# فرصت‌ها و چالش‌های زیست‌شناسی مصنوعی در چهارچوب اخلاق، امنیت و ایمنی زیستی

**چکیده**

فناوری‌های مدرنی نظیر زیست‌شناسی مصنوعی قابلیت‌ها و راه‌حل‌های بدیعی برای حل چالش‌های کنونی حوزه‌های مختلف زندگی انسان دارند. زیست‌شناسی مصنوعی به عنوان پیشروترین جنبه فناوری مهندسی ژنتیک کاربردهای وسیعی در علوم و فنون مختلف نظیر کشاورزی، پزشکی، صنعت و محیط زیست دارد. به عنوان مثال، در کشاورزی می‌تواند در خدمت تولید محصولات بیشتر و سالم‌تری قرار گیرد و مسائلی را حل کند که پیش‌ازاین راه حل مطمئنی برای آنها وجود نداشت. زیست‌شناسی مصنوعی در خدمت تولید محصولات جدید نه تنها از طریق ویرایش آنها بلکه از طریق اهلی سازی موجودات جدید است. در حوزه سلامتی و پزشکی، تولید موثر عوامل پزشکی، ساخت مدارهای ژنتیکی جدید برای هدفگیری تومور، رهاسازی قابل کنترل عوامل درمانی و پزشکی شخصی از مهم ترین استفاده‌های زیست‌شناسی مصنوعی است. در کنار این خدمات برجسته، شائبه‌هایی در خصوص استفاده دوگانه از این فناوری و وجود مخاطرات احتمالی در استفاده از این فناوری مطرح است که در سه مقوله ایمنی زیستی، امنیت زیستی و اخلاق در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند.

**واژه‌های کلیدی:**

کشاورزی، اصلاح، سلامت، محیط زیست، استفاده دوگانه.

[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

**مقدمه**

از زمان ظهور زیست‌شناسی مولکولی و به ویژه فناوری زیستی در بیش از نیم قرن پیش تاکنون، این شاخه از علوم و فناوری زیستی با سرعت حیرت‌انگیزی به رشد خود ادامه داده و داده‌های فراوانی را برای تمامی زمینه‌های کاربردی از پزشکی و صنعت گرفته تا کشاورزی و محیط زیست به وجود آورده است. این داده‌ها یا به عبارت درست‌تر، کلان داده‌ها در زمینه توالی‌یابی کل ژنوم موجودات زنده، شناسایی ژن‌ها و سایر عوامل و اجزاء ژنتیکی آنها از جمله پروموترها، اینترون‌ها، ترمیناتورها و سایر عوامل رونویسی، شناسایی کارکرد ژن‌ها در پس‌زمینه‌های ژنتیکی مختلف، شناسایی، توالی‌یابی و مطالعه کارکرد پروتئین‌ها و از جمله، آنزیم‌های مختلف، و همچنین بررسی طیف وسیع عملکرد و فیزیولوژی مجموعه عوامل داخل سلولی، هم در موجودات تک‌سلولی و میکروبیوم‌ها و هم در موجودات پرسلولی و عالی را شامل شده است (Eghtedari Naeini et al, 2014).

از همان بدو شروع تشکیل این مجموعه عظیم اطلاعاتی، ایده‌های مختلفی در خصوص نحوه استفاده از این اطلاعات به وجود آمد و از کنار آن فناوری‌های بسیار پیشرفته‌ای نظیر فناوری DNAی نوترکیب ارائه شد که با شناسایی، جداسازی، تغییر، انتقال و بررسی عملکرد ژن‌ها و با عنوان دقیق‌تر، تراژن‌ها و اجزای ژنتیکی آنها در میزبان‌های جدید، به ایجاد عملکردهای جدید در موجودات زنده انجامید. ماحصل این فناوری پیشرفته یعنی موجودات مهندسی‌شده یا تغییرژنتیک‌یافته اکنون به جزیی جدایی‌ناپذیر از زندگی انسان در تمامی زمینه‌های مرتبط یعنی پزشکی (مثل ژن‌درمانی، تولید واکسن‌های جدید و داروهای نوترکیب)، صنعت (مثل تولید انواع و اقسام پروتئین‌ها و آنزیم‌های صنعتی، و نیز متابولیت‌های مختلف)، کشاورزی (مثل تولید محصولات تغییریافته ژنتیکی مقاوم به آفات، بیماری‌ها و تنش‌های غیرزنده، موجودات با ارزش تغذیه‌ای بهبودیافته و نیز کودهای زیستی جدید)، و محیط زیست (مثل فناوری زیست‌پالایی و احیای منابع ژنتیکی از دست رفته) تبدیل شده‌اند (Yan et al, 2023).

با وجود تمامی این پیشرفت‌های شگرف، باز هم می‌توان گفت که تا اینجا استفاده از این مجموعه عظیم اطلاعات زیستی محدود به کاربردهای ساده‌ای بوده است که شبیه کپی کردن یک فرایند از یک موجود زنده در یک موجود زنده دیگر است. اما به تدریج ایده‌های خلاقانه دیگری به وجود آمدند که شامل ترکیب کردن فرایندهای شناسایی‌شده و ایجاد فرایندهای جدید می‌شود. این فناوری جدید که در واقع زاییده همان فناوری DNAی نوترکیب و بخشی از آن است، زیست‌شناسی مصنوعی نامیده شد.

**زیست‌شناسی مصنوعی**

بنا بر توضیح مقدمه، زیست‌شناسی مصنوعی یک شاخه میان‌رشته‌ای از زیست‌فناوری و مهندسی ژنتیک است که شامل مهندسی یا ترکیب مواد ژنتیکی موجودات مختلف مانند ویروس‌ها، باکتری‌ها، مخمرها، گیاهان یا جانوران برای خلق ویژگی‌های جدید است (Yan et al, 2023). خلق ویژگی‌های جدید به این معناست که آن ویژگی‌ها پیش از آن در طبیعت وجود نداشته و با دخالت و مهندسی انسانی به وجود آمده است. با این توصیف، می‌توان حدس زد که این فناوری، توانایی ایجاد تغییرات مفید در موجودات، تولید داروهای بهبودیافته، و بالاخره فراهم‌سازی مواد قوی‌تر و فرآیندهای صنعتی کارآمدتر را دارد. هم‌چنین استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی برای مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی توسط موجودات مهندسی‌شده نظیر استفاده از دی‌اکسید کربن، تولید سوخت‌های زیستی برای وسایل نقلیه و تبدیل متان به پلاستیک‌های زیست‌تخریب‌پذیر نیز از جمله همین کاربردهاست.

برای نیل به منظورهای فوق، زیست‌شناسی مصنوعی اصول مهندسی را با تکنیک‌های بیوتکنولوژی موجود، مانند شناسایی ژن‌ها و اجزای آنها، توالی‌یابی DNA و ویرایش ژنوم ترکیب می‌کند تا موجودات جدیدی به وجود آورد و یا اینکه فرایندهای



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

درون موجودات زنده، تغییر پیدا کرده و بهبود یابند. پایگاه‌های داده‌های توالی‌های DNA، RNA، پروتئین و متابولیت‌ها جزء اصلی این فرایند هستند و به متخصصین کمک می‌کنند تا عملکردهای زیستی قطعات خاصی از DNA را شناسایی کنند. در ادامه، پیشرفت‌های ایجادشده در ابزارهای محاسباتی مانند هوش مصنوعی به طراحی عملکردهای جدید و اجرای چرخه‌های آزمایشی سریع‌تر و تکراری به جای آزمایش‌های زمان‌بر قبلی کمک می‌کنند. به عنوان مثال، روش‌های یادگیری ماشین برای فهم و پیش‌بینی بهتر تأثیر تغییراتی که روی یک موجود زنده اعمال می‌شود، مورد استفاده قرار می‌گیرد. هنگامی که اطلاعات مربوط به عملکرد DNA کامل شد، نوبت به اعمال تغییرات مورد نظر می‌رسد و در این میان، می‌توان با استفاده از ابزارهای مهندسی ژنتیک و ویرایش ژنوم مانند فناوری کریسپر، مواد ژنتیکی مورد نظر را در یک موجود زنده ویرایش یا ایجاد کرد و بدین ترتیب، می‌توان موجوداتی به وجود آورد که قابلیت‌ها و کاربردهایی دارند که در حال حاضر در طبیعت وجود ندارد. به عنوان مثل، با این ابزار، کرم‌های ابریشم با استفاده از اطلاعات ژنتیکی تارهای عنکبوت به گونه‌ای مهندسی شده‌اند تا ابریشم تولیدشده در آنها از خواص بهتر و تولید بیشتری بهره برده و ضمن افزایش کیفیت و بهبود خواص آنها، کاربردهای جدیدی نیز پیدا کند (Bittencourt et al. 2022).

شاید در نگاه اول و به ویژه برای افراد غیرمتخصص در حوزه مهندسی ژنتیک این تصور به وجود بیاید که این دست پژوهش‌ها و دستاوردها از قبیل همان روش‌های مهندسی ژنتیک است که پیش از این نیز وجود داشته است. این تصور از آنجا به وجود می‌آید که در فناوری DNA نوترکیبی که از دهه ۷۰ قرن پیش به وجود آمده است، پس از جداسازی یک ژن و پیش از انتقال آن به میزبان جدید، تغییرات گاه وسیعی در آن توالی اعمال می‌شود. به عنوان مثال ترجیح کدونی آن توالی تغییر می‌کند، و عناصر ژنتیکی از قبیل توالی‌های شاخص و رهبر، توالی‌های کاهنده یا افزاینده، توالی پیشبر، اینترون و ترمیناتور آن تغییر می‌یابد یا به آن توالی ژنی افزوده می‌شود، و از ژن‌های نشانگر انتخابی (مثل ژن‌های مقاومت به آنتی‌بیوتیک یا علف‌کش یا ژن‌های متابولیکی دیگر) نیز برای ساخت سازه‌های پلاسمیدی انتقالی استفاده می‌شود که این ژن‌های اخیر هرگز در میزبان‌های جدید آنها وجود نداشته‌اند و این در واقع، افزودن یک فرایند جدید به میزبان جدید به شمار می‌رود. بنابراین، در واقع به این سوال مهم باید پاسخ داده شده و تبیین شود که مرز بین مهندسی ژنتیکی که می‌شناسیم (که می‌توان آن را مهندسی ژنتیک سنتی نامید) با زیست‌شناسی مصنوعی کجاست.

