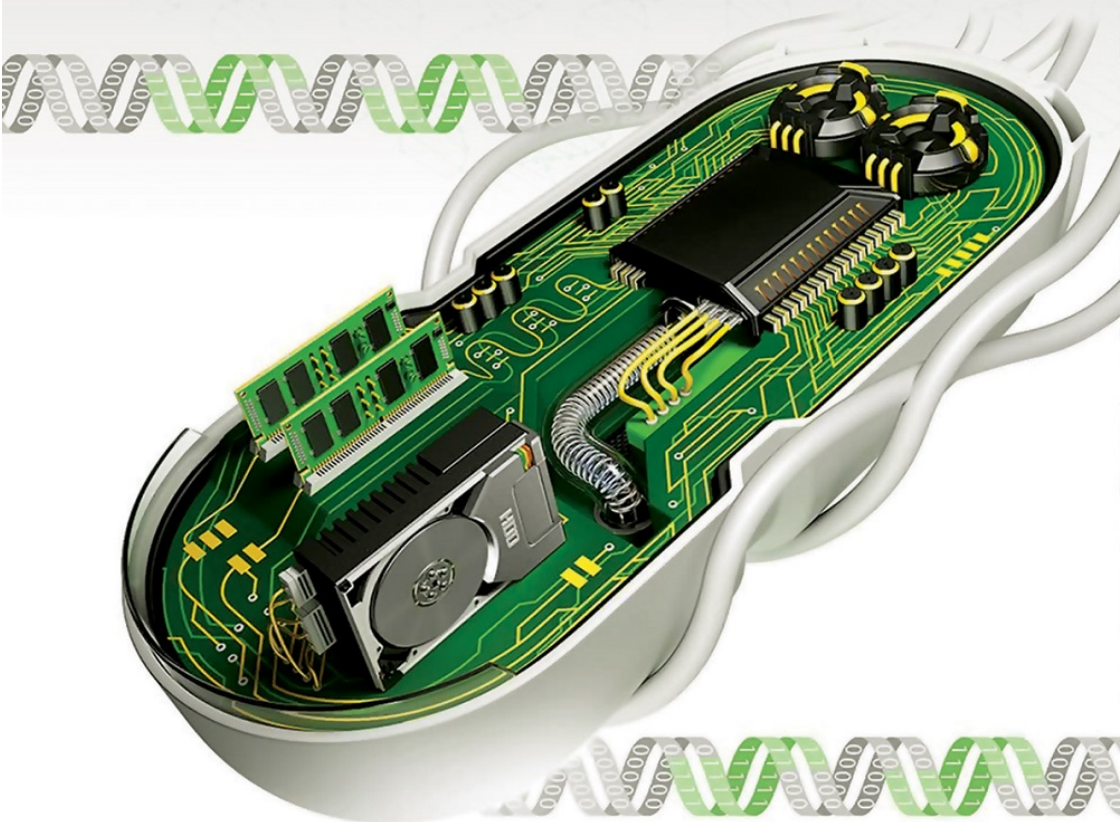


فلسفه، اخلاق و سیاست در  
**بیولوژی سینتتیک**

دکتر ایرج نبی پور







# فلسفه، اخلاق و سیاست در بیولوژی سینتیک

دکتر ایرج نبی پور



بنیاد ملی نخبگان  
بنیاد نخبگان استان بوشهر



ریاست جمهوری  
معاونت علمی و فناوری  
مندوبان حمایت از پژوهشگران  
و فناوریان کشور



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی  
معاونت آموزشی  
کلان منطقه پنج



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
مرکز تحقیقات زیست فناوری دریایی خلیج فارس

## به نام خداوند جان و خرد

سرشناسه	نمی پور، ایرج، ۱۳۴۲ -
عنوان و نام پدیدآور	فلسفه، اخلاق و سیاست در بیولوژی سینتتیک/ ایرج نمی پور؛ با حمایت کرسی پژوهشی پزشکی دریایی، مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری)؛ [برای] دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر، مرکز تحقیقات زیست فناوری دریایی خلیج فارس... [و دیگران].
وضعیت ویراست	اول
مشخصات نشر	بوشهر: دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر، ۱۳۹۷.
مشخصات ظاهری	۱۵۷ص: (مصورنگی)، جدول، نمودار.
شابک	۹۷۸-۶۰۰-۵۰۳۲-۸۶-۴
وضعیت فهرست نویسی	فیبا
یادداشت	یادداشت
موضوع	زیست شناسی مصنوعی
موضوع	Synthetic biology
موضوع	زیست شناسی مصنوعی -- ایران -- سیاست دولت
موضوع	Synthetic biology -- Government policy -- Iran
موضوع	زیست شناسی مصنوعی -- جنبه های اخلاقی
موضوع	Synthetic biology -- Moral and ethical aspects
موضوع	زیست شناسی -- فلسفه
موضوع	Biology -- Philosophy
شناسه افزوده	دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی استان بوشهر، مرکز تحقیقات زیست فناوری دریایی خلیج فارس
شناسه افزوده	ایران. ریاست جمهوری. معاونت علمی و فناوری. کرسی پژوهشی پزشکی دریایی
شناسه افزوده	دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی استان بوشهر
رده بندی کنگره	۱۳۹۷: ۸ف۲ن۱۶۴TA
رده بندی دیویی	۶۲۰/۰۰۴۲۰۱۵۷۴۱۹
شماره کتابشناسی ملی	۵۱۶۶۱۶۴

## فلسفه، اخلاق و سیاست در بیولوژی سینتتیک

تألیف: دکتر ایرج نمی پور

چاپ اول: بهار ۱۳۹۷

حروفچینی: حسین آذری

ویراستار: دکتر کنایون وحدت، دارا جوکار

صفحه آرا و طراح جلد: دارا جوکار

ناشر: انتشارات دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر

چاپ: نزهت

شمارگان: ۲۰۰۰ جلد

این نوشتار با حمایت های کرسی پژوهشی پزشکی دریایی، مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری) تدوین و به زور چاپ آراسته گردید.

تصویر روی جلد اقتباس از: (5) Nature Biotechnology 2013; 31(5)



پیداغی خلیج فارس  
بنیاد تحقیقات استان بوشهر



ریاست جمهوری  
معاونت علمی و فناوری  
صندوق حمایت از پژوهشگران  
و فناوران کشور



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی  
معاونت آموزشی  
کتابخانه ملی



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
مرکز تحقیقات زیست فناوری دریایی خلیج فارس

بوشهر، خیابان معلم، دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر

تقدیم به دانشمند فرهیخته

جناب آقای پروفیسور رضا ملک زاده



## فهرست مطالب

مقدمه .....	۱
فصل اول: سیاست در بیولوژی سینتتیک؛ پیش نویسی برای نقشه راه توسعه بیولوژی سینتتیک در جمهوری اسلامی ایران .....	۷
۱-۱- بیولوژی سینتتیک چیست؟ .....	۹
۱-۲- کاربردهای بیولوژی سینتتیک در پزشکی .....	۱۵
۱-۳- برنامه توسعه بیولوژی سینتتیک .....	۲۰
۱-۴- نقشه راه جهت توسعه بیولوژی سینتتیک در ایران .....	۲۴
۱-۴-۱- راهبرد اول: بنیان گذاری مراکز تعالی پژوهش برای بیولوژی سینتتیک .....	۲۵
۱-۴-۲- راهبرد دوم: رهیافت میان رشته ای .....	۲۸
۱-۴-۳- راهبرد سوم: مأموریت گرایی هوشمندانه بر پایه برنامه آمایش سرزمین و شبکه سازی .....	۳۰
۱-۴-۴- راهبرد چهارم: آموزش نیروی انسانی برای فراهم آوردن توده بحرانی نیروی کار در عرصه بیولوژی سینتتیک .....	۳۳
۱-۴-۵- راهبرد پنجم: مردمی کردن دانش بیولوژی سینتتیک .....	۳۵
۱-۵- چالش های نقشه راه توسعه بیولوژی سینتتیک .....	۳۷
۱-۶- منابع فصل اول .....	۳۹

فصل دوم: فلسفه در بیولوژی سینتتیک..... ۴۳

۱-۲- مقدمه..... ۴۵

۲-۲- خلق دانش در بیولوژی سینتتیک..... ۴۷

۳-۲- شیوه عمل خلق دانش در بیولوژی سینتتیک..... ۵۰

۴-۲- رهیافت‌های طراحی در بیولوژی سینتتیک..... ۵۴

۵-۲- از خلق دانش به ادراک..... ۵۷

۶-۲- بیولوژی در برابر ماشین..... ۶۱

۷-۲- زیست‌کمینه (مینی مال)..... ۶۷

۸-۲- حیات مصنوعی..... ۷۲

۹-۲- منابع فصل دوم..... ۷۹

فصل سوم: اخلاق در بیولوژی سینتتیک..... ۸۳

۱-۳- اخلاق در بیولوژی سنتتیک..... ۸۵

۲-۳- خلق دانش در بیولوژی سینتتیک..... ۸۷

۳-۳- ذخیره‌سازی دانش..... ۹۳

۱-۳-۳- عدالت و شکاف فناورانه..... ۹۹

۴-۳- بهره‌برداری از دانش..... ۱۰۳

۱-۴-۳- ایمنی زیستی..... ۱۰۵

۲-۴-۳- امنیت زیستی..... ۱۱۱

۵-۳- منابع فصل سوم..... ۱۱۶

پیوست: زیرساخت‌های پزشکی سیستمی در نقشه جامع علمی کشور

در گستره سلامت..... ۱۱۹

مقدمه..... ۱۲۱

نقشه علمی آمریکا در گستره سلامت..... ۱۳۰

تحلیل نقشه علمی آمریکا.....	۱۳۳
الف/ زیرساخت‌هایی برای فناوری‌های نوپدید در گستره علوم	
زیست - پزشکی.....	۱۳۴
ب/ متدهای محاسباتی و ریاضیاتی نوین و بهبود زیرساخت فناوری	
اطلاعات.....	۱۴۰
زیرساخت‌های نقشه علمی ایران برای پزشکی آینده (پزشکی سیستمی).....	۱۴۳
الف/ فرصت‌های نقشه علمی کشور در گستره سلامت برای توسعه	
پزشکی سیستمی.....	۱۴۵
ب/ تنگناهای توسعه پزشکی سیستمی در نقشه علمی ایران در	
گستره سلامت.....	۱۴۷
منابع پیوست.....	۱۵۵
نمایه.....	۱۶۱



## مقدمه

در گزارش آکادمی سلطنتی مهندسی، بیولوژی سینتتیک، به صورت رشته‌ای که طراحی و مهندسی اجزاء، ادوات و رسانه‌ها را بر پایه بیولوژی هدف قرار داده است، تعریف شده است. ریشه این دانش در پژوهش‌های زیست فناوری و علوم زیستی نهفته است و در حد فصل مشترک بیولوژی، شیمی و فیزیک بوده و با گستره‌ای از عرصه‌های پژوهش و توسعه فناوری‌ها نیز همپوشانی دارد.

در آینده‌ای نزدیک، دانشمندان می‌توانند ارگانیسم‌ها و سامانه‌های نوینی را به صورت کامل خلق کنند که پیش از این در جهان طبیعت موجود نبوده‌اند. خلق یک میکروارگانیسم مصنوعی توسط گریک و نتر که دارای حداقل ژنوم کمینه سازگار با زیست بود، موجب برانگیختن بحث‌های پیشین فلسفی پیرامون چیستی حیات گردیده است. همچنین پیشرفت‌های اخیر بیولوژی سینتتیک موجب بحث و گفتگوهای نوین فلسفی پیرامون موجودات هیبرید «ارگانیسم‌های سینتتیک» و «ماشین‌های زنده» و تفاوت بنیادین میان ماشین‌های بیولوژیک و جهان

زنده شده است. از این رو، پرسش‌ها و مسائل گوناگونی پیرامون اخلاق و فلسفه بیولوژی سینتتیک برانگیخته شده‌اند که پاسخگویی به آن‌ها، مشارکت میان‌رشته‌ای با حضور نخبگان علم اخلاق، فلسفه، حقوق و آینده پژوهان علوم و فناوری را طلب می‌کند.

هدف اصلی این نوشتار پرداختن به پرسش‌های فلسفی است که با پیشرفت‌های دو دهه اخیر در گستره دانش بیولوژی سینتتیک، مطرح شده‌اند و همچنین این نوشتار به زوایای عام و خاص بیولوژی سینتتیک از دیدگاه مسائل اخلاقی نظر می‌کند که در نتیجه پیشرفت این دانش حاصل آمده و یا پدید خواهند آمد. رهیافت این نوشتار برای ترسیم چهارچوب مسائل اخلاقی گستره بیولوژی سینتتیک بر اساس قالب مدیریت دانش طراحی گردیده است و این مسائل را در چهارچوب حوزه خلق دانش، ذخیره‌سازی دانش، انتشار و به کار گیری دانش بیولوژی سینتتیک، به کنکاش می‌کشد.

بر اساس پیش‌بینی‌های موجود، بیولوژی سینتتیک از جمله دوازده فناوری بنیان‌برافکن و تحول‌برانگیز آینده است که جهان زیست، کسب و کار و اقتصاد جهانی را متحول خواهد ساخت.

از این رو، با در نظر گرفتن زیرساخت‌های بحرانی در علوم زیستی، مراکز تحقیقات زیست پزشکی، زیرساخت‌های فناوری، سامانه ملی نوآوری، نقشه جامع علمی کشور و مراکز تعلیم و تربیت نیروی دکتری در جمهوری اسلامی ایران و تجربیات اخیر برای پیشرفت بیولوژی

سینتتیک در کشورهای گوناگون، پیش‌نویس نقشه راه برای توسعه بیولوژی سینتتیک در ایران، تدوین شده است که در بخش سیاست این نوشتار ارائه خواهد گردید.

از دیدگاه رهیافت، منظر و ابزار، همانندی‌های بسیاری میان بیولوژی سیستمی و بیولوژی سینتتیک وجود دارد و چنین بوده است که در دانشنامه فلسفه استانفورد، به فلسفه بیولوژی سیستمی و بیولوژی سینتتیک، به صورت یکپارچه، نگریسته شده است. بر این اساس، در بخش پیوست کتاب نیز به معرفی پزشکی سیستمی همراه با تنگناهای پیشرفت در پزشکی سیستمی در قالب نقشه علمی کشور در حوزه سلامت پرداخته شده است.

هم‌اکنون، حرکت به سوی دانشگاه‌های نسل سوم، به عنوان یکی از بسته‌های یازده‌گانه تحول و نوآوری از سوی معاونت آموزشی وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی جمهوری اسلامی ایران، با رهبری استاد عزیزم جناب آقای دکتر باقر لاریجانی در دست انجام است و دانشگاه‌های علوم پزشکی، در سراسر کشور، در تکاپوی آن هستند تا گذار پارادایمی خود را به سوی دانشگاه‌های نسل سوم، با محوریت کارآفرینی دانشگاهی، مدیریت نمایند. در این گذار، نگرش به بیولوژی سینتتیک به عنوان یک فناوری بنیان برافکن که نوید دهنده فناوری‌های مرزشکن در گستره علوم پزشکی است، می‌تواند برای دانشگاه‌های نسل آینده بسیار راهبردی باشد. چنین است که نگریستن عالمانه مدیران و سیاست‌گذاران

دانشگاه‌ها که در بسته تحولی دانشگاه نسل سوم فعالیت می‌نمایند به زوایای گوناگون بیولوژی سینتتیک به عنوان یک فناوری پلتفرم، بسیار پسندیده جلوه می‌کند.

خوانش این نوشتار، خواننده‌ای بسیار صبور را می‌طلبد؛ زیرا مفاهیم و مبانی این علم در لا به لای دسته‌واژگان آن بسیار دشوار و طنزانه خود را نشان می‌دهند و ممکن است خواننده گریزپای سوار بر اسب سرکش را خشمگین نماید؛ اما، با لحظه‌ای درنگ و تفکر ژرف در اندرون درون مایه‌ها، رگبار خشن واژگان، به رگه‌های ناب دانستگی، بدل خواهند شد.

نویسنده در نگارش این نوشتار، روزهای متوالی بسیاری را در پناه صخره‌ای در کرانه خلیج فارس، با تازیانه‌های باد سرکش شمالگان، سپری نمود. سرمای تند زمستانه این باد، نرون‌های خفته وی را بیدار نگه می‌داشت تا فرمان اندیشیدن و نوشتن جاری گردد. اما در این گذار، این حقیر از درس آموخته‌های استاد گرامی جناب آقای دکتر عبدالحسن کاظمی، استاد دانشگاه علوم پزشکی تبریز که بر ذهن وی ملودی بیولوژی سینتتیک را نواخت، لحظه‌ای از یاد نبرد.

از جناب آقای دکتر سید علیرضا مرندی، رئیس محترم فرهنگستان علوم پزشکی جمهوری اسلامی ایران، جناب آقای دکتر فریدون عزیزی، جناب آقای دکتر محقق، جناب آقای دکتر مصطفی قانع و دیگر فرهیختگان عضو گروه آینده‌نگاری و رصد کلان سلامت فرهنگستان علوم پزشکی جمهوری اسلامی ایران که مشوق این حقیر در تدوین این نوشتار

بوده‌اند، صمیمانه قدردانی می‌نمایم.

در پایان، این حقیر بر خود لازم می‌داند از بازخوانی صبورانه متن توسط سرکار خانم دکتر کنایون وحدت، از تلاش‌های جناب آقای دارا جوکار در صفحه‌آرایی، طراحی و بازآفرینی تصاویر و ویرایش متن، از جناب آقای حسین آذری و سرکار خانم سوسن کتویی زاده در حروفچینی متن و سرکار خانم صفایی در انتشارات دانشگاه، صمیمانه قدردانی نماید. بازارهای رقابت‌پذیر بسیار هیجان‌انگیزی در سطح ملی و جهانی برای بیولوژی سینتتیک وجود دارند و بی‌شک کشورهای می‌توانند این گوی را برابند که شاهراه‌هایی را برای مسیر توسعه این دانش گشایش نموده باشند. ما برای تدوین نقشه راه بیولوژی سینتتیک در سطح ملی، نیاز به مشارکت ذی‌نفع‌ها از بخش‌های گوناگون خواهیم بود. بدین‌سان، بسیار ضروری است که چهارچوب‌ها را همچون نقشه علمی کشور و نیز سیاست‌گذاری در سطح کلان از سوی رهبران جامعه در سطح بالا، تدوین گردند. با امیدی بی‌پایان برای ایرانی سرافراز و پیشتاز در عرصه‌های فناوری‌های همگرا در گستره‌های بیولوژیک.

دکتر ایرج نبی پور

عضو پیوسته فرهنگستان علوم پزشکی جمهوری اسلامی ایران

گروه آینده‌نگاری، نظریه پردازی و رصد کلان سلامت



## فصل اول

### سیاست در بیولوژی سینتتیک

پیش نویسی برای نقشه راه توسعه بیولوژی سینتتیک

در جمهوری اسلامی ایران



## ۱-۱- بیولوژی سینتتیک چیست؟

بیولوژی سینتتیک یک گسترهٔ دانشی نوپدید است که با خود انبوهی از امکانات و کاربردهای بالقوه را حمل می‌نماید و از آنجا که رشته‌های گوناگون را از مهندسی تا علوم پایه با یکدیگر درهم می‌آمیزد، بیشتر چنین می‌نماید که سیمای یک علم میان رشته‌ای را داشته باشد. در گزارش آکادمی سلطنتی مهندسی، بیولوژی سینتتیک را به صورت رشته‌ای که طراحی و مهندسی اجزاء<sup>۱</sup>، ادوات<sup>۲</sup> و سامانه‌ها<sup>۳</sup> بر پایهٔ بیولوژی را هدف قرار داده است، تعریف شده است (۱). بر پایهٔ این تعریف، می‌توان بیولوژی سینتتیک را به صورت کاربرد اصول مهندسی در سطح اجزاء اساسی و پایهٔ «بیولوژی»، چکیده نمود.

از این دیدگاه، بیولوژی سینتتیک در واقع مهندسی بیولوژی است که چشم‌اندازهای مهندسی را در تمام سطوح سلسله مراتب ساختارهای بیولوژیک، از سطح ملکول‌های واحد تا کل سلول‌ها، بافت‌ها و ارگانیسم‌ها به کار می‌برد. از دیدگاه جوهری، بیولوژی سینتتیک می‌تواند طرح «سامانه‌های بیولوژیک» را به شیوه‌ای منطقی و سیستمی جلوه دهد (۲).

---

<sup>1</sup> Parts

<sup>2</sup> Devices

<sup>3</sup> Systems

وجود واژگانی همچون «طراحی»، «مهندسی» و «ادوات» در تعریف بیولوژی سینتتیک، آن را از بیولوژی سیستمی جدا می‌سازد (۳). آنچه که در پس‌زمینه بیولوژی سینتتیک هویدا است، وجود ماهیت «طراحی منطقی» آن است. بیولوژی همیشه یک علم بسیار توصیفی بوده است که به مفاهیم «استانداردسازی» که جزء لازم در مسیر ساخت و ساز و تولید است، بی‌اعتنا بوده است (۴). در هر دو شاخه علم بیولوژی سیستمی و بیولوژی سینتتیک، از علوم ریاضی، محاسباتی و راهبردهای مدل‌سازی سینتتیک جهت چیرگی بر مسائل پیچیده علوم زیستی استفاده می‌شود. از این رو، این دو شاخه علم را خواهر می‌نامند؛ به گونه‌ای که بیولوژی سیستمی در پی «درک» و بیولوژی سینتتیک در جستجوی «طراحی» سامانه‌های زیستی است. هر دوی این علوم می‌توانند با کاربرد در رهیافت‌های محاسباتی، پیوستگی میان حیات و سامانه‌های مصنوعی را ترسیم نمایند (۵).

از دیدگاه فلسفی، پیوند این علوم را شاید بتوان در فرازی از گفتار فاینمن مشاهده نمود که در سال ۱۹۸۸ چنین عنوان کرد: «هر آنچه را که من نمی‌توانم خلق کنم، پس نمی‌توانم درک نمایم». این فراز نمایانگر پیوستگی میان درک «بیولوژی سیستمی» و طراحی «بیولوژی سینتتیک» می‌باشد. در حقیقت، این بیولوژی سیستمی است که پایه‌های تئوریک «طراحی» را بنیان می‌گذارد (۵)؛ هر چند که در بسیاری از درس‌نامه‌های آکادمیک پیرامون بیولوژی سینتتیک، پافشاری بر کاربرد اصول مهندسی جهت معرفی شیوه‌های نوین تولید است اما تعریف دیگر بیولوژی سینتتیک

حاوی این ایده است که بیولوژی سینتتیک را می توان برای پیشرفت تئوری بیولوژیک پایه به کار برد؛ یا به زبانی دیگر: "بیولوژی سینتتیک طراحی و ساخت سامانه های بیولوژیک است که اصول مهندسی را با هدف درک بیولوژی توسط تولید فناوری های بیولوژیک سودمند، به کار می برد." در این منظر، در حالی که زیست فناوری به کاربرد مدارهای بیولوژیک کنترل شده در طراحی و تولید محصولات جدید تمرکز دارد، بیولوژی سینتتیک، فرصت های نوینی را در جهت معکوس ارائه می دهد (کاربرد مدارهای بیولوژیک مصنوعی جهت درک مسائل بیولوژیک بنیادی) (۴).

امروز به بیولوژی سینتتیک به صورت پلی میان سلول های طبیعی و مصنوعی نگریسته می شود که این پلی می تواند شکاف میان این دو نوع سلول را زدوده و کاربردهای گسترده ای را در زیست پزشکی نوید دهد (۶). از آنجا که بیولوژی سینتتیک بر این باور است که میکروارگانیسم ها، گیاهان، جانوران و انسان ها، سامانه های ماشین مانند هستند، می توان پیرامون «طراحی منطقی» یا مهندسی مجدد این ماشین ها گفتگو کرد، به گونه ای که عملکردهای ارزشمندی را از خود نشان دهند (۷). گاهی این بازطراحی و مهندسی مجدد ارگانیسم ها به گونه ای خواهد بود که آن ها خواهند توانست موادی بسازند که ممکن است به شکل طبیعی قابل ساخت نباشند. گاهی این بلند پروازی فقط در جستجوی بازمهندسی سامانه های زنده نیست بلکه ساخت نمونه های کاملاً نوین را می جوید: خلق حیات از مواد غیرزنده (۸). به زبان دیگر،

جایگاه بلندپروازانه این علم این گونه است که اشیاء زنده را به گونه‌ای طراحی نماید که نیازهای ویژه و آرزوهای انسانی را برآورده سازند.

چالش‌ها	مثال‌هایی از اثرگذاری بیولوژی سینتتیک
سلامت و تندرستی	بیولوژی سینتتیک می‌تواند ذخیره در حال کاهش عوامل ضد میکروبی نوین که در دسترس پزشکان است را پر نماید. این دانش طراحی منطقی آنتی‌بیوتیک‌های نوین و توسعه راحل‌های جدید مانند باکتریوفاج‌های مهندسی شده را امکان‌پذیر می‌نماید.
انرژی و عملکرد بر اقلیم	اتانول زیستی و دیزل زیستی در مقیاس تجاری هم‌اکنون با کمک ارگانیسم‌های توسعه یافته توسط بیولوژی سینتتیک در خط تولید می‌باشند. بهره‌وری عظیم‌تر و عملکردهای مهندسی شده نوین می‌توانند از اتکا، به سوخت‌های فسیلی کاسته و هم‌زمان نیز با کاربرد گاز کربنیک به عنوان ماده خام در صنعت شیمیایی می‌تواند در گسیلش‌های گازهای گلخانه‌ای، توازن ایجاد نماید.
امنیت غذایی	توسعه ارگانیسم‌های تولید کننده سوخت زیستی فستوتنز کننده می‌تواند رقابت را بین محصولات غذایی و انرژی کاهش داده و هم‌زمان وارپته‌های محصولات جدید می‌توانند تغذیه را افزایش و خسارات برآمده از آفات و بلایای محیطی را کاهش دهند.
امنیت	بیولوژی سینتتیک پتانسیل حمایت از ساخت مواد زیستی و شناساگرهای زیستی نوین را دارد.

