارای ویژگی‌های متمایزتری نظیر سرعت پاسخ بالاتر و رفتارهای مشابه سوئیچ است. در نهایت و در سال‌های اخیر، فناوری CRISPR-Cas9، دسته دیگری از ابزارهای کارآمد را از طریق

⁹ gene expression

هدایت RNA ها فراهم کرده است که علیرغم دستیابی به موفقیت قابل توجه همچنان از نظر مدل‌سازی ریاضی هنوز به تکامل مورد نیاز دست نیافته است.

• ابزارها و نرم‌افزارهای طراحی و سنتز برنامه‌های مبتنی بر DNA

در این بخش به معرفی مقالات، نرم‌افزارها و ابزارهای بیولوژیکی - که برای طراحی و ایجاد برنامه‌های مبتنی بر DNA مورد استفاده قرار میگیرند - پرداخته شده است:

• مatsuoka و همکارانش¹⁰ اقدامات مهمی که برای استانداردسازی طراحی توابع کدگذاری شده توسط DNA

در مهندسی بیولوژیک صورت پذیرفته است را دسته‌بندی و بررسی کرده‌اند. استفاده از مدل‌های کمی

قابل اندازه‌گیری، عنصر اصلی در تحلیل و طراحی سیستم‌های ترکیبی بوده و اندلر¹¹ و همکارانش

چارچوبی کلی از فرایند ایجاد مدل و ابزارهای نرم-افزاری را طراحی نموده‌اند.

• فیلیپس و کاردلی¹² یک زبان برنامه‌نویسی را برای طراحی و شبیه‌سازی محاسبه‌گرهای DNA طراحی کرده‌اند،

• پدرس و فیلیپس¹³ یک زبان رسمی را برای مهندسی ژنتیک سلول‌ها معرفی کرده‌اند که امکان توصیف

سیستم‌های ترکیبی را در سطح تعامل منطقی بین ژن‌های با DNA-کدگذاری شده و پروتئین‌ها را فراهم می‌کند.

¹⁰ Matsuoka, Y., Ghosh, S. & Kitano, H. 2009 Consistent design schematics for biological systems: standardization of representation in biological engineering. J. R. Soc. Interface 6, S393–S404. (doi:10.1098/rsif.2009.0046.focus)

¹¹ Endler, L., Rodriguez, N., Juty, N., Chelliah, V., Laibe, C., Li, C. & Le Novère, N. 2009 Designing and encoding models for synthetic biology. J. R. Soc. Interface 6, S405–S417. (doi:10.1098/rsif.2009.0035.focus)

¹² Phillips, A. & Cardelli, L. 2009 A programming language for composable DNA circuits. J. R. Soc. Interface 6, S419–S436. (doi:10.1098/rsif.2009.0072.focus)

¹³ Pedersen, M. & Phillips, A. 2009 Towards programming languages for genetic engineering of living cells. J. R. Soc. Interface 6, S437–S450. (doi:10.1098/rsif.2008.0516.focus)

- بنتلی¹⁴ نیز روش‌های بهبود شبیه‌سازی‌های مربوط به سیستم‌های بیولوژیکی را شرح داده و یک زبان تعاملی و محاسبات سیستماتیک را معرفی کرده است که بیان و مدل‌سازی سیستم‌های بیولوژیکی را ممکن می‌سازد.
 - ولچ و همکارانش¹⁵ نیز تجارب ارزنده خود را در زمینه سنتز DNA به اشتراک گذاشته و در زمینه محدودیت‌های اصلی طراحی ژن‌های مصنوعی و قواعد بهینه‌سازی توصیف ژنها بحث کرده‌اند.
 - سوارز و جارامیلو¹⁶ نیز پیشرفت در طراحی محاسباتی پروتئین‌های مصنوعی و چالش‌های آتی برای تولید اجزای جدید بیولوژی مصنوعی را مورد بحث و گفتگو قرار داده‌اند.
 - گولاتی و همکارانش¹⁷ نیز فناوری میکروفلوئیدها به عنوان فناوری بنیادی برای زیست‌شناسی مصنوعی و استفاده در کاربردهای متنوع ساخت و تست سیستم‌های ترکیبی استفاده نموده‌اند.
- به طور کلی، تحقیقات این حوزه بسیار متنوع و گسترده بوده و نیازمند بررسی‌های بسیار دقیق و موشکافانه هستند.

¹⁴ Bentley, P. J. 2009 Methods for improving simulations of biological systems: systemic computation and fractal proteins. J. R. Soc. Interface 6, S451–S466. (doi:10.1098/rsif.2008.0505.focus)

¹⁵ Welch, M., Villalobos, A., Gustafsson, C. & Minshull, J. 2009 You're one in a googol: optimizing genes for protein expression. J. R. Soc. Interface 6, S467–S476. (doi:10.1098/rsif.2008.0520.focus)

¹⁶ Suarez, M. & Jaramillo, A. 2009 Challenges in the computational design of proteins. J. R. Soc. Interface 6, S477–S491. (doi:10.1098/rsif.2008.0508.focus)

¹⁷ Gulati, S., Rouilly, V., Niu, X., Chappell, J., Kitney, R. I., Edel, J. B., Freemont, P. S. & deMello, A. J. 2009 Opportunities for microfluidic technologies in synthetic biology. J. R. Soc. Interface 6, S493–S506. (doi:10.1098/rsif.2009.0083.focus)

4- کاربردهای زیست شناسی مصنوعی

زیست‌شناسی مصنوعی حوزه جدیدی است که کاربردهای بسیاری در علوم دارویی، شیمی، کشاورزی و بخش‌های انرژی پیدا کرده است. در سال 2012 انجمن جهانی اقتصاد¹⁸ در داووس (Davos) زیست‌شناسی مصنوعی را به عنوان حوزه‌ای معرفی کرده است که در آینده اثرات قابل توجهی بر اقتصاد جهانی خواهد داشت. دولت انگلستان نیز این حوزه را به عنوان یکی از هشت فناوری اثرگذار بر رشد اقتصادی آینده این کشور معرفی کرده است.

کاربردهای تجاری این فناوری متمرکز بر ایجاد میکرو ارگانیسم‌هایی (نظیر *E. coli*، مایه خمیر نانواپی¹⁹ و جلبک-های ریز) است که می‌توانند در تولید محصولات ارزشمندی نظیر سوخت، غذا و دارو استفاده شوند. یکی از مثالهای خوب برای توضیح این مطلب مربوط به ساخت سلول‌های مخمری است که می‌توانند در تولید آرتمیسینین²⁰ استفاده شوند.

آرتمیسینین دارویی است که در درمان مالاریا مورد استفاده قرار می‌گیرد. دانشمندان آمریکایی برای اولین بار در سال 2006 ساخت این مخمر و تولید این ماده را انجام داده و منتشر کردند. ماده‌ای که می‌توانست با تبدیل شیمیایی به یک داروی کامل برای درمان مالاریا مورد استفاده قرار گیرد. از آن زمان این فرایند مرتب بهبود یافته و تولید تجاری آرتمیسینین نیمه مصنوعی هم‌اکنون توسط شرکت Sanofi انجام می‌شود.

در سال 2006، آژانس دارویی اروپا²¹ مجوز ساخت داروی مصنوعی Atryn را صادر کرد، دارویی که از شیر بزهای دستکاری ژنتیکی شده به دست می‌آید. از این دارو برای جلوگیری از لخته شدن خون بیماران استفاده می‌شود که دارای مشکل مادرزادی ژنتیکی هستند. این پروتئین درمانی می‌تواند از شیر بزهایی استخراج شود که طوری تغییر ژنتیکی پیدا کرده‌اند که بخشی از DNA آنها می‌تواند در تولید آنتی‌ترومبین²² استفاده شود. پروتئینی که

¹⁸ World economic forum

¹⁹ Baker's yeast

²⁰ Artemisinin

²¹ EU Medicine Agency

²² Antithrombin

به طور طبیعی در بدن تولید می‌شود ولی بدن برخی از بیماران نادر قادر به تولید آن نیست. در سال 2009، داروی ATryn توسط آمریکا تایید شد که این اولین تاییدیه برای محصولات دارویی بود که از حیوانات دارای دستکاری ژنتیکی به دست آمده بود. دیگر کاربردهای دارویی زیست‌شناسی دارویی شامل ساخت باکتری‌هایی با قابلیت حمله به سلول‌های سرطانی و طراحی آنتی‌بیوتیک‌های جدید است.

علاوه بر این، بخش قابل توجهی از مطالعات زیست‌شناسی مصنوعی به کاربردهای این علم برای محیط زیست پرداخته‌اند. به عنوان مثال در بخشی از این مطالعات، حسگرهای زیستی تولید شده است که می‌تواند برای سنجش میزان آلودگی آب‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین می‌توان ارگانیزم‌هایی را تولید کرد که می‌توانند با حذف آلودگی‌هایی نظیر فلزات سنگین و آفت‌کش‌ها، تجزیه پسماندها و تصفیه آب را انجام دهند. اخیراً گروهی از دانشمندان نوعی از E. coli را تولید کرده‌اند که می‌تواند متیل جیوه²³ را از بین ببرد. این ماده سمی می‌تواند در زنجیره غذایی به سمت بالا حرکت کرده و وارد بدن جانوران به ویژه انسان شود.

سوخت‌های زیستی تولید شده توسط ارگانیزم‌های مهندسی شده نظیر جلبک می‌توانند جایگزین بسیار پایدارتری برای سوخت‌های فسیلی باشند، زیرا می‌توانند بدون نیاز به زمین‌های قابل کشت پرورش داده شوند. جلبک می‌تواند باعث حذف CO₂ از هوا شده و آن را به هیدروکربن‌های دارای انرژی تبدیل کند. همچنین زیست‌شناسی مصنوعی نقش مهمی در ایجاد محصولات کشاورزی مقاوم به آفت‌ها دارد و می‌تواند با بالا بردن ارزش غذایی این محصولات دستیابی به ایمنی غذایی را برای جامعه بشری رقم بزند.

با وجود اینکه زیست‌شناسی مصنوعی منافع و مزایای بسیاری برای جامعه دارد، در توسعه سلول‌ها و ژن‌های مصنوعی عدم قطعیت‌های بسیاری وجود دارد، به ویژه اینکه اثر این ارگانیزم‌ها بر محیط زیست هنوز نامشخص است.