پاسخ به این پرسش اما ساده نیست، ولی به طور کلی می‌توان اینطور عنوان کرد که تغییراتی در تراژن از قبیل آنچه که به اختصار در پاراگراف قبل بر شمرده شد، همگی برای حفظ کارکرد سنتی آن ژن در میزبان جدید اعمال می‌شوند و برای چنان هدفی، گاه حتی ضروری هستند. اما تغییراتی در تراژن را باید به زیست‌شناسی مصنوعی منتسب کرد که به تغییر کارکرد تراژن و حتی عناصر ژنتیکی دیگر از قبیل پیشبر و اینترون مرتبط می‌شود. در مثال تغییر خصوصیات تارهای ابریشم، در صورتی که توالی DNA تراژن که از موجودی مثل عنکبوت جداسازی‌شده، به صورت تقریباً کامل (حتی پس از اعمال تغییرات فوق‌الاشاره) به میزبان جدید یعنی کرم ابریشم منتقل شود به صورتی که عین همان تار عنکبوت را در کرم ابریشم تولید کند، در این صورت شاهد فناوری مهندسی ژنتیک سنتی هستیم. اما در این مثال، بخشی از توالی ژنتیکی مربوط به تار عنکبوت از این موجود جداسازی شده و در اصلاح یا تغییر توالی ژن مربوط به تولید ابریشم در کرم ابریشم به کار گرفته شده است، به صورتی که کرم ابریشم باز هم ابریشم خودش را تولید می‌کند ولی با تغییرات اعمال شده در توالی ژن مربوط به آن، بخشی از خواص تار ابریشم آن تغییر یافته و برای منظورهای مورد نظر انسان اصلاح شده یا بهبود یافته است (Bittencourt et al. 2022). این تغییر جدید که مستلزم تغییرات هوشمند یا هدفمند است، در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی قرار می‌گیرد. با این توصیف، تغییراتی از قبیل ترکیب عناصر پروموتری به نحوی که یک پروموتر جدید با خواص تغییریافته یا بهبودیافته ایجاد شود (و هر نوع عناصر و اجزاء ژنتیکی دیگر) تا ترکیب ژن‌های مختلف برای ایجاد یک فرایند و یا حتی موجود جدید را باید به حوزه زیست‌شناسی مصنوعی منتسب کرد.



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

در مجموع پیشرفت‌های فنی مختلفی با توسعه زیست‌شناسی مصنوعی سروکار دارد. ابتدا و با توضیح فوق می‌توان گفت که زیست‌شناسی مصنوعی با ساخت DNA مصنوعی سروکار دارد. از یک طرف پیشرفت‌ها در فناوری‌های ساخت DNA، باعث شده است که طراحی و ساخت توالی‌های DNA بزرگ، آسان‌تر و مقرون به صرفه‌تر شده و از این رو ساخت موجودات مهندسی‌شده جدید، تسهیل شده است. فرایندهای مونتاژ خودکار DNA نیز ساخت سازه‌های DNA مصنوعی را تسریع کرده است و این امر، نمونه‌سازی سریع مدارها و مسیرهای ژنتیکی را ممکن می‌سازد. از طرف دیگر، توسعه سیستم ویرایش ژن مبتنی بر فناوری CRISPR-Cas9 نیز کل حوزه مهندسی ژنتیک و زیست‌شناسی مصنوعی به عنوان بخش پیشروی آن را متحول کرده است. این فناوری امکان اصلاح دقیق و کارآمد ژن‌ها و توالی‌های DNA را در موجودات مختلف فراهم می‌کند. هم‌چنین، توسعه سیستم‌های بدون سلول در زیست‌شناسی مصنوعی به پژوهشگران اجازه می‌دهد تا عملکردهای زیستی خارج از سلول‌های زنده را مهندسی کنند و کنترل و انعطاف‌پذیری بیشتری در طراحی سیستم‌های زیستی اعمال کنند (Feng et al, 2024).

به این ترتیب و با مشخص شدن توانایی‌های عظیم فناوری زیست‌شناسی مصنوعی، می‌توان تصور کرد که حوزه‌های استفاده از آن تا چه اندازه وسیع بوده و بازار آن تا چه اندازه قابل گسترش است. بر اساس تحقیقات بازار، ارزش بازار زیست‌شناسی مصنوعی که در سال ۲۰۲۱ به حدود ۱۰ میلیارد دلار رسید، تا کمتر از یک دهه دیگر به بین ۳۷ تا ۱۰۰ میلیارد دلار افزایش خواهد یافت (Garner, 2021). با تبیین حوزه‌های کاربرد زیست‌شناسی مصنوعی، بهتر می‌توان درباره جزییات ارزش بازار آن در کوتاه‌مدت، میان‌مدت و دراز مدت صحبت کرد، هر چند که مقوله بازار فناوری، آنقدر مهم و آن قدر گسترده هست که باید در یک مقاله جداگانه به آن پرداخت.

تاکنون چندین محصول با استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی ایجاد و تجاری شده‌اند. به عنوان مثال، پیش از این عنوان شد که این فناوری برای مهندسی پروتئین‌هایی استفاده شده که می‌توانند برای تولید پارچه‌های بادوام‌تری استفاده شوند. علاوه بر این، پنیر، گوشت‌های حاصل از کشت سلولی و جایگزین‌های گوشت گیاهی که با استفاده از سلول‌های مهندسی‌شده تولید می‌شوند، به صورت تجاری در برخی بازارها موجود هستند (Xueqin et al. 2021). در پزشکی، سلول‌های ایمنی انسان را برای شناسایی و از بین بردن سلول‌های سرطانی مهندسی کرده‌اند (Irvine et al. 2022). زیست‌شناسی مصنوعی همچنین به طراحی و تولید سریع برخی از واکسن‌های COVID-19 بر اساس توالی ژنوم SARS-CoV-2 کمک کرد (Fathizadeh et al. 2021). اینها فقط بخشی از توانایی‌های زیست‌شناسی مصنوعی است که تاکنون محقق شده است و طبیعتاً اخبار بسیار خوب دیگری در راهند.

**فرصت‌ها و قابلیت‌های زیست‌شناسی مصنوعی**

به طور کلی می‌توان گفت که زیست‌شناسی مصنوعی به صورت بسیار گسترده‌ای با فناوری‌ها و نیازهای کنونی انسان سازگار است و از این رو، کاربردهای کنونی و آینده آن به قدری زیاد است که تنها می‌توان به عناوین مهم‌ترین آنها اشاره کرد. در حالت کلی، توانایی کمک به تشخیص و درمان بیماری‌ها، کمک به بهبود و ارتقای کشاورزی، بهبود فرآیندهای صنعتی و رفع برخی چالش‌های محیط‌زیستی رئوس این عناوین کلی به ترتیب در پزشکی، کشاورزی، صنعت و محیط زیست هستند.

هم‌چنین از حیث عدالت اجتماعی، این فناوری باعث دسترسی عادلانه‌تر به زیست‌فناوری هم می‌شود، زیرا برخی از ابزارهای مورد نیاز برای زیست‌شناسی مصنوعی، کم‌هزینه بوده و تقریباً به شکل گسترده‌ای در دسترس همه کشورها هستند، که این امر می‌تواند دستیابی به اجرای برنامه‌های مفید را عادلانه‌تر کند. از سوی دیگر، قابلیت‌های حفاظت‌کنندگی زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند از حفاظت از گونه‌های در حال انقراض حمایت کند، مثلاً می‌تواند ژن‌های گیاهان در معرض خطر را طوری تغییر دهد که آن گیاهان را در برابر بیماری‌ها مقاوم کند.



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

**الف- حوزه کشاورزی**

بی‌گمان پراستفاده‌ترین جنبه‌ی زیست‌شناسی مصنوعی، استفاده از قابلیت‌های آن در حل چالش‌های حوزه کشاورزی است. کشاورزی خود شامل مباحث گیاهی، دامی و آبزیان، و ریزسازواره‌هاست. در این میان، مباحث گیاهی از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، نه تنها به این دلیل که بیشترین بخش‌ها را شامل می‌شود، بلکه به این دلیل که بخش گیاهی به عنوان مدلی برای سامانه‌های جانوری و در نهایت حتی انسانی عمل می‌کند؛ بدین معنی که تقریباً به طور عمومی، فناوری‌ها ابتدا در سامانه‌های گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در مدت طولانی ارزیابی می‌شوند، و در صورت موفقیت، در سامانه‌های جانوری و انسانی (پزشکی و داروسازی) نیز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. این امر اهمیت فناوری مهندسی ژنتیک در کشاورزی و سامانه‌های گیاهی را نیز نشان می‌دهد. به هر روی، توسعه کشاورزی آینده نیاز به حل بحران امنیت غذایی ناشی از کمبود جهانی غذا و تقاضای زیست‌محیطی برای فناوری سبز و پایدار دارد. توسعه گسترده زیست‌شناسی مصنوعی فرصت‌های جدیدی را برای کشاورزی مدرن به ارمغان آورده است.

با اینکه از زمان ابداع تکنیک‌های مهندسی ژنتیک و تجاری‌سازی محصولات آنها با عنوان محصولات تغییریافته ژنتیکی تاکنون صدها رویداد تراریزشی مختلف برای حل چالش‌های بزرگ کشاورزی از جمله تنش‌های زیستی و غیرزیستی با موفقیت تولید و معرفی شده‌اند، اما زیست‌شناسی مصنوعی این قابلیت را دارد که باز هم با متحول‌کردن این حوزه، چالش‌های بیشتری را مدیریت کند. به عنوان مثال با اینکه از زمان استفاده از ژن‌های پروتئین کریستالی از *باسیلوس تورینجینسیس (اسم علمی لاتین)* مدیریت برخی از آفات نظیر بالپولک‌داران یا پروانه‌ها (Lepidopterea) و سوسک‌ها (Coleopterea) ممکن شده و بسیار موفق هم بوده است، با این وجود، در حال حاضر ژن موثری برای مدیریت برخی از آفات زراعی نظیر راست‌بالان و مکنده‌ها در اختیار نیست. اما به عنوان یک راه حل جدید، با جداسازی ژن سم عنکبوت و استفاده از بخشی از توالی آن در ترکیب با ژن‌های پروتئین کریستالی برای ساخت ژن مقاومت نسبت به آفات مکنده‌ای نظیر شته‌ها و سفیدبالک‌ها (Vilchez, 2020) این منبع به فهرست منابع اضافه شود فرصت جدیدی برای مقابله با این چالش به وجود آمده است.