شکل ۱) چالش‌های اجتماعی و مثال‌هایی از اثرگذاری بیولوژی سینتتیک

هنوز علم بیولوژی سینتتیک بسیار جوان است و عمر آن به یک دهه می‌رسد. اولین بخش بیولوژی سینتتیک در آزمایشگاه ملی برکلی در سال ۲۰۰۳ تأسیس یافت و پژوهشگران آمریکایی پیشگام بودند ولی هم‌اکنون بسیاری از اعضای اتحادیه اروپا، گروه‌های پژوهشی فعالی دارند. سنگ بنای مفاهیم بیولوژی سینتتیک توسط زیست‌شناس آمریکایی کریگ وینتر گذاشته شد که اعضای گروه پژوهشی او موفق شدند، یک ژنوم صناعی را پیوند

بزندند. در حقیقت این اولین کوشش موفقیت‌آمیز برای خلق حیات بود. DNA حاوی دستورالعمل‌های ژنتیکی آن‌ها، از مواد غیرزنده مشتق شده بود ولی سلولی که مورد پیوند قرار گرفت واقعاً پوستهٔ باکتریایی به نام مایکوپلازما میکوئیدس بود که محتویات اولیه آن را برداشته بودند.

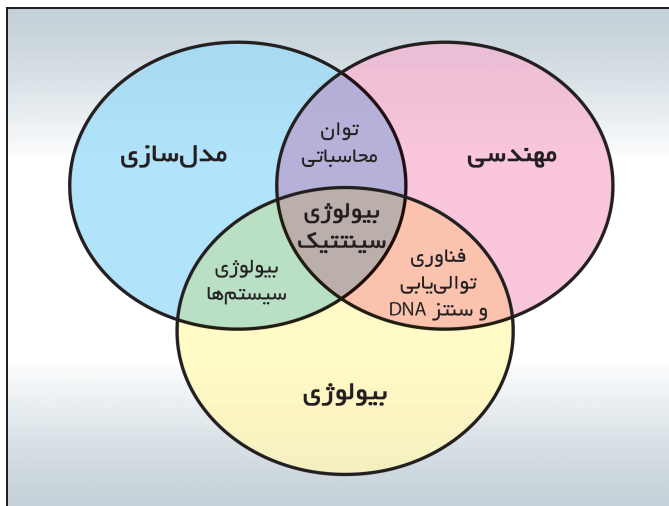
در حقیقت، آنچه آن‌ها انجام می‌دادند نشان داد که می‌توان رهیافت‌های بیولوژی سینتتیک را به کار برد (۸). امروز رهیافت‌های بیولوژی سینتتیک را می‌توان در دو بخش جای داد، رهیافت «پایین به بالا» یا رهیافت بر پایهٔ مفهوم ژنوم کمینه<sup>۱</sup> که سونگری از «بالا به پایین» را هدف قرار داده است. نخستین رهیافت شامل واحدهای ساختاری پایه (اجزاء) است که قطعات DNA سنتز شده، فراهم آمده و برای طراحی و ساخت ادوات (اجزاء چندگانه با عملکردهای تعریف شده)، مسیرهای بیولوژیک و در نهایت ژنوم‌ها به کار برده می‌شوند. رهیافت‌های گوناگونی برای هم‌گذاری و سوار کردن ژنوم‌های سینتتیک توسعه یافته‌اند که بر اساس استانداردهای اجزاء انجام گردیده و بدین سان عمل هم‌گذاری و سوار کردن تسهیل می‌گردد.

رهیافت از بالا به پایین که معکوس می‌باشد، کاهش دادن ژنوم به مجموعه‌ای کمینه از ژن‌ها است که بتواند حیات را تحت شرایط تعریف شده، برقرار سازد. این سلول‌های کمینه که به عنوان شاسی نامیده می‌شوند، نقش یک سکوی کارخانهٔ سلولی را بازی می‌کنند که عناصر سینتتیک را

---

<sup>1</sup> Minimal genome

به آن‌ها می‌توان افزود. این سکوها انتخابی، ارگانسیم‌های مدلی هستند که به خوبی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند مانند *E. Coli* یا مخمرها که می‌توانند به عنوان میزبان بیان مسیرهای بیولوژیک، به کار برده شوند (۲). چنین می‌نماید که هنوز نتوان بیولوژی سینتتیک را تعریف نمود اما چنین می‌نماید که این دانش، دارای ویژگی میان رشته‌ای یا فرارشته‌ای است که در تقاطع میان بیولوژی، مهندسی شیمی، شیمی، مهندسی برق، فیزیک و علوم رایانه‌ای قرار می‌گیرد (۹).



شکل ۲) بیولوژی سینتتیک در فصل مشترک مهندسی، مدل‌سازی محاسباتی و علوم زیستی است. بیولوژی سینتتیک بر پایه تنوعی از ابزارها و فناوری‌ها شامل توسعه توالی‌یابی DNA، فناوری‌های سنتز ژن‌ها به صورت ارزان، افزایش توان محاسباتی و درک بهتر از سامانه‌های زیستی به دست آمده از بیولوژی سیستمی، سامان می‌یابد.

## ۱-۲- کاربردهای بیولوژی سینتتیک در پزشکی

هدف تحقیقاتی و کاربردی بیولوژی سینتتیک آن است که مسیرهای متابولیک را دستکاری نماید به گونه‌ای که واکنش‌های بیوشیمیایی را کنترل کرده و مواد شیمیایی را تولید کند که ارزش اقتصادی در گسترهٔ جامعه دارند (مانند تولید سوخت‌های زیستی، روغن‌ها، لاستیک و ترکیبات زیست پزشکی). همچنین امکان طراحی ارگانیسم‌های سینتتیک برای اهداف پاک‌سازی محیط زیست نیز وجود دارد. از سوی دیگر، ارگانیسم‌های تغییر یافتهٔ ژنتیکی را می‌توان به عنوان حس‌گرهای زیستی طراحی نمود تا مواد شیمیایی سمی را مورد شناسایی قرار داده و به پاک‌سازی خاک و آب با متابولیزه کردن این ترکیبات سمی، کمک کنند (۵).

از این رو، چنین می‌نماید که بیولوژی سینتتیک با خلق موارد بیولوژیک مشتری مدار، می‌تواند بر بسیاری از چالش‌های قرن بیست و یکم که انسان‌ها با آن‌ها در رو هستند، چیرگی یابد. این چالش‌ها، گستره‌های محیط زیست، انرژی، تولید غذا و سلامت را پوشش می‌دهند. از این رو، بیولوژی سینتتیک به صورت یک فناوری سکو مانند عمل می‌نماید که می‌تواند در بحث تهدیدات آب و خاک، کاربردهای کشاورزی و محیط زیست که برای بقاء انسان، به ویژه در کشورهای در حال توسعه و فقیر، از چالش‌های عمده محسوب می‌شوند، ورود نموده و بهره‌وری و کارایی را در حوزهٔ اقتصاد، افزایش دهد (۴).



شکل ۳) رشته‌های علوم که از رهیافت‌های بیولوژی سینتتیک استفاده می‌کنند، گستره‌های کاربرد بیولوژی سینتتیک و فناوری‌ها و ابزارهای پشتیبان

شاید هیجان‌انگیزترین نقطه بحث کاربرد بیولوژی سینتتیک در عرصه پزشکی و تولید محصولات در گستره سلامت باشد. در این عرصه، با مهندسی شبکه‌های ژنی پیچیده، با هدف درمانی، بیولوژی سینتتیک در پی درمان بیماری‌های پیچیده، از سطح ریشه‌ای و درمان علائم بیماری‌ها و کمک به شناسایی مواد دارویی جهت افزایش تولید مواد زیستی فعال با توان درمانی می‌باشد. همچنین بیولوژی سینتتیک دارای پتانسیل ایجاد انقلاب در رهیافت‌های درمانی دقیق مانند ژن درمانی و سلول

درمانی است. در آینده‌ای نزدیک، مدارهای سینتتیک به کارآزمایی‌های بالینی وارد خواهند شد؛ هر چند که مهم‌ترین چالش در این مسیر، یافتن یک انتقال دهنده است که بتواند شبکه‌های ژنی سنتز شده را به سلول هدف، رها سازد (۱۰).

بی‌شک بیولوژی سینتتیک با به کارگیری اصول مهندسی می‌تواند حس‌گرها، مدارهای کنترلی و فعال‌کننده‌هایی را در جسم بیولوژیک بر اساس ویژگی‌های بالینی، سنتز نماید. بیولوژی سینتتیک با ساخت چنین ادوات تشخیصی برنامه‌پذیر و خودکار که با درمان‌های فردگرایانه<sup>۱</sup> در هم آمیخته شده باشند، می‌تواند مناسب‌ترین و جامع‌ترین اطلاعات تشخیصی را فراهم آورد. بنابراین، بیولوژی سینتتیک در ساخت ادوات تشخیصی که درمان‌های همزمان را نیز بر پایه ویژگی‌های فردی بیمار ارائه می‌دهد، یک انقلاب حیرت‌انگیز را رقم می‌زند که علم پزشکی آینده را هدف قرار داده است (۱۱).

با رهیافت‌های بیولوژی سینتتیک توانسته‌اند، عناصر ژنتیکی را بر روی یک کاغذ فروگذاری کرده و ادوات تشخیصی بر پایه کاغذ را که می‌توانند پاتوژن‌ها را در بزاق یا خون تشخیص دهند، تولید کنند. همچنین ادوات تشخیصی بر پایه چنین فناوری‌ای برای تشخیص مقاومت ارگانیسم‌ها به آنتی‌بیوتیک‌ها، به کار برده شده است. چنین شیوه‌های تشخیصی که بر پایه بیولوژی سینتتیک بنیان‌گذاری شده‌اند، خواهند

---

<sup>1</sup> Personalized

توانست نگرانی‌های سلامت عمومی را هدف قرار دهند (۱۲). با وجود این که بیولوژی سینتتیک دوران کودکی خود را طی می‌کند اما در گستره پزشکی بازآفرینشی<sup>۱</sup>، هم‌اکنون خود را نشان داده است. با ترکیب بیولوژی سینتتیک و پزشکی بازآفرینشی، مهندسی سلول‌ها و ارگانیسیم‌ها، پتانسیل خود را برای کاربرد در مهندسی بافت، فرآوری زیستی<sup>۲</sup>، مواد زیستی، تولید و توسعه داربست‌های بافتی، درمان با سلول‌های بنیادی و حتی ژن درمانی، نشان داده است (۱۳).

می‌توان از بیولوژی سینتتیک در مهندسی سلولی و ویرایش ژنی سلول‌های میزبان استفاده کرد؛ مانند آنچه که در پژوهش‌های ایمنی درمانی سرطان بر پایه سلول نشان داده شده است که سلول‌های سری T بیمار، مهندسی گردیده و به عنوان عوامل درمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بدین‌سان، می‌توان از بیولوژی سینتتیک جهت بهبودی درمان‌های سرطان بر پایه سلولی از طریق توسعه و به کارگیری حس‌گرهای سینتتیک، سویچ‌ها و مدارها استفاده کرد. همچنین با ساخت و مهندسی شبکه‌های کنترل سینتتیک و آبشارهای پیام‌دهی می‌توان مورفولوژی سلولی، رفتار متابولیک و تداخلات درمانی را با دقت فراوان برنامه‌ریزی نمود.

در حقیقت، این امکان وجود دارد که اقدامات درمانی را برای بیماری‌ها

<sup>1</sup> Regenerative

<sup>2</sup> Bioprocessing

با به کار بردن مدارهای ژن درمانی سینتتیک در سلول‌ها جهت کنترل شبکه‌های پیام‌دهی ویژه، به کار برد. این بیماری‌ها شامل بیماری‌های متابولیک (مانند چاقی، دیابت)، سرطان و بیماری‌های ایمنولوژیک می‌باشند (۱۳). در پزشکی بازآفرینشی از توانمندی‌های طبیعی سلول‌ها جهت ساخت فاکتورهای تروفیک و تولید بافت‌های جدید از طریق فرایندهای طبیعی رشد و نمو و بقاء بافت استفاده می‌شود. پدیداری بیولوژی سینتتیک توانسته است، فرایندهای پزشکی بازآفرینشی را به گونه‌ی حیرت‌آور متحول سازد. در آینده‌ای نزدیک، به کارگیری رهیافت‌های بیولوژی سینتتیک در پزشکی بازآفرینشی، می‌تواند نه تنها این شاخه از دانش را شکوفا سازد بلکه پرکاربردترین عرصه‌ی به کارگیری بیولوژی سینتتیک در علوم پزشکی خواهد شد. چهار گستره‌ی عمده وجود دارد که تکنیک‌های بیولوژی سینتتیک جهت ارتقاء پزشکی بازآفرینشی در آن‌ها به کار می‌آید:

۱) سنتز زیستی و رهاسازی کنترل شده‌ی ملکول‌های درمانی

۲) سنتز مواد برای داربست‌های بافتی

۳) تنظیم سلول‌های بنیادی

۴) برنامه‌ریزی سلول‌ها جهت سازمان‌دهی آن‌ها به سوی بافت‌های

نوین (۱۴).

در گستره‌ی کشف و تولید دارو نیز بیولوژی سینتتیک آینده‌ای روشن را رقم می‌زند. در پناه همگرایی نسل بعدی توالی‌یابی و بیولوژی سینتتیک، ایجاد کتابخانه‌های عظیم قابل اعتماد برای محصولات طبیعی کشف دارو

راه‌اندازی شده‌اند. هر روزه بر فهرست داروها یا پیش‌سازهای داروها که توسط میکروارگانیسم‌های مهندسی شده برای اهداف متابولیکی تولید می‌شوند، افزوده می‌گردد. آرتمیسینین، مثالی از کاربرد بالقوه بیولوژی سینتتیک در تولید دارو است. این دارو ضد مالاریا، به صورت اولیه، از *Artemisia annua* جدا شده است. امروزه با انتقال ژن‌های گیاهی (که در مسیر بیولوژیک این دارو کار می‌کنند) به یک ارگانیسم شاسی تخمیر کننده<sup>۱</sup> و فشار به تولید پیش‌نیازهای آن، هزینه تولید دارو نصف شده و امکان ارائه این دارو برای کشورهای با درآمد پایین فراهم آمده است؛ مثال دیگر، داروی تاکسول<sup>۲</sup> است که در شیمی درمانی سرطان‌های سینه، پستان و تخمدان نقش مهمی دارد. به شکل رایج، پیش‌سازهای تاکسول از کشت سلول گیاهی تولید می‌شود و با سنتز شیمیایی، به تاکسول انتقال می‌یابد. این فرایند هزینه‌بر بوده و بازده کمی را از کشت سلول گیاهی فراهم می‌سازد. بیولوژی سینتتیک، راه ساده‌تر و کارآمدتری را برای تولید این دارو از طریق هم‌آوری مسیرهای بیوسنتزی کامل در *E. Coli* و *Saccharomyces cerevisiae* عرضه می‌دارد (۴).

### ۱-۳- برنامه توسعه بیولوژی سینتتیک

با ظهور بیولوژی سینتتیک در عرصه دانش از اوایل هزاره جدید، این علم با سرعت چشم‌گیری مورد اقبال جامعه علمی جهان قرار گرفته و

<sup>1</sup> Fermentable chassis

<sup>2</sup> Taxol

موجب جذب جامعه مهندسان، دانشمندان، کارآفرینان، سرمایه‌گذاران، خبرگان علوم اجتماعی و سیاست‌گذاران شده است. بر اساس پیش‌بینی‌های موجود، بیولوژی سینتتیک از جمله ۱۲ فناوری بنیان‌برافکن و تحول‌برانگیز آینده است که زیست، کسب و کار و اقتصاد جهانی را متحول می‌سازد (۱۵). باراک اوباما رئیس‌جمهور وقت آمریکا، این علم را به صورت یک فناوری سکویی بحرانی عنوان کرد و دولت وقت انگلستان نیز آن را یکی از پایه‌های شتاب‌دهنده رشد برای انگلستان مطرح نمود (۱۶ و ۱۷).

هر دو کشور آمریکا و انگلستان، برای توسعه بیولوژی سینتتیک بسیار سرمایه‌گذاری کرده‌اند. هم‌اکنون بیش از ۳۰۰ شرکت در گستره بیولوژی سینتتیک در آمریکا فعال هستند. در سال ۲۰۱۵ استارت‌آپ‌های آمریکایی، بیش از ۵۰۰ میلیون دلار را در سرمایه‌گذاری‌های پرخطر بر این علم تحول‌برانگیز سرمایه‌گذاری نمودند و در سال ۲۰۱۶، این میزان از مرز یک میلیارد دلار گذشت. جالب اینجاست که کسانی بر روی این علوم سرمایه‌گذاری کرده‌اند که در عرصه زیست فناوری کار نمی‌کنند بلکه حوزه عمل آن‌ها علوم اطلاعات و ارتباطات است مانند گوگل، یاهو و پی‌پال<sup>۱</sup>. یکی از استارت‌آپ‌ها به نام جینگو بیورک<sup>۲</sup> در بوستون، ۱۰۰ میلیون دلار در سرمایه‌گذاری پرخطر برای ابتیاع ۴۰۰ میلیون جفت‌باز DNA و جستجو جهت طراحی جدید و خلق مسیرهای تولید زیستی، دریافت نموده است. جیسون کلی، از بنیان‌گذاران این استارت‌آپ چنین بیان نموده است

---

<sup>1</sup> PayPal

<sup>2</sup> Ginkgo Bioworks

که با طراحی بهتر بیولوژی، ما به گونه‌ای از آن استفاده خواهیم کرد که هر چیزی را بسازیم و بخش‌هایی را متحول خواهیم کرد که صنعت فناوریانه سنتی حتی نتوانسته است به آن دستیابی داشته باشد (۱۸).

با توجه به گستردگی کاربردهای بیولوژی سینتتیک، سرمایه‌گذاران بخش‌های گوناگون اقتصادی در این عرصه حضور یافته‌اند تا بر روی بخش‌های کشاورزی، پزشکی، انرژی، مواد شیمیایی و فناوری اطلاعات سرمایه‌گذاری کنند. برای مثال، اگزون موبیل<sup>۱</sup> اخیراً ۳۰۰ میلیون دلار در تولید سوخت زیستی آلگی در مشارکت با سینتتیک ژنومیک سرمایه‌گذاری کرده است (۱۵). ایالات متحده آمریکا، پیش‌تازترین کشور در توسعه بیولوژی سینتتیک است که از بیش از ۱۵ سال پیش، سرمایه‌گذاری راهبردی را در بخش‌های دولتی بر روی این علم استراتژیک به انجام رسانده است و هم‌اکنون مراکز پژوهشی بی‌شماری را در عرصه بیولوژی سینتتیک راه‌اندازی نموده است که پیشرفت‌های چشمگیری را در توسعه ابزاری و کاربردهای علمی بیولوژی سینتتیک در عرصه‌های انرژی زیستی، تولید زیستی تا زیست پزشکی را شامل می‌شود.

ایالات متحده آمریکا، برای نگهداشت رهبری خود در این علم بحرانی، چندین نقشه راه را برای فراهم آوردن دیدگاه استراتژیک و ارائه پیشنهادها عملکردی تدوین کرده است (۱۹). در انگلستان نیز تعدادی از مراکز پژوهشی بیولوژی سینتتیک، مراکز سنتز DNA، مرکز آموزش

<sup>۱</sup> ExxonMobil

دکتری و مرکز نوآوری و دانش بنیان گذاری شده‌اند؛ تا کنون این کشور دو نقشه راه را طی سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ تدوین کرده است (۲۰).

شورای مشورتی علوم آکادمیک اروپا (EASAC) که شامل آکادمی‌های ملی علوم کشورهای عضو اتحادیه اروپا است، گزارشی را پیرامون بیولوژی سینتتیک جهت یافت فرصت‌های علمی و حاکمیت خوب منتشر نمود (۸). شرکای شبکه منطقه پژوهشی اروپا جهت توسعه و هماهنگی بیولوژی سینتتیک (ERASynBio) نیز چشم‌انداز استراتژیک خود را در سال ۲۰۱۴ انتشار داد (۲۱).

در بسیاری از کشورهای اروپایی، زیرساخت‌ها و مقررات به کارگیری بیولوژی سینتتیک فراهم شده است که می‌توان از دانمارک، فنلاند، فرانسه و انگلستان نام برد؛ هر چند که در ژاپن، چین، استرالیا و هندوستان نیز اقدامات بسیار گسترده‌ای آغاز شده‌اند (۴ و ۲۲).

جالب اینجا است که در هندوستان متفکران راهبردی، بیولوژی سینتتیک را راهی برای بیرون رفت آن کشور از معضلات پیش روی مانند بحران غذا، مواد مغذی، داروها، واکسن‌ها و آب سالم مطرح کرده‌اند (۲۳) و به نظر می‌رسد که اکوسیستم موجود در این کشور، بسیار مساعد برای پذیرا شدن از بیولوژی سینتتیک باشد (۲۴). این تلاش‌ها که در تمام کشورهای پیشرفته و در حال توسعه در حال انجام است، نشان می‌دهد که در آینده ممکن است دیگر رهبری بیولوژی سینتتیک، در استان ایالات متحده آمریکا نباشد (۲۵). در کشور عزیز ما نیز به نظر می‌رسد

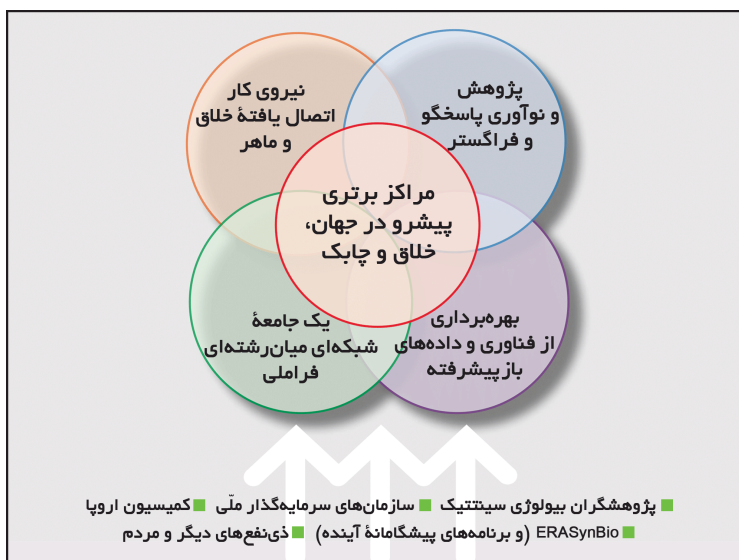
که اکوسیستم مناسبی را برای چیدمان بیولوژی سینتتیک فراهم آمده است که در اینجا با توجه به زیرساخت‌های موجود در ایران و نیز تجربیات، راهبردها، چشم‌اندازها و نقشه راه‌های دیگر کشورها، تلاش می‌شود که نمایی از نقشه راه توسعه علم بیولوژی سینتتیک در ایران ارائه شود.

#### ۱-۴- نقشه راه جهت توسعه بیولوژی سینتتیک در ایران

بیولوژی سینتتیک در چشم‌انداز خود رشد اقتصادی خارق‌العاده همراه با خلق مشاغل فراوان را دارد که این کار را با احیاء صنایع و فناوری‌های موجود و رشد بخش‌های جدید نوآورانه انجام می‌دهد. این چشم‌انداز برخاسته از درک این موضوع است که این علم تحول برانگیز، راه‌های نوآورانه‌ای را برای چالش‌های سترگ اجتماعی ارائه می‌دهد. این به معنای این خواهد بود که بازارهای رقابت‌پذیر بسیار هیجان‌انگیزی در سطح ملی و جهانی برای بیولوژی سینتتیک وجود دارند و کشورهایی می‌توانند این گوی را برابیند که شاهراه‌هایی را برای مسیر توسعه این دانش گشایش نموده باشند. زیست فناوری صنعتی و انرژی زیستی، پزشکی، انرژی و کشاورزی و علم مواد، از عرصه‌هایی هستند که این تأثیر را می‌پذیرند (۲۶).

در نتیجه، برای تدوین نقشه راه بیولوژی سینتتیک در سطح ملی نیاز به مشارکت ذی‌نفع‌ها از بخش‌های گوناگون خواهیم بود که

چهارچوب هایی را همچون نقشه علمی کشور و سیاست گذاری در سطح کلان از سوی رهبران جامعه در سطح بسیار بالا را می طلبد. در این پیش نقشه راه تلاش گردیده که راهبردهای کلان جهت توسعه بیولوژی سینتتیک در گستره زیست پزشکی ترسیم شود.