²³ Methylmercury

بخش سلامت: صنعت زیست شناسی مصنوعی می تواند انقلابی در تشخیص و درمان بیماری ها ایجاد کند. مدارهای ژنتیکی مصنوعی می توانند تجمع گونه های متنوع مولکولی در داخل انواع سلول ها تشخیص داده و از طریق واکنش های بیومولکولی، محاسبات منطقی خاصی را انجام دهند، همان طور که میدانیم در صورت برآورده شدن مجموعه ای از شرایط منطقی، سیگنال خروجی، نتیجه مشخصی را نشان خواهد داد.

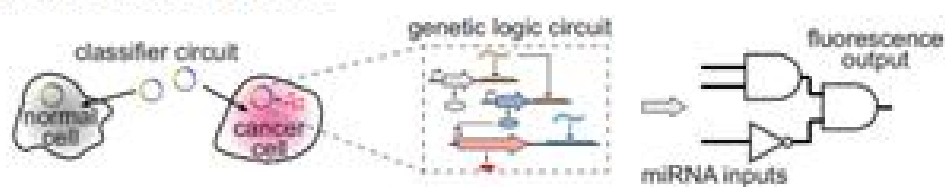
به عنوان مثال، این شرایط منطقی می توانند برای شناسایی علائم شیمیایی سلول های سرطانی و شروع اقدامات پیشگیرانه به کار گرفته شوند (شکل 3). مدارهای مشابه می توانند جایگزینی برای آزمایش های مخرب تشخیص بیماری و نظارت بر سلامت بیمار باشند. باکتری های برنامه ریزی شده نیز می توانند به عنوان ابزارهای هوشمند انتقال دارو به محل تومور و آزادسازی پروتئین های درمانی برای کاهش فعالیت تومور استفاده شوند.

زیست شناسی مصنوعی ابزارهای قدرتمندی را برای برنامه ریزی گونه ای از سلول های ایمنی بدن به سلول های T فراهم می کند. این قابلیت، توانایی حمله به سلول های سرطانی را به این سلول ها میدهد. این نوع از درمان که به عنوان ایمونوتراپی²⁴ شناخته می شود، در سال های اخیر نتایج موفقیت آمیزی در آزمایشگاه ها داشته است. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، گیرنده های مصنوعی ساخته شده بر روی سلول های T، می توانند با ترکیب شدن با گیت های منطقی بیومولکولی، برای تشخیص سلول های سرطانی به کار گرفته شوند. کنترل گرهای ژنتیکی مصنوعی²⁵ نیز می توانند از طریق واکنش با مسیر شیمی درمانی سلولی، سلول های T را به محل تومور هدایت کرده (شکل 4) و میزان و شدت فعالیت سلول T را به منظور محافظت از سلول های غیرسرطانی تنظیم کنند.

²⁴ Immunotherapy

²⁵ Synthetic genetic controllers

(a) **ex vivo cancer diagnostic**



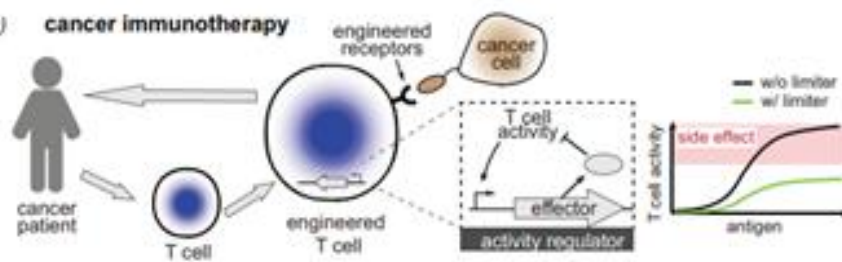
شکل 3) نوعی از مدار دسته‌بندی کننده که برای تشخیص سرطان استفاده می‌شود

(b) **periodic drug release**



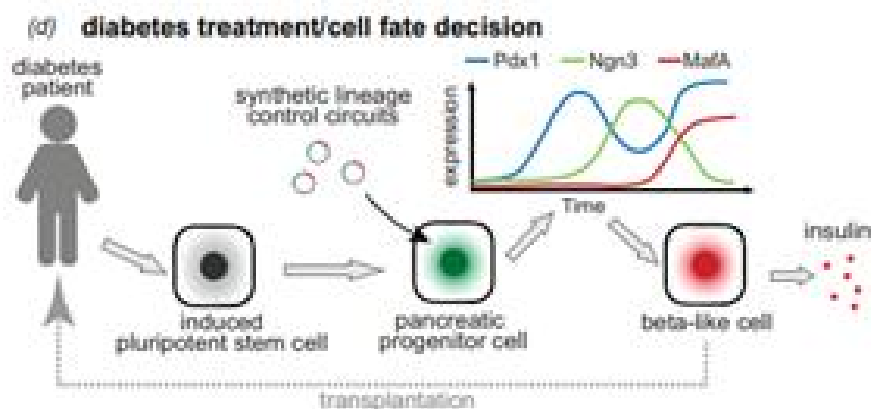
شکل 4) باکتری‌ها می‌توانند طوری طراحی شوند که ابزاری هوشمند برای انتقال دارو باشند

(c) **cancer immunotherapy**



شکل 5) مدارهای ژنتیکی مصنوعی میتوانند باعث بهبود عملکرد و امنیت ایمونوتراپی سرطان شوند

مطالعات نظری و آزمایش‌های تجربی در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی، شناخت بشر از سیستم‌های طبیعی، نظیر تمییز سلولی²⁶ و بیولوژی سرطان را بهبود بخشیده است. به عنوان مثال، چنین شناختی می‌تواند برای برنامه‌ریزی سلول‌ها در ایجاد داروی باز زا به کار گرفته شود. به عنوان مثال در شکل 6 مدار برنامه‌ریزی سلولی نشان داده شده است که سلولهای مادرزادی پانکراس گرفته شده از سلول‌های بنیادی پرتوان انسانی (hiPSC) را به سلول‌های بتای ترشح انسولین تبدیل می‌کند. بنابراین این امکان برای بیماران دیابتی فراهم شده است که از سلول‌های بافت خود بیمار برای ایجاد سلول‌های بتا استفاده شود.



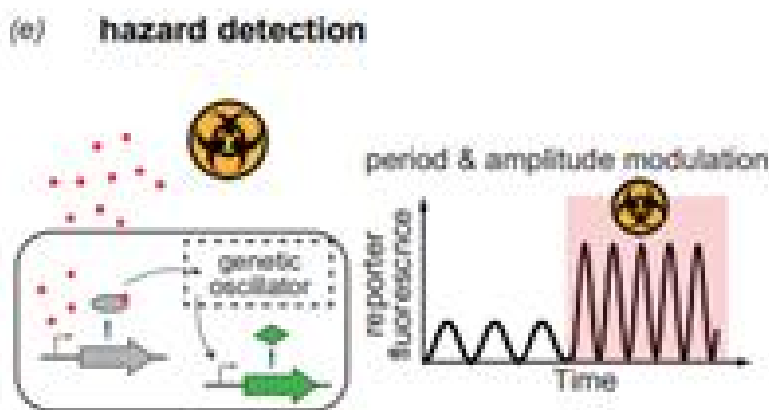
شکل 6) نمونه یک مدار کنترل مصنوعی میزان انسولین

• محیط زیست و انرژی - میکروب‌های برنامه‌ریزی شده برای تشخیص و گزارش سموم موجود در آب، هوا، خاک و غذا یکی از کاربردهای اولیه زیست‌شناسی مصنوعی است. برای ایجاد یک بیوسنسور زیست‌محیطی، ژن‌های استفاده شده برای کدگذاری پروتئین‌های گزارشگر و پروتئین‌هایی که محاسبات منطقی را انجام می‌دهند، تحت کنترل سیستم تنظیم حسگری سلول میزبان قرار می‌گیرند. این روش طراحی برای شناسایی

²⁶ Cell differentiation

TNT، فلزات سنگین و آنتی‌بیوتیک‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اخیراً، حسگرهایی برای ایجاد یک خروجی پویا تولید شده‌اند. شکل 7 یک بیوسنسور باکتریایی را نشان می‌دهد که می‌تواند خروجی فلورسنت نوسانی، - که شدت و فرکانس آن نشان‌دهنده میزان آرسنیک در محیط است - را تولید می‌کند.

علاوه‌براین، میکروب‌ها می‌توانند طوری برنامه‌ریزی شوند که باعث حذف آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین شوند. همچنین این میکروب‌ها می‌توانند طوری برنامه‌ریزی و ساخته شوند که زباله‌های انبوه انسانی را به سوخت‌های بیولوژیکی تبدیل کرده و کنترل‌گرهای مصنوعی برای افزایش بهره‌وری آن‌ها پیاده‌سازی شوند. در نهایت، سلامت بیولوژیکی یکی از نگرانی‌های کاربرد انبوه بیوسنسورهای میکروبی است؛ از این جهت که بتوانند قابلیت فرار و تکثیر خودبخودی را داشته باشند. برای ساده شدن نگرانی در مورد این مسئله، سوئیچ‌های ژنتیکی اهرمی، طوری ساخته شده‌اند که این میکروب‌ها فقط تحت شرایط خاصی قابلیت زیستن را داشته باشند.



شکل 7) یک سنسور زیستی که حضور گاز آرسنیک را تشخیص داده و میزان آن را با مدوله کردن دوره خروجی و دامنه یک مدار ژنتیکی نشان می‌دهد.

کاربردهای زیست‌انرژی²⁷، به ویژه در زمینه تولید سوخت، بخش مهمی از تمرکز تحقیقات زیست‌شناسی مصنوعی را تشکیل می‌دهند. سوخت‌های زیستی تولید شده با استفاده از تکنیک‌های زیست‌شناسی مصنوعی هم‌اکنون به مراحل تست میدانی و تولید در مقیاس کوچک دست پیدا کرده‌اند.