جنبه مهم دیگر استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی در کشاورزی، تولید گیاهان زراعی جدید از طریق اهلی‌کردن گیاهان وحشی است. اهلی کردن محصولات در گذشته مستلزم تثبیت تنوع طبیعی مورد نظر بوده و بر اساس مشاهدات باستان‌شناسی در مدت زمان بسیار طولانی رخ داده و یا حتی هزاران سال به طول انجامیده است (منبع مناسب؟). در مقابل، این انتخاب توسط انسان بود که در اصلاح نژاد مدرن توانست زمان تثبیت آلل‌های نیمه پاکوتاه در برنج و گندم را به چندین دهه کاهش دهد (منبع مناسی؟). با این حال، این سرعت باز هم نتوانسته چالش‌های متعددی که عرضه مواد غذایی امروزی با آن مواجه است را پاسخگو باشد. با توجه به تقابل بین جمعیت و زمین‌های قابل کشت، تلاش‌های فنی زیادی در اصلاح محصولات جدید انجام شده است. با توسعه فناوری ژنومی، اهلی کردن محصولات و سرعت اصلاح محصولات با دستورزی ژنوم گیاهان بسیار تسریع شده است. کار در اصلاح محصولات را بر اساس فهم از ژنوم گیاه، می‌توان به سه فرآیند تقسیم کرد: خواندن، تفسیر و نوشتن؛ و زیست‌شناسی مصنوعی یکی از فناوری‌های مهم در نوشتن برای اصلاح ژنوم گیاهی است (Huang et al. 2022). فناوری‌های نگارش ژنوم گیاهی شامل ویرایش ژنومی و طراحی ژنومی است. به عنوان مثال یک استراتژی اهلی‌سازی سریع برنج وحشی آلوتتراپلوئید که در چین ایجاد شده، در نهایت یک مجموعه ژنومی با کیفیت بالا تولید کرد که می‌تواند به طور قابل توجهی عملکرد غذا را بهبود ببخشد و سازگاری محصولات را با تغییرات محیطی افزایش دهد و مسیر جدیدی را برای اصلاح محصولات باز کند. در این برنامه یک ژنوتیپ از طریق غربال‌گری برنج پلی‌پلوئید *Oryza alta* به دست آمد. سپس فناوری‌های CRISPR/Cas9، ویرایش پایه و ویرایش چندگانه برای بهبود این ژنوتیپ به کار گرفته شد. در واقع اهلی کردن سریع این برنج وحشی آلوتراپلوئید از طریق ویرایش ژن‌های همولوگ کنترل‌کننده صفات مختلف آن با استفاده از الگوی



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

ژن‌های گیاه برنج معمولی به دست آمده است (Yu et al. 2021). باید توجه داشت که سیستم‌های ویرایش ژنی مبتنی بر فناوری CRISPR/Cas9 نه تنها قادر به تغییر حتی یک نوکلئوتید هستند، بلکه می‌توانند در مقیاس بزرگ میلیون بازی نیز مورد استفاده واقع شوند. این گونه تغییرات به ویژه برای اهلی‌سازی گونه‌های وحشی مورد نیاز و استفاده است (Ronspies et al. 2021).

جنبه مهم دیگری که استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی در کشاورزی را اجتناب‌ناپذیر می‌کند، تغییر سیستم فتوسنتزی در گیاهان است. می‌دانیم که گیاهان دارای سیستم فتوسنتزی C3 یا C4 هستند و یا از مکانیسم‌های بینابین استفاده می‌کنند. نکته مهم این است که نه تنها کارایی گیاهان دارای سیستم فتوسنتزی C4 مثل ذرت در تثبیت کربن هزار برابر گیاهان C3 مثل گندم است بلکه کارایی آنها در استفاده از نور خورشید و تبدیل انرژی آن به انرژی شیمیایی موجود در قندها نیز بسیار بیشتر از گیاهان C3 است. در این میان بیشتر گیاهان زراعی مهم مثل برنج و سیب‌زمینی از سیستم C3 بهره می‌برند. اساس تثبیت کربن در گیاهان C3 بر استفاده از سیستم آنزیمی روبیسکو (ریبولوز ۱و۵-بای‌فسفات کربوکسیلاز) مبتنی است که کارایی محدودی دارد. با این وجود کارایی انواع مختلف روبیسکو در تثبیت کربن نیز تفاوت دارد و به عنوان مثال، کارایی آنزیم روبیسکو در برخی از خویشاوندان وحشی گندم، ۲۰ درصد بیشتر از خود گیاه گندم است (Prins et al. 2016). بنابراین یک پیشنهاد برای افزایش فتوسنتز و افزایش عملکرد محصول این است که ژن‌های روبیسکو در گیاه گندم با این ژن وحشی جایگزین شود. با این وجود، باز هم کارایی این سیستم فتوسنتزی محدود است و شاید وقت آن رسیده است که یک سیستم فتوسنتزی جدید برای این گیاهان مهم طراحی شود که البته کار ساده‌ای نیست (Eghtedari Naieni et al. 2014).

مدت‌هاست که متخصصین در حال کار بر روی تبدیل سیستم فتوسنتزی گیاهان از C3 به C4 هستند. به عنوان مثال متخصصین در مرکز تحقیقات بین‌المللی برنج (IRRI) در حال انجام پژوهش‌هایی برای انتقال سیستم آنزیمی C4 از خویشاوندان وحشی برنج به گیاه برنج هستند. نکته مهم در این میان آن است که سیستم فتوسنتزی C4 در گیاهان عالی مانند ذرت فقط یک سیستم آنزیمی صرف نیست بلکه به ساختار گیاه نیز وابسته است. با این وجود، این نکته که گیاهان یا ریزسازواره‌های هم وجود دارند که از سیستم‌های بینابین استفاده می‌کنند، می‌تواند به عنوان الگویی در این زمینه عمل کند. بنابراین، زیست‌شناسی مصنوعی در این فرایند ورود پیدا کرده تا با طراحی سیستم فتوسنتزی جدید، ژن‌های مناسب را در گیاه گیرنده مورد ویرایش و تغییر قرار دهد (Gonzalez-Esquer et al, 2015; Hay et al, 2017).

صفت مهم دیگری که انتظار می‌رود به دست فناوری زیست‌شناسی مصنوعی تغییر کند، تثبیت نیتروژن است. می‌دانیم که گیاهان در حال حاضر فاقد مکانیسم‌های درونی تثبیت نیتروژن بوده و برای تأمین نیتروژن مورد نیاز خود به عملکرد ریزسازواره‌های خاکزی و منابع نیترات خاک وابسته هستند. اما اکنون وقت آن رسیده که سامانه‌های تثبیت نیتروژن به خود گیاه انتقال پیدا کند. ساده‌ترین گزینه در این راستا جداسازی خوشه‌های ژنی تثبیت نیتروژن از ریزسازواره‌ها و انتقال آنها به ژنوم گیاه (Temme et al. 2012) و یا حتی به ژنوم‌های اندامکی مثل ژنوم پلاستیدی (Eseverri et al. 2020) و یا میتوکندریایی (Xiang et al. 2020) است. انرژی‌بر بودن فرایندهای تثبیت نیتروژن دلیل اصلی استفاده از ژنوم‌های اندامکی است اما ثبات عملکرد این ژن‌های جدید در ژنوم‌های میزبانی هم یکی دیگر از دلایل آن است.

ریزسازواره‌ها نیز موضوع پژوهش‌های کنونی و آینده زیست‌شناسی مصنوعی هستند. این موجودات به عنوان کود زیستی، زیست‌پالایی در خاک و محیط‌های آبی، و بالاخره به عنوان آفت‌کش به ویژه در سال‌های اخیر مورد توجه و استفاده فراوانی بوده‌اند و عجیب نیست اگر بهبود عملکرد این صفات در آنها باعث انجام پژوهش‌هایی وسیع و در واقع، گسترده‌ترین پژوهش‌ها در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی شده باشد. تولید انواع کودهای زیستی مبتنی بر ریزسازواره‌ها با عملکرد بهبودیافته برای تأمین عناصر اصلی مورد نیاز گیاه در خاک یعنی نیتروژن، فسفر و پتاسیم و حتی برخی از عناصر ریزمغذی مهم‌ترین حوزه پژوهش و کاربرد زیست‌شناسی مصنوعی در حوزه ریزسازواره‌هاست. بهبود روابط گیاه (تیره نخود) و



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

ریزوبیوم‌ها و نیز توسعه استفاده از ریزوبیوم‌ها برای همزیستی با سایر گیاهان از دیگر محورهای مهم پژوهشی است. به جز اینها، تولید انواع ریزسازواره‌های مورد استفاده در زیست‌پالایی خاک، آب و دریا، به ویژه برای حذف ریزپلاستیک‌ها، آلودگی‌های نفتی، فلزات سنگین، آلودگی‌های میکروبی و سایر آلودگی‌ها، به نحوی که عملکرد آنها در انجام این مأموریت، بهبود یافته و یا اختصاصی شده باشد، از دیگر موضوعات پژوهشی حوزه زیست‌شناسی مصنوعی بوده و هست (Wang et al. 2022).

ریزسازواره‌ها به عنوان آفت‌کش یا منبع آفت‌کشی استفاده می شوند. به عنوان مثال استفاده از باکتری‌های *باسیلوس تورینژینسیس* به عنوان آفت‌کش زیستی بر علیه انواع حشرات آفت از اوایل قرن بیستم تاکنون رایج بوده است. اما اکنون تولید سویه‌های جدیدی از این باکتری به نحوی که کارکرد آنها بهبود یافته، تخصصی‌تر شده و دامنه کاربرد آنها به گونه‌های بیشتری از حشرات گسترش یابد در دستور کار زیست‌شناسی مصنوعی قرار گرفته است. علاوه بر این، استفاده از باکتری‌ها و مخمرها برای فرآوری و سنتز انواع مختلفی از مواد صنعتی مورد استفاده در آفت‌کش‌ها از دیگر اهداف پژوهشی حوزه زیست‌شناسی مصنوعی است. این فرایند که به نام تولید زیستی معروف است، ضمن اینکه آلایندگی زیست‌محیطی (به معنای متعارف آن) ندارد، هزینه تولید بسیار پایین‌تری نسبت به روش‌های صنعتی دارد و از این رو می‌تواند جایگزین روش‌های تولید صنعتی که آلایندگی محیطی زیادی هم تولید می‌کنند، شود. به عنوان مثال، تولید ماده آمینومتیل فسفونات به عنوان یکی از پیش‌سازهای علف‌کش گلایفوسیت در باکتری *Streptomyces lividans* بسیار موفقت‌آمیز بوده است (Chu et al., 2022). علاوه بر این، یک علف‌کش طبیعی جدید به نام اسید اسپتریک که در مسیر بیوسنتز اسیدهای آمینه‌ی شاخه‌دار، آنزیم دای هیدروکسی اسید دهیتراتاز را هدف قرار داده و آن را مختل می‌کند، در مطالعات کاوش ژنومی هدایت‌شده به سمت ژن‌های خود–مقاومتی پیدا شد. انتقال ژن مقاومت به این علف‌کش (*astD*) به آرابیدوپسیس منجر به ایجاد مقاومت درونی نسبت به این علف‌کش تازه گردید (Yan et al. 2018). تولید این علف‌کش جدید در مقیاس بزرگ را می‌توان در مخمر از طریق فرایندهای تخمیری انجام داد.