شکل ۴) نمایی از چشم‌انداز ERASynBio برای بیولوژی سینتتیک

## ۱-۴-۱- راهبرد اول: بنیان‌گذاری مراکز تعالی پژوهش برای

### بیولوژی سینتتیک

در مدل انتخابی این راهبرد، شایسته آن بود که می‌توانستیم یک پژوهشکده ملی را برای بیولوژی سینتتیک بنیان می‌گذاشتیم تا ضمن

ارائه زیرساخت‌های پژوهشی مشترک، مکان فیزیکی واحدی را برای ساماندهی و هماهنگی همکاری‌ها در سطح کشور فراهم آورد. این پژوهشکده می‌توانست تخصیص بودجه جهت انجام پروژه‌های بیولوژی سینتتیک را در سطح ملی به انجام رسانده و افراد نخبه را برای توسعه این دانش فرا بخواند. مشابه چنین مرکز ملی را می‌توان در ایالات متحده آمریکا به نام Synberc مشاهده نمود (۱۵) که در سال ۲۰۰۶ بنیان یافت تا برنامه کلان پژوهشی را برای بیولوژی سینتتیک، به واسطه توسعه فناوری‌های پایه، همگرا کردن پژوهش‌های آکادمیک و صنعتی و نیز آموزش پژوهشگران برجسته در این عرصه را پیگیری نماید. مدل Synberc یک مدل مؤثر برای هم‌راستا قرار دادن فعالیت‌های زیست‌فناوری با نیازهای جامعه عمومی از طریق گفتمان پژوهش و آموزش است. در حقیقت، دو ویژگی منحصر به فرد Synberc آن است که به عنوان یک مرکز «مجازی»، پژوهش‌های مشترک و زیرساخت آموزشی را هدایت می‌نماید (۱۹). چنین مدلی را می‌توان برای کشورهایی که زیرساخت‌های گسترده و انتشار یافته‌ای برای زیست‌فناوری دارا می‌باشند را اتخاذ نمود.

در ایران، وجود زیرساخت‌های متنوع و تقریباً گسترده و انتشار یافته‌ای برای زیست‌فناوری وجود دارند مانند انجمن بیوتکنولوژی جمهوری اسلامی ایران، پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست‌فناوری، ستاد توسعه زیست‌فناوری معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری. این زیرساخت موجب

می شود که اتخاذ چنین مدلی برای ایجاد ارتباطات میان مرکزی و هماهنگ نمودن فعالیت ها جهت ایجاد هم افزایی، بهینه کردن تخصیص منابع و نیز کاهش دوباره کاری و همپوشانی در فعالیت ها، مؤثر واقع شود. در حقیقت، مدل پیشنهادی می تواند ستاد توسعه زیست فناوری معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری باشد که نقش هماهنگ کننده و اجرای سیاست را در سطح ملی ایفا نماید. اتخاذ چنین مدلی می تواند از زیرساخت های موجود بهره برداری بهینه نموده و از بنیان گذاری پژوهشکده ای دیگر که اختصاص به بیولوژی سینتتیک دارد (در زمانی که این علم دوران نوزادی خود را طی می کند)، جلوگیری نماید. چنین راهبردی حتی برای کشورهای پیشرفته از سوی OECD پیشنهاد شده است که این سازمان این راهبرد را کم هزینه تر و ایمن تر برای تجهیز کردن تسهیلات موجود جهت توسعه بیولوژی سینتتیک اعلام نموده است (۴).

بر اساس چنین سیاستی می توان در ستاد توسعه زیست فناوری معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری، مرکز تعالی بیولوژی سینتتیک را به عنوان طاق نمای توسعه این علم برپا نمود. بازوی سطح دوم، بنیان گذاشتن مراکز تعالی بیولوژی سینتتیک در پژوهشگاه ملی مهندسی ژنتیک و زیست فناوری و دانشگاه های مطرح در ده قطب آمایشی کشور می باشد. به زبان دیگر، از دیدگاه توپوگرافی سرزمینی، هر قطب نقش ویژه ای (که در بخش دیگر به آن اشاره خواهیم کرد) را با بنیان گذاشتن مرکز تعالی بیولوژی سینتتیک در درون ساختار موجود جهت توسعه

بیولوژی سینتتیک به عهده خواهد گرفت. بی شک، انجمن بیوتکنولوژی و نهادهای فناوری‌های وابسته به بیولوژی سینتتیک مانند ستاد توسعه علوم و فناوری‌های سلول‌های بنیادی نیز در این شبکه سیاستی، مشارکت خواهند داشت.

اتخاذ چنین راهبردی، یعنی بنیان گذاشت مراکز تعالی بیولوژی سینتتیک در قلب ساختارهای موجود زیست فناوری، موجب خواهد شد که این مراکز تعالی از امکانات، تجهیزات و دانش موجود برای بیولوژی ملکولی، ژنومیک و در آینده‌ای نزدیک پروتئومیک و فناوری‌های امیکس آینده، بهره‌مند شوند. در حقیقت، مجاورت این مراکز تعالی با زیرساخت‌های تار و پودی زیست فناوری مانند مرکز ژنومیک، در رشد و بالندگی مراکز تعالی بیولوژی سنتتیک، نقش بی‌همتایی را از خود نشان خواهند داد. از دیدگاه تأمین منابع نیز همان‌گونه که بنیاد ملی علم آمریکا ۸۷ درصد از بودجه Synberc را تا سال ۲۰۱۶ به عهده گرفت (۱۹)، صندوق حمایت از پژوهشگران کشور (بنیاد ملی علم ایران) نیز می‌تواند ضمن تخصیص پژوهانه (گرانته) برای پژوهش‌های بنیادی در بیولوژی سینتتیک از کرسی‌های پژوهشی در زمینه بیولوژی سینتتیک نیز حمایت نماید.

#### ۱-۴-۲- راهبرد دوم: رهیافت میان‌رشته‌ای

نظریه پردازان معاصر مانند کلین و نیوول، رهیافت میان‌رشته‌ای را چنین توصیف کرده‌اند؛ "مطالعات میان‌رشته‌ای به صورت یک فرایند

پاسخ به پرسش، حل مسئله و پرداختن به موضوعی است که در ماهیت چنان گسترده و یا پیچیده می‌باشد که نمی‌توان به اندازه کافی با یک رشته یا تخصص به آن پرداخت (۲۷). از میان علوم نوین، بیولوژی سینتتیک، بیشترین ماهیت میان‌رشته‌ای را دارد زیرا برای تبلور این رشته نوین نیاز است که دانشمندان و مهندسان از رشته‌های گوناگون، همچون زیست‌شناسی، علوم مهندسی، شیمی، علوم محیط زیست، فیزیک دانان، دانشمندان علوم رایانه‌ای و فناوری اطلاعات و ارتباطات، با یکدیگر برهم کنش نزدیک داشته باشند؛ حتی دانشمندان علوم اجتماعی، نمایندگان صنایع، اقتصاددانان و سیاست‌گذاران نیز برای این که دستاوردهای بیولوژی سینتتیک بتوانند به سوی جامعه و دنیای اقتصاد راه بیابند و نیازهای جامعه را پاسخگو باشند، مورد نیاز هستند (۲۰).

در بسیاری از کشورها، این رهیافت میان‌رشته‌ای جهت بنیان‌گذاری بیولوژی سینتتیک و توسعه آن اتخاذ شده است. برای مثال، مرکز بیولوژی سینتتیک و نوآوری در کالج سلطنتی انگلستان (SynBI) به عنوان یک مرکز میان‌رشته‌ای در سال ۲۰۰۹ تأسیس شد که همراه خود مراکز دیگری را در انگلستان رشد داد. چنین مراکزی موجب افزایش ظرفیت پژوهشی و تنوع در بدنه خبرگان، تحریک نوآوری و تسهیل برهم کنش میان صنعت و ذی‌نفع‌های کلیدی گردید (۲۰). از آنجا که ساختار تحقیقاتی در کشور ما به گونه‌ای است که برهم کنش میان دانشگاه‌های علوم پزشکی و وزارت علوم و تحقیقات بسیار ناچیز است بایستی در رهیافت میان‌رشته‌ای به

گونه‌ای عمل نمود که در مراکز تعالی بیولوژی سینتتیک، امکان حضور مهندسان و دیگر دانشمندان علوم غیر زیست پزشکی نیز فراهم شود. بنابراین، تشکیل کارگروه‌های مشترک و هسته‌های پژوهشی میان‌رشته‌ای در این مراکز تعالی، بسیار حیاتی می‌باشد زیرا چنانچه چنین تدبیری انجام نشود، امکان پیدایش، رشد و تکامل بیولوژی سینتتیک وجود ندارد. از سوی دیگر، از نقاط قوت ساختار علمی پژوهشی کشور، وجود پارک‌های علم و فناوری و مراکز رشد است که همجواری و برهم‌کنش دانشمندان علوم زیست پزشکی و علوم مهندسی را امکان‌پذیر نموده‌اند و در همین مکان‌ها است که خبرگان علوم اجتماعی و اقتصادی نیز می‌توانند در عرصه توسعه بیولوژی سینتتیک، وارد عمل شوند.

#### ۱-۴-۳- راهبرد سوم: مأموریت‌گرایی هوشمندانه بر پایه برنامه

##### آمایش سرزمین و شبکه‌سازی

بر اساس نقشه علمی کشور، باید اولویت‌های کلیدی پژوهشی و آموزشی و توسعه‌ای را برای هر کلان منطقه (ده کلان منطقه آمایشی)، تعریف نمود تا دانشگاه‌های مستقر در هر کلان منطقه نیز بر اساس ویژگی و دارایی‌هایی منحصر به فرد خود، مزیت‌های رقابتی دانشگاهی خود را برجسته نموده و ذی‌نفع‌های منطقه‌ای و منابع را حول چشم‌انداز برخاسته از تعالی‌گرایی آینده این مناطق سوق دهند و این همان معنای مأموریت‌گرایی (تخصص‌گرایی) هوشمندانه (RIS<sub>3</sub>) برنامه‌های جامع

آمایش یکپارچه تحول اقتصادی بر پایه مکان است (۲۸).

ترجمان این گفتار در عرصه بیولوژی سینتتیک بدین گونه است که می‌بایست مراکز تعالی بیولوژی سینتتیک و دانشگاه‌های مادر در کلان مناطق آمایشی را در دو گستره توسعه فناوری‌های سکویی و همچنین کاربردهای بیولوژی سینتتیک درگیر نمود و بر اساس توانمندی‌ها و پیش‌زمینه‌های زیست فناوری و علوم زیست پزشکی و نیز علوم مهندسی پشتیبان در این دو عرصه، تقسیم‌بندی کرد. در عرصه توسعه فناوری‌ها نیز مأموریت‌های ویژه‌ای برای هر کلان منطقه و مراکز تعالی بیولوژی سینتتیک در گستره فناوری‌های سکویی تعیین می‌شود؛ مانند سامانه‌های اطلاعاتی، استانداردسازی، پروتکل‌های ساخت قسمت‌ها، ادوات و شاسی‌ها و نیز هم‌آوری<sup>۱</sup> ملکول DNA. در عرصه کاربردها نیز می‌توان بخش‌های حس‌گرهای زیستی، محاسبه زیستی، تولید محصولات درمانی، درمان‌های بر پایه سلول، سوخت‌های زیستی، مواد زیستی و فناوری سنتز ژنوم (به ویژه در مخمرها)، تقسیم‌بندی نمود.

برای مثال، در NIH که پژوهش بیولوژی سینتتیک با کاربردهای زیست پزشکی و سلامت را مورد حمایت قرار می‌دهد، در زیر چتر ۲۷ انستیتوی جداگانه NIH، گرانت‌های پژوهشی ویژه‌ای نیز برای مراکزی در MIT، دانشکده پزشکی دانشگاه جان هاپکینز و دانشگاه استنفورد، جهت توسعه بیولوژی سینتتیک تخصیص داده است. اما هر کدامیک از

---

<sup>1</sup> Assembly

این مراکز، کارها و پروژه‌ها و مأموریت‌های ویژه خود را دنبال می‌کنند. به عنوان نمونه، مرکز بیولوژی سینتتیک MIT، از مدارهای سینتتیک بر پایه RNA جهت حس کردن و نابودی سلول‌های سرطانی، برنامه‌ریزی تمایز سلول‌های بنیادی جهت تولید سلول‌های بتای تولیدکننده انسولین جهت افراد دیابتی و رهیافت‌های مهندسی برای هدف قرار دادن باکتری‌های مقاوم به آنتی‌بیوتیک، برنامه‌ریزی کرده است.

همچنین NIH، اخیراً ۲۰ میلیون دلار بین سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۹ به دانشگاه راکفلر و دانشگاه استنفورد جهت برنامه «ژنوم تا محصولات طبیعی» اختصاص داده است که هدف آن کشف و تولید محصولات طبیعی بر پایه ژنوم است که می‌توانند موانع فنی را زدوده و شکاف‌های دانشی را برای ترجمان اطلاعات ژنتیکی به اطلاعات شیمیایی پر کنند (۱۹). در هر صورت، توسعه در بیولوژی سینتتیک بدون توسعه طراحی رایانه‌ای، سنتز و توالی‌یابی DNA، پروتوتیپ‌سازی سریع، مدل‌سازی، مهندسی سامانه‌ها و بیولوژی سیستمی، امکان‌ناپذیر است. با توجه به گستردگی و پیچیدگی این دانش، نیاز است که مناطق آمایشی در هر بخش به صورت هوشمندانه، تخصص یافته و با ایجاد شبکه ملی بیولوژی سینتتیک، امکان بهره‌برداری آزاد و دستیابی سریع به اطلاعات و دانش تخصصی این علم برای پژوهشگران و خبرگان را فراهم آورد.

در همین شبکه است که مرکز ذخیره ملی جهت دستیابی سریع به قطعات، ادوات و مدارهای بیولوژیک جهت طراحی و مهندسی ارگانسیم‌ها

تحقق می‌یابد. به صورت ایده‌آل، این قطعات ژنتیکی می‌بایست قابل تبادل بوده و برای تولید هر گونه از محصولات با ارزش افزوده یا بازبرنامه‌نویسی سلولی یا ویرایش آن‌ها به کار آید. چنانچه این شبکه پویا به صورت روزآمد راه توسعه را بی‌ماید می‌تواند هم‌چون ارگانیسمی زنده عمل نماید که با جامعه بیولوژی سینتتیک پیرامونی در منطقه و در عرصه بین‌المللی، فعالیت کرده و به رقابت برخیزد.

#### ۱-۴-۴- راهبرد چهارم: آموزش نیروی انسانی برای فراهم آوردن

##### توده بحرانی نیروی کار در عرصه بیولوژی سینتتیک

توجه به توسعه نیروی انسانی ماهر، پرانرژی و مسئولیت‌پذیر با دیدگاه‌های نوآورانه که بتواند از مرزهای رشته‌ای گذر نماید و در گفتمان میان رشته‌ای مشارکت جوید، از اولویت‌های هر نقشه راه توسعه بیولوژی سینتتیک می‌باشد. تربیت نیروی انسانی برای این توسعه، مقاطع کارشناسی ارشد، دکتری و پسادکتری را می‌طلبد تا بتوان از میان آن‌ها، بیولوژیست‌های سینتتیک نسل آینده و رهبران این عرصه را خلق کرد. در اتحادیه اروپا بیش از ۵۰ پژوهشگر و انستیتو شامل کالج سلطنتی انگلستان، آموزش‌های در حد پایه کارشناسی ارشد را ارائه می‌دهند.

در نقشه راه توسعه بیولوژی سینتتیک ایران نیز می‌بایست در مراکز عالی این دانش و نیز در دانشگاه‌های قطب در مناطق آمایشی ده‌گانه، آموزش میان رشته‌ای بیولوژی سینتتیک و بیولوژی سیستمی را تدوین

کرد و برنامه آموزشی را بر اساس مأموریت هر کلان منطقه، طراحی نمود. بی شک در مراکز تحقیقاتی زیست فناوری و مراکز تعالی بیولوژی سینتتیک نیز می توان به پذیرش دانشجویان مقاطع دکتری و پسادکتری اقدام نمود تا بتوان توده‌ای بحرانی از نیروی انسانی را برای پیشبرد اهداف بیولوژی سینتتیک فراهم نمود. همچنین می توان آموزش بیولوژی سینتتیک را برای دانشجویان به گونه‌ای طرح ریزی نمود که این دانشجویان ضمن بهره برداری از مفاد درس نامه‌ای، به صورت عملی، در تولید سلول های یوکاریوتیپ با ژنوم کاملاً سینتتیک نیز مشارکت نمایند. از سوی دیگر، طراحی برنامه های نوآورانه در جوار تدوین کتب جامع، ضروری می باشد (مانند طراحی منابع تحت وب که به صورت دوره های آنلاین باز گسترده<sup>۱</sup> در اختیار دانشجویان قرار می گیرد).

در دوره آموزشی مقطع کارشناسی، آموزش اصول میان رشته‌ای و در دوره تحصیلات تکمیلی، کار میان رشته‌ای با مشارکت خبرگان آزمایشگاه تر<sup>۲</sup> بیولوژی، طراحی مهندسی و مدل سازی و خبرگان در گستره های اخلاقی، قانونی و جنبه های اجتماعی عرصه بیولوژی سینتتیک ضروری می باشد (۲۰). در دوره آموزشی، می بایست بر روی مهندسی زیستی، مهندسی شیمی، بیوفیزیک، بیولوژی سیستم ها، سامانه های فیزیولوژیک، فناوری های تصویربرداری پیشرفته و آموزش ابزارهای محاسباتی و آنالیز داده ها، تأکید ویژه گذاشت.

<sup>1</sup> MOOCS

<sup>2</sup> Wet-Lab

### ۱-۴-۵- راهبرد پنجم: مردمی کردن دانش بیولوژی سینتتیک

آموزش و یادگیری، آگاه سازی و درگیر نمودن جامعه پیرامون این که چگونه دانش بیولوژی سینتتیک می تواند بزرگترین سودمندی ها را برای جامعه خلق نماید، در پذیرش این دانش بسیار حیاتی است؛ زیرا این دانش تحول برانگیز، بسیار گران و پرهزینه است و مردمی کردن آن به صورت شفاف و به شیوه ای دموکراتیک، می تواند در رشد و شکوفایی آن در مراحل اولیه تکاملی، بسیار مؤثر باشد (۱۹). از سوی دیگر، این مردمی کردن بیولوژی سینتتیک می تواند از نگرانی های جامعه پیرامون بیوتروریسم، ایمنی زیستی، آسیب به محیط زیست و دیگر نگرانی ها پیرامون مسائل اخلاقی و مذهبی نیز بکاهد (۴).

در کشورهای پیشرفته، آموزش بیولوژی سینتتیک را از مدارس سطح متوسطه آغاز کرده اند (۸ و ۲۱). برنامه غنی سازی دبیرستان توسط MIT، برنامه آموزشی خود را از فرایند کلون سازی ژن از آغاز تا انتها شامل کاربرد PCR، هم آوری قطعات DNA، انتقال DNA به سویه ای از باکتری میزبان و بیان کنترل شده توسط سامانه های بیان ژن تنظیم کرده است (۲۱). از سوی دیگر، در سطح جهانی، دانشجویان و دانش آموزان و کارآفرینان در فعالیت های رقابتی همچون iGEM شرکت کرده و توانمندی های خود را نشان می دهند؛ این برنامه رقابتی MIT که در سال ۲۰۰۳ آغاز شد، در تولد اصول بیولوژی سینتتیک و مردمی کردن این دانش، نقش به سزایی را داشته است. در این برنامه، دانشجویان، کارآفرینان و دانش آموزان دبیرستانی، در

طراحی و هم‌آوری سامانه‌های ژنتیکی خلاق با ترکیب کردن قطعات BioBrick موجود و خلق نمونه‌های جدید، اقدام می‌کنند (۸).



شکل ۵) نقشه راه پیشنهادی بیولوژی سینتتیک برای جمهوری اسلامی ایران

خوشبختانه در کشور عزیزمان، ما تجربه برنامه‌های سامان یافته‌ای را در سطح مدارس در مقاطع مختلف برای توسعه دانش‌های سلول‌های بنیادی و نانو فناوری داشته‌ایم که همسان این برنامه را می‌توان برای بیولوژی سینتتیک تدارک دید. همچنین با درگیر نمودن سیاست‌گذاران، نمایندگان بخش‌های گوناگون صنعت و مردم، چشم‌انداز بیولوژی سینتتیک جهت رشد، توسعه و شکوفایی جامعه را روشن نمود.

## ۱-۵- چالش‌های نقشه‌راه توسعه بیولوژی سینتتیک

برای تدوین این نقشه‌راه، ما به فشار دوجانبه از «بالا به پایین» از سوی بالاترین نهادهای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری در عرصه توسعه دانش و فناوری (مانند درج مفاد توسعه بیولوژی سینتتیک در نقشه علمی کشور و در سیاست‌های ابلاغی مقام معظم رهبری در توسعه علم و فناوری) و همچنین از «پایین به بالا» از سوی نهادهای انجمن‌های علمی کشور، نمایندگان صنایع و مردم نیاز داریم. هر چند که راهبردهای پیشنهادی برای نقشه‌راه توسعه بیولوژی سینتتیک، ظهور و رشد و نمو این دانش را هدف قرار داده است اما با تکامل این علم در کشور، می‌توان نقشه‌راه تکمیلی دوم را با هدف تجاری‌سازی و رقابت در صحنه منطقه‌ای و بین‌المللی نگارش نمود. چنین رویکردی نیز در نقشه‌راه انگلستان مشاهده می‌شود. در نقشه‌راه بیولوژی سینتتیک انگلستان در سال ۲۰۱۲ پایه‌سازی چهارچوب توسعه دانش بیولوژی سینتتیک را هدف قرار داده بود، اما در نقشه‌راه سال ۲۰۱۶، به سوی جنبه‌های ترجمانی این علم و صنعتی‌سازی آن میل نمود و با عنوان «طراحی زیستی برای اقتصاد زیستی» نشان داد که فصل برداشت از باغ شکوفایی بیولوژی سینتتیک در صحنه کار برای این کشور فرا رسیده است. هم‌اکنون بیش از ۵۰ استارت‌آپ، شرکت‌های کوچک و متوسط (SMEs) و شرکت‌های بزرگ در بیولوژی سینتتیک درگیر شده‌اند و سرمایه‌گذاری به سوی این دانش، با شتاب در جریان است (۲۱).

بنابراین، بحث‌های مربوط به تجاری‌سازی، مالکیت فکری و ترجمان

دانش به سوی کاربرد را هر چند که جامعه علمی کشور ما دیگر چندان با آن‌ها بیگانه نمی‌باشد را می‌توان به شکل جزئی‌تر در تکمیل نقشه راه، در سال‌های نه چندان دور، در آینده، لحاظ نمود. از سوی دیگر، جهت بحث‌های اخلاق زیستی، تنظیم مقررات برای رشد و شکوفایی بیولوژی سینتتیک و مسائل مربوط به ایمنی زیستی و امنیت زیستی که از چالش‌های عمده می‌باشند را می‌توان از ذخیره تجربیات پیشین پیرامون توسعه دانش زیست فناوری و سلول‌های بنیادی که در کشور موجود می‌باشند، استفاده نمود. این مسائل، چالش‌های عمده مربوط به بیولوژی سینتتیک را به عرصه عمل می‌کشاند اما به یاد داشته باشیم که در نقشه راه بیولوژی سینتتیک کشورهای دیگر نیز به این مسائل به خوبی پرداخته نشده است (۱۹). اما کریگ و نتر در گزارش ۲۰۱۴ خود عنوان کرده است، سامانه مقرراتی موجود (در کشور آمریکا) برای محصولات مهندسی شده ژنتیکی، به خوبی می‌توانند از پس ارگانسیم‌های مهندسی شده بیولوژی سینتتیک که در راه هستند، برآید (۲۹).

## ۱-۶- منابع فصل اول

1. Synthetic Biology: scope, applications and implications. 2009. Royal Academy of Engineering. (Accessed 29 Oct 2017 at <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/synthetic-biology-report>).
2. Brüller W, Gansberger M, Hohegger R, et al. Synthetic Biology. 2014. (Accessed 29 Oct 2017 at [https://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/2/6/8/CH1052/CMS1422371020012/synthetic\\_biology\\_02122014\\_final.pdf](https://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/2/6/8/CH1052/CMS1422371020012/synthetic_biology_02122014_final.pdf)).
3. Benner SA, Sismour AM. Synthetic biology. *Nat Rev Genet*. 2005;6:533-43.
4. Emerging Policy Issues in Synthetic Biology. 2014. Organization For Economic Co-Operation & Development (OECD).
5. Philosophy of Systems and Synthetic Biology. 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. (Accessed 29 Oct 2017 at <https://plato.stanford.edu/entries/systems-synthetic-biology/>).
6. Ding Y, Wu F, Tan C. Synthetic Biology: A Bridge between Artificial and Natural Cells. *Life (Basel)*. 2014; 4(4): 1092-116.
7. Holdrege C. When Engineers Take Hold of Life: Synthetic Biology. 2014. (Accessed 29 Oct 2017 at <http://natureinstitute.org/pub/ic/ic32/synbio.pdf>).
8. Synthetic Biology: An Introduction. 2011. European Academies Science Advisory Council. (Accessed 29 Oct 2017 at [http://www.easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Synthetic%20Biology%20An%20Introduction%20Feb%202011.pdf](http://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Synthetic%20Biology%20An%20Introduction%20Feb%202011.pdf)).

9. Peccoud J, Isalan M. The PLOS ONE synthetic biology collection: six years and counting. *PloS one*. 2012;7 (8):e43231.
10. Kis Z, Pereira HS, Homma T, et al. Mammalian synthetic biology: emerging medical applications. *J R Soc Interface*. 2015; 12(106): 1-18.
11. Courbet A, Renard E, Molina F. Bringing next-generation diagnostics to the clinic through synthetic biology. *EMBO Mol Med*. 2016; 8(9): 987-91.
12. May M. Synthetic biology's clinical applications. 2015. (Accessed 29 Oct 2017 at <http://www.sciencemag.org/custom-publishing/technology-features/synthetic-biology-s-clinical-applications>).
13. Evans A, Ratcliffe E. Rising influence of synthetic biology in regenerative medicine. *Engineering Biology*. 2017; 1(1): 24-29.
14. Cachat E, Davies JA. Application of Synthetic Biology to Regenerative Medicine. *J Bioeng Biomed Sci*. 2011; S2: 003. (Accessed 29 Oct 2017 at <https://www.omicsonline.org/application-of-synthetic-biology-to-regenerative-medicine-2155-9538.S2-003.pdf>).
15. Think synthetic biology. 2016. Ontario Genomics. (Accessed 29 Oct 2017 at [http://www.ontariogenomics.ca/syntheticbiology/Ontario\\_Synthetic\\_Biology\\_Report\\_2016.pdf](http://www.ontariogenomics.ca/syntheticbiology/Ontario_Synthetic_Biology_Report_2016.pdf)).
16. Eight great technologies. 2013. UK Department for Business, Innovation and Skills. [www.gov.uk](http://www.gov.uk). (Accessed 29 Oct 2017 at <https://www.gov.uk/government/speeches/eight-great-technologies>).
17. National Bioeconomy Blueprint. 2012. Office of Science and Technology Policy: [whitehouse.gov](http://whitehouse.gov). (Accessed 29 Oct 2017 at [https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national\\_bioeconomy\\_blueprint\\_exec\\_sum\\_april\\_2012.pdf](https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/microsites/ostp/national_bioeconomy_blueprint_exec_sum_april_2012.pdf)).