یکی از حوزه‌های تحقیقاتی، استفاده از ابزارهای زیست‌شناسی مصنوعی برای تولید آنزیم‌هایی است که می‌توانند پسماندهای کشاورزی و غذایی را تجزیه کنند. زمینه تحقیقاتی دیگر در زمینه استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی، پرورش گیاهانی است که پسماندهای آن‌ها می‌تواند به راحتی تبدیل به سوخت زیستی شود. به عنوان مثال یکی از کاربردهای نسخه مهندسی شده باکتری E.coli تجزیه و تبدیل توده‌های زیستی به سوخت‌های زیستی است. همچنین تحقیقاتی انجام شده است که به موجب آن برگ‌های مصنوعی تولیدی توسط علم زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند انرژی خورشیدی را به سوخت مایع با پایه کربن تبدیل کنند. همچنین محققان از علم زیست‌شناسی مصنوعی برای تولید جلبک‌هایی استفاده کرده‌اند که می‌توانند از ترکیب نشاسته و آب سوخت هیدروژنی تولید کنند. ادعا می‌شود که این جایگزینی سوخت‌های فسیلی با منابع انرژی مبتنی بر فراورده‌های زیستی می‌تواند باعث کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای شوند. ابزارهای زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند در طراحی سوخت‌های زیستی نسل بعدی مورد استفاده قرار گیرند؛ به ویژه در تولید سوخت از محصولات کشاورزی.

از طرفی این کاربرد می‌تواند پیامدهای منفی قابل توجهی نیز داشته باشد. یکی از این موارد کاهش کیفیت خاک و حاصل‌خیزی آن است. برداشت پسماندهای کشاورزی از مزارع ما را مجبور به استفاده از کودهای نیتروژنی، فسفر و پتاسیم خواهد کرد. از طرفی دیگر، رهاسازی ارگانیزم‌های استفاده شده در روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی، می‌تواند تهدیدات غیرقابل پیش‌بینی برای محیط زیست داشته باشد. به عنوان مثال، جلبک‌هایی که به منظور

²⁷ Bioenergy

تولید سوخت‌های زیستی استفاده می‌شوند می‌توانند اثرات منفی محیط زیستی داشته باشند. برای جلوگیری از این مشکل در بسیاری از روش‌ها، این ارگانیزم‌های ریز در راکتورهای مخصوص مورد استفاده قرار می‌گیرند.

مثال کاربردی زیست‌شناسی مصنوعی: تولید گیاهان درخشان (عکس فوق)

در کنار کاربردهایی که برای حل چالش‌های اجتماعی وجود دارند، کاربردهایی نیز وجود دارند که کاملاً تجاری هستند. پروژه گیاه درخشان²⁸ به عنوان اولین پروژه مهندسی تیل کرس (یا نام علمی *Arabidopsis thaliana*) برای تابش نور مطرح است که از ژن‌های مصنوعی کرم‌های شب‌تاب و عروس دریایی می‌کند. این پروژه اولین کمپین تامین مالی جمعی برای انجام یک پروژه زیست‌شناسی مصنوعی است. تامین مالی این پروژه به خوبی انجام پذیرفته است و هم‌اکنون آمریکایی‌ها می‌توانند پیش‌سفارش آن را انجام دهند.



شکل 8 یک نمونه از گیاهان درخشان

²⁸ Glowing plant project

به گفته توسعه‌دهندگان این کاربرد، این گیاهان می‌توانند در آینده به عنوان روشنایی خیابان‌ها مورد استفاده قرار گرفته و بنابراین با صرفه‌جویی در مصرف انرژی باعث کاهش انتشار CO2 شوند. با این وجود برخی دیگر عقیده دارند که این پروژه بیهوده بوده و ارزش کمی برای جامعه ایجاد خواهد کرد. همچنین نگرانی‌هایی در زمینه تولید این ارگانیزم جدید وجود دارد زیرا رگولاتوری این گیاهان هنوز توسط سرویس بررسی سلامت جانوران و گیاهان آمریکا²⁹ (APHIS) انجام نشده است (<http://www.glowingplant.com>).

• **تغییر جمعیت حیوانات حیات وحش:** هم‌اکنون روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی مختلفی به منظور تغییر جمعیت حیات وحش مورد بررسی هستند. این کاربرد زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند اثرات مثبتی بر زندگی انسان‌ها، حیات وحش و اکوسیستم داشته باشد. در کنفرانسی که در سال 2013 و با عنوان "چگونه زیست-شناسی مصنوعی، حفاظت منابع طبیعی آینده طبیعت را شکل خواهند داد؟"³⁰ به این مسئله پرداخته شد. در این کنفرانس ایده پروژه‌های جدید زیست‌شناسی مصنوعی برای کاربرد در زمینه حفاظت منابع طبیعی شناسایی شدند؛ به عنوان مثال سازگار کردن مرجان‌ها با دما و اسیدیته آب، حمله به قارچ‌هایی که موجب سندروم بینی سفید در خفاش‌ها می‌شوند و یافتن راه‌هایی برای تنظیم جمعیت زنبورهای عسل. کاربردهای زیست‌شناسی مصنوعی در کشاورزی و انرژی زیستی می‌تواند فشار بر اکوسیستم‌ها را کاهش داده و باعث حفاظت بیشتر منابع طبیعی و حیات وحش شود. علاوه بر این، گونه‌های خاص جمعیتی حیات وحش می‌توانند هدف زیست‌شناسی مصنوعی واقع شوند. به عنوان مثال، زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند برای تولید سیستم‌های gene drive که در کاهش گسترش و انتقال بیماری‌ها توسط حشرات، نظیر پشه‌ها، کاربرد دارد، استفاده شوند. این سیستم‌ها می‌توانند گونه منتقل‌کننده بیماری را منقرض کنند. همین روش می‌تواند برای مقابله با آفت‌های محصولات کشاورزی نیز مورد استفاده قرار گیرد. البته نگرانی‌هایی نیز در زمینه استفاده از این سیستم‌های gene drive وجود دارد و پیشنهاد می‌شود که قبل از اتخاذ هرگونه تصمیمی برای استفاده از آن

²⁹ US Animal and Plant Health Inspection Service

³⁰ How will synthetic biology and conservation shape the future of nature?

گزینه‌های مدیریت ریسک انجام شوند. برخی عقیده دارند که فناوری‌های نوظهوری که بر مفاهیم و کاربردهای جهانی اثرگذار هستند باید قبل از تست و عملیاتی شدن، منتشر شوند. در این بازه بحث‌های عمومی در زمینه ملاحظات زیست‌محیطی و امنیتی، تحقیق در زمینه‌هایی که عدم قطعیت وجود دارد و توسعه و تست ویژگی‌های ایمنی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

در حال حاضر در نشریات عمومی توجه ویژه‌ای به پروژه جلوگیری از انقراض³¹ شده است. موضوع جلوگیری از انقراض موضوع کنفرانس TEDx در آمریکا و همچنین متن روی جلد مجله نشنال جغرافی در مارچ 2013 نیز بوده است. محققان سراسر جهان در حال مطالعه روش‌هایی هستند که بتوانند از طریق آن گونه‌های منقرض شده کبوتر وحشی، ماموت و قورباغه gastric brooding را دوباره احیا کنند. برخی از فعالیت‌های مربوط به احیای گونه‌های منقرض شده شامل روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی هستند، به عنوان مثال مهندسی ژنوم مصنوعی یکی از این روشها است.

احیای برخی از گونه‌های حیات وحش می‌تواند در بازیابی اکوسیستم‌های حیات وحشی - که وابستگی به عملکرد آن گونه خاص دارند- بسیار موثر باشد. از طرف دیگر برخی عقیده دارند که پروژه‌های احیای این چینی می‌تواند اثرات منفی مستقیمی بر تنوع زیستی داشته باشند. به عنوان مثال نگرانند که ارگانیزم‌های ناشی از روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی ممکن است مهاجم بوده و یا تاثیر منفی بر اکوسیستم‌های میزبان داشته باشند. همچنین این نگرانی نیز وجود دارد که این پروژه‌ها منجر به تولید ارگانیزم‌های دیگری (نظیر پاتوژن‌ها) شوند که میتوانند اثرات غیرمستقیم مخربی بر محیط زیست داشته باشند.

• **کاربردهای کشاورزی:** این امید وجود دارد که ابزارها و روش‌های زیست‌شناسی بتوانند ضمن افزایش بازدهی صنعت کشاورزی، اثرات زیست‌محیطی منفی محصولات کشاورزی را نیز کاهش دهند. طبق پیش‌بینی نقشه‌راه زیست‌شناسی مصنوعی انگلستان "زیست‌شناسی مصنوعی این پتانسیل را دارد که آسیب‌پذیری محصولات

³¹ De-extinction

غذایی به عواملی نظیر خشکسالی، آب شور یا آفات و بیماری‌ها را کاهش دهد. همچنین زیست‌شناسی مصنوعی توانایی ایجاد گیاهان جدیدی را - که بتوانند برای بدن انسانها مواد مفید را فراهم کند- دارا میباشد." طبق یکی از پیش‌بینی‌های انجام شده در سال 2009، ظرف 10 سال آینده زیست‌شناسی مصنوعی برای مهندسی گونه‌های جدید آفت‌کش‌هایی استفاده خواهد شد که علیرغم کارکرد موثر هیچ اثر منفی بر طبیعت باقی نخواهند گذاشت. در این راستا می‌توان به فکر ایجاد روش‌هایی بود که گیاهان به جای استفاده از کودهای دارای نیتروژن، مستقیماً نیتروژن را از هوا جذب کنند.

همچنین این امید وجود دارد که استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی در بخش‌های تولید محصولات کشاورزی بتواند با ایجاد ویژگی "تشدید پایدار"³² باعث کاهش نیاز به تبدیل مراتع و جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی شود و از این حیث موجبات حفاظت بیشتر از منابع طبیعی را نیز فراهم کند.

البته کاربردهای احتمالی زیست‌شناسی مصنوعی در کشاورزی می‌تواند برای تنوع زیستی³³ اثرات منفی در پی داشته باشد. بسیاری از پروژه‌های زیست‌شناسی مصنوعی برای بخش کشاورزی مستلزم رها شدن ارگانیزم-های تولیدی این روش‌ها هستند که می‌تواند اثرات منفی بسیاری بر محیط زیست داشته باشند؛ به عنوان مثال ارگانیزم‌های ناشی از زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند مهاجم و مختل‌کننده شبکه غذایی بوده یا اثرات منفی دیگری بر گونه‌های خاص داشته باشند. اگر این کاربردها به مرحله تجاری‌سازی برسند، باید در ابتدا اثرات منفی آن‌ها به صورت دقیق و موردی بررسی و ارزیابی شوند.