همین تکنیک در داروسازی نیز مورد استفاده است؛ به طوری که زیست‌شناسی مصنوعی امکان تولید مولکول‌های کوچک ارزشمندی را فراهم کرده که سنتز آنها با مهندسی شیمی یا برداشت از منابع طبیعی دشوار است. مثلاً آرتمیزینین ترکیبی است که در داروهای ضد مالاریا استفاده می‌شود، اما تولید آن در مقیاس بزرگ دشوار بود تا زمانی که زیست‌شناسی مصنوعی اجازه تولید یک مولکول پیش‌ساز، یعنی اسید آرتمیسینیک را با کمک یک مخمر مصنوعی داد (منبع مرتبط اضافه شود).

به جز گیاهان و ریزسازواره‌ها، زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند در حوزه دام‌ها و آبزیان نیز تحول ایجاد کند و کاربرد این تکنیک در حوزه علوم دامی نیز به همان اندازه علوم گیاهی و ریزسازواره‌هاست و از این رو، نیازی به تکرار همان مفاهیم نیست. به صورت خلاصه، بهبود دام‌ها از طریق کاربرد فناوری ویرایش ژنی، اهلی‌سازی دام‌های جدید و استفاده بهینه از خزانه ژنتیکی آنها در اصلاح دام، سلول‌های بنیادی و کلون‌سازی، تولید واکسن‌ها و داروهای جدید، و ابداع سامانه‌های تشخیصی از جمله این کاربردهاست (Bahrami and Najafi, 2019).

**ب- حوزه پزشکی و سلامت**

در سال‌های ابتدایی قرن بیست و یکم، جهان با چالش‌های مهمی در حوزه‌ی بهداشت و سلامت روبرو شده است که همه‌گیری بیماری کروناویروس و برخی دیگر از بیماری‌های عفونی مانند زیکا و ابولا از جمله مهم‌ترین آنهاست. علاوه بر این، افزایش سریع بیماری‌های غیرواگیر نظیر دیابت، بیماری‌های قلبی و سرطان فشار زیادی را بر منابع و سیستم‌های مراقبت‌های بهداشتی وارد کرده است. متأسفانه، سرعت پیشرفت‌های به دست آمده در زمینه توسعه داروهای جدید، و تشخیص و درمان بیماری‌ها فاصله بسیاری با سرعت ظهور و پیشرفت این بیماری‌ها داشته‌اند و از این رو جهان ما نیازمند



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

اکتشاف و توسعه فناوری‌های جدیدی در حوزه زیست‌پزشکی و بیوتراپی دارد تا بتواند بر چالش‌های موجود فائق آمده و چهارچوبی قابل اتکاء برای روبروشدن با چالش‌های سلامتی در آینده را فراهم کند. به نظر می‌رسد که زیست‌شناسی مصنوعی، همان رشته انقلابی مورد نیاز پزشکی مدرن است که نوید بزرگی در پیشبرد توسعه دارو و درمان بیماری‌ها دارد. تولید واکسن‌های نوترکیب کووید-۱۹ مثال بارزی از کاربرد زیست‌شناسی مصنوعی بود که با استفاده از چهارچوبی امکانپذیر شد که پیش از این در تولید واکسن ابولا مورد استفاده قرار گرفته بود (Feng et al., 2024).

هدف زیست‌شناسی مصنوعی طراحی یا مونتاژ زیست‌بخش‌ها یا اجزای زیستی موجود برای دستیابی به خواص زیستی مفید آنهاست. در طول دهه‌های گذشته، پیشرفت‌هایی در ساخت مدارهای زیستی ظریف، بلوک‌های ساختمانی بیولوژیکی استاندارد و توسعه ابزارها و رویکردهای مهندسی ژنومیک/متابولیک مختلف صورت پذیرفته است. تقاضای بازار در حوزه پزشکی و دارویی به توسعه کاربرد پیشرفت‌های فناوری زیست‌شناسی مصنوعی منجر شده است که از جمله آنها ادغام مسیرهای هترولوگ در سلول‌های طراح برای تولید موثر عوامل پزشکی، افزایش بازده محصولات طبیعی در محیط‌های رشد سلولی به اندازه یا حتی بالاتر از عصاره‌های گیاهان یا قارچ‌ها، ساخت مدارهای ژنتیکی جدید برای هدفگیری تومور، رهاسازی قابل کنترل عوامل درمانی در پاسخ به نشانگرهای زیستی خاص برای مبارزه با بیماری‌هایی مانند دیابت و سرطان بوده است. در کنار این موارد، استراتژی‌های جدیدی برای درمان بیماری‌های پیچیده ایمنی، بیماری‌های عفونی و اختلالات متابولیکی که درمان آن‌ها از طریق روش‌های سنتی سخت است، ایجاد شده‌اند (Yan et al., 2023). تحقیقات در زیست‌شناسی مصنوعی ممکن است به چیزهای جدیدی مانند سلول‌های برنامه‌ریزی‌شده منجر شود که به خودی خود در محل‌های بروز بیماری برای ترمیم آسیب‌ها جمع می‌شوند (منبع مناسب اضافه شود).

یک کاربرد مهم دیگر زیست‌شناسی مصنوعی در حوزه پزشکی به پزشکی فرد محور یا پزشکی شخصی مربوط می‌شود. به مجموعه ای از فعالیت‌ها که در جهت تشخیص و درمان بیماری‌های افراد بر اساس ویژگی‌های شخصی آنها صورت می‌گیرد، پزشکی شخصی گفته می‌شود. منظور از این ویژگی‌های شخصی، ویژگی‌هایی است که در ژنوم افراد موجود است. پزشکی شخصی برای درمان بیماری‌های مزمن در قرن بیست و یکم به اندازه درمان بیماری‌های عفونی در قرن بیستم اهمیت دارد. زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند تکنیک‌های درمانی جدیدی را برای سرطان، بیماری‌های ایمنی و اختلالات متابولیک فعال کند. با توجه به اینکه این بیماری‌ها علت اصلی مرگ و میر هستند، زیست‌شناسی مصنوعی به کار رفته در پزشکی شخصی می‌تواند به اندازه واکسن‌های آبله پیشگام باشد (منابع مناسب اضافه شود).

**مزایای زیست‌شناسی مصنوعی در برابر چالش‌های مورد انتظار**

مانند هر فناوری قدرتمند نوظهور، در فناوری زیست‌شناسی مصنوعی نیز مزایا و چالش‌هایی وجود دارد. کاربردها و مزایای بزرگ این فناوری به اختصار در حوزه‌های مختلف مورد اشاره قرار گرفت. لذا برخی از چالش‌های مهم آن نیز در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرد. بیشتر چالش‌هایی که در این خصوص مطرح می‌شود، به دلیل دانش ناکافی‌ای است که تاکنون به دست آمده و در دسترس دانشمندان و مردم قرار گرفته است و بدیهی است که یک راه غلبه بر چالش‌های پیش رو، تلاش برای دستیابی به زوایای مختلف این دانش و فناوری از یک سو، و ارائه اطلاعات کافی به جامعه برای پیشگیری از هر گونه سیاه‌نمایی و هراس‌افکنی است. بدین ترتیب با سنجش مزایا و معایب زیست‌شناسی مصنوعی، نهادهای نظارتی و دانشمندان می‌توانند مخاطرات احتمالی را کاهش داده و مزایای آن را افزایش دهند.

خوشبختانه، زیست شناسی مصنوعی به طور طبیعی یک عامل محدود کننده دارد: تا زمانی که موجودات کوچکتر نتوانند رشد کنند، موجودات بزرگتر و پیچیده‌تر ایجاد نخواهند شد. این موضوع باعث می‌شود که یک زمینه آزمایشی بر اساس موجودات



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

ریزسازواره‌ای به وجود آید که در آن استراتژی‌های مدیریت مخاطرات احتمالی می‌توانند پیاده‌سازی شوند (Feng et al, 2024).

همانطور که در بالا مورد بحث قرار گرفت، زیست شناسی مصنوعی این قدرت را دارد که افق‌ها و چشم‌اندازهای جدیدی را به سوی بهبود و یا حتی ایجاد موجودات زنده جدید باز کند. با این وجود، این فناوری هم در نگاه اول می‌تواند با پتانسیل استفاده دوگانه مواجه باشد، به این معنی که همانند هر فناوری دیگری هم می‌تواند برای اهداف مفید مورد استفاده واقع شود و هم این امکان وجود دارد که مورد سوء استفاده قرار گیرد. بی‌گمان قسمت اعظم این نگاه توأم با احتیاط، از ترس ما از ناشناخته‌ها منشاء می‌گیرد و بلافاصله می‌توان گفت که راه حل اصلی این مشکل یعنی غلبه بر ترس را باید در شناخت از فناوری و جنبه‌های مختلف آن جستجو کرد. باید توجه داشت که اگرچه مانند هر فناوری نوظهور یا قدیمی دیگری امکان سوء استفاده از زیست‌شناسی مصنوعی را هم نمی‌توان به طور کامل منتفی دانست، اما این احتمال را می‌توان با شناخت کامل از فناوری و احتمالات مرتبط با خطرات مترتب بر آن، و در نهایت از طریق آموزش، اعمال اقدامات اخلاقی و اعمال نظارت مناسب بر استفاده از این فناوری به حداقل رساند. به نظر می‌رسد که مخاطرات احتمالی مربوط به فناوری زیست‌شناسی مصنوعی را از سه منظر می‌توان مورد بحث قرار داد: ایمنی زیستی، امنیت زیستی و اخلاق.

**۱- ایمنی زیستی**

سازمان بهداشت جهانی ایمنی زیستی را به صورت «یک رویکرد استراتژیک و یکپارچه برای تجزیه و تحلیل و مدیریت خطرات احتمالی مربوط به زندگی و سلامت انسان، جانور و گیاه و مخاطرات احتمالی مرتبط با محیط زیست تعریف کرده است. این رویکرد، بر شناخت پیوندهای حیاتی بین بخش‌ها و خطرات بالقوه برای حرکت در داخل و بین بخش‌ها، و پیامدهای آن برای کل سامانه مبتنی است». از آنجایی که هدف نهایی ایمنی زیستی، حذف یا به حداقل رساندن آلاینده‌های زیستی است، طبق این تعریف به طور کلی در خصوص هر فناوری‌ای با سه مفهوم مهم در زمینه ایمنی زیستی مواجه هستیم:

الف- مخاطرات احتمالی زیستی، که به معنی مخاطرات بالقوه در مواجهه‌ی کنترل نشده با عوامل زیستی بوده که ظرفیت عفونی داشته و ممکن است آسیبی به افراد وارد سازند.