18. Rejeski D, Fellow G, Center W. Synthetic Biology in the United States: A Brief History of an Emerging Innovation System. 2016. (Accessed 29 Oct 2017 at [http://platformvaluenow.org/wp-content/uploads/2017/06/SyntheticBiologyCaseStudy\\_Rejeski.pdf](http://platformvaluenow.org/wp-content/uploads/2017/06/SyntheticBiologyCaseStudy_Rejeski.pdf)).
19. Si T, Zhao H. A brief overview of synthetic biology research programs and roadmap studies in the United States. *Synth Syst Biotechnol.* 2016; 1(4): 258-64.
20. Clarke LJ, Kitney RI. Synthetic biology in the UK - An outline of plans and progress. *Synth Syst Biotechnol.* 2016; 1(4): 243-57.
21. Next steps for European synthetic biology: a strategic vision from ERASynBio. 2014. (Accessed 29 Oct 2017 at <http://www.evolva.com/wp-content/uploads/2016/01/EU-Synbio-Vision.pdf>).
22. Workshop on Synthetic Biology. 2015. European Commission. (Accessed 29 Oct 2017 at [https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific\\_commitees/emerging/docs/ev\\_20151210\\_booklet\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/health/sites/health/files/scientific_commitees/emerging/docs/ev_20151210_booklet_en.pdf)).
23. Singh V, Jain R, Dhar PK. Challenges and Opportunities for Synthetic Biology in India. *Curr Synthetic Sys Biol.* 2014; 2(3): e112.
24. Singh D, Dhar PK. Exploring the Future of Synthetic Biology in India and its Probable Pathways from Infancy to Maturity. *Curr Synthetic Sys Biol.* 2013; 1(1): 106.
25. Gronvall GK. US Competitiveness in Synthetic Biology. *Health Secur.* 2015; 13(6): 378-89.
26. Hayden E. Tech investors bet on synthetic biology. *Nature.* 2015; 527: 19. (Accessed 29 Oct 2017 at [https://www.nature.com/polopoly\\_fs/1.18715!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/527019a.pdf?origin=ppub](https://www.nature.com/polopoly_fs/1.18715!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/527019a.pdf?origin=ppub)).
27. Nabipour I, Assadi M. Infrastructures for systems medicine in Iran's health roadmap. *Iran South Med J* 2014, 17(5): 974-92

28. Nabipour I, Mosleh A, Assadi M. Role of the future creative universities in the triple helix of science and technology corridors. *Iran South Med J* 2015, 17(6): 1068-89.
29. Carter SR. Synthetic Biology and the U.S. Biotechnology Regulatory System Challenges and Options. 2014. J. Craig Venter Institute. (Accessed 29 Oct 2017 at <http://www.jcvi.org/cms/fileadmin/site/research/projects/synthetic-biology-and-the-us-regulatory-system/full-report.pdf>).

**فصل دوم**  
**فلسفه در بیولوژی سینتتیک**



## ۲-۱- مقدمه

بیولوژی سینتتیک، در گزارش آکادمی سلطنتی مهندسی به صورت یک رشته تعریف شده است که طراحی و مهندسی قطعات، ادوات و سامانه‌های بر پایه بیولوژی را هدف قرار داده است (۱). این شاخه از دانش، بسیار نوین می‌باشد که مراحل رشد چشمگیری را در گذر بوده و توجه شگرفی را از پژوهشگران، سیاست‌گذاران و عموم مردم به خود جلب نموده است، زیرا دارای این پتانسیل است که روابط ما را با جهان زنده به شکل فزاینده‌ای دچار تحول نموده و به ما این توان را خواهد داد که موجودات زنده را دستکاری نماییم (۲).

از این رو، این دانش یک گستره بسیار هیجان‌انگیز و رو به تکامل است که طراحی (یا بازطراحی) و ساختن مسیرهای زیستی مصنوعی نوین، ارگانسیم‌ها، ادوات و دستگاه‌های بیولوژیک را مورد توجه خود قرار داده است. زیرا به کارگیری اصول مهندسی در اجزاء بیولوژیک، این اجازه را به ما می‌دهد که فعالیت سلول‌ها را مورد پویش، تغییر و دستکاری قرار دهیم. از این رو، جعبه ابزار بیولوژی سینتتیک شامل عملکردهای مهندسی و بیولوژیک است که به دستکاری ملکولی، آنالیز داده‌های ژرف و الگوریتم‌های رایانه‌ای می‌پردازد. بدین سان، بیولوژی سینتتیک

می‌تواند با خلق قطعات، ادوات و سامانه‌های زیستی، به چالش‌های پرفشار بشر کنونی در گستره‌های سلامت، تولید غذا و محیط زیست بپردازد (۳).

هر چند که بیولوژی سینتتیک برای دانشمندان همچون زرادخانه‌ای است که ابزارهای نوین را جهت تغییر کارآمد و فرادقیق عملکردهای ملکولی سلول‌ها با مزیت‌های کاربردی در گستره پزشکی فراهم کرده است اما با پیشگامی کریگ ونتر<sup>۱</sup> در خلق یک میکروارگانیسم مصنوعی که دارای ژنوم کمینه<sup>۲</sup> به گونه‌ای بوده تا حداقل بتواند زنده بماند، مباحث بیولوژی سینتتیک به گستره‌های نقد فلسفی ورود کرده است (۴). از آنجا که حوزه نفوذ بیولوژی سینتتیک و چتر گسترده آن از بیولوژی ملکولی و مهندسی ژنتیک بسیار فراتر است و با توسعه و کاربرد مدل‌های سینتتیک، محاسبه‌ای و ریاضیاتی در پاسخ به مسائل پیچیده و چالش‌های موجود در علوم زیستی سروکار دارد، گستره‌های نوین کشف نشده‌ای را برای تجزیه و تحلیل فلسفی پیش روی فیلسوفان می‌گشاید و با طرح کردن مدل‌های محاسباتی چندمقیاسی و اشکال صناعی حیات، به روابط میان سامانه‌های مصنوعی و زیستی، چنگ می‌اندازد (۵و۶). بدین سان، شاید هیچگاه در طول تاریخ حیات فرهنگی و علمی بشر، این گونه بیولوژی به مباحث فلسفی پیوند نخورده باشد. هدف از این نوشتار،

<sup>1</sup> Craig Venter

<sup>2</sup> Minimal Genome

طرح نمودن سؤالاتی فلسفی است که با پیشرفت‌های دو دههٔ اخیر در گسترهٔ دانش بیولوژی سینتتیک، روی داده است.

## ۲-۲- خلق دانش در بیولوژی سینتتیک

ریچارد فاینمن<sup>۱</sup> برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک نظری در پیش از مرگ خود در سال ۱۹۸۸، در گوشه‌ای از تخته سیاه خود در کالتک<sup>۲</sup> چنین نوشت: *”آنچه که من نتوانم خلق کنم، درک نمی‌کنم.”* این نوشته بسیار مورد ارجاع فیلسوفان بیولوژی سینتتیک قرار گرفت. ریشه‌های چنین اندیشه‌ای را می‌توان در گفتارهای توماس آکویناس<sup>۳</sup>، فرانسیس بیکن<sup>۴</sup>، گیام باتیستا ویکو<sup>۵</sup> یافت. آکویناس چنین بیان می‌کند که خدا به حق می‌داند جهان چیست زیرا او آن را خلق کرده و فقط کسی از چیزی می‌داند که آن را خلق کرده باشد. بیکن نیز قدرت کنترل یا ساخت اشیاء را یک شاخص دانش قلمداد می‌کند. چنین است که هم اکنون آنچه به عنوان «دانش قدرت است» را در پیوست به او می‌دانند. ویکو فیلسوف ایتالیایی نیز در این باره چنین گفته است: *”حقیقت و ساختن، دو سویهٔ یکدیگر هستند.”*

آشکار نیست که چرا فاینمن چنین شرط لازمی را برای «درک کردن

<sup>1</sup> Richard Feynman

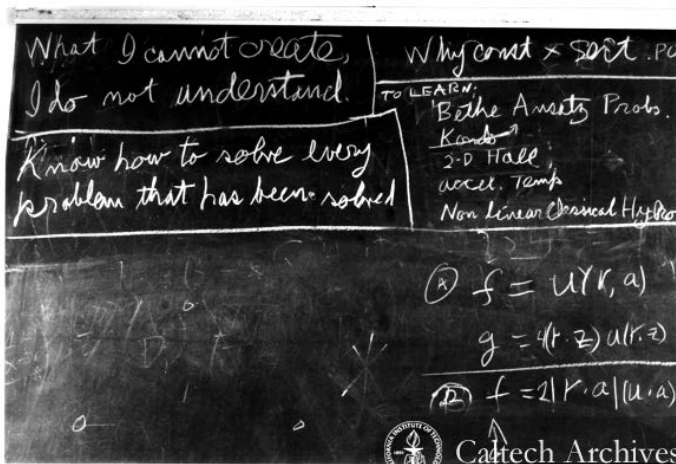
<sup>2</sup> Caltech

<sup>3</sup> Thomas of Aquinas

<sup>4</sup> Francis Bacon

<sup>5</sup> Giambattista Vico

و دانستن» یعنی «خلق کردن» بیان کرده است. شاید این گفتار اعتراضی بوده است به تئوری ریسمان‌ها در فیزیک و شاید اشاره‌ای بوده است به تجربه اخیر او از کشف و نشان دادن علت حادثه شاتل فضایی چالنجر. در هر صورت، شاید بتوان این دیدگاه‌ها را چنین سرشته نمود (۷)؛ «اهمیتی ندارد که چقدر مدل‌ها یا تئوری‌های پیش‌بینی‌کننده و اکتشافی ما خوب باشند، این‌ها برای «درک کردن» کافی نیستند مگر آن که شرط دیگری نیز برآورده شود. این شرط لازم آن است که با کمک این مدل‌ها یا تئوری‌ها، کسی بتواند در ذهن دیگری یا در آزمایشگاه، فرایند یا پدیده مورد سؤال را خلق کند» (۷).



شکل ۶) ریچارد فاینمن برندهٔ جایزهٔ نوبل فیزیک نظری در پیش از مرگ خود در سال ۱۹۸۸، در گوشه‌ای از تخته سیاه خود در کالتک چنین نوشت:

“آنچه که من نتوانم خلق کنم، درک نمی‌کنم.”

بر علیه این گفتار در عالم واقع، بیاناتی را می‌توان فراخواند مانند آن که اختر فیزیک‌دانان درک قابل قبولی از ویژگی‌های فیزیکی کهکشان‌های دور را بدون آن که آن‌ها را به صورت مادی بسازند، به دست آورده‌اند و زیست‌شناسان نیز به نظر می‌رسد که با مشاهده آزمایش‌های خود به درجه‌ای از ادراکی پیرامون سامانه‌های زیستی رسیده باشند؛ بدون آن که توانسته باشند این سامانه‌ها را خلق کرده باشند.

می‌توان معادله فاینمن را اینگونه تبدیل کرد «آنچه من خلق می‌کنم، می‌توانم درک نمایم.» از این رو توانایی خلق به نظر می‌آید که شرط کافی برای درک کردن باشد (۷).

هر چند که به این موضوع، دوباره پس از طرح روش شناسی «درک کردن و طراحی نمودن» در بیولوژی سینتتیک، باز می‌گردیم و از دیدگاه فلسفه آن را مورد موشکافی قرار می‌دهیم ولی این گفتار فاینمن و دیگر فلاسفه این را آشکار می‌سازد که با خلق کردن می‌توان به ادراک و دانایی نایل شد. این سؤال اساسی از این گفتار برمی‌خیزد که چه گونه‌ای از درک منظور است و آیا این درک کردن به عنوان سنگ بنای تولید دانش تفوریک به کار خواهد آمد؟ آیا با ساختن و خلق کردن سامانه‌های بیولوژیک سینتتیک ما می‌توانیم به ادراک کامل از سطح پیچیدگی و به معنای غایی از حیات چنگ اندازیم؟

پیش از این که به این پرسش‌های فلسفی بپردازیم لازم است با شیوه ساختن و خلق کردن «شیوه عمل خلق دانش» در بیولوژی

سینتتیک نیم‌نگاهی داشته باشیم تا سپس به فرایندهای پیچیده «ادراک کردن و خلق دانایی» از لا به لای فرایندهای «خلق کردن» نظر افکنیم.

### ۲-۳- شیوه عمل خلق دانش در بیولوژی سینتتیک

در پناه بسیاری از اهداف، بیولوژی سینتتیک را به صورت توانمندی‌های زیستی فناورانه بیولوژی ملکولی به ویژه در شکل ژنومیک می‌نگرند و از آنجا که در تکنیک‌ها، جمع‌آوری داده‌ها و سونگری تحقیقاتی، بیولوژی سینتتیک از فرایندهای مهندسی سود می‌جوید، پاره‌ای از دانشمندان را به این اشتباه انداخته است که رهیافت بیولوژی سینتتیک به سوی سامانه‌های زیستی، همانند مهندسی است. هر چند که مسلماً رهیافت مهندسی در شیوه عمل خلق دانش در بیولوژی سینتتیک اثر چشمگیری دارد اما رهیافت مهندسی بر بیولوژی سینتتیک به گونه‌ای بسیار بغرنج و پیچیده اثر خود را فرود می‌آورد که نمی‌توان در ایده‌آل مهندسی «خالص» به آن نظر انداخت.

مجموعه‌ای به هم پیوسته از جریان‌های شیوه‌های عمل که متفاوت می‌آیند، شیوه عمل خلق دانش در بیولوژی سینتتیک را شکل می‌دهند. مائورین اومالی<sup>۱</sup> از دانشگاه اکستر انگلستان، سه جریان شیوه عمل را در بیولوژی سینتتیک جهت خلق دانش فهرست نموده است (۸). نخستین جریان، ساخت دستگاه بر پایه DNA<sup>۲</sup> است. در این شیوه عمل،

<sup>۱</sup> Maureen O'Malley

<sup>۲</sup> DNA-based device construction

بیولوژیست سینتتیک کار خود را با سنتز DNA آغاز می کند و کار را ادامه می دهد و هدف او زدودن پیچیدگی از بیولوژی، با هدف کنترل کامل بر فرایندهای زیستی است که سنتز می شوند.

اصول حاکم بر این رهیافت شامل متعارف سازی<sup>۱</sup> ناهمبسته کردن<sup>۲</sup> و انتزاع<sup>۳</sup> اجزاء و توصیف عملکردی است. در حقیقت، در این جریان از شیوه عمل، اجزاء متمایز از دید عملکردی که قابل تعویض می باشند را می توان طراحی نمود و به شیوه قطعه قطعه ای و یکانی<sup>۴</sup> پیاده نمود. یعنی همان فرایند عملی که در رهیافت بنیاد BioBrick پیگیری می شود. نمونه های عملی آن را می توان در ساخت repressilator، کلیدهای سینتتیک<sup>۵</sup>، و تولید سینتتیک آرتمیسینین<sup>۶</sup> به عنوان داروی ضد مالاریا مشاهده کرد (۵)، اما این که چقدر این متعارف سازی و ساخت قطعات قابل تعویض بتواند همسان با وجود پیچیدگی های زیستی بوده و از آن ها تبعیت نماید، خود جایگاه بحثی ژرف در فلسفه بیولوژی سینتتیک است که سپس به آن خواهیم پرداخت.

دومین جریان، مهندسی سلولی پیش ران با ژنوم<sup>۷</sup> است. در این شیوه

عمل برای خلق، بیولوژیست سینتتیک در راستا قراردادان و یکانی کردن<sup>۸</sup>

<sup>1</sup> Standardization

<sup>2</sup> Decoupling

<sup>3</sup> Abstraction

<sup>4</sup> Modular

<sup>5</sup> Synthetic toggle switch

<sup>6</sup> Artemisinin

<sup>7</sup> Genome-driven cell engineering

<sup>8</sup> Modularizing

ژنوم از طریق آنالیز ژنوم کمینه (مینی مال)<sup>۱</sup>، سنتز ژنوم کامل و پیوند ژنوم‌های تغییر یافته یا «بیگانه» به سلول‌ها، متمرکز می‌شود. پژوهندگان در این شیوه عمل، ژنوم را به صورت مدول (یکان) قابل ساده‌سازی و قابل جایگزین می‌پندارند که فرایندهای سلولی را هدایت کرده و فقط به سادگی نیاز است که یک پیوند برقرار نمود تا به شاسی سلولی<sup>۲</sup> اتصال یابد (۸). از این رو، تفاوت این شیوه عمل با شیوه جریان اول آن است که شیوه اول بر مدولاریتی (یکانی کردن) تمرکز دارد ولی این شیوه بر عملکرد نمودن ژنوم کامل یا سلول کامل، تمرکز می‌یابد. برای به دست آوردن عملکرد در این شیوه لازم است که ژنوم‌های تغییر یافته و یا بیگانه، به «سلول شاسی»، پیوند یافته تا عملکردهای جدیدی به دست آید و همچنین با سنتز ژنوم کمینه نیز سروکار دارد. مفهوم ژنوم کمینه بر این ایده استوار است که ارگانسیم‌های موجود، دارای ژنوم‌هایی هستند که پیچیده‌تر از آن می‌باشند و برای عملکردهای پایه جهت بقا و تولید مثل مورد نیاز است.

اولین مدل سلول کامل در بیولوژی سینتتیک، پاتوژن میکروبی انسانی مایکوپلاسما ژنیتالایوم<sup>۳</sup> بود که جهت پژوهش‌های ژنوم کمینه مورد استفاده قرار گرفت. در سال ۲۰۱۰، دانشمندان پژوهشگاه کریگ ونتر، یک ژنوم سینتتیک از گونه‌ای دیگر از باکتری از همین جنس

---

<sup>1</sup> Minimal genome analysis

<sup>2</sup> Cell chassis

<sup>3</sup> Mycoplasma genitalium

به نام مایکوپلازما میکوئیدس<sup>۱</sup> را خلق کردند. اخیراً دانشمندان موفق شدند که ژنوم این باکتری را به ۴۷۳ ژن کاهش دهند به گونه‌ای که می‌تواند هنوز زنده مانده و تولید مثل کند. در آینده‌ای نزدیک شاهد دستکاری و کنترل عملکردی ژنوم‌های گونه‌های پیچیده‌تر همچون مخمرها و جلبک‌ها خواهیم بود (۵).

سومین جریان خلق دانش، بر خلق پیش سلول<sup>۲</sup> با استفاده از میسل‌ها<sup>۳</sup>، خودهم‌آوری<sup>۴</sup> لیپیدی و وزیکول‌های با ریبوزوم تمرکز دارد. هدف بیولوژیست‌های سینتتیک در این شیوه عمل، ساخت سلول‌های کمینه<sup>۵</sup> است که به سلول‌های زنده در بسیاری از جهات اساسی، قرابت دارند (۸). از آنجا که پژوهندگان این شیوه عمل تلاش دارند تا پیچیدگی حیات را تقلیل دهند و به سلول زنده به شکل ساده، نزدیکی بیابند، شاید بتوانند به پرسش‌های فلسفی بنیادین مانند آن که بالاخره حیات چیست نیز پردازند. آن‌ها برای پاسخ دادن به این پرسش به ساخت و دستکاری وزیکول‌هایی دست زده‌اند که با سلول‌های آغازین شباهت دارند. آن‌ها همچنین از طریق شبیه‌سازی رایانه‌ای پیشرفته شبکه‌های تنظیم ژنی، به این موضوع می‌پردازند. دانشمندان ممکن است به شیوه‌های دیگر و ساده‌تر به خلق اشکال حیات سینتتیکی نایل شوند و از این رو گستره

---

<sup>1</sup> *Mycoplasma mycoides*

<sup>2</sup> Protocell

<sup>3</sup> Micelles

<sup>4</sup> Self-assembly

<sup>5</sup> Minimal cells

پژوهشی آن‌ها با پروژه‌هایی که در جریان دوم خلق دانش (مهندسی سلول بر پایهٔ ژنوم) حاکم بوده و به نیازمندی‌های کمینه برای سامانه‌های زیستی جهت عملکرد، بقاء و تولید مثل می‌پردازند، پیوند بیابد (۵).

#### ۴-۲- رهیافت‌های طراحی<sup>۱</sup> در بیولوژی سینتتیک

بیولوژی سینتتیک از سه رهیافت مکمل همدیگر برای پیاده‌سازی اهداف خود در طراحی سامانه‌ها و دستگاه‌های بیولوژیک بهره می‌برد. نخستین رهیافت، مهندسی روبه جلو<sup>۲</sup> است که اشاره به طراحی سیستم‌ها با عملکردهای نوین دارد که این عمل را با پرداختن به مدل سطح بالایی موجود (برای مثال کد یا سلول زندهٔ موجود)، انجام می‌دهد. مهندسی رو به جلو یا بازمهندسی<sup>۳</sup> می‌تواند به سامانه‌های پیچیده‌تر منتهی شود؛ البته ساده‌سازی نیز ممکن است از طریق پیاده‌سازی زبان کدگذاری انتزاعی یا از طریق رهیافتی استقرایی یا سیم‌کشی کردن مجدد<sup>۴</sup> مدارهای ژنتیکی، دنبال شود. در مهندسی معکوس<sup>۵</sup> که دومین رهیافت در سینتتیک بیولوژی است و اشاره به هدفی است که درک عملکرد یک سیستم را از طریق رفتن به سوی عقب توسط بررسی سامانهٔ موجود در متن را جستجو می‌نماید. جستجو برای موتیف‌ها (نقش مکرر) شبکه<sup>۶</sup>، مثالی است که بیولوژیست‌های

<sup>1</sup> Design

<sup>2</sup> Forward engineering

<sup>3</sup> Re-engineering

<sup>4</sup> Rewiring

<sup>5</sup> Reverse engineering

<sup>6</sup> Network motifs

سینتتیک در پی معکوس کردن ساختار یک سامانه جهت درک توانمندی‌های عملکردی آن هستند. در حقیقت، در مهندسی معکوس، پژوهندگان اغلب در جستجوی آن هستند که سیمای ژنریک طراحی سیستم یا اصول طراحی را شناسایی کرده و در ساخت سامانه‌های جدید به کار ببرند. شناخت اصول طراحی بیولوژیک می‌تواند درک روابط ساختار - عملکرد را در سامانه‌های گوناگون افزایش دهد (۵).

این را باید به یاد داشته باشیم که هر چند بیولوژی سینتتیک از رهیافت‌های مهندسی رو به جلو و معکوس (با پروتکل طراحی ثابت) یا طراحی منطقی<sup>۱</sup> استفاده می‌کند، اما بیشتر میل به کاربست رهیافت متضاد با طراحی منطقی به نام کلاچینگ<sup>۲</sup> را دارد. رهیافت سوم بیولوژی سینتتیک در طراحی یا کلاچینگ به صورت سرهم بندی کردن رو به جلو یا معکوس<sup>۳</sup> نیز توصیف شده است. در رهیافت کلاچینگ، دستیابی به عملکرد خاص، بیشتر از طی کردن مسیر منطقی به آن عملکرد، مدنظر قرار می‌گیرد. در کلاچینگ، اصلاً مهم نیست که چقدر فرایند رسیدن به عملکرد خاص به صورت ناهنجار است و یا چقدر روابط میان بعضی از اجزاء تشکیل دهنده و مداربندی<sup>۴</sup> کم بازده می‌باشد (۸).

در حقیقت، در کلاچینگ، تجزیه و ساخت مدولار به صورت سیکل‌های تکرار شونده تا رسیدن به راه‌حل‌های مرحله‌ای و تدریجی

<sup>1</sup> Rational design

<sup>2</sup> Kludging: Clumsy, lame, ugly, dumb, but good enough

<sup>3</sup> Reverse and forward tinkering

<sup>4</sup> Circuitry

ادامه می‌یابد و فرضیه‌های طراحی حاکم بر ساخت سامانه‌های سینتتیک به صورت مداوم، مورد ارزیابی قرار می‌گیرند (۵). از این رو، این رهیافت، یک فرایند مؤثر و بسیار خلاقانه است (۸).