• **تولید موادی برای جایگزینی با مواد طبیعی:** در حال حاضر برخی از روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی برای تولید مواد شیمیایی و مولکول‌هایی استفاده می‌شود که پیش از این از گیاهان و حیوانات برداشت می‌شده است. استخراج مواد خاص از گیاهان و حیوانات می‌تواند اثرات منفی و مخربی بر تنوع زیستی آن‌ها داشته باشد و در مواردی جمعیت آن‌ها را تا مرز انقراض پیش ببرد.

³² sustainable intensification

³³ Biodiversity

یکی از مثال‌های این کاربرد تولید اسکالن³⁴، مرطوب‌کننده طبیعی مورد استفاده در محصولات آرایشی و مراقبت پوستی، است که پیش از این از کبد کوسه‌های دریایی استخراج می‌شده است. البته در سال‌های اخیر، اسکالن گیاهی استخراج شده از زیتون تا حدود زیادی جایگزین اسکالن حیوانی شده است. در سال 2011، روشی مبتنی بر زیست‌شناسی مصنوعی برای تولید اسکالن ابداع شد که نتیجه آن عرضه اسکالن نئوسانس³⁵ به بازار محصولات آرایشی و بهداشتی ژاپن بود. این ماده با استفاده از نیشکر برزیلی و تولید فارنس³⁶ هیدروکربن از مخمر منتج شده است که در نهایت به شکل اسکالن قابل بهره‌برداری شده است. تولید این ماده می‌تواند فشار موجود بر جمعیت کوسه‌های آب‌های عمیق را کاهش دهد.

مثال دیگر روغن پالم است که یکی از استفاده‌های آن تولید سورفکتانت³⁷ می‌باشد. سازمان صنایع فناوری-زیستی³⁸ با اذعان نگرانی نسبت به خسارت‌های ناشی از تولید روغن پالم به اکوسیستم جنگل‌های بارانی، به تحقیقات زیست‌شناسی مصنوعی برای تبدیل پسماندهای کشاورزی به سورفکتانت اشاره کرده است.

جایگزینی محصولات طبیعی با محصولات تولیدی زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند فشار بر زیستگاه‌های طبیعی را کاهش دهد ولی در مقابل می‌تواند تهدیداتی را نیز برای حفاظت منابع طبیعی بوجود بیاورد. به عنوان مثال شرکت‌های Evolva و همچنین شرکت بین‌المللی طعم‌دهنده‌ها و عطردهنده‌ها³⁹ قصد دارند که استفاده از وانیل حاصل از فرایند تخمیر خود را در اروپا رواج دهند.

آنها امیدوارند که بتوانند مزیت‌های رقابتی آن را به نسبت وانیل حاصل از زیست‌شناسی مصنوعی و مواد شیمیایی را نشان بدهند. درحالی‌که این شرکت‌ها ادعا می‌کنند که محصول آن‌ها جایگزین بهتری برای گونه شیمیایی وانیل بوده و هیچ خسارت یا تهدیدی را به جنگل‌های بارانی و یا گونه‌های در خطر انقراض ندارد،

³⁴ Squalene

³⁵ Neossance™ squalane

³⁶ Farnesene

³⁷ Surfactant

³⁸ Biotechnology Industry Organization

³⁹ International flavors and fragrances

البته باید در نظر داشت گروه ETC عقیده دارد که تولید انبوه این محصول می‌تواند بر کشاورزان محلی که در تولید دانه‌های وانیل فعال هستند، اثرات منفی داشته باشد.

• **کاربرد در تولیدات شیمیایی:** یکی از کاربردهای بالقوه زیست‌شناسی مصنوعی، مهندسی گیاهان و میکروب‌ها برای تولید مواد خامی است که در حال حاضر توسط علم شیمی تولید می‌شوند. یکی از مثالهای بارز در این حوزه، مرتبط با تولید پلاستیک‌های زیستی⁴⁰ نظیر پلاستیک‌های اسید پلی‌لاکتیک است، برای تولید این نوع پلاستیکها میتوان از روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی استفاده کرده و بجای استفاده از نفت خام برای تولید آنها از ساقه نیشکر استفاده کرد.

شرکت DuPont با تخمیر شکر ذرت با استفاده از یک میکروارگانیسم مصنوعی که گلوکز را به پروپاندیول⁴¹ تبدیل می‌کند موفق به تولید پروپاندیول 1 و 2 با پایه زیستی شده است.

جامعه صنعتی و مدنی اثرات مثبت و منفی بسیاری را در نتیجه کاربردهای زیست‌شناسی مصنوعی شناسایی کرده‌اند. چنین محصولات و فرایندهایی می‌توانند باعث کاهش استفاده از منابع غیر تجدیدپذیر شوند. اما گروه‌های جامعه مدنی نگرانند که شرکت‌های زیست‌شناسی مصنوعی تمرکز خود را از سوخت‌های زیستی به بازارهای کوچکتر ولی سودآورتر مواد شیمیایی تغییر دهند.

گروه ETC این سوال را مطرح کرده است که آیا استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی منجر به تولید محصولات یا فرایندهای صنعتی سبزتر می‌شوند یا خیر؟ این گروه اشاره به استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی و توده‌های زیستی برای تولید محصولاتی کرده‌اند که همان مشکلات نسخه‌های قبلی را دارند، همانند PVC با پایه زیستی (که در فرایند ساخت خود نیازمند کلر است) و بسیاری از پلاستیک‌های زیستی (که برخی از آنها قابلیت تجزیه شدن را نداشته و فقط باید در بازیافت صنعتی تجزیه شوند). حتی در مواردی برخی از

⁴⁰ Bioplastics

⁴¹ Propanediol

روش‌های تولید زیستی پلاستیک می‌تواند منجر به محصولاتی شود که اثر سرطان‌زایی بالاتری داشته و باعث حتی نسبت پلیمرهای مبتنی بر نفت اثرات مخرب تری بر کیفیت آب‌ها اقیانوس داشته باشد.

5- فرصتها و تهدیدهای زیست شناسی مصنوعی

در جدول زیر اثرات بالقوه مثبت و منفی زیست‌شناسی مصنوعی بر حفاظت از منابع طبیعی و استفاده پایدار از تنوع زیستی نشان داده شده است.

حوزه کاربرد	فرصت/تهدید	اثرات مثبت و منفی بالقوه بر حفاظت و استفاده پایدار از تنوع زیستی
کاربردهای زیست‌انرژی	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> کاهش وابستگی جهانی به سوخت‌های فسیلی و کاهش انتشار گازهای مضر استفاده از ابزارهای زیست‌شناسی مصنوعی در طراحی سوخت‌های زیستی نسل‌های آینده که امید است بتوانند بر چالش‌های سوخت‌های زیستی نسل اول¹ حاصل از محصولات غذایی کشاورزی غلبه کنند. استفاده از توده‌های زیستی به عنوان خوراک فرایندهای زیست‌شناسی مصنوعی که می‌تواند موجب کم شدن میزان استفاده از منابع غیرتجدیدپذیر شده و برای محیط زیست اثرات مثبتی داشته باشد.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> کاربردهای زیست‌انرژی زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند باعث استخراج بیش از حد مواد زیستی از زمین‌های کشاورزی شده و بنابراین میزان حاصلخیزی خاکها را کاهش یابد. افزایش تقاضا برای مواد زیستی می‌تواند باعث صدمات زیست‌محیطی در مناطق گرمسیری و نیمه گرمسیری شوند. اگر زیست‌شناسی مصنوعی منابع جدیدی از انرژی نظیر جلبک‌ها را معرفی کند، افزایش تقاضا می‌تواند باعث صدمه به استفاده سنتی از این مواد شود.
کاربردهای زیست‌محیطی	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> میکروارگانیزم‌های ساخته شده توسط روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند به عنوان حسگرهای زیستی عمل کرده و در شناسایی مناطق آلوده به مواد آلوده‌کننده‌های خاص به دانشمندان کمک کنند.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> میکروب‌هایی که در طبیعت رها می‌شوند می‌توانند به دلیل بقا و پایداری و انتقال خواص ژنتیکی به میکروارگانیزم‌های دیگر، اثرات مخربی را در پی داشته باشند.
کاربرد در کنترل جمعیت گونه‌های حیات وحش	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند در شناسایی و درمان بیماری‌های حیات وحش یاری کننده باشند. روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند برای بازیابی و احیای گونه‌های منقرض شده استفاده شوند. سیستم‌های gene drive مبتنی بر RNA می‌توانند مانع از گسترش بیماری‌ها شده و گونه‌های مهاجم آسیب‌رسان را کنترل کنند.