ب- محصورسازی یا مهار زیستی، که اقداماتی هستند که برای جلوگیری از نشت بیماری‌های عفونی از مراکز تحقیقاتی به سایر مکان‌هایی که ممکن است در آنجا گسترش یابند، استفاده می‌شوند.

ج- حفاظت زیستی، که مجموعه‌ای از اقدامات است که برای کاهش خطر از دست دادن، سرقت، استفاده نادرست یا انتشار عمدی پاتوژن‌ها و سموم انجام می‌شود، و از جمله آنها، اقداماتی است که بر دسترسی به امکانات، ذخیره‌سازی مواد، محافظت از داده‌ها و نتایج، و سیاست‌های انتشار نتایج حاکم است.

بنابراین، به طور مختصر مسائل ایمنی زیستی شامل «اصول مهار، طراحی تأسیسات، شیوه‌ها و رویه‌ها برای جلوگیری از عفونت‌های شغلی در محیط زیست یا انتشار ارگانیسم‌های بالقوه خطرناک به محیط است»، که این تعریف توسط انجمن ایمنی زیستی ایالات متحده بیان شده است. در کنفرانس سال ۲۰۰۶ کنوانسیون سلاح‌های بیولوژیکی و سمی (BWC)، نماینده آلمان به نمایندگی از اتحادیه اروپا، تعریف زیر را از ایمنی زیستی ارائه کرد: «ایمنی زیستی یک سیستم طبقه‌بندی مخاطرات



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

احتمالی بر اساس توانایی ذاتی میکروارگانیسم‌ها برای ایجاد بیماری است، با شدت بیشتر یا کمتر، در انسان، حیوانات و گیاهان" (Wang & Zhang, 2019).

همین مفاهیم در خصوص ایمنی زیستی در زیست‌شناسی مصنوعی مطرح هستند. در حال حاضر، استدلال می‌شود که کار کافی برای شناسایی یا ارزیابی مخاطرات ایمنی زیستی مرتبط با زیست‌شناسی مصنوعی انجام نشده است و اطلاعات کافی برای این فناوری وجود ندارد. این گفته شاید توسط برخی از افراد کم‌اطلاع به این معنا استفاده شود که تا زمانی که این اطلاعات به وجود بیایند باید از توسعه این فناوری جلوگیری شود. اما باید توجه کرد که اطلاعات به صورت خود به خود به وجود نمی‌آیند، بلکه تلاش دانشمندان در این حوزه است که همزمان با پیشرفت فناروی، جنبه‌های مختلف ایمنی زیستی آن را هم توسعه می‌دهد و اطلاعات علمی لازم را تولید می‌کند.

یک چالش مهم در حال حاضر این است که ارزیابی این مخاطرات احتمالی بر اساس مقایسه (که مبنای روش های ایمنی زیستی کنونی است) به دلیل پیچیدگی زیست‌شناسی مصنوعی دشوار است. رویکردهای اصلاح ژنتیکی سنتی معمولاً شامل دستورزی ژن‌های شناخته شده در ارگانیسم اهداکننده است. بنابراین، در این موارد، پیداکردن یک مقایسه‌کننده مناسب آسان است. در مقابل، طرح‌ها و رویه‌ها در زیست‌شناسی مصنوعی معمولاً پیچیده‌تر هستند و همانطور که توضیح داده شد، معمولاً شامل ساخت یک مسیر جدید متشکل از ژن‌های متعدد یا شامل یک ژن با عملکرد ناشناخته می‌شوند. علاوه بر این، یکی از شاخه‌های مهم زیست‌شناسی مصنوعی، زیست‌شناسی بیگانه، به ساخت حیات با استفاده از جفت بازهای غیرمتعارف یا اسیدهای آمینه نامتعارف می‌پردازد. این اجزا در طبیعت وجود ندارند؛ بنابراین، هیچ مقایسه‌کننده‌ای به طور طبیعی برای این موارد نمی‌توان یافت تا در آزمایش‌های میدانی به عنوان شاهد مورد استفاده قرار داده شوند (Bohua et al, 2023).

در هر حال، Hewett و همکاران (2016) پس از بررسی بیش از ۲۰۰ سند، ۴۴ مخاطره مجزا در زیست‌شناسی مصنوعی را شناسایی و معرفی کردند که می‌توان آنها را به مخاطرات احتمالی مرتبط با سلامت انسان و آلودگی محیطی طبقه‌بندی کرد. مشکلات مربوط به آلرژی‌زایی، مقاومت آنتی بیوتیکی، مواد سرطان‌زای ناشناخته یا احتمالی، و بیماری‌زایی یا سمّیّت از جمله مخاطرات احتمالی مرتبط با سلامت انسان هستند. تغییرات احتمالی ناشناخته در محیط زیست، رقابت با گونه‌های بومی، انتقال افقی ژن، و بیماری‌زایی برای موجودات زنده یا سمّیّت برای محیط زیست نیز به عنوان مخاطرات زیست‌محیطی به شمار آورده می‌شوند. هر یک از این چالش‌ها باید جداگانه و به صورت دقیق و مورد مورد توجه و مطالعه قرار گیرند تا بتوان در خصوص اهمیت و جایگاه و کاربرد آنها تصمیم درست اتخاذ کرد.

یکی از نگرانی‌های مهم مرتبط با ایمنی زیستی در زیست‌شناسی مصنوعی، رهاسازی عمدی یا غیرعمدی موجودات مصنوعی در محیط زیست در طول دوره تحقیق و کاربرد است؛ هر چند که استدلال شده است که به دلیل هموستازی اکوسیستم‌های زیستی و آسیب‌پذیری موجودات مصنوعی در برابر جابجایی، خطر واقعی در این زمینه وجود ندارد. در سال‌های اخیر، اتحادیه اروپا چندین گروه تحقیقاتی را در مورد اثرات زیست‌محیطی رهاسازی عمدی میکروب‌های دستورزی‌شده ژنتیکی برای تقویت رشد گیاه یا اصلاح زیستی، تأمین مالی کرده است. نویسندگان این مطالعات به این نتیجه رسیده‌اند که تأثیرات زیست‌محیطی تقریباً بین ریزسازواره‌های دستورزی‌شده ژنتیکی و ریزسازواره‌های بومی یکسان است (Bohua et al, 2023). مطالعات نشان داده‌اند که میکروب‌های مصنوعی در یک جمعیت می‌توانند به یک مزیت گذرا دست یابند، اما بقای آن‌ها در درازمدت دشوار است، زیرا می‌توانند به سرعت توسط رقبا یا شکارچیان از بین بروند و برای تکثیر آنها نیز محدودیت‌های زیادی توسط محیط زیست تحمیل شده است (Wang et al. 2022). این تصور با این واقعیت سازگار است که بیشتر تلاش‌ها برای مهندسی ژنتیکی میکروب‌ها برای کاربردهای زیست‌محیطی تا به امروز موفقیت کمی داشته‌اند.

یکی دیگر از مسائل مهم مربوط به انتقال موجودات حاصل از زیست‌شناسی مصنوعی از قلمرو تحقیقات محدود آزمایشگاهی به کاربردهای دنیای واقعی، انتقال افقی ژن است که به خودی خود و حتی بدون موجودات مهندسی‌شده هم یک پدیده رایج



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

در طبیعت است. تخمین زده می شود که به دلیل هضم طبیعی ریزسازواره‌ها در خاک، تا ۱ میکروگرم اسید نوکلئیک در هر گرم خاک و ۸۰ میکروگرم از آن در هر لیتر آب دریا وجود داشته باشد. عنوان شده است که این اسید نوکلئیک می‌تواند توسط سایر ریزسازواره‌ها جذب شده و مورد استفاده واقع شود.

سومین موضوع ایمنی زیستی، امکان تشکیل ابرمیکروب‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک است. پلاسمیدهای مورد استفاده برای انتقال یا ساخت DNA یا مونتاژ مسیرهای متابولیکی گاهی حاوی ژن‌های مقاومت به آنتی‌بیوتیک به عنوان نشانگرهای انتخابی هستند. ترس اصلی این است که این ساختارها بتوانند از سلول‌های میزبان فرار کرده و وارد محیط شوند و بتوانند وارد باکتری‌های دیگر شده و در این باکتری‌های جدید که در میانشان میکروب‌هایی وجود دارند که در انسان و دام باعث بیماری می‌شوند، باقی بمانند. در این صورت در طبیعت «ابرمیکروب‌های» مقاوم به آنتی‌بیوتیک تولید می‌شوند. با این وجود، باید دانست که این احتمال بر روی کاغذ پر رنگ است. موجودات زنده در طبیعت اگرچه می‌توانند از محیط بیرون خود DNAها و از جمله پلاسمیدها را جذب کنند، اما برای انجام این انتقال باید شرایط ویژه‌ای وجود داشته باشد. هر دو موجود دهنده و گیرنده باید در کنار هم زنده و فعال باشند (مثلاً در حالت اسپور نباشند) و مهم‌تر از آن، این DNAی جدید باید یک مزیت نسبی به موجود میزبانی خود بدهد تا موجود میزبان را مجبور به نگهداری این DNAی جدید در داخل خود بکند. در طبیعت معمولاً آنتی‌بیوتیک‌های مورد استفاده ما برای درمان بیماری‌های عفونی حضور ندارند و بنابراین، یک سلول باکتری در این شرایط هزینه‌ی انرژی برای بروز، نگهداری و تکثیر یک قطعه DNA که کاربردی برایش ندارد را نمی‌پردازد و به زودی آن را از دست می‌دهد. از این رو، احتمال تجمع مقاومت‌های آنتی‌بیوتیکی مختلف در یک باکتری بسیار ضعیف است. با این وجود، باید توجه کرد که آزمایشگاه‌های فعال در حوزه زیست‌شناسی مصنوعی باید اصول ایمنی زیستی برای دفع باکتری‌های مورد استفاده را رعایت کرده باشند. احتمال انتقال افقی ژن از سلول‌های گیاهی یا جانوری به میکروب‌ها نیز بسیار بسیار اندک است و مطالعات انجام شده در مرکز ایمنی غذایی اتحادیه اروپایی (EFSA) احتمال چنین رویدادی را ناچیز تصیف کرده است (EFSA, 2014).