شاید چنین به نظر آید که رهیافت کلاچینگ در بیولوژی یک پراگماتیسم آزمون و خطا است که از اصول طراحی منطقی که ساخت سامانه‌ها و دستگاه‌های بیولوژیک را بر پایه شواهد، تئوری و نقشه پیگیری می‌کند به دور باشد و بیشتر خوی و منش سرهم‌بندی بی‌منطقی و کور را داشته باشد. اما اینگونه نیست؛ زیرا آزمون و خطا در کلاچینگ و پیگیری کردن فرایند تکرار شونده سازگarmندی و تنظیم کردن سامانه‌ها و دستگاه‌های بیولوژیک ساخته شده در طی این فرایندهای تکرار شونده، می‌توانند خود به صورت راهبردهای طراحی قلمداد شوند که در فقدان اطلاعات پیرامون جزئیات مکانیکی، از محدودیت‌های دانشی عبور نموده و مدل‌های (یکان‌ها) پابرجایی را خلق نمایند (۷). از این رو این رهیافت هر چند که اصول منطقی مهندسی را در طراحی به کار نمی‌برد، اما خود نیز فقط یک فرایند سرهم‌بندی نیست و به صورت نظام‌مندی، عملکرد یک سامانه ساخته شده را بهینه می‌سازد. در طی این بهینه‌سازی در فرایند تکرار شونده طراحی، پیچیدگی مضاعفی خلق می‌شود. زیرا با راهبرد منطقی جهت تنظیم کردن و سازگarmندی سامانه‌های ساخته شده زیستی، آن‌ها سامانه‌های بیولوژیک را تقلید می‌کنند. در این پویش، این مدول‌های سنتز شده همانند جعبه

ابزار، در رهیافت کلاچینگ نقش ایفا می‌کنند که با خلق دانش بیشتر، موجب خلق پیچیدگی بیشتر می‌شوند (۷). به زبان دیگر، بیولوژی سینتتیک با نمایش روابط ساده بسیار، موجب خلق دانش به گونه‌ای می‌شود که نه تنها پیچیدگی سامانه‌های زیستی را کاهش نمی‌دهد بلکه بر پیچیدگی آن‌ها نیز می‌افزاید.

## ۲-۵- از خلق دانش به ادراک

همان‌گونه که اشاره شد، بیولوژی سیستمی به عنوان پایه تئوریک جهت طراحی در بیولوژی سینتتیک مورد استفاده قرار می‌گیرد و بیولوژی سینتتیک با هدف طراحی سیستم‌ها و دستگاه‌های زیستی، از رهیافت‌های مهندسی معکوس یا مهندسی رو به جلو، به شکل طراحی منطقی و یا سرهم‌بندی رو به جلو یا معکوس بهره می‌برد. اما با چنین رهیافت‌هایی برای طراحی و یافت روابط ساختار عملکرد در سامانه‌های گوناگون و خلق دانش، آیا امکان درک غایی از زیست حاصل می‌شود؟ در نگاه نخست چنین به نظر می‌آید که رهیافت‌های بیولوژی سینتتیک در آشکارسازی و شناخت سامانه‌های زیستی اینگونه می‌باشد که برای فرار از بغرنجی و پیچیدگی، سامانه‌ها را به مدل‌های ساده‌تر تقلیل می‌دهد و با دیدگاه مدولاریتی (یکانی) در پی آن است که با رهیافتی مهندسی به حیات، آن‌ها را به ماشین‌های ساده‌تر و ترکیب یافته از مدول‌ها فرو بکاهد. در مهندسی نرم‌افزار، مدولاریتی به معنای

گذاشتن خط و مرز پیرامون مجموعه‌ای از چیزها به گونه‌ای است که آن را از مابقی سیستم جدا می‌سازد. آنگاه مدول‌های جدا یافته از طریق تلاقی‌های کنترل شده، در ارتباط قرار می‌گیرند. اما آیا این گونه نگرستن مهندسی به سامانه‌های زیستی، امکان‌پذیر است؟ پاسخ این پرسش را می‌توان از گفتار خلایقانه مارک ایسالان<sup>۱</sup> و همکاران در تجربه آن‌ها در بیولوژی سینتتیک شبکه‌های باکتریایی یافت (۹).

”نتایج ما بیانگر آن است که محدودسازی یک شبکه به مدول‌های کوچک می‌تواند در بعضی از موارد همراه‌کننده باشد زیرا رفتار مدول‌ها به میزان عظیمی از مابقی شبکه‌ای که آن‌ها در آن نهفته‌اند، تأثیر می‌پذیرد.“

گرچه داشتن دیدگاه مدولار برای به دست آوردن موفقیت در رهیافت‌های مهندسی در بیولوژی حیاتی است، اما بیشتر چنین به نظر می‌رسد که مقوله مدولاریتی یک حکم تئوریک است که بیولوژی از آن تبعیت نمی‌کند (۸).

به زبان دیگر، جهان طبیعی از مرزهای مدولاریتی گذر می‌کند و تقریباً ناممکن است که بتوان سامانه‌های زیستی را با فشار مدولاریتی ترسیم نمود. هرچند که با مکانیستیک کردن رهیافت بیولوژی سینتتیک و به کارگیری کلاچینگ در خلق دانش، تلاش می‌شود که از فشار غیرمدولاریتی طبیعت گذر نمود ولی با شیوه و روش شناختی کنونی بیولوژی سینتتیک، تقریباً محال است که بتوان پیراهن مدولاریتی را بر

<sup>1</sup> Mark Isalan

تن طبیعت دوخت و یا به ماهیت غیرمدولاریتی آن چنگ انداخت و از این دیدگاه نمی توان به ادراک غایی در جهان زیست، دست یافت. با این وجود نباید این را فراموش کنیم که مدولار کردن طبیعت و اکتشاف رازهای آن با کشاندن رهیافت های مهندسی، می تواند حداقل به شناخت دون پایه و نه غایی منتهی شود و شاید با این رهیافت های ساده کردن پیچیدگی طبیعت، تا حدی بتوان به شناخت رسید؛ هرچند که این شناخت ادراک کامل و نهایی نخواهد بود و با رشد و تکامل روش شناسی علم شاید بتوان نقشه را به تدریج کامل نمود.

دوم آن که سامانه های زیستی دارای ناهماهنگی هستند و بیولوژیست های سینتتیک می بایست بتوانند از پس نوسانات فرایندهای درون سلولی و تنوع میان سلول های «یکسان» در شرایط محیط زیست «همسان» برآیند. از سوی دیگر، این موضوع تدریجاً پذیرفته می شود که ترکیب قطعات گوناگون با عملکردهای شناخته شده در قالب یک سامانه، لزوماً به عملکرد قابل پیش بینی و افزوده سامانه جدید، منتهی نمی شود زیرا توانمندی ها و رفتارهای نوینی ممکن است از چنین ترکیبات در سامانه نوین پدیدار آید (۸). از این رو، طرح در خلق سامانه ها و دستگاه های زیستی باید از دیدگاه بیولوژیک، انعطاف پذیر، الاستیک و پیچیده باشد تا بتواند نمایی از عملکرد سامانه زیستی واقعی را جلوه دهد. نکته سوم آن که تفاوت ماهیتی میان سازه های بیولوژی سینتتیک ساخته شده با اصول منطقی مهندسی، با جهان واقعی طبیعی وجود دارد؛

زیرا سازه‌های طبیعی با نیروی نرم تکامل تغییر می‌یابند و انتخاب طبیعی بر آن‌ها حکم می‌راند.

این به معنای آن نیست که سامانه‌ها و دستگاه‌های بیولوژی سینتتیک از دست انتخاب طبیعی می‌توانند گریز کنند بلکه به آن معنا است که قوانین و اصول پیچیده‌ای که خود نیز از انبوهی از سامانه‌ها و سیستم‌های پیچیده‌ای مشروب می‌شوند، به شکل تدریجی بر سامانه‌های بسیار پیچیده زیستی به گونه‌ای عمل می‌نمایند که درک و پیش‌بینی‌پذیری آن‌ها با سطح دانش کنونی برای ما بسیار دشوار است. بر این اساس بوده که داروین به ما نشان داده است که موجودات و فرایندهای بیولوژیک، حاصل تاریخ طبیعی هستند و نه طرح.

از این رو، سازه‌های بیولوژی سینتتیک نیز نمی‌توانند از فعالیت پرقدرت و فراگیر تکامل که از طریق انتخاب طبیعی اعمال می‌شود اجتناب نمایند و خود نیز به در مسیر «تنوع و تغییر» قرار می‌گیرند. بنابراین خلق دانش بر اساس طرح بیولوژی سینتتیک در جهان واقعی طبیعی، بدون در نظر گرفتن نیروی پرقدرت و نرم تکامل، بی‌معنی خواهد بود و از آنجا که این نیرو در گذر زمان که تعیین‌گر آن ما نیستیم حادث می‌شود، نمی‌توان پیرامون ادراک حاصل از این نیرو به صراحت و در حد پیش‌بینی‌پذیری، بحث کرد. شاید گفته شود در خلق سامانه‌های زیستی، بیولوژیست‌های سینتتیک تنوع را کم و بیش به شکل تصادفی در چرخه طراحی در نظر گرفته و رفتار سیستم حاصله را گزینش نموده و آن را با

عملکرد مورد انتظار سازش می دهند. اما به یاد داشته باشیم که این فرایند به شکل بسیار تسریع یافته و با منشی مقصودوار پیگیری می شود؛ در حالی که در طبیعت این فرایند بسیار تدریجی و پیچیده، در طول تاریخ طبیعی روی می دهد و از این رو نمی توان گفت که بیولوژی سینتتیک شبیه سازی زیستی<sup>۱</sup> انجام می دهد (۷).

در یک فراگرد کلی، چنین می نماید که خلق دانش بر پایه بیولوژی سینتتیک و ساده سازی الگوهای طبیعی پیچیده به سطح مدولار، نمی تواند ما را به سرانجام ادراک غایی برساند و بیشتر چنین می نماید که این رهیافت های بیولوژی سینتتیک در خلق دانش بیشتر بر پیچیدگی جهان طبیعت می افزاید و این را بر ما هویدا می سازند که سامانه های زیستی پیچیده بوده و هر قدر به آن ها بنگریم باز هم پیچیده تر جلوه گر می شوند.

## ۲-۶- بیولوژی در برابر ماشین

همان گونه که در بخش پیشین اشاره شد، با شیوه عمل و رهیافت های مورد استفاده در بیولوژی سینتتیک، رسیدن به ادراک کامل از سامانه های بیولوژی بسیار دشوار است و شاید غیرمحتمل؛ در نتیجه نمی بایست ارگانیسم را ماشین قلمداد کرد.

پیش از آن که به تفاوت های ماهیتی میان ارگانیسم ها و ماشین ها

---

<sup>1</sup> Biomimetic

بپردازیم، لازم است به تفاوت کلیدی میان ماشین‌ها و ارگانیسم، از دیدگاه فلسفه هستی، نظر بیفکنیم. این تفاوت کلیدی، به این صورت است که منشأ هدفمندی ارگانیسم‌ها، درونی است در حالی که منشأ هدفمندی ماشین‌ها، بیرونی می‌باشد. یعنی ماشین‌ها طراحی می‌شوند و نگهداری آن‌ها توسط طراح انجام می‌گردد در حالی که ارگانیسم‌ها این گونه طراحی نشده‌اند و در فقدان قصد بیرونی کار می‌کنند. این به معنای آن است که ماشین‌ها به عوامل بیرونی (انسان‌ها یا ماشین‌های دیگر) وابسته‌اند که طراحی، ساخت و تعمیر شوند. این در حالی است که در ارگانیسم‌ها، عوامل درونی و نه عوامل بیرونی، ساخت و تعمیر آن‌ها را هدایت می‌کنند. از این رو، هر چند که ماشین‌ها و ارگانیسم‌ها از دیدگاه ترمودینامیک، درگاه‌های باز برای ورود مواد و انرژی هستند ولی ارگانیسم‌ها سامانه‌های پیچیده‌ای هستند که برای «علیت مؤثر»، به صورت بسته عمل می‌کنند. در هر صورت، اگر ما تفاوت ماهوی میان ماشین‌ها و ارگانیسم‌ها را در نظر بگیریم، برای پیشرفت و چشم‌انداز بیولوژی سینتتیک با محدودیت‌هایی رو به رو خواهیم شد؛ زیرا ماشین‌ها و سلول‌ها، دو ماهیت کاملاً متفاوت از یکدیگر هستند (۹).

در فراتر از این تفاوت هستی‌شناسانه، به تفاوت‌های بنیادین میان ماشین‌ها و ارگانیسم‌ها از دیدگاه دو دانشمند اسپانیایی (پورکار و پرتو) می‌پردازیم (۱۰). نخست آن که به نظر نمی‌آید که ارگانیسم‌ها دارای ساختارهای مدولار واقعی باشند، اما آشکار است که آن‌ها دارای ویژگی

ضد راست گوش<sup>۱</sup> هستند. راست گوش بودن<sup>۲</sup> که یکی از ارکان مهندسی صنایع است، اشاره به استقلال رفتاری دارد. چه ساختارهای مدولار، راست گوش و یا به زبان ساده تر، قطعات نمی بایست در ورای چهارچوب ارتباطی از پیش تعریف شده، برهم کنش نشان دهند و می بایست به شیوه ای پیش بینی پذیر، رفتار نمایند. در سامانه های مهندسی شده، توان و قدرت سیستم از طریق تکرار قطعات یا مدارها با عملکرد یکسان ایجاد می شود در حالی که در بیولوژی، همپوشانی عملکردی<sup>۳</sup> و تبهگنی<sup>۴</sup>، از اصول حاکم می باشند. معنای همپوشانی عملکردی را به این طریق می توان استنباط کرد که در حالی که ماشین ها به گونه ای طراحی شده اند که قطعات مستقل به گونه ای کنار یکدیگر قرار گیرند که می توان هر قطعه را جایگزین کرده و یا برداشت نمود، بدون این که اثرات عمده ای بر کل سیستم حادث شود، اما در ارگانسیم های زنده، قطعات از نظر عملکردی به یکدیگر چسبندگی جدایی ناپذیری دارند. از این رو بیولوژی با ماشین ها (که بر پایه مدولار مهندسی شده اند) از لحاظ مداربندی دارای تفاوت ماهوی هستند؛ به این صورت که اجزاء یک سلول برهم کنش های انبوه، تغییرپذیر و غیرنقشه واری دارند که در سامانه های مهندسی نمی توان چنین مداربندی را یافت نمود.

---

<sup>1</sup> Anti-orthogonality

<sup>2</sup> Orthogonality

<sup>3</sup> Functional overlapping

<sup>4</sup> Degeneracy

از این رو، ارگانیسیم‌ها و بیولوژی از اصول طراحی منطقی، ترکیب ادوات متعارف، مدولار و قطعات راست گوشه با رفتار پیش‌بینی‌پذیر (که در مهندسی می‌بینیم)، تبعیت نمی‌کنند.

نکته دوم، وجود پیچیدگی در فراغ از حالت متعارف<sup>۱</sup> در ارگانیسیم‌ها است. تعداد سیستم عامل در انفورماتیک بسیار پایین است. برعکس سیستم‌های عامل بیولوژیک بسیار بالا است و وجود تعداد انبوه از گونه‌های زنده در روی زمین و تنوع بسیار بالای ژنتیکی در بین خود گونه‌ها و سویه‌ها و تبادلات مواد ژنتیکی میان ارگانیسیم‌ها (مانند انتقال ژنی افقی) موجب شده است که بروز رفتار متعارف در ارگانیسیم‌ها زیر سؤال باشد. از سوی دیگر، رفتار هر قطعه نیز در ارگانیسیم‌های گوناگون (یا لاین‌های سلولی) اغلب بسیار متفاوت است که در تضاد با تعریف بودن حالت متعارف و استاندارد قرار می‌گیرد. بنابراین برعکس ماشین‌ها که از قطعات قابل تعویض و قابل تعمیر ساخته شده‌اند، سلول‌ها طراحی نشده‌اند بلکه تکامل می‌یابند و در مسیر تکامل است که قطعه‌ای که می‌بایست رفتار متعارف خود را نشان دهد به گونه‌ای مورد باز کاربرد در ارگانیسیم قرار می‌گیرد که دیگر رفتار متعارف عام خود را نشان نمی‌دهد. بر پایهٔ چنین ویژگی‌ای، تفاوت سوم میان ارگانیسیم‌ها و ماشین‌ها پدید می‌آید: یعنی وجود تنوع درونی<sup>۲</sup> که ویژگی اصلی حیات است که تمایل دارد تغییر و تنوع را به عرصهٔ ظهور برساند. بدین گونه است که تولید

<sup>۱</sup> Standard-free complexity

<sup>۲</sup> Intrinsic variation

مثل، فرایند ساخت نمونه مشابه از ارگانیسم است و نه یکسان از آن (۱۰).  
نوترکیبی، رانش ژنتیکی<sup>۱</sup>، انتقال ژنی افقی و به ویژه موتاسیون‌ها، در دستکاری غیرمستقیم مداوم آرایه ژنتیکی گونه‌ها مشارکت می‌نمایند. این تغییرات و تنوع ژنتیکی به تنوع فنوتیپی و در نهایت انتخاب طبیعی پیوستگی می‌یابد. چنین ظهور تنوعی در طراحی منطقی ماشینی امکان‌ناپذیر است و این فقط در جهان طبیعی است که چنین ویژگی‌ای ظهور می‌یابد. نکته چهارم تفاوت بین ارگانیسم‌ها و ماشین‌ها در وابستگی به متن<sup>۲</sup> و جهان برون ارگانیسم‌ها نهفته است. ماشین‌ها و یا حتی ارگانیسم‌های دستکاری شده در شرایط مصنوعی آزمایشگاهی با کنترل مواد رشد و برهم‌کنش‌های محدود اکولوژیکی، طراحی می‌شوند در حالی که ارگانیسم‌های طبیعی در محیط و متن بیرونی پیچیده‌ای زندگی و برهم‌کنش می‌کنند که مدل سازی این شرایط اکوسیستمی واقعی در شرایط آزمایشگاهی ناممکن است و در این شرایط پیچیده زمینه‌ای با فشارهای اکولوژیک پیچیده در مسیر تکامل قرار می‌گیرند و این در حالی است که ارگانیسم‌های سینتتیک در محیط زیست کنترل شده ساده‌تر طراحی می‌گردند و بی‌شک به دلیل نداشتن توان برهم‌کنش و مکانیسم‌های پیچیده درونی در ارگانیسم‌ها، آن‌ها نمی‌توانند رفتارهای برهم‌کنش‌های پیچیده همچون ارگانیسم واقعی را از خود نشان دهند (۱۰).  
با وجودی که ارگانیسم‌ها و سلول‌ها، ماشین نیستند ولی نباید این

---

<sup>1</sup> Genetic drift

<sup>2</sup> Context dependence

نکته را فراموش کرد که می توان آن ها را مهندسی نمود و به گونه ای آن ها را دستکاری کرد که حداقل پاره ای از فرضیات مهندسی را برآورده سازند؛ مانند آنچه با دستکاری های مهندسی ژنتیکی، میکروب ها را به ماشین های زیستی<sup>۱</sup> تولید کننده دارو تبدیل می کنیم. اما باز به یاد داشته باشیم که با این دستکاری ها باز این ارگانیسم ها را نمی توان ماشین های زیستی نامید زیرا از اصول پیش بینی پذیری و ناهمبستگی سازی<sup>۲</sup> پیروی نمی کنند (۱۰). اکنون این پرسش فلسفی برجسته می شود که آیا می توان در بیولوژی سینتتیک، ماشین های زیستی را خلق کرد که از اصول مهندسی پیروی کنند. آیا ما دوران طلایی را تجربه خواهیم کرد که اصول طراحی منطقی با سرهم بندی<sup>۳</sup> از طریق تکاملی با یکدیگر ممزوج شوند و موجودات صناعی با ویژگی های انعطاف پذیر به گونه ای که بتوانند در محیط و متن پیچیده بیرونی با برهم کنش بقا یافته و تکامل پذیرند، پدیدار شوند.

به زبان دیگر، آیا می توان پیش بینی نمود که در آینده، زیستمدان ماشین مانند داشته باشیم که از قوانین مهندسی تبعیت نمایند؟

در هر صورت، پیشرفت های چشمگیر در بیولوژی سینتتیک موجب شده اند که مفاهیم ارگانیسم های سینتتیک<sup>۴</sup> و ماشین های زنده<sup>۵</sup> که به عنوان موجودات هیبرید قلمداد می شوند، ظهور یافته و رهیافت برای

<sup>1</sup> Bio-machines

<sup>2</sup> Decoupling

<sup>3</sup> Tinkering

<sup>4</sup> Synthetic organisms

<sup>5</sup> Living machines

درک این موجودات موجب شده است که در درک ما از ارگانیسم‌ها و ماشین‌ها اثر گذارد و این پرسش که آیا جهان زنده به صورت بنیادین از جهان غیرزنده که در فلسفه طبیعی همیشه وجود داشته است، به صورت بسیار آتشین، دوباره مطرح گردد (۱۱).

## ۲-۷- زیست کمینه (مینی مال)<sup>۱</sup>

درک واقعی از بیولوژی سینتتیک در مفهوم «ژنوم مینی مال» نهفته است. ژنوم کمینه، مجموعه‌ای حداقل ناچیز از ژن‌هایی است که اجازه زیست سلول را فراهم می‌آورد و به این مجموعه ژنی می‌توان ژن‌های مورد علاقه را افزود و آنگاه به یک شاسی پیوند زد. در حقیقت، ژنوم کمینه شامل ساده‌ترین اجزاء ممکن است که موجب بقاء، تولید مثل، پابرجا بودن و تکامل ارگانیسم می‌شود (۱۲). این ویژگی‌های منحصر به فرد ارگانیسم‌های زنده را با واژه اتوپوئیس<sup>۲</sup> از آن یاد می‌کنند. شاید برترین هدفی که در بیولوژی سینتتیک دنبال می‌شود خلق سلول‌های انسان ساختی باشند که بتوانند ویژگی‌های اتوپوئیس یعنی تولید مثل، خود سازمانی و خود ابقایی را از خود نشان دهند. اما پیش از این که انسان به این هدف برسد، بسیاری از موانع می‌بایست برداشته شوند. در هر صورت، این هدف در بطن خود یک واقع‌گرایی را نهفته دارد و چندین گروه پژوهشی در پی آن هستند،

<sup>1</sup> Minimal life

<sup>2</sup> Autopoiesis

مانند پروژه تکامل سلول مصنوعی قابل برنامه ریزی (PACE)<sup>۱</sup> که توسط اتحادیه اروپا سرمایه گذاری شده است (۱۲).

در رهیافت سنتز پیش سلول ها (پروتئوسل)<sup>۲</sup>، هدف ساخت دسته ای از مواد شیمیایی شبیه به حیات به شکل سامانه سلول مصنوعی است که می تواند ویژگی های اتوپوئیس را از خود نشان دهد. در حقیقت، رهیافت سلول کمینه یا پروتئوسل شامل تعداد مینی مال در ژن ها است که می توانند مورد نسخه برداری و ترجمان به پروتئین های بسیار ضروری برای حیات شوند.

از سوی دیگر، این قابل قبول است که سلول مینی مال به شکل یک سلول RNA ای باشد که RNA بتواند نه تنها حامل اطلاعات ژنتیکی قابل تکثیر باشد بلکه عملکرد کاتالیتیک به صورت ریبوزومی را نیز به سرانجام برساند. هرچند که تاکنون چنین پیش سلول هایی که بتوانند خود تکثیر بوده و تکامل پذیر باشند و خود ابقایی را از خود نشان دهند، ساخته نشده اند اما نمونه هایی اولیه ساخته شده یا شبیه سازی شده اند (۱۱).

در هر صورت، با ساخت پیش سلول ها، بیولوژیست های سینتتیک در پی آن هستند که بسیاری از پرسش های فلسفی پیرامون آن که حیات چیست و چگونه منشأ می گیرد و تکامل می پذیرد را پاسخ دهند. نخست، برای ساخت پیش سلول، لازم است که درون داره (محفظه)، متابولیسم و

<sup>1</sup> Programmable Artificial cell Evolution

<sup>2</sup> Protocell

اطلاعات یکپارچه شوند. برای درون داره، از وزیکول‌ها<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که بسیار با جداره سلولی مشابهت دارند و از لیپید دو جداره‌ای ساخته شده‌اند. متابولیسم شامل تبدیل انرژی بوده که کاتالیز درون سلولی را هدایت می‌نماید و اطلاعات نیز توسط ژنوم فراهم می‌شود. با وجود پیشرفت‌های شگرف در این سه بخش، یکپارچه‌سازی آن‌ها به ویژه در بخش تقسیم سلولی، با چالش‌های سترگی رو به رو است که تا بر آن‌ها، پیروزی حاصل نشود، ساخت سلول صناعی امکان‌ناپذیر است. چنانچه این موانع در آینده زوده شوند، ساخت ارگانیسم سینتتیک، دور از تصور نخواهد بود (۱۱). در این هنگامه است که ما می‌توانیم از بسیاری از فرایندها و پدیده‌هایی که در پیش از خلق حیات روی دادند، آگاهی بیابیم. در چنین هنگامه‌ای است که مفاهیم حیات و موجودات غیرزنده، از دیدگاه فلسفی معنای ژرفا خود را خواهند یافت و می‌توانیم به خط تمایز بین سامانه زیستی از غیرزنده، نایل شویم.

بیولوژیست‌های سیستمی که در بحث‌های ویژگی‌های حیات وارد شده‌اند، بر بینش‌های فلاسفه کلاسیک پافشاری دارند، برای مثال بحث‌های ارسطو و کانت پیرامون آن که آیا مفهوم کنونی از علیت می‌تواند به اندازه کافی آشکار نماید که چگونه جزء و کل در سامانه‌های زیستی در روابط علت و معلولی معکوس قرار می‌گیرند؟ منابع الهام دیگر برای بیولوژیست‌های سینتتیک را می‌توان در تئوری روزن<sup>۲</sup> از سامانه‌های

---

<sup>1</sup> Vesicles

<sup>2</sup> Rosen's Formalization

متابولیسم - ترمیم<sup>۱</sup>، تئوری سیستمی عمومی (ریاضی) و تئوری دسته‌ای<sup>۲</sup> یافت.