¹ First generation biofuels

		<ul style="list-style-type: none"> • روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند برای جلوگیری از تهدیدات اعمالی به حیات وحش به کار گرفته شوند، به عنوان مثال برای جلوگیری از گسترش بیماری توسط حشراتی نظیر پشه
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> • راه‌حل‌های پیشنهادی زیست‌شناسی مصنوعی ممکن است باعث کاهش منابع مالی و حمایت‌ها از سایر تلاش‌ها در جهت حفاظت از منابع طبیعی شوند. • پیشنهاد راه‌حل‌های زیست‌شناسی مصنوعی به دولت‌ها ممکن است باعث منحرف شدن ذهن آن‌ها از دلایل اصلی کاهش تنوع زیستی شود. • شاید اشتیاق جامعه برای حفاظت از گونه‌های حیات وحش در خطر، کاهش یابد. • شاید تلاش‌های جامعه برای حفاظت و پشتیبانی از مناطق حفاظت شده موجود کاهش یابد. • استفاده از سیستم‌های gene drive برای نابودی گونه‌های خاصی که ناقل بیماری هستند می‌تواند تبعات منفی نیز داشته باشد. به عنوان مثال یکی از پیامدهای نامطلوب آن می‌تواند معرفی بیماری‌های جدید با جایگزینی گونه‌های جدید به جای گونه‌های از بین رفته توسط راه‌حل باشد.
	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> • این امکان وجود دارد که ارگانیزم‌های ناشی از روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی در بخش‌های کشاورزی باعث کاهش توسعه زمین‌های کشاورزی شده و بنابراین باعث حفاظت از زیستگاه‌های طبیعی شود. • کاهش استفاده از آفت‌کش‌ها و کودها قطعاً اثرات مثبتی خواهد داشت. • روش‌های مبتنی بر gene drive می‌تواند باعث کاهش مقاومت آفت‌ها و حشرات در مقابل آفت‌کش‌ها شود.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> • اثرات سمی و سایر اثرات منفی بر ارگانیزم‌های غیرهدف نظیر میکروارگانیزم‌های خاک، حشرات مفید و سایر حیوانات و گیاهان • احتمال وجود اثرات منفی بر حفظ و استفاده پایدار از تنوع زیستی به دلیل انتقال ویژگی‌های ژنتیکی به جمعیت‌های حیات وحش
	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> • مولکول‌های تهیه شده توسط زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند باعث ماندگاری و احیای بیشتر گیاهان و حیواناتی شوند که هم‌اکنون مورد بهره‌برداری شدید قرار گرفته‌اند.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> • محصولات زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند جانشین محصولات و موادی شوند که برای پروژه‌های حفاظت طبیعی ضروری هستند.
	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> • جایگزینی مواد تولیدی زیست‌شناسی مصنوعی با محصولات شیمیایی می‌تواند باعث کاهش استفاده از منابع تجدیدناپذیر و فرایندهای تولید مضر برای محیط زیست خواهد شد. • حرکت به سمت تولید و مصرف پایدار تضمین خواهد شد.

کاربردهای کشاورزی

کاربردها در جایگزینی مواد طبیعی

کاربرد در جایگزینی مواد شیمیایی

	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> • جایگزین‌های احتمالی مربوط به زیست‌شناسی مصنوعی برای محصولات شیمیایی و فرایندهای صنعتی شاید آنگونه که ادعا می‌شود، سبتر نباشند، به عنوان مثال پلاستیک‌های زیستی کنونی. • استفاده صنعتی از زیست‌شناسی مصنوعی ممکن است منجر به افزایش چشمگیر تولید خوراک این صنعت در زمین‌های کشاورزی شود.
اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی زیست‌شناسی مصنوعی	فرصتها	• پیوست یک
	تهدیدها	• پیوست یک
مسائل اخلاقی	فرصتها	• پیوست دوم
	تهدیدها	• پیوست دوم
ملاحظات ایمنی	فرصتها	• پیوست سوم
	تهدیدها	• پیوست سوم
امنیت زیستی biosecurity	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> • جایگزین‌های زیست‌شناسی مصنوعی برای محصولات طبیعی می‌توانند با تغییر الگوی مصرفی محصولات، اثراتی منفی بر اقتصاد و معیشت کشاورزان خرد کشورهای در حال توسعه داشته باشند. • میزان استخراج و استفاده از مواد زیستی برای اقتصاد جهانی می‌تواند از نظر زیست محیطی نامتعارف بوده و متکی به همان منابع مربوط به اقتصاد سنتی شود. • زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند ابزارهایی را فراهم کند که در شناسایی و تشخیص عوامل بیماری‌زا مفید بوده و پاسخی برای تهدیدات امنیت زیستی باشند؛ به عنوان مثال از طریق تسریع تولید واکسن بیماری‌ها
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> • روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند دارای چالش استفاده دوگانه² باشند، به این معنی که موادی که در تحقیقات برای مقاصد مثبت استفاده می‌شوند می‌توانند برای مقاصد منفی نظیر ایجاد بیماری‌های مخرب استفاده شوند.
اقتصاد	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> • پیش‌بینی شده است که زیست‌شناسی مصنوعی نقش قابل توجهی در اقتصاد زیستی ایفا کرده و موجبات رشد اقتصادی کشورها را فراهم کند. • جایگزین‌های زیست‌شناسی مصنوعی برای محصولات طبیعی می‌تواند باعث تغییر محصولات مصرفی کشورهای در حال توسعه شوند؛ صدمات بالقوه موجود نیز از طریق تدابیر و ترتیبات عمومی قابل حل هستند و همچنان می‌توان از نسخه طبیعی محصول در بازار استفاده کرد. در کل منافع نسخه‌های زیست‌شناسی مصنوعی بیشتر از مضرات آن‌ها هستند.

² Dual use

		<ul style="list-style-type: none"> محصولات تولیدی توسط زیست‌شناسی مصنوعی، نظیر آرتمیسینین³، می‌توانند سلامت مردم کشورهای در حال توسعه و در نتیجه اقتصاد این کشورها را بهبود بخشند.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> جایگزین‌های زیست‌شناسی مصنوعی برای محصولات طبیعی می‌توانند با تغییر الگوی مصرفی محصولات، اثراتی منفی بر اقتصاد و معیشت کشاورزان خرد کشورهای در حال توسعه داشته باشند. میزان استخراج و استفاده از مواد زیستی برای اقتصاد جهانی می‌تواند از نظر زیست محیطی نامتعارف بوده و متکی به همان منابع مربوط به اقتصاد سنتی شود.
	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> کمک به مطالعه مکانیزم‌های بیماری‌ها کمک به تشخیص بیماری‌ها کمک به کشف داروهای جدید از طریق توسعه پلتفرم‌های غربالگری دارو کمک به طراحی ارگانیزم‌هایی برای تولید دارو و واکسن کمک به طراحی روش‌های درمانی جدید
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> اگر ارگانیزم‌ها یا ویروس‌های طراحی شده دارای اثرات پیش‌بینی نشده منفی باشند، کاربردهای زیست‌شناسی مصنوعی می‌توانند باعث ایجاد صدمات مستقیم به سلامت بیماران شوند. زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند موجب وارد آمدن صدمات مستقیم به کارکنان آزمایشگاه‌های مرتبط شوند. حقوق ثبت اختراع می‌تواند باعث محدودیت دسترسی به روش‌های درمانی و داروها شود.
	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> بحث‌های اخلاقی حول زیست‌شناسی مصنوعی بیش از اینکه به اثرات مثبت و منفی آن بپردازد به ملاحظات گسترده‌تر تخصیص داده شده است. تحلیل اخلاقی می‌تواند در تعیین وزن اثرات منفی زیست‌شناسی مصنوعی در مقابل اثرات مثبت آن به ما کمک کند؛ همچنین می‌تواند توزیع منصفانه مضرات و منافع مرتبط با زیست‌شناسی مصنوعی و چگونگی دستیابی به آن را در اختیار ما قرار دهد.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> از طرف دیگر، توانایی طراحی بخش قابل توجهی از ارگانیزم‌ها می‌تواند بر رویکرد بشر نسبت به طبیعت تاثیر منفی داشته باشد؛ بحث‌های اخلاقی نباید مبتنی بر این فرض باشد که زیست‌شناسی قادر به انجام چیزهایی بیش از توانش است.

³ artemisinin

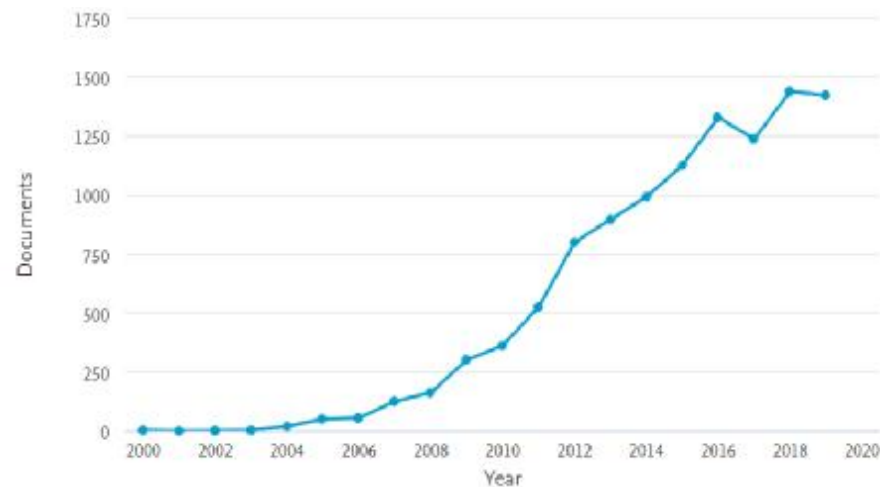
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ اگر تحقیقات زیست‌شناسی مصنوعی مبتنی بر دیدگاه تقلیل‌گرایانه⁴ از جهان باشد، ممکن است وضعیت ویژه موجودات زنده به خوبی در نظر گرفته نشوند.
مالکیت معنوی	فرصتها	<ul style="list-style-type: none"> ▪ مدلی از IP که مبتنی بر نرم‌افزار متن باز باشد می‌تواند منجر به نوآوری، شفافیت و آزادی بیشتر شود. ▪ استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی برای طراحی و سنتز زنجیره‌های DNA می‌تواند از چالش‌های اخلاقی و حقوقی مربوط به اختراع زنجیره‌های DNA طبیعی جلوگیری کند.
	تهدیدها	<ul style="list-style-type: none"> ▪ زیست‌شناسی مصنوعی ممکن است مالکیت خصوصی ماده ژنتیکی را گسترش داده و دسترسی به منافع عمومی را کاهش دهد. ▪ رژیم‌های IP سخت می‌تواند دسترسی به اطلاعات را برای انجام ارزیابی‌های مستقل ریسک، محدود کنند.