**۲- امنیت زیستی**

پیش از این اشاره شد که یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در خصوص زیست‌شناسی مصنوعی، امکان استفاده دوگانه از آن است. معنای این جمله آن است که با دستیابی به این فناوری این امکان به وجود می‌آید که دانش حاصله از سوی گروه‌های تروریستی مورد سوء استفاده واقع شود. به عنوان نمونه‌ای از این دست اقدامات می‌توان به مطالعه Cello و همکاران (۲۰۰۲) در ساخت ویروس انسانی فلج اطفال (منبع؟) در آزمایشگاه و یا مطالعه Tumpey و همکاران (۲۰۰۵) در ساخت ویروس آنفلوآنزای اسپانیایی اشاره کرد که نشان می‌دهند که حتی بدون دسترسی به ویروس‌های نوع وحشی و صرفاً با وجود اطلاعات ژنتیکی می‌توان ویروس‌های بیماریزای انسانی را حتی به گونه‌ای بازآفرینی کرد که از حالت قبلی خود، بیماریزاتر بوده و نسبت به واکسن‌های رایج مقاوم باشند. چنین سلاحی در دست گروه‌های تروریستی از هر سلاحی خطرناک‌تر خواهد بود، زیرا بدون جلب توجه و در دوره نهفتگی قابلیت انتشار گسترده‌ای داشته و وسعت خرابی آن قابل تصور نیست. ایجاد سویه‌های ویروسی مقاوم به واکسن قبلاً در ویروس آبله موشی گزارش شده است (Jackson et al., 2001). هر چند که ویروس آبله موشی در انسان بیماریزا نیست، اما امکان تولید سویه مشابه در ویروس آبله انسانی به عنوان یکی از خطرناک‌ترین بیماری‌های عفونی انسان در سال‌های دور، و یا تغییر همین ویروس برای تبدیل به یک بیماری انسانی منتفی نیست.

به جز مباحث مربوط به تولید عوامل بیماریزای انسانی، برخی از حوزه‌های دیگر نیز ممکن است مورد سوء استفاده قرار گیرد. به عنوان مثال در حوزه زیست‌شناسی پزشکی موضوعات مربوط به ژنتیک رفتاری و یا تفاوت‌های نژادی در هوش یا



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

شخصیت هم می‌تواند سوژه استفاده‌های نادرست باشد (Douglas & Savulescu, 2010). طبیعی است که شائبه احتمال استفاده نادرست از علم و فناوری دلیل خوبی برای جلوگیری از پژوهش در علم نیست و دانشمندان معمولاً به اینکه نتیجه کار آنها تا چه اندازه ممکن است مورد سوء استفاده واقع شود، بی‌توجه هستند. به عنوان مثال اگرچه تمامی دانشمندانی که در توسعه فیزیک هسته‌ای نقش داشتند و حتی آنهایی که در تولید سلاح‌های هسته‌ای دخالت مستقیم داشتند، از نتایج سوء استفاده جنایتکارانه از این سلاح‌ها مثلاً در ژاپن بیزاری جسته‌اند ولی همگی همواره از اصل دانش و فناوری در این حوزه به دلیل خدمات بیشماری که به علم و دانش بشری و سلامت، رفاه و امنیت جامعه داشته است، دفاع کرده‌اند. این امر به معنای غفلت از اصول اخلاق علمی نیست؛ بلکه می‌تواند عین رفتار اخلاقی باشد.

کمبود کار اخلاق زیستی در مورد معضل استفاده دوگانه همراه با این چشم انداز که زیست‌شناسی مصنوعی چنین معضلاتی را ایجاد می‌کند، در بدو امر به این نتیجه منتهی می‌شود که باید به اخلاق زیستی تولید دانش بیشتر توجه شود. گفته می‌شود که دانشمندان بیشتر نگران مسائل اخلاقی در مراحل تحقیق علمی هستند و چندان نگران تبعات دستیابی به یک دانش فنی که ممکن است مورد سوء استفاده واقع شود، نیستند. اما در واقع آنچه که به نظر می‌رسد، تلاشی است برای رویارو کردن دانشمندان با پرسش‌هایی درباره اخلاق تولید و انتشار انواع معینی از دانش علمی، نه صرفاً اخلاقیات مربوط به چگونگی تولید دانش علمی. برای مثال، علمای اخلاق می‌توانند به دنبال توسعه اصولی باشند تا تشخیص دهند که تولید یا انتشار یک دانش خطرناک در چه زمانی مجاز نیست. در سال‌های اخیر، اقدامات اولیه‌ای در این راستا انجام شده است و بدیهی به نظر می‌رسد که چنین تلاش‌هایی باید ادامه یافته و تقویت شود (Douglas & Savulescu, 2010).

به هر صورت، در شرایط وجود تهدیدات زیستی باز هم بر ضرورت دستیابی به فناوری تأکید می‌شود. این امر هم از جهت شناخت و تحلیل تهدید و هم از جهت یافتن راهکارهای موثر برای حذف تهدید یا مدیریت تبعات آن ضرورت دارد.

**۳- جنبه‌های اخلاقی**

اخلاق در مکاتب مختلف فکری و مذهبی تعاریف مختلفی دارد و از این رو، تعریف فعل اخلاقی هم کار آسانی نیست. اما با وجود همه این افتراقات، شباهت چشمگیری هم وجود دارد که باعث می‌شود بتوان جنبه‌های مختلفی از یک رویداد را از دیدگاه‌های مختلفی مورد توجه قرار داد. در خصوص زیست‌شناسی مصنوعی چند نگرانی اخلاقی وجود دارد که البته در این فرصت کوتاه و به خاطر گسترگی حیطه این فناوری امکان مرور و بررسی تمامی آن نگرانی‌ها و جنبه‌های اخلاقی وجود ندارد و حتی نمی‌توان در خصوص آنها پاسخ‌گویی کرد؛ شاید تنها بتوان برخی از موارد مهم آنها را عنوان کرد.

مهم‌ترین جنبه‌ای که در زیست‌شناسی مصنوعی مورد نظر بیشتر مکاتب فکری و مذهبی است، امکان استفاده دوگانه از زیست‌شناسی مصنوعی است (Douglas & Savulescu, 2010) که باعث می‌شود «در خدمت و خیانت» آن تردید به وجود آید. بدیهی است که این تردید در خود دانش و فناوری نباید وجود داشته باشد، بلکه نوع استفاده انسان از این فناوری است که آماج این تردید می‌شود. در بیشتر جوامع توسعه‌نیافته یا در حال توسعه واکنش اولیه در این خصوص، مقیدکردن استفاده‌کنندگان از فناوری به قیود و دستورالعمل‌های اخلاقی فنی است، اما اِعمال هر گونه محدودیت بر این فناوری تنها استفاده‌کنندگان و بهره‌برداران قانونی را دچار مشکل می‌کند؛ زیرا در صورتی که فرض کنیم که این فناوری مورد استفاده افراد سودجو قرار گیرد، روشن است که در این موارد، این افراد خود را به هیچ راهنمایی و قید اخلاقی‌ای مقیّد نمی‌بینند و حتی اگر فرض شود که توسعه فناوری با استفاده از ابزار قانونی محدود و متوقف شود، باز هم مانع سوء استفاده افراد بدون مسئولیت نخواهد شد. مثال برجسته این مورد، اعمال محدودیت بر فناوری سلول‌های بنیادی با هدف جلوگیری از سوء استفاده احتمالی از آن (نظیر کلون‌سازی انسان به عنوان یک عمل غیراخلاقی در جوامع مسیحی و جوامع متأثر از آن) بود که تنها باعث شد استفاده‌های درمانی و قانونی این فناوری متوقف شود ولی در همین شرایط و با وجود همه ممنوعیت‌های و قیود قانونی، مانع استفاده برخی از افراد به صورت غیرقانونی در مثلاً کلون‌سازی انسان نشد (Langlois, 2017). بنابراین، در



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

مواجهه با پدیده امکان استفاده دوگانه از هر فناوری‌ای، از جمله زیست‌شناسی مصنوعی، اعمال محدودیت‌های قانونی تنها به استفاده‌های قانونی از آن فناوری محدودیت می‌دهد و تنها دست دانشمندان مقید به اصول اخلاقی را می‌بندد، ولی به هیچ وجه نمی‌تواند مانعی برای استفاده‌های غیراخلاقی از آن شود.

راهکار اصلی در این رابطه، در کنار مشخص‌ساختن محدودیت‌های واقعی (و نه محدودیت‌های سلیقه‌ای و خودساخته) لزوم آگاهی بخشی عمومی درست و بدون از هر گونه حب و بغض نسبت به اصل فناوری یا بزرگ‌نمایی برخی از مشکلات کوچک و یا دادن آدرس غلط است. مثال برجسته در مورد مشکلات آگاهی‌بخشی عمومی، مورد محصولات تغییریافته ژنتیکی است که برخی از افراد ناآگاه با ایجاد جو رسانه‌ای و با سوء استفاده از شعار بحقّی مانند «دانستن حق مردم است» دست به انتشار اطلاعات غلط و گمراه کننده زده‌اند و بدون هر گونه مدرک مستند علمی از طریق رسانه‌های عمومی، اتهامی نبوده است که به این محصولات نزنند؛ سرطان‌زا بودن، عقیم‌سازی، ناسالم‌بودن و ... تنها بخشی از این ادعاها و اتهامات است که همگی آنها تاکنون توسط مراجع علمی مردود شناخته شده‌اند (باید منابع مرتبط و جدید اضافه شود در غیر اینصورت این مطلب حذف شود)، اما ادامه هیاهوی رسانه‌ای و جوسازی افراد ناآگاه یا مغرض هنوز نتوانسته است تشویش اذهان ساختگی آنها را خنثی کند. از این رو، در موضوع زیست‌شناسی مصنوعی پیش از اینکه فرصت به دست افراد بدون اطلاع و ناآگاه بیفتد، باید نسبت به آگاه‌سازی عمومی از منافع بیشمار فناوری در خدمت به نوع بشر، سلامت انسان و دام، محیط زیست و ... اقدام کرد و با بیان امکان برخی استفاده‌های دوگانه و هشیارسازی جامعه نسبت به این سوء استفاده‌ها، راه را برای دانشمندان دارای مسئولیت اخلاقی باز گذارند (Kuhlau et al, 2011). باید یک منبع جدید بعد از ۲۰۲۳ حداقل اضافه شود

دیگر جنبه اخلاقی این فناوری، مسائل مرتبط با ثبت اختراع و حقوق مالکیت معنوی بر فناوری است که ضمن ایجاد برخی مشکلات فرعی در نهایت باعث تشدید بی‌عدالتی اجتماعی و بین‌المللی خواهد شد؛ زیرا این مسائل در نهایت باعث انحصاری شدن فناوری در دست صاحبان و مالکان آن خواهد شد (Bohua et al, 2023). روشن است که در این شرایط برخی از کشورها و جوامع همواره مصرف‌کننده باقی خواهند ماند و فاصله طبقاتی کشورها افزایش خواهد یافت. در ابتدای این مقاله اشاره شد که سادگی دسترسی به فناوری زیست‌شناسی مصنوعی به گونه‌ای است که می‌تواند بخشی از نابرابری و فاصله طبقاتی موجود بین جوامع ثروتمند و فقیر را از بین ببرد، و در نتیجه تحریک به خودتحریمی از طریق انتشار مطالب نادرست و بزرگ‌نمایی نقاط ضعف احتمالی در این زمینه با صرف منابع مالی و تولید محتوای مغرضانه دور از ذهن نیست. لذا موثرترین راه مقابله با این شرایط، کمک به توسعه فناوری و محصولات بومی حاصل از آن است.