در تئوری‌های سامانه‌ها و سازمانی، به نقش‌های عملکردی درون داره (محفظه)، اتونومی و علیت فرایندها در خود ابقایی در نمونه‌های زیست‌کمینه اشاره شده است و بر روی پژوهش، جهت یافت اصول عمومی (اصول سازماندهی)<sup>۳</sup> به جای اصول طراحی<sup>۴</sup>، تأکید ورزیده شده است. در حقیقت، برای درک سامانه‌های زیستی، رهیافت تئوری سیستمی در ابعاد ژرف آن، بیش از رهیافت‌های سایبرنتیکی نیاز است. در همین جا است که از دید روش‌شناسی فلسفی این پرسش برمی‌خیزد که آیا ما به چهارچوب ریاضی یا رسمی دیگری در بیولوژی نیاز داریم که با آنچه در مهندسی و فیزیک است، متفاوت خواهد بود؟

نکته قابل بحث فلسفی دیگر پیرامون ویژگی‌های بنیادین حیات، نقش نسبی اتونومی، باز بودن و همکاری در سامانه‌های زیستی است. تاکنون، پژوهش‌های فلسفی پیرامون منشأ حیات بر ارگانسیم‌های منفرد متمرکز بوده است، اما بینش‌های برخاسته از میکروبیولوژی مدرن موجب شده است که تمرکز از ارگانسیم‌های واحد به برهم‌کنش‌های همکارانه موجود در کلنی‌های سلول‌ها نیز گسترش بیابد (۵).

<sup>1</sup> Metabolism-repair systems

<sup>2</sup> Category theory

<sup>3</sup> Organizing principles

<sup>4</sup> Design principles

مباحث مربوط به میکروبیوم و برهم کنش میان آن‌ها و ارگانیسم میزبان و چگونگی شکل‌گیری متابولیسم و متابولیت‌های وابسته به این برهم کنش‌ها در سامانه‌های پیچیده ارگانیسم مادر، در ترسیم شبکه‌های پیچیده ملکولی و عملکردی در سطح پایه و پویا، بسیار اثرگذار بوده‌اند. پژوهش اخیر در بیولوژی سینتتیک جهت شناخت پویایی کلنی‌های وزیکول‌های بر پایه اولئیت<sup>۱</sup> غول آسا در شرایط پره بیوتیک<sup>۲</sup> نشان داد که نفوذپذیری وزیکول‌ها به کاتالیست‌ها و ماکروملکول‌ها برای کلنی‌ها از وزیکول‌های منفرد بیشتر بوده است. در پاره‌ای از موارد نیز کلنی‌ها یکدیگر را جذب نموده و به تبادل مواد پرداختند. این پژوهش‌ها و مباحث مربوط به میکروبیوم در دانش میکروبیولوژی موجب برانگیخته شدن پرسش‌های فراوانی شده است. برای مثال: آیا حیات از مکانیسم‌های همکارانه میان سامانه‌های پره بیوتیک برخاسته است؟ آیا ما نیاز داریم که پیرامون فرضیات هستی‌شناسایی درباره این که چه چیز «وحدت حیات»<sup>۳</sup> را مقرر می‌نماید، تفکر کنیم؟ (۵). هر چند پاسخ به این پرسش‌ها برای فلاسفه‌ای که پیرامون بیولوژی سینتتیک و بیولوژی سیستمی به تفکر می‌پردازند بسیار جالب است اما این پیوستگی ارگانیسم به محیط و زمینه برهم کنش‌های پیچیده موجب می‌شود که مدارهای بیولوژیک مهندسی شده به ندرت به شیوه‌ای که طراحی شده‌اند کار کنند. زیرا عمل بخش‌های ملکولی به

---

<sup>1</sup> Oleate-based

<sup>2</sup> Prebiotic

<sup>3</sup> Unity of life

شدت وابسته به زمینه سلولی و توالی محیطی است که از یک سیستم به سیستم دیگر در تغییر است و در نتیجه بیولوژیست‌های سینتتیک در حد فوریت نیاز به راهبردهایی دارند که این وابستگی به محیط و متن<sup>۱</sup> را در مدل‌های زیست‌کمیته خود لحاظ نموده و تا حد زیادی کنترل نمایند (۱۳).

## ۲-۸- حیات مصنوعی<sup>۲</sup>

تعریف ارائه شده در مقاله اولین کنفرانس حیات مصنوعی، پیش از آن که توصیف یک هدف علمی باشد تعریف‌کننده یک گستره نوین پژوهشی در آینده است (۱۴)؛ «حیات مصنوعی مطالعه سامانه‌های انسان ساخت است که رفتارهای ویژه سامانه‌های زیستی را از خود نشان می‌دهند و مکمل علوم بیولوژیک سنتی است که بر آنالیز ارگانسیم‌های زنده تمرکز دارند و تلاش می‌نماید یک رفتارهای همسان با حیات را در درون رایانه‌های دیگر فضاهای مصنوعی سنتز نماید.» با گسترش فراتر از بنیان تجربی که بیولوژی بر پایه آن است یعنی «زنده کربنی حیات» که در زمین تکامل یافته است، حیات مصنوعی می‌تواند در ترسیم تصویر بزرگتری از «زندگی ای که ما آن را می‌شناسیم» را به صورت «زندگی ای که می‌تواند باشد» در مفاهیم بیولوژی نظری سهیم شود؛ برای ایجاد حیات مصنوعی، سلول‌های مصنوعی می‌بایست سه بخش عمده زیر را داشته باشند:

<sup>1</sup> Context-dependence

<sup>2</sup> Artificial life

(۱) غشاء‌های بیولوژیکی که به عنوان سد محافظتی عمل کرده و در همان زمان نیز اجازه ارتباط میان سلول و محیط زیست را فراهم می‌کنند.

(۲) ماشین نسخه برداری و ترجمان که پروتئین‌ها را بر اساس توالی‌های ژنتیکی سنتز می‌کند.

(۳) مدول‌های ژنتیکی که پویایی کل سلول را کنترل می‌نماید. این سلول‌های مصنوعی سامانه‌های مینی‌مال (کمینه) تعریف شده هستند که می‌توان آن‌ها را مهندسی کرد و تحت کنترل قرار داد. اما چند پرسش ساختاری پابرجا هستند:

- چه میزان اطلاعات را می‌توان در درون سلول‌های مصنوعی کد کرد؟
- تعداد کمینه فاکتورهای مورد لزوم برای عملکرد ثابت و توانمند سلول‌های مصنوعی چقدر است؟
- آیا سلول‌های مصنوعی می‌توانند به صورت مؤثر با محیط زیست خود در ارتباط قرار گیرند؟
- آیا سلول‌های مصنوعی می‌توانند تکثیر، تقسیم و حتی تکامل بیابند؟

بیولوژیک سینتتیک، کتابخانه‌ای غنی از ابزارها و قطعات سلولی را فراهم آورده است که می‌توان برای ساخت این سلول‌ها به کار برد. از پایگاه داده‌های مربوط به مسیرهای بیولوژیک و ابزارهای طراحی خودکار را می‌توان برای طراحی و پیش‌بینی مسیرهای سلولی در درون

سلول‌های مصنوعی استفاده کرد. کلونینگ با توان عملیاتی بالا<sup>۱</sup>، سنتز ژن و هم‌آوردن مسیرهای بیولوژیک را می‌توان برای بررسی مجموعه‌ای از مسیرهای کاندید شده به کاربرد. افزون بر این، موتاسیون تصادفی DNA و فناوری میکروفلوئیدی را می‌توان برای تکامل کتابخانه‌ای عظیم از DNA جهت پیاده‌سازی در سلول‌های مصنوعی مورد استفاده قرار داد. با تمام این پیشرفت‌ها، هنوز همان سه پرسش بنیادی برای ساخت زیست‌مینی‌مال پابرجا بوده است و پژوهش‌های بیشتری مورد نیاز است تا بتوان مجموعه‌ی مینی‌مال از بخش‌ها و قطعات سلولی مورد لزوم برای متابولیسم کارآمد و تکثیر را یافت نمود. افزودن بر این، درک این موضوع که چگونه فاکتورهای غیرژنتیکی درون سلولی شامل ازدحام و چیدمان<sup>۲</sup> گونه‌های شیمیایی و ساختارهای سلولی، عملکرد کارآمد مسیرهای بیولوژیک سلولی را تنظیم می‌کنند، وجود ندارد. اما پیشرفت‌های آینده موجب خواهند شد که جعبه ابزار مدولار برای طراحی رایانه‌ای سلول‌های مصنوعی فراهم آورد تا کلاس نوینی از سلول‌های سینتتیک خلق شوند (۱۷-۱۵).

در این پروژه‌های جاه‌طلبانه حتی می‌توان از اشکال غیرطبیعی حیات نیز گفتگو کرد که بدین منظور، زیست‌شناسان مواد ژنتیکی و اسیدهای هسته‌ای و یا کدهای ژنتیکی متفاوتی را استفاده می‌کنند. در حقیقت، در این پروژه‌هایی که آنان در پی ساخت اشکال نوین غیرطبیعی

<sup>1</sup> High-throughput cloning

<sup>2</sup> Crowding

حیات هستند، از زنجیر و قید و بند طبیعت خود را رها می‌سازند. هر چند DNA، RNA و ماشین سلولی، به حیات طبیعی شکلی توانمند و پابرجا را داده‌اند اما دانشمندان بیولوژی سینتتیک در تلاش هستند تا یکی یا دو از چهار باز DNA را تغییر دهند و در حالی که باندهای هیدروژنی گیرنده - دهنده را در ساختار حفظ می‌کنند، سامانه‌های ژنتیکی مصنوعی‌ای را بسازند که پذیرای تکامل باشند.

به زبان دیگر، اشکال جایگزینی از حیات را خلق می‌کنند که ممکن است در جایی دیگر از گیتی بوده یا امکان خلق داشته باشد. چنین است که این پروژه‌ها مورد توجه سازمان فضایی آمریکا (NASA) نیز قرار گرفته است. با خلق این شیوه‌های نوین، جایگزین و محتمل از حیات، پرسش‌های پیشین فلسفی پیرامون گذشته و منشأ حیات، نه تنها پاسخ‌های در خور اندیشه‌ای را در می‌یابند بلکه پیرامون اصولی که حیات در آینده چگونه خواهد بود و شکل می‌پذیرد، گویا خواهند بود (۱۸).

ساخت سلول‌ها و حیات مصنوعی و یا ساخت حیات مصنوعی از عناصر غیرطبیعی که یک انحراف نوین از طبیعت است، پرسش‌های بی‌پاسخ فراوانی را در حوزه معرفت‌شناسی فلسفه بیولوژی به میان می‌کشاند که پاسخ به آن‌ها آمیزه‌ای از تحلیل و دلیل و برهان طلبی را می‌جوید. این گونه‌های حیات مصنوعی به صورت فیزیکی ممکن (حتی نه در ابعاد تکنیکی امکان‌پذیر)، چه بر پایه مواد طبیعی یا غیرطبیعی یا کدهای ژنتیکی متفاوت، می‌توانند نه تنها آینده‌های ممکن برای حیات

را در فراتر از قوانین تکامل طبیعی به تصویر بکشند بلکه دانش ما در مورد چیهستی حیات در آینده نیز گسترش می‌دهند. بر این اساس، آیا می‌توان همانگونه که در مجله طبیعت<sup>۱</sup> به تصویر کشیده شد گفت که «حیات آن چیزی است که ما آن را می‌سازیم» و یا این که گستاخانه موضوع را به اینجا کشاند: «حیات شما در دستان شما خواهد بود». بی‌شک دانش ما با خلق و ساخت سامانه‌های زیستی و یا ماشین‌های زیستی، زیست مینی‌مال یا حیات مصنوعی افزایش می‌یابد و ما با «ساختن»، «دانستن» خود را افزایش می‌دهیم و دیگر دانش خود را با نگاه به حیات و تجربه و تحلیل آن محدود نمی‌سازیم و آن را «خواهیم ساخت» و با این ساختن، خواهیم دانست. این موضوعی است که در شناخت‌شناسی و معرفت فلسفه علم بیولوژی سینتتیک، جایگاهی رفیع را برای خود باز نموده است (۱۸).

آیا با این توالی ساختن و دانستن و خلق حیات مصنوعی به اشکال غیرقابل شمارش، ما بر قدرت و نیروی تکامل چیرگی می‌یابیم و برای اولین بار موجوداتی خلق می‌شوند که با سرعت غیرقابل تصویری، نیروی تکامل را در می‌نوردند؟ آیا این شیوه خلق حیات مصنوعی که بر شیوه‌های طبیعی فائق می‌آید، می‌تواند در شرایط بحرانی که ساخته انسان است یا شرایطی که به شکل طبیعی در آینده با آن‌ها رو به رو خواهیم شد و می‌توانند حیات را از کره زمین محو کنند، به مقابله بپردازد؟

---

<sup>1</sup> Nature

آیا این پیشرفت‌ها در ساخت حیات مصنوعی از مواد غیرطبیعی و خلق تنوع زیستی مصنوعی با ملکول‌های غیرطبیعی بیولوژیک، می‌تواند پاسخی منطقی در برابر تهدیدات محیط زیستی باشد که ما خود آن را آفریده و یا خلق خواهیم کرد؟ چنین به نظر می‌آید که خیزش بیولوژی سینتتیک موجب یک تغییر جابه‌جایی در پارادایم معرفت‌شناسی در حوزه بیولوژی شده است و این بیشتر به دلیل آن است که بیولوژی از آنالیز و شناخت سامانه‌های زیستی به سوی بازتولید آن به شکل مصنوعی حرکت کرده است؛ یعنی چیزی که پیش از این در بیولوژی سنتی نه امکان آن وجود داشت و نه در مورد آن اندیشه می‌شد. بنابراین چنین می‌نماید که تقارن میان اجزاء آنالیتیک و سینتتیک که پیش از این در شیمی (به ویژه شیمی آلی) وجود داشت، با ساخت حیات مصنوعی گسترش یابد (۴).

در این تغییر پارادایم، بیولوژیست‌های سینتتیک به سنتز پروتئین‌ها و مواد ژنتیکی‌ای می‌پردازند که پیش از این وجود نداشته‌اند و عملکرد آن‌ها را در مقابل پروتئین‌ها و مواد ژنتیکی‌ای که اطلاعات زیستی را در خود نهفته داشته و محصول تکامل طبیعی بوده‌اند (تا طراحی منطقی) می‌سازند (۱۹). در چنین تقارن میان آنالیز و سنتز است که بیولوژی را شاید بتوان یک فناوری نامید<sup>۱</sup>.

با دستاوردهای بیولوژی سینتتیک به عنوان یک فناوری، شاید انسان

---

<sup>1</sup> Biology is technology

بتواند گام به گام به کشف رموز حیات و نوشتن برنامه سلول‌های زنده در قالب حیات مصنوعی نایل شود. از این رو، با آنالیز و سنتز پیوسته که در بیولوژی سینتتیک در پارادایم جدید بیولوژی روی می‌دهد، فاصله میان حیات طبیعی و حیات مصنوعی فنا می‌یابد. بنابراین، بر پایه دیدگاه فلسفه حاکم بر بیولوژی سینتتیک، مرز میان زیست طبیعی و مصنوعی که هم اکنون می‌بینیم، مشروط، موقتی و ناپایدار است و در زمانی (که نمی‌توان هرگز آن را پیش‌بینی کرد)، این مرز موقت و ناپایدار، برداشته خواهد شد (۲۰).

## ۲-۹- منابع فصل دوم

1. Synthetic Biology: scope, applications and implications. 2009. Royal Academy of Engineering. (Accessed 29 Oct 2017 at <http://www.raeng.org.uk/publications/reports/synthetic-biology-report>).
2. Cachat E, Davies JA. Application of Synthetic Biology to Regenerative Medicine. *J Bioeng Biomed Sci*. 2011; S2: 003.
3. Think Synthetic Biology. 2016. Ontario Genomics. (Accessed 20 Jan 2018 at [http://www.ontariogenomics.ca/syntheticbiology/Ontario\\_Synthetic\\_Biology\\_Report\\_2016.pdf](http://www.ontariogenomics.ca/syntheticbiology/Ontario_Synthetic_Biology_Report_2016.pdf)).
4. Morange M. A Critical Perspective on Synthetic Biology. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*. 2009; 15 (1): 21-30. (Accessed 20 Jan 2018 at <http://www.hyle.org/journal/issues/15-1/morange.pdf>).
5. Green S. Philosophy of Systems and Synthetic Biology. 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University. (Accessed 20 Jan 2018 at <https://plato.stanford.edu/entries/systems-synthetic-biology/>).
6. Nabipour I. A Roadmap Draft for the Development of Synthetic Biology in I.R. Iran. *Iran South Med J* 2017;20(5):501-518.(Persian)
7. Nordmann A. Synthetic Biology at the Limits of Science. *Synthetic Biology* 2014; 31-58.
8. O'Malley MA. Making Knowledge in Synthetic Biology: Design Meets Kludge. *Biological Theory*. 2009; 4(4): 378–89.

9. Isalan M, Lemerle C, Michalodimitrakis K, et al. Evolvability and hierarchy in rewired bacterial gene networks. *Nature*. 2008; 452(7189): 840-5.
10. Porcar M, Peretó J. Nature versus design: synthetic biology or how to build a biological non-machine. *Integr Biol (Camb)*. 2016; 8(4): 451-5.
11. Deplazes A, Huppenbauer M. Synthetic organisms and living machines: Positioning the products of synthetic biology at the borderline between living and non-living matter. *Syst Synth Biol*. 2009; 3(1-4):55-63.
12. Synthetic Biology: An Introduction. 2011. European Academies Science Advisory Council. (Accessed 20 Jan 2018 at [http://www.easac.eu/fileadmin/PDF\\_s/reports\\_statements/Synthetic%20Biology%20An%20Introduction%20Feb%202011.pdf](http://www.easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Synthetic%20Biology%20An%20Introduction%20Feb%202011.pdf)).
13. Holdrege C. When Engineers Take Hold of Life: Synthetic Biology. *The Nature Institute* 2014; 16-23 (Accessed 20 Jan 2018 at <http://natureinstitute.org/pub/ic/ic32/synbio.pdf>).
14. Umerez J. Artificial Life: Prospects of a Synthetic Biology. 2010. (Accessed 20 Jan 2018 at <http://www2.uefs.br/graco/amacs/pdf/umerez-adapcog.pdf>).
15. Ding Y, Wu F, Tan C. Synthetic Biology: A Bridge between Artificial and Natural Cells. *Life (Basel)*. 2014; 4(4): 1092-1116.
16. May M. Synthetic biology's clinical applications. 2015; 349(6255): 1564-66.. American Association for the Advancement of Science. (Accessed 20 Jan 2018 at <http://www.sciencemag.org/custom-publishing/technology-features/synthetic-biology-s-clinical-applications>).
17. Brüller W, Gansberger M, Hohegger R, et al. Synthetic Biology. 2014. AGES - Austrian Agency for Health and Food Safety. (Accessed 20 Jan 2018 at [https://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/2/6/8/CH1052/CMS1422371020012/synthetic\\_biology\\_02122014\\_final.pdf](https://www.bmgf.gv.at/cms/home/attachments/2/6/8/CH1052/CMS1422371020012/synthetic_biology_02122014_final.pdf)).

18. Bensaude-Vincent B. Between the possible and the actual: Philosophical perspectives on the design of synthetic organisms. *Futures*. 2013; 48: 23–31.
19. Bensaude-Vincent B. Life by design: Philosophical perspectives on synthetic biology. *BIO Web of Conferences*. 2015; 4(00015): 1-6. (Accessed 20 Jan 2018 at [https://www.bioconferences.org/articles/bioconf/pdf/2015/01/bioconf-origins2015\\_00015.pdf](https://www.bioconferences.org/articles/bioconf/pdf/2015/01/bioconf-origins2015_00015.pdf)).
20. Bensaude-Vincent B. Biomimetic Chemistry and Synthetic Biology: A Two-way Traffic Across the Borders. *HYLE – International Journal for Philosophy of Chemistry*. 2009; 15(1): 31-46. (Accessed 20 Jan 2018 at <http://www.hyle.org/journal/issues/15-1/bensaude.pdf>



فصل سوم

اخلاق در بیولوژی سینتتیک



### ۳-۱- اخلاق در بیولوژی سنتتیک

بیولوژی سینتتیک یک گستره دانشی نوین و پر امید است که به عنوان علم مرزשکن و بحرانی در هزاره جدید خود را نشان داده است و آن را مهندسی اجزاء و سامانه‌های بیولوژیکی که در طبیعت نیستند و یا مهندسی مجدد عناصر بیولوژیک موجود، تعریف نموده‌اند. ریشه این دانش در پژوهش‌های زیست فناوری و علوم زیستی نهفته است و در حدّ فصل مشترک بیولوژی، شیمی و فیزیک بوده و با گستره‌ای از عرصه‌های پژوهش و توسعه فناوری‌ها نیز همپوشانی دارد. اما ویژگی مهم آن، پیوند بیولوژی با رهیافت‌های مهندسی است. هر چند ما هم اکنون در هنگامه آغازین این دانش هستیم، اما در این مرحله از توسعه، پرسش‌ها و مسائل گوناگونی پیرامون اخلاق و فلسفه بیولوژی سینتتیک برانگیخته شده‌اند که پاسخ‌گویی به آن‌ها، مشارکت میان رشته‌ای با حضور خبرگان علم اخلاق، حقوق و آینده پژوهان علم و فناوری را طلب می‌کند (۱).

در آینده‌ای نزدیک، دانشمندان می‌توانند ارگانیسم‌ها و سامانه‌های نوینی را به صورت کامل خلق کنند که پیش از این در جهان طبیعت موجود نبوده‌اند. پیشرفت‌هایی چنین مرزشکن، موجب برانگیخته شدن مجموعه‌ای پیچیده و بحث برانگیز خواهد شد. بسیاری از این پیشرفت‌ها

به شیوه‌ای گوناگون به انسانیت کمک خواهند کرد ولی با خود نیز خطرات اجتناب ناپذیری که اغلب نیز موجب ترس و نگرانی‌های عموم خواهند شد، به ارمغان می‌آورند. چنین بیم و امیدهای برخاسته از بیولوژی سینتتیک، نیاز به اصول اخلاقی بسیار عالمانه را گوشزد می‌نمایند (۲).

تدوین چنین اصول اخلاقی‌ای توسط جامعه دانشگاهی، حقوقی و نیز سیاست‌گذاران جامعه، به خوبی احساس شده است. اما این پرسش مطرح است که اصول اخلاقی مربوط به بیولوژی سینتتیک آیا از اصول اخلاقی تدوین شده پیرامون فناوری‌های نوین و به ویژه مهندسی ژنتیک فراتر است و می‌بایست به صورت ویژه‌ای به آن نگرست (۳). به زبان دیگر، آیا چیزی در دانش بیولوژی سینتتیک نهفته است که تدوین «رهیافت اخلاقی» متمایزی را جایز شمرد؟

هدف اصلی این نوشتار پرداختن به زوایای عام و خاص بیولوژی سینتتیک از دیدگاه مسائل اخلاقی است که در نتیجه پیشرفت این دانش حاصل آمده است و یا پدید خواهد آمد. در حقیقت، بررسی مسائل اخلاقی برخاسته از این پیشرفت‌ها نشان می‌دهند که دانش اخلاق در عرصه بیولوژی سینتتیک هنوز بسیار جوان است (۴).

در بسیاری از نقاط جهان، به اخلاق در بیولوژی سینتتیک، از زوایای گوناگونی نگرسته‌اند (۲، ۷-۵).

حاکمیت عدم قطعیت‌ها در مسائل اخلاقی بیولوژی سینتتیک، به گسترش گفتمان میان دانشمندان گستره بیولوژی سینتتیک و جامعه

مدنی نیاز دارد. اگر این اهداف و چشم اندازهای مشترک تدوین شوند، می‌بایست از منظرهای اخلاقی و سیاسی نگریسته شوند (۷).  
 رهیافت این نوشتار برای ترسیم چهارچوب مسائل اخلاقی گستره بیولوژی سینتتیک بر اساس قالب مدیریت دانش طراحی گردیده است و این مسائل را در چهار حوزه خلق دانش، ذخیره‌سازی دانش، انتشار دانش و به کارگیری دانش بیولوژی سینتتیک، به کنکاش می‌کشد.

### ۳-۲- خلق دانش در بیولوژی سینتتیک

سازوکار بیولوژی سینتتیک در خلق دانش گستره‌هایی گوناگونی را مانند سنتز DNA، مهندسی متابولیک، سنتز شیمیایی پروتوسل‌ها، مدل‌سازی رایانه‌ای یا سنتز بازهای اسیدهای هسته‌ای جایگزین و خلق ژنوم کمینه شامل می‌شود. هر چند که از دیدگاه متدلوژی در خلق دانش میان بیولوژی سینتتیک با زیست فناوری و شیمی، همپوشانی‌هایی روی می‌دهد ولی بیولوژی سینتتیک، سودای خلق اشکال نوینی از حیات را نوید می‌دهد و از این دیدگاه، پرسش‌های اخلاقی فراوانی در رابطه با انسان‌ها و همچنین دیگر موجودات زنده با موضوع جایگاه اخلاقی محصولات بیولوژی سینتتیک (که ارگانسیم‌های مصنوعی<sup>۲</sup> و یا ماشین‌های زنده<sup>۳</sup> هستند) به وجود می‌آید (۸).

---

<sup>1</sup> Protocells

<sup>2</sup> Artificial Organisms

<sup>3</sup> Living Machines

از این رو چنین به نظر می‌آید که یک شکاف ژرف میان درک ما میان «طبیعی» و «مصنوعی» یا میان «رشد یافته» و «ساخته شده» حاصل می‌گردد. پرداختن به این شکاف از آنجا اهمیت می‌یابد که چنانچه بیولوژی سینتتیک موفق به ساخت موجودی در طبیعت با ژنوم کمینه شود، آیا آن را باید مصنوعی دانست یا طبیعی؟ یا آن که اگر یک موجودی در طبیعت را با عناصر صنایع خلق نماید، آیا باید آن را مصنوعی دانست یا طبیعی؟ پژوهش بر روی «انتولوژی این اجسام در حال پدید»، در پژوهشگاه‌های مطرح جهان مانند مرکز پژوهش‌های مهندسی بیولوژی سینتتیک<sup>۱</sup>، در حال انجام است و برای پرداختن به مسائل اخلاقی مربوطه، همکاری نزدیکی میان علمای اخلاق، انسان‌شناسی و بیولوژی در جریان می‌باشد (۱).