⁴ Reductionist view

6- اهمیت فناوری زیست شناسی مصنوعی

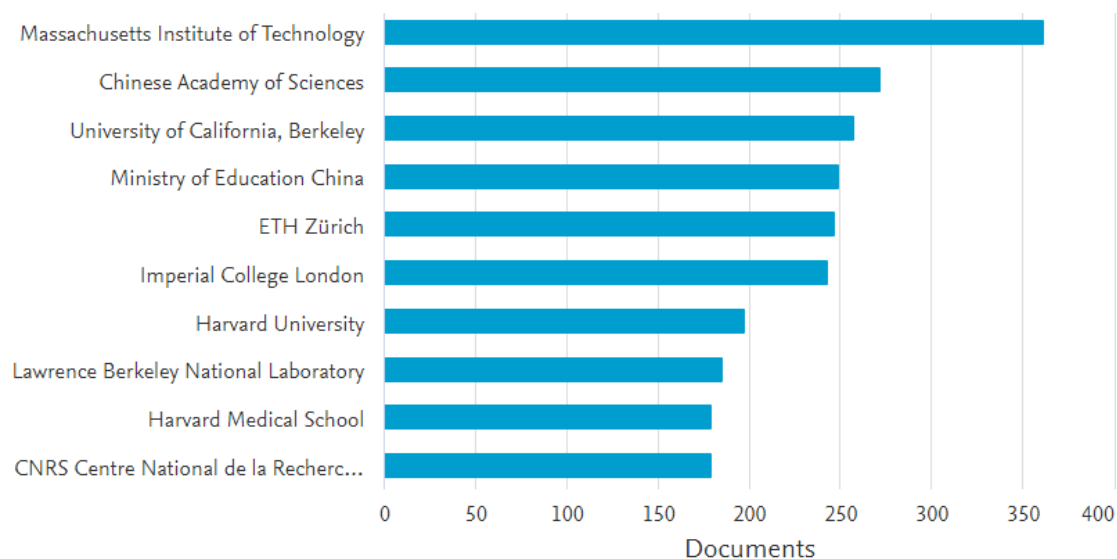
• اهمیت از جنبه تحقیقاتی

اهمیت فناوری زیست شناسی مصنوعی (synthetic biology) و مدارهای ژنتیکی (genetic circuits) زمانی بیشتر آشکار می شود که به بررسی روند تحقیقات این حوزه پرداخته شود. در این راستا، با جستجوی کلید واژه زیست شناسی مصنوعی به نتایج جالب توجهی می توان دست یافت. تعداد مقالات این حوزه از سال 2000 تا 2019 رشد قابل توجهی داشته است که نمودار زیر نشان دهنده این روند است.



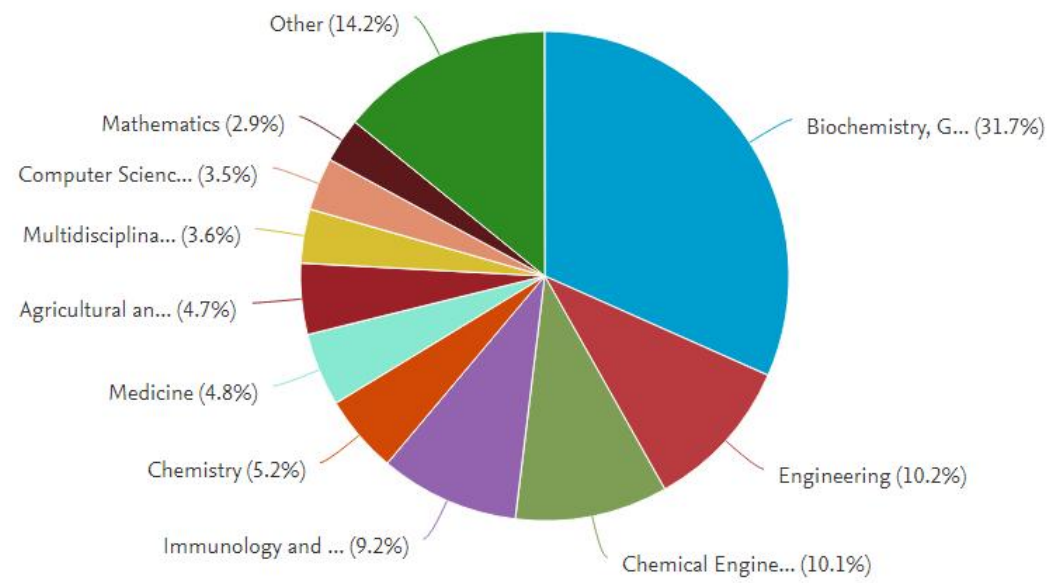
شکل 9) نمودار رشد تعداد مقالات در طول زمان

با بررسی دانشگاه‌ها و موسساتی که در این حوزه فعال هستند (شکل زیر)، می‌توان دید که این حوزه از نظر مهندسان و پیشگامان فناوری در مرکز توجه قرار دارد. دانشگاه‌هایی نظیر MIT، برکلی، ETH، امپریال کالج در صدر این لیست قرار دارند.



شکل 10) سازمانها و دانشگاه‌های فعال در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی

با بررسی موضوع مقالات می‌توان دید که بیوشیمی، مهندسی، مهندسی شیمی، ایمنولوژی، شیمی، داروسازی، کشاورزی، علوم کامپیوتری و ریاضیات موضوعات با بیشترین جذابیت برای زیست‌شناسی مصنوعی محسوب می‌شوند. این مطلب در شکل زیر دیده می‌شود. با جستجوی کلیدواژه “genetic circuits” نیز می‌توان به نتایج مشابهی دست یافت.



7- منابع و مراجع

8- پیوستها

پیوست یک

اثرات مثبت و منفی اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی زیست‌شناسی مصنوعی

زیست‌شناسی مصنوعی از بسیاری از جنبه‌ها یک دوراهی محسوب می‌شود؛ این فناوری راه‌حل‌های نوینی را برای حل برخی از بزرگترین چالش‌های زیست‌محیطی نظیر تغییرات آب و هوایی و کمبود آب آشامیدنی ارائه می‌دهد، ولی در مقابل می‌تواند همزمان برای اکوسیستم‌های طبیعی دارای ریسک بالایی باشد.

فرصتها

کاربردهای متعددی از زیست‌شناسی مصنوعی در حوزه انرژی، حیات وحش و کشاورزی، با هدف پاسخگویی به چالش‌های زیست‌محیطی معرفی شده است. این کاربردها می‌توانند اثرات مثبتی بصورت مستقیم و یا غیرمستقیمی بر تنوع زیستی داشته باشند. در ادامه به برخی از این کاربردها اشاره میشود:

- برخی از محصولات اصلاح ژنتیکی شده دارای مزیت‌های معیشتی و حفاظت منابع طبیعی هستند. پنبه *Bacillus thuringiensis* - که برای تولید نوعی حشره‌کش اصلاح ژنتیکی شده است - می‌تواند آسیب‌های ناشی از آفت را در کشورهای در حال توسعه (مانند هند) کاهش داده و باعث رشد کشاورزی در مزارع کوچک شود.
- محصولات اصلاح ژنتیکی شده که در برابر حشرات و علف‌کش‌ها مقاوم هستند نیز موجب افزایش بهره‌وری کشاورزان در کشورهای در حال توسعه می‌شوند. از این منظر، زیست‌شناسی صنعتی می‌تواند با کاهش استفاده از آفت‌کش‌ها، اثرات مخرب مربوط به بهره‌برداری از زمین توسط انسان را بر تنوع زیستی کاهش دهد.
- زیست‌گاه‌هایی که هم‌اکنون به دلیل نصب زیرساخت‌های تولید انرژی از دسترس حیات وحش خارج شده اند می‌توانند با معرفی روش‌های جدید تولید انرژی، نظیر تولید سوخت توسط جلبک، دوباره احیا شوند. لازم به ذکر است که سوخت‌های زیستی طوری طراحی شده‌اند که نیاز انسان به منابع انرژی غیرتجدیدپذیر مرتفع شده و بنابراین معضل تغییرات آب و هوایی که اثرات منفی بسیاری بر تنوع زیستی دارد، نیز حل شود.
- کاربردهای زیست‌شناسی مصنوعی در زیست‌پالایی⁵ (پالایش محیط زیست) می‌تواند مزیت‌هایی را برای تنوع زیستی داشته باشد. باکتری‌هایی نظیر *Rhodococcus* و *Pseudomonas* ذاتا می‌توانند با مصرف و تجزیه نفت قابلیت تولید موادی که ضرر کمتری برای طبیعت دارند را دارند.
- میکروب‌های مصنوعی می‌توانند برای حذف مواد شیمیایی ماندگار نظیر دیوکسین‌ها، داروها، آفت‌کش‌ها و یا حتی مواد رادیواکتیو مورد استفاده قرار بگیرند. تیمی از مرکز ملی فناوری زیستی اسپانیا در حال ساخت میکروب‌هایی هستند که می‌توانند در شرایط سخت دوام آورده و برای حذف آلاینده‌های موجود در طبیعت مورد استفاده قرار گیرند.

⁵ Bioremediation

- زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند برای ساخت محصولاتی استفاده شود که هم‌اکنون از گیاهان و حیوانات استخراج می‌شوند. زیست‌شناسی مصنوعی روش‌های جدیدی برای تولید داروهایی نظیر آسگرین و مورفین ارائه کرده است که پیش از این از منابع طبیعی استخراج می‌شده‌اند. این رویکرد می‌تواند فشار بر گونه‌هایی که هم‌اکنون به دلیل شکار و برداشت بیش از حد مورد تهدید قرار گرفته‌اند را کاهش دهد.

- توانایی زیست‌شناسی مصنوعی برای بازیابی تنوع ژنتیکی و حتی احیای گونه‌های منقرض شده، در بسیاری از منابع گزارش شده است. استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی برای خلق دوباره گونه‌های منقرض شده، از طریق پروژه‌هایی نظیر “Revive and Restore” باعث جلب توجه عموم شده است؛ پروژه‌ای که در نگاه اول شاید یک خیال‌پردازی تصور ولی موضوع تحقیقات و برنامه‌های علمی معتبر است. با وجود اینکه DNA فقط برای دوره محدودی می‌تواند دوام بیاورد، ولی DNA مربوط به اسب‌های وحشی 700000 سال پیش یافت شده و زنجیره آن‌ها کاملاً مشخص شده است. تحقیقات برای خلق دوباره کبوتر وحشی و ماموت‌ها همچنان در حال انجام است. علی‌رغم اینکه این پروژه‌ها توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند، این نگرانی وجود دارد که چنین پروژه‌هایی باعث انحراف اذهان از پروژه‌های حفظ منابع طبیعی مهم‌تر شوند. خلق دوباره گونه‌های منقرض شده می‌تواند مزیت‌ها و ریسک‌هایی را داشته باشند که همچنان برای بشر مبهم و ناشناخته هستند.