یک جنبه بسیار مهم دیگر نگرانی در خصوص ایمنی آزمایشگاه‌های زیست‌شناسی مصنوعی است که ممکن است با گریز برخی از مواد آزمایشگاهی و به ویژه ریزسازواره‌های تحقیقاتی همراه باشد. متأسفانه در برخی از آزمایشگاه‌های زیستی مسائل ایمنی زیستی به خوبی تبیین نشده و آزمایشگاه‌های یادشده فاقد امکانات مربوط به تصفیه‌های مواد زائد هستند که نگرانی فوق را بوجود می‌آورد. به هر ترتیب با توجه به تدوین یک مجموعه‌ی کامل از استانداردها و راهنماهای فنی برای محصورسازی موجودات تغییریافته ژنتیکی، دانشمندان و مسئولین مربوطه وظیفه دارند که با رعایت این روش‌ها از هر گونه رهاسازی غیرعمدی این موجودات جلوگیری کنند. تجربه نشان داده است که رعایت این موازین باعث جلوگیری از گریز این موجودات شده است و از این رو می‌توان اینگونه نتیجه گرفت که اولاً این استانداردها و دستورالعمل‌های فنی کافی هستند و در ثانی، متخصصان وظیفه اخلاقی خود در اجرای مفاد این روش‌ها به خوبی ایفا کرده‌اند و در نتیجه این نگرانی دیگر یک موضوع جدی به شمار نمی‌رود. و کلام آخر در این مورد اینکه مطالعه‌ی جامعی که به مدت دو سال و با حمایت مالی اتحادیه اروپا به اجرا درآمد نشان داد که قوانین کنونی مورد استفاده برای محصولات تغییریافته ژنتیکی و از جمله موارد مربوط به محصورسازی آنها برای محصولات حاصل از زیست‌شناسی مصنوعی نیز قابل استفاده است و در بدترین حالت، نیاز به تغییرات بسیار جزیی دارد (Osseweijer and Landeweerd, 2024).



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

علاوه بر موارد مهم فوق دو نگرانی دیگر هم وجود دارد که احتمالاً بیشترین توجه را از سوی علمای اخلاق زیستی در جوامع غربی به سوی خود جلب می‌کند، اما در جوامع اسلامی و به خصوص با دیدگاه فقهای شیعه آنچنان موضوعات بغرنجی به شمار نمی‌روند. این دو مورد، شامل نگرانی‌ها در مورد «ایفای نقش به جای خداوند»، و نگرانی در مورد «تضعیف تمایز بین موجودات زنده و ماشین‌ها» هستند.

**بحث و نتیجه‌گیری**

به طور خلاصه، زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند در خدمت سلامتی، کشاورزی، محیط زیست و صنایع متعددی قرار گیرد. زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند برای شناسایی و حذف آلاینده‌های محیطی، و ایجاد هوایی امن‌تر و تمیزتر برای تنفس، و آبی گواراتر برای نوشیدن به کار برده شود. علاوه بر اینها، می‌تواند بر سلامتی انسان و دام نظارت کرده، بیماری‌ها را تشخیص داده، و پاسخ مناسبی در زمان مناسب به این شرایط دهد و داروها و واکسن‌های جدیدی تولید کند که مؤثرتر و کارآمدتر باشند. زیست‌شناسی مصنوعی می‌تواند کشاورزی مدرن را باز هم متحول کند به طوری که محصولاتی بیشتر، سالم‌تر و با هزینه کم‌تری تولید و به بازار عرضه شود. هم‌چنین برای ایجاد آنزیم‌هایی برای تقویت سوخت‌های زیستی و همچنین افزایش کارایی در تولید زیستی و فناوری شیمیایی مورد استفاده واقع شود (Bahrami & Najafi, 2019).

با وجود این فواید بافعل و بالقوه، برخی از منتقدان زیست‌شناسی مصنوعی اینگونه القاء کرده‌اند که این حوزه نوظهور، دنیایی از فرانکشتاین‌ها و موجودات غیرطبیعی را ایجاد خواهد کرد. آنها نگران این هستند که انتشار حیات مصنوعی در محیط، چه عمداً در یک کاربرد بالقوه محیطی باشد و چه به صورت تصادفی انجام شود، می‌تواند تأثیر نامطلوبی بر اکوسیستم ما داشته باشد. آنها عنوان می‌کنند که این فناوری‌ها می‌توانند برای بیوتروریسم استفاده شوند که خسارات زیادی به بار می‌آورد، زیرا زیست‌شناسی مصنوعی امکان ساخت ریزسازواره‌هایی را به وجود می‌آورد که اثرات ناتوان‌کننده یا کشنده‌ای روی انسان‌ها دارند. این موارد بسیار شبیه به داستان «پیامدهای ناخواسته» است که توسط منتقدان محصولات تغییریافته ژنتیکی استفاده می‌شود (Garner, 2021). در واقع این منتقدان بدون وجود شواهد واقعی از مخاطرات احتمالی، با القاء ترس در جامعه سعی دارند راهی برای متقاعد کردن عامه مردم برای بی‌اعتمادبودن به این فناوری جدید بیابند.

این منتقدان همچنین عنوان می‌کنندکه مزایای زیست‌شناسی مصنوعی به اندازه کافی قابل توجه نیست که خطرات مرتبط را توجیه کند. آنها مثلاً به یک عدم پیشرفت مقطعی در تولید داروهای ضد مالاریا به عنوان یک نمونه اشاره می‌کنند. توضیح داده شد که یک داروی ضد مالاریا به نام آرتمیزینین در باکتری‌های تغییریافته ژنتیکی سنتز شد. این دارو پیش از این با استفاده از روش‌های سنتی از منابع گیاهی استخراج می‌شد که منجر به قطع درختان و نابودی منابع ژنتیکی طبیعی آنها می‌شد. در ابتدا تصور می‌شد که این پیشرفت منجر به قطع دست‌اندازی به منابع طبیعی برای تهیه دارو خواهد شد و از این رو، هیجان زیادی برای قابلیت‌های زیست‌شناسی مصنوعی به راه افتاد، اما هیاهو از واقعیت فاصله داشت. در سال‌های بعد، این داروی مهندسی‌شده به دلیل این واقعیت که فناوری آن هنوز به حد کافی پیشرفت نکرده بود، وارد بازار نشد. با این حال، مدتی بعد و با پیشرفت در فناوری، تولید گسترده‌ی نسخه نیمه‌مصنوعی آرتمیزینین آغاز شد. این دستاورد می‌تواند به رساندن دارو به ۶۵۰ هزار فرد مبتلا به مالاریا که بیشتر آنها کودکانی هستند که هر ساله بر اثر این بیماری می‌میرند، کمک کند (Zhao et al, 2022).

جای این مطلب (از آنها مثلا ...تا انتها) در متن مقاله است نه نتیجه گیری. لطفا به جای مناسب و مرتبط منتقل و از اینجا حذف شود

در هر صورت، بعید است که این داستان موفقیت‌آمیز، برخی از منتقدان را متقاعد کند. و هر بار یک موضوع دیگر، دستاویز مخالفت و انتقاد قرار می‌گیرد. در فرهنگ غربی و به ویژه از دوره رنسانس اروپا، دانش و مسیحیت با هم برخورد داشته‌اند و مفهوم «ایفای نقش خداوند» توسط انسان هر از گاهی مبنای اعتراض به فناوری قرار می‌گیرد. تقریباً هر دستاورد



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

بیوتکنولوژیک از قبیل ظهور بیهوشی، کنترل موالید، تحقیقات سلول‌های بنیادی و مهندسی ژنتیک، با مخالفت‌ها و اتهاماتی مبنی بر «نقض نظم طبیعی» به دست دانشمندان مواجه شده است. در فرهنگ اسلامی اما این داستان متفاوت است و انسان با داشتن نقش خلیفه‌اللهی یا جانشینی خداوند بر روی زمین، این اختیار و اجازه را دارد که از فناوری‌های مختلف برای بهبود رفاه و کیفیت زندگی انسان استفاده کند.

برخی از منتقدان، این موضوع مهم را که فناوری زیستی تاکنون گام‌های بزرگی را برای تغذیه گرسنگان و شفای بیماران برداشته، نادیده می‌گیرند. بدون این پیشرفت‌های علمی که در ابتدا با عنوان «برخلاف طبیعت» توصیف می‌شد، بشر نمی‌توانست راه‌حلی برای بیماری‌های کشنده یا راه‌حل‌هایی برای برخی از بزرگترین مشکلات ما، مانند یافتن درمانی برای فلج اطفال یا کشف ساختار DNA پیدا کند.

این منتقدان از ماهیت استفاده مسئولانه از فناوری، از ابتدای بروز نبوغ بشری تاکنون غافل هستند. مثلاً زمانی که نوع بشر برای اولین بار کشف کرد که چگونه بر اساس نیاز خود از آتش استفاده کند می‌توانست با این پرسش‌ها مواجه شود که به جای گرم نگه داشتن منزل خود آیا ممکن است این موهبت موجب سوختن منزل خود یا منازل دیگران شود؟ و با همین استدلال می‌شد جلو این پیشرفت را گرفت. اما آتش ماند و مطمئناً استفاده مسئولانه از آن میلیون‌ها بار بیشتر از اثرات مخرب آن مثل آتش‌سوزی در خدمت رفاه نوع بشر بوده است.

به احتمال فراوان هیچ شاخه‌ای از دانش بشری وجود ندارد که شائبه استفاده دوگانه در آن وجود نداشته باشد، اما به نظر می‌رسد که در خصوص زیست‌شناسی مصنوعی حساسیت بیشتری به وجود آمده است. دلیل این موضوع را باید در سادگی دسترسی به این فناوری، عدم وجود اطلاعات کامل و کافی در میان آحاد جامعه، اقدامات فناوری‌هراسان در انتشار اطلاعات نادرست یا بزرگ‌نمایی خطرات احتمالی و نادیده‌انگاشتن معضلات بزرگ جامعه به ویژه در کشورهای جهان سوم جستجو کرد. در نهایت اینکه برای اطمینان از توسعه ایمن و کارآمد زیست‌شناسی مصنوعی، بسیار مهم است که در زمینه خود فناوری‌ها، و نیز آموزش و سیاست‌ها سرمایه‌گذاری شود. فرصت‌های بحث و گفتگوی عمومی بین متخصصین واقعی و نخبگان در مورد این موضوع باید مورد حمایت قرار گیرد و مردم عادی بدون آنکه با اطلاعات غلط درگیر شوند باید در جریان این مسائل قرار داده شوند. اما در این میان این نکته حائز اهمیت فراوانی است که فرصت‌های شگفت‌انگیزی که این فناوری در اختیار انسان قرار می‌دهد، از پیش چشم عامه مردم دور نشود.