با تمام این تلاش‌ها، چالش‌های موجود در تعریف حیات، موجب برانگیخته شدن بحث‌های بسیار داغ پیرامون فلسفه و اخلاق گردیده است که هنوز ابعاد آن‌ها به خوبی مورد کاوش قرار نگرفته‌اند. چنین است که گروه خبرگان بلند مرتبه اتحادیه اروپا در گزارش خود در مورد بیولوژی سینتتیک عنوان نمود که "به نظر می‌رسد که دیدگاه خلق اشکال کاملاً نوین موجب برانگیخته شدن بحث‌هایی پیرامون مرزهای اخلاقی مناسب علم خواهد شد". این گروه درباره عدم وجود یک چهارچوب مفهومی برای اخلاق که زمینه را برای چنین بحث‌هایی بتواند

<sup>1</sup> Synthetic Biology Engineering Research Center (SynBERC)

مهیا نماید، گوشزد نموده است و یا همچنین این گروه یادآوری کرده است که بحث‌های اخلاقی هنگامی زاینده خواهند بود که قدر معنای «حیات» را در فراتر از گفتمان عامه توسعه دهند (۱).

به زبان دیگر، فقدان مرز آشکار میان حیات طبیعی و مصنوعی، موجب گردیده است که موارد اخلاقی بر علیه پیش زمینه دیدگاه‌های گوناگون گسترده در جامعه و منظرهای ضد و نقیض اهداف و مرزبندی‌های مشروع اخلاقی علم و فناوری، مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند.

کم کم این موضوع هویدا می‌شود که موجودات صناعی و یا ماشین‌های زنده خلق شده توسط انسان‌ها را نمی‌توان بر پایه اصول مهندسی تفسیر نمود. زیرا بر عکس چیدمان قطعات در مهندسی مکانیک، واحدهای ساختاری در بیولوژی سینتتیک، به صورت ناگزیر، با یکدیگر برهم کنش از خود نشان می‌دهند و این برهم کنش‌ها ممکن است کم و بیش غیرقابل پیش بینی بوده و بر هویت و رفتار این ارگانیسم‌ها یا ماشین‌های زنده تأثیر گذارند (۹-۱۰). از سویی دیگر، از آنجا که ارگانیسم‌های صناعی با محیط زیست خود همچون ارگانیسم‌های طبیعی در برهم کنش قرار گرفته و تکامل می‌یابند، می‌بایست خود را با عدم قطعیت‌های مسیر تکاملی سازگار نمایند (۱۱).

هر چند که هنوز معنای حیات، حتی با وجود خلق ارگانیسم‌های زنده توسط بیولوژی سینتتیک آشکار نیست، باید این را به خاطر داشت که با خلق موجودات جدید از طریق بیولوژی سینتتیک، خصوصیات و

ویژگی آن‌ها تعیین کننده وضعیت اخلاقی آن‌ها خواهد بود و نگرش به آن‌ها که آیا خلق شده طبیعی هستند یا ساخته دست انسان، بر جایگاه اخلاقی آن‌ها اثری نخواهد داشت. اما با این وجود، این پرسش بنیادین بر می‌خیزد که چنانچه بیولوژی سینتتیک بتواند موجودات نوین و احتمالاً پیچیده را خلق کند آنگاه ما با آن‌ها چگونه برخورد خواهیم کرد. زیرا چنانچه این ماشین‌های زنده بتوانند جایگاه اخلاقی ویژه خود را داشته باشند، پسندیده نیست که با آن‌ها در خارج از وضعیت متعارف برخورد نمود. اگر بپذیریم که چگونگی رفتار اخلاقی با موجودات در فراتر از منشأ خالق آن‌ها باشد (مصنوعی یا طبیعی)، در آن صورت پژوهش‌ها و اندیشه‌های نوینی نیاز خواهد بود که بر اساس ویژگی‌های زنده بودن، به جایگاه اخلاقی آن‌ها بپردازد. این ویژگی‌ها می‌توانند شامل درک، حساسیت جسمانی، توانایی درک درد و توانایی پنداشت پیوست خود با گذشته و آینده باشند.

از این دیدگاه، تنها داشتن حیات بیولوژیکی شرط کافی نیست و منطقی است بپذیریم که شاید همه موجودات زنده خلق یافته با بیولوژی سینتتیک، در خور دریافت توجه اخلاقی نباشند (۳). البته هر چند این ویژگی‌ها در خور توجه هستند اما به یاد داشته باشیم که ارگانیسم‌های مصنوعی همانند ماشین‌های ساخت دست بشر نیستند که بتوان کنترل کامل کلاسیک آن‌ها را در طول بقاء آن‌ها داشته باشیم و آن‌ها را بتوان آزادانه خاموش و روشن نمود. این ارگانیسم‌های مصنوعی حتماً پاره‌ای

از ویژگی‌های ماشین‌ها را خواهند داشت ولی از سوی دیگر ویژگی‌هایی اتوپوئتیک<sup>۱</sup> آن‌ها که به معنای توانایی خود سازمان‌دهی و خود تولید مثل است و ویژگی کلاسیک ارگانیسم‌های زنده محسوب می‌شود را دارا خواهند بود. از این رو، چندان آشکار نیست که آیا باید این ارگانیسم‌های مصنوعی را زنده نامید یا خیر و در نتیجه وضعیت اخلاقی این ارگانیسم‌ها و مسئولیت‌پذیری خالق نسبت به آن‌ها، هنوز تعریف شده نیست (۱).

بنابراین چنین به نظر می‌آید که تعریف حیات برای چیدمان رفتار اخلاقی با این ارگانیسم‌ها بسیار ضروری است. هرچند تعریف حیات از زمان روشننگری تاکنون تغییر چندانی نداشته است، اخیراً با تولید سلول‌های حیات‌مانند<sup>۲</sup> توسط گروه ونتر<sup>۳</sup> (که آن‌ها را میکروارگانیسم‌های با ژنوم کمینه<sup>۴</sup> نامید و بیولوژیست‌های سینتتیک از واژه شاسی و در شیمی صناعی در انگلستان از واژه چلس<sup>۵</sup>) موجب شده است که ادوارد ماشری<sup>۶</sup>، به عنوان فیلسوف علم در دانشگاه پیتزبورگ چنین بیان نماید که تعریف پابرجایی برای «حیات» امکان‌ناپذیر و ناکارآمد است زیرا بیولوژیست‌های سینتتیک پیرامون منشأ آفرینش و میزان پیچیدگی موجود خلق یافته، بیش از پیش، سردرگم هستند (۱۲). اگر هم گفتار ادوارد ماشری درست

---

<sup>1</sup> Autopoietic

<sup>2</sup> Life-like Cells

<sup>3</sup> Venter

<sup>4</sup> Minimal Genome

<sup>5</sup> Chells

<sup>6</sup> Edward Machery

باشد و حیات بسیار پیچیده‌تر از آن است که بتوان به آن چنگ انداخت، اما احتمالاً می‌توان آن را در چهارچوب علمی تعریف نمود؛ زیرا این تعریف در ترسیم چهارچوب‌های اخلاقی بسیار ضروری است. این تعاریف نه تنها در مورد ارگانیسم‌های مصنوعی بسیار گیج کننده است بلکه در مورد ماشین‌های زنده نیز سردرگمی می‌آفرینند.

شاخهٔ زیست مهندسی بیولوژی سینتتیک این هدف را می‌جوید که بیولوژی را به یک رشتهٔ مهندسی تبدیل کند و این کار را با سنتز مهندسی ژنتیک انجام می‌دهد که اساس آن استانداردسازی قطعات در سطح DNA است که می‌توان به شکل مدول‌هایی ترکیب کرده و همچنین در مسیرهای متابولیک نیز چیدمان داد. با این زمینهٔ کاری، آن‌ها بر محصولات خود در رقابت‌های جهانی<sup>۱</sup> iGEM، نام ماشین‌های مهندسی شدهٔ ژنتیکی<sup>۲</sup> می‌نهند.

از واژهٔ ماشین در این عبارت به این دلیل استفاده شده است که یادآور مفهوم «طراحی و کنترل» توسط انسان باشد که از ویژگی‌های ماشین‌ها می‌باشد. با طراحی و ساخت این ماشین‌های زنده، این پرسش برمی‌خیزد که آیا امکان تبدیل ارگانیسم‌های زنده به ماشین نیز امکان‌پذیر است و آیا اصلاً تفاوت ماهیتی میان ارگانیسم‌های زنده و ماشین‌ها وجود دارد و در چنین صورتی آیا گذاشتن و یا برداشتن واژهٔ

<sup>1</sup> international Genetically Engineered Machine

<sup>2</sup> Genetically Engineered Machines (GEM)

«زنده» از بار اخلاقی و جایگاه اخلاقی موجود فرو می‌کاهد یا به آن ارزش می‌آفریند؟ پاسخ به این پرسش بستگی به منش رفتار با طبیعت و موجودات زنده دارد و احتمالاً نمی‌توان به شکل کامل به آن پاسخ داد ولی باید دانست که در این زمینه، بیولوژی سینتتیک پرسش‌های بسیار جالبی را برمی‌انگیزد که اثربخشی بسیار بالایی را در سطح جامعه از خود نمایان می‌کند (۸).

### ۳-۳- ذخیره‌سازی دانش

از دیدگاه اصولی، بیولوژی سینتتیک شامل ساخت قطعات، ادوات و سامانه‌های بیولوژیک یا جابه‌جایی و بازطراحی سامانه‌های بیولوژیک طبیعی موجود برای بهینه نمودن جامع است. به شکل ساده‌انگارانه، بیولوژی سینتتیک اصول مهندسی را در بخش‌های بنیادین بیولوژی به کار می‌برد. از آنجا که قطعات به عنوان ابزار بنیادین در بیولوژی سینتتیک مهندسی می‌شوند، آن‌ها رکن مهمی را در توسعه و پیشرفت این دانش ایفا می‌نمایند. دفتر قطعات بیولوژیک استاندارد<sup>۱</sup> انستیتو فناوری ماساچوست، مجموعه‌ای از قطعات ژنتیکی که در مونتاژ سامانه‌ها و ادوات در بیولوژی سینتتیک استفاده می‌شوند را ارائه می‌دهد. این دفتر در سال ۲۰۰۳ تأسیس شده است و حاوی چند هزار قطعه است و دریافت کنندگان خدمات شامل دانشمندان و تیم‌های دانشجویی شرکت کننده

<sup>1</sup> Registry of Standard Biological Parts

در رقابت‌های بین‌المللی می‌باشند. این دفتر از استاندارد BioBrick پیروی می‌کند که استانداردی برای قطعات ژنتیکی قابل تعویض با یکدیگر است. این دفتر که ذخیره‌ای از دانش بیولوژی سینتتیک را در خود نهفته دارد، قطعات ژنتیکی را به امید این که دریافت کنندگان در داده‌ها مشارکت کرده و در توسعه این ذخیره دانشی کوشش کنند، ثبت و شناسنامه دار کرده و خدماتی را در گستره سنتز و مونتاژ قطعات، ادوات و سامانه‌ها ارائه می‌دهد (۱۳).

به تیم‌های دانشجویی در رقابت سالانه iGEM یک کیت استاندارد از قطعات قابل تعویض با یکدیگر (به نام BioBricks) را در آغاز هر تابستان، از دفتر قطعات بیولوژیک (که شامل قطعات ژنتیکی مانند پروموتورها، ترمیناتورها، المان‌های گزارشگر و ستون‌های پلاسمیدی است) داده می‌شود. این تیم‌ها در آزمایشگاه‌های محلی خود در طول فصل، بر روی این قطعات جدید ساخته شده توسط آن‌ها، کار می‌کنند و سامانه‌های زیستی‌ای را می‌سازند که بتوانند در سلول‌های زنده عمل نمایند (۱۴). در حقیقت هدف این رقابت‌های آزاد، طراحی و مونتاژ سامانه‌های ژنتیکی خلاقانه با ترکیب نمودن قطعات BioBrick موجود و خلق نمونه‌های نوین است (۱۵).

به زبان دیگر می‌توان اطلاعات پیرامون قطعات ساختاری بیولوژیک درباره توالی DNA، عملکرد و اعتبار آن‌ها را در منابع آزاد<sup>۱</sup> یا کتابخانه‌های

<sup>1</sup> Open sources

قطعات<sup>۱</sup> همچون BioBrick، BIOFAB، SynBIS و OpenPlant یافت کرده و این قطعات ساختاری را به یکدیگر اتصال داد تا ارگانیسیم‌های طراحی شده، شکل بیابند (۱۶). دسترسی آزاد به قطعات ساختاری در بیولوژی سینتتیک در قالب کتابخانه‌های آزاد، دکترین «ثبت اختراع (پتنت)» را در برابر «مدیریت و انتشار آزاد منابع ژنتیکی» به چالش می‌کشد (۱۷). به زبان دیگر، «مالکیت دانش و ثبت اختراع» در برابر «ذخیره‌سازی دانش به صورت آزاد»، قرار می‌گیرد. گروهی که در بیولوژی سینتتیک با پتنت‌سازی مخالفت می‌ورزند و از دیدگاه اخلاقی پیرو منابع آزاد در دانش بیولوژی سینتتیک می‌باشند، بر این باور هستند که پتنت نمودن این دانش، نوآوری را منع ساخته و موجب مونوپولی در این گستره توسط شرکت‌های تجاری گردیده (۱۸) و دسترس‌پذیری جامعه دانشمندان و پژوهندگان را به اختراعات و اکتشافات مهم محدود می‌سازد و نگرانی‌های اخلاقی‌ای را پیرامون بخش‌های حیاتی مانند غذا و دارو، ایجاد می‌کند.

در حقیقت، دکترین «ثبت اختراع» که سابقه آن را می‌توان در زیست‌فناوری سنتی جستجو نمود در برابر راهبرد «منبع آزاد» قرار می‌گیرد. پیروان دکترین ثبت اختراع بر این باور هستند که این راهبرد می‌تواند رشد اقتصادی این دانش را نوید دهد. در هر صورت، مقررات مالکیت فکری در بیولوژی سینتتیک به تجزیه و تحلیل گسترده‌تر و بحث‌های بیشتر، نه تنها از دیدگاه اقتصادی یا قانونی بلکه از منظرهای

---

<sup>1</sup> Part Libraries

اخلاقی و اجتماعی، نیازمند است (۸).

افرادی همچون کریک ونتر با ساخت ژنوم‌های سینتتیک و گذاشتن آن‌ها در درون سلول، پتنت‌های بسیار گسترده‌ای را تدارک دیدند ولی در سوی دیگر، دفتر قطعات بیولوژیک استاندارد و BioBrick با راهبرد منبع آزاد قرار دارند.

تعدادی از اندیشمندان بر این اعتقاد پافشاری دارند که توسعهٔ دفاتر قطعات استاندارد و یا کتابخانه‌های آزاد، احتمالاً می‌توانند پدیداری بخش‌های رقابت‌پذیر در مقیاس کتابخانه‌های آزاد را تحریک نمایند؛ به گونه‌ای که به جای ثبت قطعات، این کتابخانه‌ها موفق به اخذ لیسانس شوند. در این رقابت، کتابخانه‌های آزادی که قطعات بیشتری را در معرض کاربران خود قرار می‌دهند و قطعات آن‌ها بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، هزینه‌های قطعات را با کاربرد متوالی آن‌ها کاهش می‌دهند و این اثر اقتصادی همان است که در اقتصاد دانایی محور به اثر شبکه‌ای<sup>۱</sup> معروف است (۱۹).

در این میان، گروهی دیگر نیز قرار دارند که معتقدند بیولوژی سینتتیک می‌بایست از راهبرد پتنت‌سازی در ذخیره‌سازی دانش و مالکیت فکری و همچنین از راهبرد «منبع آزاد» استفاده کند (۱۹). حتی دکترین منبع آزاد نیز از زوایای اخلاقی، آکنده از هنجارها و ضد هنجارها است و این زوایا مورد بحث قرار گرفته‌اند (۲۰). برای مثال، دسترسی آزاد

<sup>۱</sup> Network Effect

به قطعات ساختاری بیولوژیک در رقابت‌های iGEM برای دانشجویان شاید اخلاقی باشد ولی هنگامی که آنان در پی کار حرفه‌ای و ساماندهی به شرکت‌های نوپا یا استارت‌آپ‌های خود جهت مقاصد اقتصادی و تجاری هستند، دسترسی آزاد ممکن است به یک ضد هنجار تبدیل شود (۲۰). در هر صورت، می‌بایست مراقبت‌های ویژه‌ای را در هنگامی که گروه دانشجویان، آماتورها، بیوهکرها<sup>۱</sup> و کسانی که در بخش بیولوژی خودگردان<sup>۲</sup>، از منابع آزاد بیولوژی سینتتیک استفاده می‌کنند انجام داد تا مطمئن شد که آن‌ها به صورت ایمن از این منابع دانشی بهره‌مند گردیده، آگاهی کافی را داشته و رعایت اصول و رهیافت‌های ایمنی زیستی را مطلع می‌باشند (۲۱-۲۲).

این جامعه بیولوژیست‌های خودگردان، بیوهکر و کسانی که بدون مراقبت‌های سخت‌گیرانه مقرراتی به طراحی و ساخت سامانه‌های زیستی به شیوه‌ای آزاد می‌پردازند (در حقیقت در مکان گاراژ به ساخت اشکال جدید حیات و سامانه‌های زیستی، اقدام می‌نمایند)، با خود یک نگرانی عمده اخلاقی را از دیدگاه ایمنی زیستی به ارمغان می‌آوردند (۲۳). زیرا بسیاری از بیوهکرها به انجام آزمایشات بیولوژیک ابتدایی در آزمایشگاه‌های شخصی خود نمی‌پردازند بلکه از شیوه‌های بیولوژی پیشرفته مانند DNA‌های پیچیده و مونتاژهای ژنتیکی که بر روی رشد و عملکرد ارگانیسم‌های

---

<sup>1</sup> Biohackers

<sup>2</sup> Do-it-yourself Biology

گونگون مؤثرند بهره می‌برند. پس این گونه به نظر می‌رسد که ما در یک تغییر پارادایمی هستیم که شامل یک رهیافت دموکراتیک در گستره سیاست تا بیهکری بوده و فلسفه منبع آزاد را مورد چالش جدی قرار می‌دهد و چنین است که پاره‌ای از اندیشمندان به این رهیافت رادیکال، در دسترسی آزاد به ذخیره دانش بیولوژی سینتتیک، به دیده شک می‌نگرند (۲۴).

اما از سوی دیگر دانشمندان جوان، بیش از پیش در جستجوی منابع آزاد، دموکراتیزه، شفاف و مصرف‌کننده مدار، در هر سطح بوده و بر این اصرار می‌ورزند که در توسعه بیولوژی سینتتیک، واقعیت‌های اقتصادی، ارقام و اعداد و سود و زیان مطرح نیستند و این فرهنگ ذخیره‌سازی آزاد دانش بیولوژی سینتتیک است که خواهد درخشید (۲۵). از پیشگامان این خط فکری اخلاقی، آندره هسل<sup>۱</sup> با ارتشی از یاران<sup>۲</sup> خود است که در سال ۲۰۰۹ سامان یافت. برنامه‌ریزی آن‌ها بر نرم‌افزارهای در دسترس و قطعات بیولوژیکی استوار است که می‌توان به شیوه‌های نوآورانه به گونه‌ای آن‌ها را ترکیب نمود تا راه برای درمان‌های فردگرایانه سرطان‌ها هموار شود و این را باید بدون نیاز به سرمایه‌گذاری‌های هنگفت از مسیرهای خرید پتنت انجام داد. این گونه است که هسل خود را «کاتالیست برای منبع آزاد بیولوژی سینتتیک» نامیده است (۲۶).

با این وجود، فراموش نشود که در جبهه‌ای دیگر، افرادی وجود دارند

<sup>1</sup> Andrew Hessel

<sup>2</sup> The Pink Army Cooperative

که معتقدند سازه‌های ژنتیکی دست ساخته انسانی که برای خلق واکسن‌ها، سوخت‌های زیستی و محصولات تغذیه‌ای استفاده می‌شوند، می‌بایست تحت رژیم مالکیت فکری قرار گیرند که این شیوه می‌تواند برای توسعه علم و صنعت زیست فناوری بسیار حیاتی بوده و موجب رشد و توسعه اقتصادی بیولوژی سینتتیک شود. با در نظر گرفتن دیدگاه‌های اخلاقی هر دو جبهه، به نظر می‌رسد که شاید بهتر باشد از مطلق‌گرایی گریز نمود و راه میانه‌ای را جست (۲۶).

### ۳-۳-۱- عدالت و شکاف فناورانه

بحث‌های کنونی درباره مفهوم عدالت از گفتمان فلسفی پیرامون ارتباط دولت و شهروندان برخاسته‌اند و دولت می‌بایست در حفاظت و توسعه حقوق انسانی، نقش حیاتی خود را ایفا نموده و در عدالت در انتشار و نقادی آن کوشا باشد. از این رو، اصل عدالت، کلیدی به سوی اخلاق، در بیولوژی سینتتیک، محسوب می‌گردد (۷). البته نه تنها بیولوژی سینتتیک بلکه همه فناوری‌ها و کاربردهای آن‌ها، به ارزیابی و بررسی در پیوند با عدالت نیاز دارند. بنابراین از بسیاری از جنبه‌ها، بحث موارد عدالت در بیولوژی سینتتیک، آینه بحث‌های پیرامون مهندسی ژنتیک است که پیش از این برقرار بوده است. بحث عدالت، منظرهای گوناگونی را به چالش می‌کشد ولی ما در اینجا به منظر اجتماعی و جغرافیایی آن نظر می‌افکنیم. از دیدگاه اجتماعی، بحث عدالت در بیولوژی سینتتیک

به این معنا است که دولت می‌بایست در تدوین قوانین انتشار خطرات و سودمندی‌های بیولوژی سینتتیک در پژوهش و کاربردهای آن کوشا بوده و دست‌اندرکاران درونی و بیرونی حکومت، فرایندهایی که بر انتشار عادلانه سودمندی‌ها و خطرات این فناوری در سطح جوامع مؤثرند را لحاظ دارند. این گزاره، این معنا را در خود نهفته دارد که خطرات پژوهش نباید ناعادلانه معطوف به افراد، زیرگروه‌ها و جمعیت‌های خاص باشد و از قطب‌گرایی این خطرات در سطح این بخش‌ها باید جلوگیری نمود. خطرات نه تنها در سطح جوامع بلکه در سطح محیط‌زیست نیز نمی‌بایست ناعادلانه توزیع گردد.

تولیدکنندگان کالاها و همهٔ کسانی که با بیولوژی سینتتیک، سوداگری می‌نمایند، باید تضمین‌کنندهٔ آن باشند که خطرات و سودمندی‌های بالقوه برای جوامع و محیط‌زیست به خوبی ارزیابی گردیده و به گونه‌ای مدیریت شوند که جدی‌ترین خطرات شامل اثرات طولانی مدت، به صورت ناعادلانه و غیرلزوم، فقط توسط پاره‌ای از افراد، زیرگروه‌ها و جمعیت‌ها تحمل نگردند. این تلاش‌ها همچنین باید تضمین کنند که پیشرفت‌های مهم که از این پژوهش‌ها حاصل می‌آیند به افراد و جمعیت‌هایی که بیشترین سود را از این پژوهش‌ها به دست می‌آورند، به صورت عادلانه دریافت شود (۲).

سازوکار «اشتراک در منافع»<sup>۱</sup>، راهبردی است که همان‌گونه که

<sup>1</sup> Benefit Sharing

شرودر<sup>۱</sup> توصیف کرده است می تواند در انتشار عادلانه سودمندی های بیولوژی سینتتیک مؤثر واقع شود. اشتراک در منافع این گونه است که می بایست بخشی از سودآوری و مزیت های حاصله از کاربرد منابع ژنتیکی انسانی، غیرانسانی، منابع کایمری<sup>۲</sup> و دانش بومی را به ارائه دهندگان این منابع تخصیص داد تا بتوان عدالت در مبادله را حاکم کرد. در این فرایند تبادلی، توجه ویژه می بایست به کسانی داشت که دسترسی منطقی به محصولات و خدمات بهداشتی و پزشکی بیولوژی سینتتیک را فاقد می باشند (۳). این عدم رعایت اشتراک در منافع خود می تواند موجب بی عدالتی اجتماعی شود که مثال برجسته آن را می توان درباره داروی ضد مالاریای آرتیمیسینین<sup>۳</sup> مشاهده نمود (۱۹).