- با حفظ گونه‌های در خطر نظیر اصلاح ژنتیکی زنبورها برای مقاومت بیشتر در مقابل آفت‌کش‌ها یا کنه‌ها، می‌توان بخشی از مزیت‌های زیست‌شناسی مصنوعی را به سرعت محقق کرد.

- زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند برای طراحی راه‌حل‌هایی برای تهدیدات دیگر تنوع زیستی، شامل بیماری‌های واگیردار همانند سندروم بینی سفید خفاش‌ها، مورد استفاده قرار گیرد.

- همچنین می‌توان از زیست‌شناسی مصنوعی برای کنترل حاملان بیماری⁶ استفاده کرد. با استفاده از سیستم‌های gene drive می‌توان ژنوم‌های جمعیت‌های پشه را طوری تغییر داد که خطراک کمتری داشته باشند (به عنوان مثال مقابله با ناقلان بیماری مالاریا). این سیستم‌های gene drive می‌توانند برای کاهش تهدید سایر حشرات ناقل بیماری، کاهش مقاومت در مقابل حشره‌کش‌ها یا حذف گونه‌های مهاجم که تهدیدی جدی برای تنوع زیستی محسوب می‌شوند، مورد استفاده قرار گیرند.

تهدیدها

- در حالیکه برای زیست‌شناسی مصنوعی فرصت‌های بسیاری از نظر حفظ تنوع زیستی وجود دارد، ریسک‌هایی نیز برای این علم وجود دارد که باید مورد توجه قرار گرفته شوند. که در ادامه به برخی از این تهدیدها اشاره می‌گردد:
- فرار یا آزاد شدن گونه‌های جدید زیستی به محیط زیست می‌تواند باعث تغییرات قابل توجه اکوسیستم‌ها شود. میکروب‌هایی که به صورت ژنتیکی و مصنوعی ساخته شده‌اند می‌توانند به دلیل امکان انتقال مواد ژنتیکی به سایر میکروارگانیسم‌ها، خطرآفرین باشند. این ارگانیسم‌ها ممکن است تهاجمی بوده و با تبادل ژنتیکی با سایر موجودات، گونه‌های ترکیبی را به وجود آورند که رقیب گونه‌های موجود در حیات وحش شوند. بنابراین، **انتقال مواد ژنتیکی به جمعیت‌های حیات وحش** یکی از ریسک‌های مهم این علم است.

- ژن‌ها می‌توانند توسط فرایندهای عمودی یا افقی انتقال داده شوند، که این پدیده می‌تواند موجب خسارت به تنوع زیستی و گسترش ویژگیهای مضر آنها شود. حتی بدون انتقال ژنتیکی، این ارگانیسم‌ها می‌توانند اثراتی مضر و مخرب بر سایر ارگانیسم‌ها نظیر میکروب‌های خاک، حشره‌های مفید، گیاهان و حیوانات

⁶ Disease vectors

داشته باشند. این گونه‌ها می‌توانند **مهاجم** بوده و باعث تخریب زیستگاه‌های طبیعی و اختلال در شبکه غذایی شوند.

• بسیاری از کاربردهای زیست‌شناسی مصنوعی که مفید به نظر می‌رسند می‌توانند همزمان اثرات جانبی منفی نیز داشته باشند. به عنوان مثال، سیستم‌های gene drive که برای حذف جمعیت حامل بیماری طراحی شده است می‌تواند پیامدهای ناخواسته‌ای برای تنوع زیستی داشته باشد، به عنوان مثال **معرفی بیماری‌های جدید** با جایگزینی جمعیت حامل بیماری با گونه دیگر

• احیای گونه‌های منقرض شده همسو با اهداف مربوط به حفاظت منابع طبیعی است، ولی در عین حال به دلیل اثر counter-balancing می‌تواند باعث خلق گونه‌های ناخواسته جدید شود.

• به طور مشابه در حالیکه جایگزینی محصولات طبیعی با معادل‌های مصنوعی باعث کاهش فشار بر روی زیستگاه‌های طبیعی می‌شود، اما می‌تواند باعث **اختلال پروژه‌های حفظ منابع طبیعی و بیکارشدن کشاورزان** خرد نیز شود. به عنوان مثال در ایران زعفران معمولاً از گل زعفران (crocus) برداشت می‌شود، ولی در حال حاضر می‌توان با استفاده از مخمر هم این ماده را به دست آورد. هر هکتار از زمین‌های زعفران در ایران باعث اشتغال 270 نفر می‌شود، که جایگزینی آن با نسخه‌های مصنوعی می‌تواند معیشت این گروه را به خطر بیندازد. با گذشت زمان محصولات بیشتری توسط زیست‌شناسی مصنوعی تولید می‌شوند که هر کدام می‌توانند باعث قطع منابع درآمد کشاورزان و به وجود آمدن **مسائل پیچیده و جدی در زمینه عدالت جهانی** گردد.

• دیگر نگرانی مهم مربوط به افزایش وسیع استفاده از توده‌های زیستی است. بسیاری از کاربردهای زیست‌شناسی مصنوعی با ارگانیزم‌هایی سر و کار دارند که توده‌های زیستی را به محصولات با ارزش تبدیل می‌کنند. توده‌های زیستی سلولزی، همانند چوب و علف، نمایانگر منبع تجدیدپذیری از مواد قندی هستند که می‌توانند به عنوان خوراک فرایندهای تخمیر زیست‌شناسی مصنوعی استفاده شوند. چندین

میکروارگانیزم می‌توانند باعث تجزیه توده‌های زیستی سلولزی شوند، ولی با استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی، ارگانیزم‌ها می‌توانند طوری طراحی و مهندسی شوند که بتوانند قندهای موجود در توده‌های زیستی را به محصولات مفید، نظیر سوخت و مواد دارویی تبدیل کنند. با وجود اینکه استفاده از این مواد اولیه می‌تواند مفید واقع شده و باعث کاهش استفاده از منابع غیرتجدیدپذیر شود، افزایش تقاضا برای توده‌های زیستی می‌تواند منجر به افزایش بهره‌برداری از توده‌های زیستی از زمین‌های کشاورزی شود. تولید سوخت نیازمند حجم بالایی از توده‌های زیستی خواهد بود که می‌تواند باعث کاهش حاصلخیزی و ساختار خاک شود. به گفته گروه ETC سازمان جامعه مدنی، اقتصادهای مبتنی بر توده‌های زیستی در آینده نزدیک توسعه یافته و برخلاف اقتصادهای مبتنی بر تنوع زیستی⁷، به طبیعت با دید ارزش تجاری و پتانسیل سودآوری نگاه خواهد کرد. از نظر این گروه، به دلیل وجود این تحولات، تغییراتی اساسی در کاربری زمین رخ خواهد داد، به عنوان مثال افزایش تعداد مزارع در جنگل‌های قدیمی خواهد شد.

این تغییرات کاربری زمین ممکن است اثرات منفی قابل توجهی بر امنیت غذا و معیشت داشته باشد. تولید فزاینده توده‌های زیستی می‌تواند دسترسی به منابع طبیعی محلی را کاهش داده و موجب شود زمین‌های کشاورزی کوچک خودگردان با کشاورزی تجاری گسترده جایگزین شود.

• در نهایت، این نگرانی وجود دارد که زیست‌شناسی مصنوعی باعث دور شدن توجه سیاست‌گذاران، دانشمندان و صنعت از دلایل ریشه‌ای از دست رفتن تنوع زیستی شود.

⁷ Biodiversity-based economies

پیوست دوم

مسائل اخلاقی مرتبط با زیست‌شناسی مصنوعی

علاوه بر اثراتی که زیست‌شناسی مصنوعی بر تنوع زیستی دارد، می‌تواند موجب مطرح شدن مسائل اخلاقی پیچیده‌ای شود. استفاده گسترده از زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند باعث ایجاد شوک در اقتصاد جهانی شده و حرکت به سمت اقتصادهای مبتنی بر فناوری‌های زیستی را سرعت بخشد. این مسئله می‌تواند تاثیر قابل توجهی بر اقتصاد روستایی و کشورهای کم‌درآمد گرمسیری داشته باشد، زیرا این مناطق سرشار از منابع توده‌های زیستی هستند. بسته به سیاستهایی که اتخاذ می‌شوند، زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند باعث سودآوری یا نابرابری تجاری در این مناطق شود.

علاوه بر این، محصولات طبیعی که در این کشورهای کم‌درآمد تولید می‌شوند می‌توانند با محصولات صنعتی تولید شده از ارگانیزم‌های مصنوعی حاصل از زیست‌شناسی مصنوعی جایگزین شوند. سیاست‌های دولتی در کشورهای با درآمد بالا یا پایین می‌تواند اثر قابل توجهی بر اقتصادهای-زیستی و اثرات اجتماعی حاصل از آن داشته باشد.

سوالات متعددی در استفاده از روش‌های زیست‌شناسی مصنوعی مطرح می‌شود، برخی از این سوالات عبارتند از:

- چگونه این روش‌ها کنترل می‌شوند؟
- چه کسی از این روش‌ها سود می‌برد؟

مسائل اخلاقی و اقتصادی متعددی در ارتباط با نقش و جایگاه زیست‌شناسی مصنوعی در تسهیم عادلانه منافع حاصل از کاربرد منابع ژنتیکی، که سومین هدف CBD هستند، به وجود می‌آید. درحالی‌که پروتکل ناگویا⁸ (<https://www.cbd.int/abs/>) چارچوبی را برای تسهیم عادلانه منافع حاصل از استفاده از منابع ژنتیکی فراهم کرده است، اما چندان مشخص نیست که بتوان از این پروتکل برای تمامی حوزه‌های زیست‌شناسی مصنوعی استفاده نمود یا خیر؟ به عنوان مثال به نظر نمی‌رسد که پروتکل ناگویا اطلاعات ژنتیکی دیجیتال را که پایه و اساس زیست‌شناسی مصنوعی است پوشش داده باشد. این مسئله با معرفی پروتکل Parties to the Protocol حل شده است.

همچنان یکی از نگرانی‌های گسترده اخلاقی مرتبط با صنعت زیست‌شناسی مصنوعی این است که زیست‌شناسی مصنوعی چگونه بر درک انسان از طبیعت و ارزشی - که برای آن قائل است - اثرگذار خواهد بود.