**منابع:**


**Bahrami A, Najafi A**. 2019. Synthetic Animal: Trends in Animal Breeding and Genetics. Insights Biol Med. 3: 007-025. DOI: 10.29328/journal.ibm.1001015

**Bittencourt DMC, Oliveira P, Michalczechen-Lacerda VA, Rosinha GMS, Jones JA, Rech EL**. 2022. Bioengineering of spider silks for the production of biomedical materials. Front Bioeng Biotechnol. 10:958486. doi: 10.3389/fbioe.2022.958486.

**Bohua L, Yuexin W, Yakun O, Huan L, Ruipeng L**. 2023. Ethical framework on risk governance of synthetic biology. Journal of Biosafety and Biosecurity, 5(2)45-56.

**Cello J, Paul AV, Wimmer E**. 2002. Chemical synthesis of poliovirus cDNA: generation of infectious virus in the absence of natural template. Science, 297:1016–18.

**Chu L, Luo X, Zhu T, Cao Y, Zhang D & Gao J**. 2022. Harnessing phosphonate antibiotics argolaphos biosynthesis enables a synthetic biology-based green synthesis of glyphosate. Nat Commun.13:1736. doi: 10.1038/s41467-022-29188-6.

**Douglas T & Savulescu J**. 2010. Synthetic biology and the ethics of knowledge. J Med Ethics; 36(11): 687–693. doi: 10.1136/jme.2010.038232




[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

**Eghtedari Naeini A, Etedali F, Mortazavi S-E, Sobhani A, Golabadi M, Ghareyazie B, and Malboobi MA**. 2014. Structure of Phosphoenolpyruvate Carboxylase (PEPC) Gene Promoter from C4 and C3 Flavera species using Sequence Analysis by Bioinformatics Tools, Annual Research & Review in Biology, 4(17): 2779-2794.

**EFSA**. 2014. Scientific Opinion on applications (EFSA-GMO-UK-2008-57 and EFSA-GMO-RX-MON15985) for the placing on the market of insect-resistant genetically modified cotton MON 15985 for food and feed uses, import and processing, and for the renewal of authorisation of existing products produced from cotton MON 15985, both under Regulation (EC) No 1829/2003 from Monsanto. EFSA Journal. 12(7): 3770.

**Eseverri A, L opez-Torrej on G, Jiang X, Bur en S, Rubio LM, Caro E**. 2020. Use of synthetic biology tools to optimize the production of active nitrogenase Fe protein in chloroplasts of tobacco leaf cells. Plant Biotechnol J. 18:1882–1896.

**Fathizadeh H, Afshar S, Masoudi MR, Gholizadeh P, Asgharzadeh M, Ganbarov K, Köse Ş, Yousefi M, Kafil HS**. 2021. SARS-CoV-2 (Covid-19) vaccines structure, mechanisms and effectiveness: A review. Int J Biol Macromol. 188:740-750. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.08.076.

**Feng Y, Su C, Mao G, Sun B, Cai Y, Dai J, Ma Y**. 2024. When synthetic biology meets medicine, Life Medicine, 3(1): lnae010, https://doi.org/10.1093/lifemedi/lnae010.

**Garner KL**. 2021. Principles of synthetic biology. Essays Biochem. 65(5):791-811. doi: 10.1042/EBC20200059.

**Gonzalez-Esquer CR, Shubitowski TB, Kerfeld CA**. 2015. Streamlined construction of the cyanobacterial CO2-fixing organelle via protein domain fusions for use in plant synthetic biology. Plant Cell. 27:2637–2644.

**Hay WT, Bihmidine S, Mutlu N, Hoang KL, Awada T, Weeks DP, Clemente TE & Long SP**. 2017. Enhancing soybean photosynthetic CO2 assimilation using a cyanobacterial membrane protein, ictB. J Plant Physiol.212:58–68. doi: 10.1016/j.jplph.2017.02.003

**Hewett JP, Wolfe AK, Bergmann RA, Stelling SC, & Davis KL**. 2016. Human Health and Environmental Risks Posed by Synthetic Biology R&D for Energy Applications: A Literature Analysis. Applied Biosafety, 21(4): 177-184

**Huang X, Huang S, Han B, Li J**. 2022. The integrated genomics of crop domestication and breeding. Cell, 185: 2828–2839.

**Irvine DJ, Maus MV, Mooney DJ, Wong WW**. 2022. The future of engineered immune cell therapies. Science, 378(6622):853-858. doi: 10.1126/science.abq6990.

**Jackson RJ, Ramsay AJ, Christensen CD, Beaton S, Hall DF, Ramshaw IA**. 2001. Expression of mouse Interleukin-4 by a recombinant ectromelia virus suppresses cytolytic lymphocyte responses and overcomes genetic resistance to mousepox. J Virol. 75:1205–10.

**Kuhlau F, Höglund AT, Evers K, and Eriksson S**. 2011. A precautionary principle for dual use research in the life sciences . Bioethics, 25: 1, pp. 1-8.

**Langlois, A**. 2017. The global governance of human cloning: the case of UNESCO. Palgrave Commun 3, 17019. https://doi.org/10.1057/palcomms.2017.19.

**Osseweijer P, Landeweerd L**. 2024. Ethical and regulatory challenges raised by synthetic biology. Final Report of EU Project, TUDelft, TNW, Department of Biotechnology; Julianalaan 67; 2628BC Delft, the Netherlands, Project website: http://www.synethethics.eu

**Prins A, Orr DJ, Andralojc PJ, Reynolds MP, Carmo-Silva E, Parry MAJ**. 2016. Rubisco catalytic properties of wild and domesticated relatives provide scope for improving wheat photosynthesis. J Exp Bot. 67:1827–1838.

**Ronspies M, Dorn A, Schindele P, Puchta H**. 2021. CRISPR–Cas-mediated chromosome engineering for crop improvement and synthetic biology. Nat Plants. 7.



[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

**Tumpey TM, Basler CF, Aguilar PV, Zeng H, Solórzano A, Swayne DE, Cox NJ, Katz JM, Taubenberger JK, Palese P, Garcia-Sastre A**. 2005. Characterization of the reconstructed 1918 Spanish Influenza pandemic virus. Science, 310:77–80.

**Temme K, Zhao D, Voigt CA**. 2012. Refactoring the nitrogen fixation gene cluster from Klebsiella oxytoca. Proc Natl Acad Sci,109:7085–7090.

**Vílchez S**. 2020. Making 3D-Cry Toxin Mutants: Much More Than a Tool of Understanding Toxins Mechanism of Action. Toxins (Basel). 12(9):600. doi: 10.3390/toxins12090600.

**Wang L, Zang X, Zhou J**. 2022. Synthetic biology: A powerful booster for future agriculture, Advanced Agrochem, 1(1): 7-11, doi.10.1016/j.aac.2022.08.005.

**Wang F and Zhang W**. 2019. Synthetic biology: Recent progress, biosafety and biosecurity concerns, and possible solutions. Journal of Biosafety and Biosecurity 1: 22–30. https://doi.org/10.1016/j.jobb.2018.12.003.

**Xiang N, Guo C, Liu J, Xu H, Dixon R, Yang J & Wang YP**. 2020. Using synthetic biology to overcome barriers to stable expression of nitrogenase in eukaryotic organelles. Proc Natl Acad Sci. 117:16537–16545. doi: 10.1073/pnas.2002307117.

**Xueqin L, Wu Y, Gong M, Deng J, Gu Y, Liu Y, Li J, Du G, Ledesma-Amaro R, Liu L, Chen J**. 2021. Synthetic biology for future food: Research progress and future directions, Future Foods, 3: 100025, DOI: 10.1016/j.fufo.2021.100025.

**Yan X, Liu X, Zhao C, Chen GQ**. 2023. Applications of synthetic biology in medical and pharmaceutical fields. Sig Transduct Target Ther. 8: 199. https://doi.org/10.1038/s41392-023-01440-5.

**Yan Y, Liu Q, Zang X, Yuan S, Bat-Erdene U, Nguyen C, Gan J, Zhou J, Jacobsen SE & Tang Y**. 2018. Resistance-gene-directed discovery of a natural-product herbicide with a new mode of action. Nature, 559:415–418. doi: 10.1038/s41586-018-0319-4.

**Yu H, Lin T, Meng X, Du H, Zhang J, Liu G, Chen M, Jing Y, Kou L, Li X, Gao Q, Liang Y, Xiangdong Liu, Zhilan Fan, Yuntao Liang, Zhukuan Cheng, Mingsheng Chen, Zhixi Tian, Wang Y, Chu C, Zuo J, Wan J, Qian Q, Han B, Zuccolo Z, Wing RO, Gao C, Liang C, Li J**. 2021. A route to de novo domestication of wild allotetraploid rice. Cell, 184:1156–1170. doi: 10.1016/j.cell.2021.01.013.

**Zhao L, Zhu Y, Jia H, Han Y, Zheng X, Wang M, Feng W.** 2022**.** From Plant to Yeast-Advances in Biosynthesis of Artemisinin. Molecules. 27(20):6888. doi: 10.3390/molecules27206888.

[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]

# Opportunities and Challenges of Synthetic Biology on the Pointview of Biosafety, Biosecurity and Ethics

**Abstract**
Modern technologies such as the synthetic biology present some capabilities and new solutions for different problems of human life. The synthetic biology as the most advanced part of the genetic engineering has many applications in the different scientific diciplines including agriculture, medicine, industy, and environment. In agriculture, it could be applied in improvement of new resistant healthier crops with more productivity, and it is capable to solve many more problems lacking a definitive solution. The Synthetic biology serves new improved crops not only via genome editing techniques, but also through domestication of new organisms. In the field of health and medicine, the most important applications of synthetic biology are production of new vaccines and drugs, construction of genetic circuits for tumor targeting, controlled release of the therapeutic agents, and the personalized medicine. Beside these great and outstanding services, there are some possible risks and incertainties about dual use of the technology. These issues will be discussed in this article in the three categories including biosafety, biosecurity and ethics.

**Key Words:**
Agriculture, improvement, health, environment, dual use.

[ Downloaded from journalofbiosafety.ir on 2025-10-07 ]