⁸ Nagoya protocol

هدف زیست‌شناسی مصنوعی ایجاد ارگانیزم‌های زنده بوده و بنابراین این که چه چیزی طبیعی است و چه چیزی طبیعی نیست به چالش کشیده خواهد شد. لذا ممکن است میزان ارزشی که انسان برای منابع طبیعی موجود قائل می‌شود کاهش یافته و در نتیجه میزان تلاش برای حفاظت از منابع طبیعی نیز کاسته شود. زیرا به عنوان مثال انسان با خیال راحت به قلع و قمع حیوانات می‌پردازد زیرا اطمینان دارد که می‌تواند گونه‌های منقرض شده را دوباره خلق و احیا کرد.

یکی دیگر از نگرانی‌هایی که وجود دارد مربوط به مسائل دینی و فلسفی این موضوع است زیرا ایفای انسان در نقش خالق زندگی توسط دانشمندان یکی از مباحث مهم در نزد فلاسفه و عالمان دین می‌باشد. فعالیت‌های انجام شده در راستای خلق موجودات زنده به شرح ذیل انجام شده است:

- در سال 2010 تیمی از دانشمندان به رهبری Craig Venter ژنوم کاملاً مصنوعی تولید کرده و وارد باکتری خالی از مواد ژنتیکی کردند تا این سلول بتواند رشد کرده و تکثیر یابد.
- در سال 2014 اولین ارگانیزم زنده با استفاده از DNA مصنوعی تولید شد. این دستاورد با مهندسی E. coli و استفاده از آن برای تکثیر یک کد ژنتیکی شامل جفت‌های غیرطبیعی، صورت گرفت.
- اخیراً آزمایشگاه Venter یک باکتری تولید کرده است که دارای کوچکترین ژنوم در بین ارگانیزم‌های زنده بوده و می‌تواند با داشتن فقط 473 ژن زنده مانده و خود را تکثیر کند (برای مقایسه باید گفت که انسان حدود 21000 و کرم میوه حدود 17000 ژن دارد). خلق زندگی با این روش سوالات متعددی را در زمینه معنای حقیقی زندگی و ارتباط ما با جهان طبیعی طرح کرده است.

مرز بین تغییر ژنتیک یک موجود زنده و ایجاد یک موجود کاملاً جدید در حال محو شدن است و برخی از دانشمندان به دنبال یافتن پاسخ‌هایی مناسبی برای برخی موضوعات و سوالات زیر هستند،

• ارائه یک تعریف مجدد از زندگی و حیات

• زندگی چیست؟

• زندگی از کجا شروع می‌شود؟

• زندگی چقدر می‌تواند پیچیده باشد؟

برای پاسخ به این سوال، برخی نسخه اصلاح شده آزمون تورینگ⁹ (برای سنجش اینکه هوش ماشین چقدر می‌تواند نزدیک به هوش انسان باشد) را برای اطلاعات زندگی پیشنهاد کرده‌اند. درحالی‌که دستیابی به این

⁹ Turing test

تعریف می‌تواند مفید باشد، ولی نمی‌تواند نگرانی در مورد محو شدن مرز بین زندگی مصنوعی و طبیعی را از بین ببرد، به ویژه زمانی که یادگیری ماشین شروع به رقابت با انسان‌ها کند.

لازم به ذکر است که فرا تر از مسائل مربوط به ایمنی و توجه جدی به تهدیدهای این صنعت، نیاز به حاکمیت اخلاقی محکمی برای زیست‌شناسی مصنوعی کاملاً حس می‌شود تا بتواند از محیط زیست و جامعه در برابر آثار احتمالی این فناوری حفاظت نماید.

برای کمک به حل این مسئله، در حال حاضر مکانیزم مشاوره علمی¹⁰ (SAM) توصیه‌های علمی مستقل و باکیفیتی را در اختیار گروه اخلاق در علم و فناوری‌های جدید اروپا¹¹ (EGE) قرار می‌دهد؛ این فعالیت بر اساس درخواست رئیس کمیسیون اروپا برای فراهم نمودن مشاوره‌های مستقل در مورد پیامدهای علمی، اخلاقی، حقوقی و سیاسی زیست‌شناسی مصنوعی در سال 2008 میلادی آغاز شده است. بر اساس اصول اخلاقی پذیرفته شده توسط EGE، توسعه مسئولانه زیست‌شناسی مصنوعی باید مبتنی بر اصول اخلاقی باشد.

پیوست سوم

ملاحظات امنیتی مربوط به زیست‌شناسی مصنوعی

¹⁰ Scientific Advice Mechanism

¹¹ European Group on Ethics in Science and New Technologies (EGE)

- با افزایش سرعت تحول و گسترش زیست‌شناسی مصنوعی، همچنان نکات مبهم بسیاری در زمینه توانمندی‌های زیست‌شناسی مصنوعی و ریسک‌هایی که می‌تواند به همراه داشته باشد وجود دارد. رها شدن احتمالی ارگانیسم‌های دستکاری شده ژنتیکی در محیط زیست یکی از نگرانی‌های عمده در خصوص این صنعت است، زیرا ممکن است این ارگانیسم‌ها به شکل غیرمنتظره تکامل یافته و تکثیر شده و در تعامل با محیط زیست اثرات منفی غیرقابل پیش‌بینی برای اکوسیستم‌ها ایجاد نمایند.
- علاوه بر مسئله فوق، احتمال انجام اقدامات خراب کارانه عمدی نظیر ژن‌های مهندسی شده‌ای که به سرعت بین جمعیت پخش شده و می‌توانند باعث بیماری‌های همه‌گیر شوند، وجود دارد. دیگر کاربردهای بالقوه مخرب شامل تولید سلاح‌های بیولوژیک (به عنوان مثال تولید ویروس‌های بیماری‌زا) یا میکروارگانیسم‌های طراحی شده برای تولید سم می‌باشد.



- با وجود اینکه احتمال طراحی و تولید پاتوژن‌های کاملاً جدید برای اقدامات تخریبی بسیار کم است، اما به هر حال باید این گونه تهدیدها را کاملاً جدی گرفت. عموم افراد می‌توانند به زنجیره‌های DNA دسترسی یافته و با استفاده از نرم‌افزارهای رایگان، DNA را طراحی کرده و عملیات سفارش و تحویل آنها را از طریق شرکتها انجام دهند (البته استفاده از این کاربرد نیازمند تخصص بسیار بالایی بوده و شرکت و سازمانها موظف هستند که بررسی کنند تا این سفارشات مربوط به DNA های جدید، بیماری‌زا و مهاجم نباشند).

• انتشار اطلاعات این حوزه و دسترس پذیر بودن نتایج تحقیقات، می تواند پیامدهای امنیتی داشته باشند لذا بحث های بسیاری نیز در این خصوص وجود دارد. با علم به وجود این خطرات، انتشار مطالعات انجام شده قطعاً منافع بسیاری برای اهل علم خواهد داشت و لذا اعمال محدودیت بر انتشار اطلاعات این حوزه، می تواند جزو مقوله سانسور محسوب شوند.

البته برای رفع مشکل فوق یک مکانیزم پیش گیرانه غربالگری برای سفارش زنجیره ها، محصولات و اطلاعات قبل از انجام آنها تعبیه شده است. در واقع، کنسرسیوم بین المللی سنتز ژن¹ (<http://www.genesynthesisconsortium.org>) - کنسرسیومی از شرکت های پیشروی سنتز ژن در سطح جهان - وظیفه غربالگری سفارش های ژن مصنوعی و بررسی سوابق مشتریان سفارش دهنده را انجام می دهد تا از سوء استفاده از این فناوری توسط افراد (سازمانهای) مشکوک و مساله دار جلوگیری شود.

• برای غلبه بر اثرات منفی احتمالی، روش های کنترل متعددی وجود دارند که می توانند بر روی ارگانیزم های مصنوعی استفاده شوند. اول اینکه، ارگانیزم های استفاده شده برای مقاصد تحقیقاتی باید در شرایط ایزوله نگهداری شده و تمهیداتی اندیشیده شود که از تماس با محیط بیرون کاملاً مجزا باشند. همچنین می توان خارج از آزمایشگاه ها و با استفاده از تجهیزات خاصی که مانع از آزاد شدن آنها در محیط زیست می شود، از این ارگانیزم ها استفاده کرد.

• کاربردهایی که مستلزم رهاسازی این ارگانیزم ها در طبیعت است دارای ملاحظات امنیتی متفاوت و سخت تری است. بنابراین، همانند محدودسازی فیزیکی، روش های پیشرفته تری برای محدود کردن ارگانیزم ها در حال بررسی و مطالعه است، نظیر "خصوصیات مهار زیستی یکپارچه"² که به عنوان کنترل -

¹ International Gene Synthesis Consortium

² integrated biocontainment traits

کنترل‌های امنیتی داخلی استفاده می‌شود. مثالی از این مورد سوئیچ‌های معدوم‌سازی^۱ است که تحت شرایط خاص و با استفاده از سیگنال‌های خاص، نظیر ورود مواد شیمیایی، باعث مرگ ارگانیزم می‌شود. کلیدهایی که با حضور ماده شیمیایی IPTG (متداول‌ترین ماده شیمیایی استفاده شده به عنوان ماشه در زیست‌شناسی مولکولی) در میکروب‌های مهندسی شده کاربردی در خاک، آب دریا و حیوانات مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیگر سیگنال‌ها فعال‌سازی این کلید می‌توانند مبتنی بر گرما یا مولکول‌های قند باشند.

- روش کنترلی دیگر، طراحی باکتری به نحوی است که در صورت افزایش جمعیت از حد مشخص دارای مکانیزم‌های خود-تخریب‌گرانه^۲ باشد.
- روش دیگر استفاده از عناصر شامل اسیدهای نوکلئیک است که در طبیعت یافت نمی‌شوند و نمی‌توانند با ارگانیزم‌های طبیعی ترکیب شوند.

علی‌رغم تاثیر مثبت تمامی این روش‌های پیشگیرانه، هیچکدام از این راهکارها نمی‌توانند به صورت کامل ریسک‌های مطرح شده را از بین ببرند، بنابراین این صنعت همچنان نیازمند روش‌های ارزیابی ریسک و ایمنی کارآمد می‌باشد.

¹ Kill switches

² Self-destruct