پیش از ساخت سینتتیک، تولید این داروی ضد مالاریا از منبع طبیعی نادر، به واسطه افراد ساکن در جوامع فقیر آسیای شرقی و بعضی از قسمت های آفریقا انجام می گرفت. این افراد به پرورش کرم چوب<sup>۴</sup> برای تولید این دارو مشغول بودند. بیولوژی سینتتیک موفق گردید که با خلق یک سویه از مخمر جهت تولید اسید آرتیمیزینیک (پیش ساز مالاریا)، اقدام نموده و شیوه ای سودمند و کارآمد را برای مبارزه با بیماری مالاریا در پیش گیرد. اما این روند موجب گردیده است که افراد در کشورهایی

---

<sup>1</sup> Schroeder

<sup>2</sup> Chimeric

<sup>3</sup> Artemisinin

<sup>4</sup> Artemisia annua

که مالاریا اندمیک است به دارویی وابسته شوند که دیگر مونوپولی آن در دست کشورهای توسعه یافته بوده و کشاورزان کرم چوب نیز شغل خود را از دست دهند (۱). در اینجا است که جغرافیای فقر و غنا و مفهوم اشتراک منافع و عدالت در انتشار سودمندی‌های بیولوژی سینتتیک، خود را نشان می‌دهد. بی شک با توسعه‌های در پیش راه بیولوژی سینتتیک، ما شاهد آن خواهیم بود که محصولات این فناوری جایگزین محصولات طبیعی شوند که پیش از این توسط جوامع محلی و به صورت عمده فقیر تولید می‌شده‌اند و این موضوع می‌تواند ابعاد عدالت جویانه منافع اقتصادی را به چالش کشد (۳).

نکته دیگر در خصوص عدالت آن است که چنانچه تولید محصولات و فرآورده‌های بیولوژی سینتتیک در کشورهای کم توسعه یافته تر و در حال توسعه انجام شود. این کشورها نیز می‌بایست به صورت عادلانه همان کدهای اخلاقی مربوط به بیولوژی سینتتیک را همانند آنچه در کشورهای توسعه یافته رعایت می‌شوند را رعایت نمایند (۷). از منظر اقتصادی نیز این گونه نقد گردیده است که این ترس وجود دارد که با توسعه بیولوژی سینتتیک و کاربرد آن، شکاف فناورانه میان کشورهای صنعتی و در حال توسعه افزایش یابد. البته این موضوع خاص بیولوژی سینتتیک نبوده و فناوری‌های نوین دیگر را نیز شامل می‌شود. نسخه راه حل نیز یکسان است و می‌بایست کشورهای در حال توسعه را برای انتقال فناوری و حمایت از آن‌ها در بهره‌برداری از محصولات و افزایش ظرفیت قوه خبرگی

آن‌ها در زمینه بیولوژی سینتتیک، مدّ نظر قرار داد. با این راهبرد می‌توان عدالت را در پهنه خلق و کاربرد این فناوری برقرار نمود (۶).

این موضوع از این لحاظ اهمیت می‌یابد که دریابیم محصولات بیولوژی سینتتیک مانند داروها و شیوه‌های درمانی، محصولات پالایندگی محیط زیست و منابع تجدیدپذیر و ارزان برای انرژی که می‌توانند بسیاری از مسائل کشورهای در حال توسعه را در زمینه سلامت و بیماری، محیط زیست و انرژی حل نمایند، عمدتاً در کشورهای توسعه یافته تولید می‌شوند و به دلیل بالا بودن هزینه‌های پژوهش و توسعه و نبود زیرساخت‌های فناورانه برای توسعه بیولوژی سینتتیک در این کشورها، کشورهای در حال توسعه، همیشه به کشورهای توسعه یافته، وابسته خواهند بود و این موجب شکاف فناورانه‌ای خواهد شد که پیش از این پیرامون فناوری‌های دیجیتالی و نانو شاهد آن بوده‌ایم و به شکاف دیجیتالی یا شکاف نانویی معروف است. جامعه بیولوژی سینتتیک چنانچه به پیشگیری از رخداد شکاف بیولوژی سینتتیک متعهد باشد، می‌تواند با در نظر گرفتن کدهای اخلاقی در گستره عدالت، در زدودن این شکاف پیش رونده، اهتمام ورزد (۸).

### ۳-۴- بهره‌برداری از دانش

در بهره‌برداری از دانش بیولوژی سینتتیک، دو مقوله ایمنی زیستی<sup>۱</sup> و امنیت زیستی<sup>۲</sup>، بسیار حائز اهمیت می‌باشند. ایمنی زیستی شامل

---

<sup>1</sup> Biosafety

<sup>2</sup> Biosecurity

سیاست‌ها و اقداماتی است که به گونه‌ای طراحی شده‌اند تا کارکنان و محیط زیست را از کاربردهای ناجور غیرعمدی، یا رها شدن عوامل و مواد آزمایشگاهی خطرناک به صورت تصادفی، محافظت نمایند؛ در حالی که امنیت زیستی، معمولاً با کنترل مواد و اطلاعات بیولوژیک حساس و بحرانی توأم است که از دست‌یابی غیرمسئولانه، کاربردهای ناجور و رهاسازی عمدی آن‌ها پیشگیری می‌نماید. هر چند که در تئوری، تفاوتی بنیادین میان این دو است ولی در عمل، ایمنی زیستی با امنیت زیستی، همپوشانی می‌یابد و با پیشرفت‌های بیولوژی سینتتیک، دولت‌ها مجبور خواهند بود که به صورت ژرف، به هر دو نیز بپردازند (۱۵).

در حالی که در ایمنی زیستی پرداختن به شیوه‌های نوین در ارزیابی خطر، ایجاد سامانه‌های ایمنی سینتتیک و نظام‌مندی دسترسی آماتورها به بیولوژی سینتتیک مهم هستند، در امنیت زیستی، مسائل آموزشی، آگاه‌رسانی، حاکمیت و مراقبت و راه‌حل‌های فنی، مدنظر قرار می‌گیرند (۲۷). گروهی از پژوهشگران این نظر را دارند که به کارگیری بازهایی<sup>۱</sup> که در طبیعت یافت نمی‌شوند و یا کاربرد ستون پیتیدی به جای قند - فسفات موجب خواهد شد که خطرات بیولوژی سینتتیک، نسبت به مهندسی ژنتیک کاهش یابد؛ اما گروهی دیگر بر این باورند که مسائل بنیادین و تحول برانگیز بیولوژی سینتتیک، آن قدر برجسته هستند که خطرات ایمنی زیستی آن‌ها از مهندسی ژنتیک بسیار بالاتر است (۱).

---

<sup>1</sup> Bases

عمده ترس مردم، جامعه فناوری زیستی و سیاست گذاران از آنجا بر می خیزد که بیولوژی سینتتیک با به کارگیری فناوری های گوناگون، این توان را به صورت بالقوه دارد که ارگانیسم های کاملاً جدیدی را طراحی و خلق نماید که می توانند خطرناک باشند. از سوی دیگر، توالی یابی ژن و سنتز آن، ارزان تر و ساده تر می شود و به آسانی از طریق آنلاین، در دسترس عامه قرار می گیرد؛ برای مثال ۳۲۱۵ جفت باز ژنوم ویروس، هپاتیت B را می توان با کمتر از صد یورو سنتز نمود. از طرفی دیگر، هکرهای زیستی<sup>۱</sup> می توانند اطلاعات زیستی را آزادانه از طریق وب سایت ها، بلاگ های شخصی و ویدیوهای یوتیوب<sup>۲</sup>، تبادل و به اشتراک گذارند (۲۸). مجموعه این رویدادها موجب شده است که در کاربرد دانش بیولوژی سینتتیک، ایمنی زیستی و امنیت زیستی، اهمیت یابند.

### ۳-۴-۱- ایمنی زیستی

همان گونه که اشاره شد، ایمنی زیستی به شیوه بازداری و دیگر اقداماتی می پردازد که کار کردن ایمن یا کاربرد عوامل بیولوژیک بالقوه خطرناک را تضمین می کنند. منطق اخلاقی کلیدی در ایمنی زیستی، حفاظت از زیان و ضرر است و از این رو بسیار مهم است که این اقدامات، تضمین نمایند که محصولات بیولوژی سینتتیک برای جمعیت های انسانی یا محیط زیست، خطرآفرین نمی باشند. البته این نکته را باید در

---

<sup>1</sup> Biohackers

<sup>2</sup> YouTube

نظر گرفت که هر چیزی که در بیولوژی سینتتیک تولید می‌شود، ملاحظات ایمنی زیستی را ندارد و بعضی از محصولات خوش خیم بوده و توانمندی ایجاد عفونت و آلودگی را ندارند. از این رو، در مباحث اخلاقی ایمنی زیستی، یافت اولویت‌های اخلاقی، خلق منابع و تعیین شرایط بسیار مهم می‌باشند (۳).

یکی از مسائل مهم، رهاسازی میکروارگانیسم‌های سینتتیک به محیط زیست است که این ارگانیسم‌ها می‌توانند فرایندهای انتقال ژنی افقی را آغاز کرده و بر توازن و تعادل بیوتیک اثر گذارند و یا در فراتر از عملکرد خود، تکامل یافته و اثرات ناخواسته‌ای را بر محیط زیست و دیگر جانداران ایجاد کنند. از این رو می‌بایست به محصولات بیولوژی سینتتیک از دید اخلاقی نگریست که آیا این محصولات، نتایج زیان‌بار برای اکولوژی و سلامت انسان را دارا می‌باشند؟ (۷)

از آنجا که ارگانیسم‌های مشتق یافته از بیولوژی سینتتیک ممکن است صفاتی داشته باشند که به صورت انتخابی بر علیه عوامل بیوتیک و غیربیوتیک مزیت داشته باشند، این احتمال وجود دارد که این ارگانیسم‌ها در طبیعت پابرجا مانده و نسبت به محیط زیست نفوذی شوند. بنابراین احتمال پابرجایی و نتایج حضور آن‌ها در محیط زیست می‌بایست بخشی از ارزیابی خطر در ارگانیسم‌های مشتق یافته از بیولوژی سینتتیک یا محصولات قرار گیرند. افزون بر این، مواد ژنتیکی (مدارها، عناصر ژنتیکی و ژنوم‌ها) ممکن است از طریق هیبرید شدن با گونه‌های

وحشی تطابق پذیر جنسی فرار کرده و در طبیعت پابرجا شوند. اثرات این جریان ژنی عمودی و همچنین جریان ژنی افقی، تا حدّ بسیار زیادی به مناسبت داشتن ارگانسیم‌ها بستگی دارد (۲۹).

پرسش اخلاقی در این زمینه بر این تمرکز دارد که چندان آشکار نیست هنگامی که یک میکروارگانسیم با هدف و منظور (مانند پاکسازی مناطق آلوده و تجزیه آلوده کننده‌ها) وارد محیط زیست می‌کنیم تا چه حدّ حق داریم که طبیعت را در معرض چنین خطری قرار دهیم؟ و آیا ما حق تداخل، با ترکیب نمودن اکوسیستم به چنین شیوه‌ای را داریم؟ از سوی دیگر، وارد کردن چنین میکروارگانسیم‌هایی نه تنها مواد آلوده کننده را برای زیست انسان بلکه برای محیط زیست و دیگر زیست‌مندان می‌زدایند و ممکن است مفید واقع شوند و از این رو بحث پیرامون سود و زیان برای طبیعت و جامعه را باید با سنجه‌های دقیق مورد ارزیابی قرار داد (۸). در هر صورت، ارزیابی خطر و پایش رهاسازی میکروارگانسیم‌ها در طبیعت، بسیار ضروری است و مقررات و قوانین ویژه‌ای را می‌طلبد (۲).

در شرایطی که خطر تکثیر میکروارگانسیم سینتتیک در محیط طبیعی وجود دارد، یافت محدودسازی قابل اعتماد و سازوکارهای کنترل، بسیار مورد نیاز است که طراحی شوند. برای مثال «ژن‌های خودکشی»<sup>۱</sup> یا دیگر اشکال «تکانه‌های خود تخریبی» را می‌توان در نظر گرفت تا بتوانند همچون خط و مرزی در طول زندگی این میکروارگانسیم‌ها، عمل

---

<sup>1</sup> Suicide Genes

نمایند. شیوه جایگزین آن است که ارگانسیم‌های مهندسی شده را به گونه‌ای ساخت که وابسته به اجزاء تغذیه‌ای باشند که در محیط آزمایشگاه بیرونی یافت نمی‌شوند (مانند اسیدهای آمینه جدید). بدین سان می‌توان از رشد و تکثیر آن‌ها، در صورت رهاسازی در محیط جلوگیری کرد (۲).

استفاده از اسیدهای آمینه سینتتیک و اجزاء سینتتیک در ساختار DNA این ارگانسیم‌ها، موجب خواهد شد که این ارگانسیم‌ها نتوانند در محیط زیستی که فاقد این اجزاء هستند، تکثیر شوند. از راهبردهای دیگر نیز می‌توان به کاربرد قطعات زیستی جهت پایش اندازه جمعیت این میکروارگانسیم‌ها اشاره نمود.

این قطعات را می‌توان به مکانسیم «خود تخریبی» پیوست داد. به این صورت که هنگامی تراکم جمعیت از حدی گذر می‌کند، فعال شوند. چنین به نظر می‌رسد که مهندسی سامانه‌های زیستی جهت کاستن توانایی زیست آن‌ها در خارج از آزمایشگاه، خود به شیوه‌ای رایج درآید.

در هر صورت، می‌بایست میکروارگانسیم‌های سینتتیک را خطرناک قلمداد کرده و با آن‌ها با مراقبت ویژه رفتار نمود، مگر آن که خلاف آن ثابت شود. بر اساس راهنمای بنیاد سلامت آمریکا (NIH) در زمینه میکروارگانسیم‌های مهندسی شده ژنتیکی، مطالعه بر روی هر قطعه زیستی حاوی DNA باید در شرایط فیزیکی با درجه بسیار بالای مراقبتی انجام پذیرد (۱۹).

بسیاری از پژوهشگران عرصه بیولوژی سینتتیک این گونه نظر داده‌اند که چهارچوب ایمنی زیستی‌ای که طی سه دهه گذشته برای فناوری DNA بیولوژی سینتتیک به کار رفته و ایمن بودن خود را اثبات نمود، می‌تواند به عنوان پایه برای طراحی چهارچوب ایمنی زیستی بیولوژی سینتتیک نیز به کار رود (۱۹). اما همان‌گونه که اشاره شد، گروهی دیگر معتقد هستند این احتمال وجود دارد که پژوهش‌های بیولوژی سینتتیک و محصولات آن (شامل ارگانیسم‌ها و ملکول‌ها) که از این فناوری مشتق شده‌اند، دارای خطرات بالاتری از نمونه‌های ارگانیسم‌های تراریخته باشند؛ زیرا در بیولوژی سینتتیک، از عناصر ژنتیکی منابع گوناگون (حتی از طراحی‌های کاملاً نوین) استفاده می‌شود. با وجود این دیدگاه‌های مخالف، نگرانی‌ها پیرامون ارزیابی خطر و مدیریت بیولوژی سینتتیک، بر پایه ارگانیسم‌های تراریخته سنتی، استوار است؛ زیرا در هر دو مورد، از DNA نوترکیب و فناوری‌های مهندسی ژنتیک، استفاده می‌شود (۲۹). اما این راهبرد خالی از چالش نیست؛ زیرا در بیولوژی سینتتیک با قطعات زیستی<sup>۱</sup> سروکار داریم و این قطعات، ادوات و سامانه‌ها، نگرانی‌های ویژه‌ای را بر می‌انگیزند؛ زیرا می‌توانند رفتارهای نوپدید را از خود، در زمانی که در مدار قرار می‌گیرند، نشان دهند و در ترکیب با واحدهای عملکردی و در برهم‌کنش با یکدیگر، رفتارهایی را از خود بروز نمایند که ما هنوز شناخت کافی از آن‌ها را نداریم. همچنین

---

<sup>۱</sup> Bio

شاسی‌های مورد استفاده در بیولوژی سینتتیک، ممکن است در طبیعت پابرجا بمانند و از این رو ایمنی زیستی در برخورد با بیولوژی سینتتیک و قطعات زیستی (شامل شاسی‌ها)، ممکن است قوانین و مقرراتی را فراتر از آن چیزی که در مهندسی ژنتیک و فناوری ارگانیسم‌های تراریخته شاهد بوده‌ایم را طلب نماید (۲۳).

مسائل برخاسته از ایمنی زیستی در بیولوژی سینتتیک، محدود به رخداد غیر عمدی حوادث نمی‌شود بلکه این مسائل می‌توانند برانگیخته از نداشتن آموزش و تربیت کافی و مناسب در رفتار با قطعات زیستی و محصولات بیولوژی سینتتیک باشد زیرا به دلیل باز بودن منابع دانش بیولوژی سینتتیک و دسترس پذیری آسان به این اطلاعات، ممکن است افراد آماتور و کسانی که بیولوژی را در اتمسفر بیرون از مجامع آکادمیک آزمون می‌کنند و معروف به جامعه بیولوژیست‌های گاراژی<sup>۱</sup> هستند، از طریق اینترنت، این اطلاعات را دریافت کرده و خود به طراحی و ساخت قطعات زیستی و ماشین‌های زیستی پردازند و از این رو نگرانی‌های عمیقی را در این عرصه ایجاد کنند. بنابراین، آموزش‌های ایمنی زیستی نه تنها برای این گروه بلکه برای دیگر کاربران و پژوهشگران غیربیولوژیست مانند مهندسان کامپیوتر، شیمی‌دانان، فیزیک‌دانان و مهندسان، بسیار ضروری می‌باشد (۱۵).

---

<sup>1</sup> Garage Biology

## ۳-۴-۲- امنیت زیستی

امنیت زیستی به پیشگیری از استفاده ناچور مانند از دست دادن، سرقت، انحراف یا رهاسازی عمدی پاتوژن‌ها، توکسین‌ها و دیگر مواد زیستی نظر دارد (۲۷). البته امنیت زیستی می‌تواند معنای برقراری هر دو نوع حفاظت را برای تضمین ایمنی زیستی و پیشگیری از کاربردهای نابکارانه را در بر داشته باشد. برای مثال، با سنتز ارزان DNA و توالی‌های ویروس در دسترس، این امکان وجود دارد که ویروس‌های آسیب‌زا را از طریق سفارش دادن پستی قطعات DNA ای، سنتز نمود. پرسش‌های اخلاقی مربوط به امنیت زیستی شامل در نظر گرفتن چگونگی سبک و سنگین کردن سودمندی‌ها در برابر کاربردهای زیان بار بالقوه آن است. این موضوع زیر عنوان «کاربرد دوگانه»<sup>۱</sup> مطرح می‌شود. به این معنا که یک پژوهش واحد می‌تواند برای اهداف خوب و هم بد به کار آید. به زبان دیگر، پژوهش و دستاوردهای آن می‌تواند برای اهداف زیان بخش ویژه‌ای به کار آید که نتایج آن بالقوه فاجعه آمیز خواهد بود. البته مسائل کاربرد دوگانه منحصر به بیولوژی سینتتیک نمی‌باشد ولی این شاخه از دانش، یک نمونه الگوی خوب برای نشان دادن موارد اخلاقی کاربرد دوگانه است (۳ و ۳۰).

در همین راستا، موضوع «اخلاق دانش»<sup>۲</sup> طرح گردیده است؛ به این معنا که آیا ما مجاز هستیم که بعضی از انواع (که بالقوه بسیار می‌توانند زیان‌بخش باشند) را خلق و انتشار دهیم در حالی که بسیاری

---

<sup>1</sup> Dual Use

<sup>2</sup> Ethics of Knowledge

سودمندی‌ها را هم در خود نهفته داشته باشند. پرداختن به این پرسش می‌تواند بسیاری از مسائل کاربرد دوگانه را حل نماید (۳). اما پژوهش‌های اخلاقی به صورت ژرف پیرامون مسئله «کاربرد دوگانه» بیولوژی سینتتیک بسیار محدود است و جامعه آکادمیک و حاکمیتی می‌بایست به تجزیه و تحلیل موارد اخلاقی کاربرد دوگانه فناوری‌های نو، به ویژه بیولوژی سینتتیک، به شکل عالمانه‌ای، ورود نماید (۳۰ و ۱).

این موضوع از این لحاظ اهمیت می‌یابد که کاربرد دوگانه بیولوژی سینتتیک و محصولات آن با فعالیت تروریسم زیستی<sup>۱</sup>، در پیوند قرار می‌گیرد و موارد کاربردی این فناوری می‌تواند برای اهداف تروریستی و نظامی نیز به کار آید. زیرا در بیولوژی سینتتیک امکان ساخت ویروس‌ها و باکتری‌های خطرناک با امکانات ساده وجود دارد و از این رو امکان کاربرد نابکارانه این فناوری فزونی می‌یابد. در سال ۲۰۰۲، پژوهشگران در یک آزمایشگاه در آمریکا، ویروس فلج اطفال را از توالی‌های DNA در دسترس تجاری، مونتاژ کردند. در سال ۲۰۰۵ نیز گروه دیگری در آمریکا ویروس منقرض شده آنفولانزای اسپانیایی را سنتز کردند. طرح این ویروس‌ها به چاپ رسید و در دسترس همگان قرار گرفت. این مثال‌ها نشان می‌دهند که ترس از کاربردهای نابکارانه در بیولوژی سینتتیک واقعی هستند و با افزایش تجاری‌سازی توالی‌های DNA و توسعه این فناوری و برداشتن موانع فنی و مالی، امکان طراحی حملات تروریستی و کاربردهای دوگانه در بیولوژی سینتتیک، فزونی خواهد یافت (۶).

<sup>1</sup> Bioterrorism

این در ماهیت بیولوژی سینتتیک نهفته است که می توان به صورت تئوریک، طراحی DNA را از یک کامپیوتر در هر مکانی، بدون نظارت مقررات سازمانی، انجام داد (۲۰۲). نکته اساسی در این مورد آن است که نظارت و مراقبتی بر توالی DNA سفارش شده بر خریدار و خود توالی که جهت ساخت چه میکروارگانیسمی سفارش داده شده است، وجود ندارد. در گزارش جالب خبرنگار گاردین در سال ۲۰۰۶ آمده است که او توالی DNA ویروس آبله را سفارش داد و در خانه خود آن را دریافت نمود و این حرکت نشان داد که مقررات خاصی بر تأمین توالی DNA حاکم نیست. در مقاله نیوساینتیست پیرامون تأمین کنندگان توالی DNA، به این حقیقت اشاره شده که از ۱۲ شرکت پاسخ دهنده، فقط پنج شرکت گفتند که هر توالی دریافتی را مورد غربالگری قرار می دهند. چهار شرکت نیز بیان کردند که بعضی از توالی ها را غربالگری می کنند و سه شرکت باقیمانده نیز هیچ برنامه غربالگری را رعایت نمی کردند. این دو گزارش نشان می دهند که چنانچه خریدار و توالی DNA مورد بازرسی قرار نگیرند، شرکت تأمین کننده توالی DNA، می تواند به راحتی مواد را جهت اقدامات تروریستی زیستی، در اختیار قرار دهد (۱۹).

بیولوژیست های سینتتیک باید مسئولیت تضمین این که کار آن ها حرکات بیوتروریستی را آسان نمی کند را بر عهده گیرند و یک کمیته مشاوره اخلاقی نیز می بایست توسعه یابد. این مشاوره ها می بایست به آسانی در دسترس بوده و اصول محرمانه بودن را رعایت نمایند.

در هر صورت، اصول اخلاقی بیولوژی سینتتیک، کاملاً آشکار نبوده و با ادامه بحث و جدل‌ها، تکامل این اصول ادامه خواهد داشت. از این رو توسعه یک وب‌گاه اخلاقی جهت شفاف‌سازی تهدیدات زیستی بیولوژی سینتتیک، به گونه‌ای که اعضاء بتواند رخدادهای بالقوه و تهدیدات ایمنی زیستی را گزارش نمایند، می‌بایست بنیان گذاشته شود. تولید محتوای حرفه‌ای مانند استانداردهای رسمی، کدهای اخلاقی، گروه مشاوره‌ای و یک جامعه تخصصی در این مورد، بسیار منطقی می‌باشد. همچنین بیولوژیست‌های سینتتیک ممکن است بتوانند راه‌حلی را برای مسائل اخلاقی در سطح طراحی ارائه دهند. بارکدهایی که تولیدکننده ارگانسیم سینتتیک را مورد شناسایی قرار می‌دهند را می‌توان برقرار و مورد جستجو قرار داد (۱۹).

البته باید این را در نظر داشت که همه اقدامات جهت کنترل کاربردهای بالقوه نابکارانه بیولوژی سینتتیک، از جمله خود حاکمیتی و مقررات قانونی، به شکل بنیادین به هوشیاری و آگاهی پژوهشگران و سیاست‌گذاران بستگی دارد. عدم آگاهی و نداشتن شواهد کافی پیرامون تهدیدات بالقوه بیولوژی سینتتیک در عرصه امنیت زیستی و در جامعه علمی این شاخه از دانش، به صورت یک معضل خودنمایی می‌کند و برای غلبه بر این چالش، می‌بایست به صورت یک اولویت مورد توجه قرار داد؛ زیرا فقدان آگاهی پیرامون این خطرات امنیتی، می‌تواند اثرات مخرب غیرقابل پیش‌بینی‌ای را از خود نشان دهد (۱۹).

امروزه، بحثی جدی وجود دارد که آیا جامعه آکادمیک می‌بایست

نتایج پژوهش‌های خود را که می‌تواند در طراحی و ساخت پاتوژن‌های بیماری‌زا مورد استفاده قرار گیرند را به چاپ برساند یا خیر؟ گروهی معتقدند که با عدم چاپ این موارد و عدم آگاهی‌رسانی به جامعه علمی، آن‌ها برای رویارویی با خطرات تروریسم زیستی و حفاظت بیولوژیک ناتوان می‌شوند زیرا ممکن است به این اطلاعات، تروریست‌های زیستی، از طریق، دسترسی داشته باشند و برای منافع سودجویانه خود استفاده نمایند و این در حالی باشد که جامعه علمی به دلیل عدم دسترسی و نداشتن آمادگی از قبل، نتواند با این خطرات بالقوه رویارویی کند (۷). از دیدگاه علمی و اخلاقی، همه شرکت‌هایی که می‌توانند توالی‌های طولانی DNA را سنتز نمایند، می‌بایست تمام توالی‌ها را برای توکسیسیتی یا عفونت‌زایی (در پیش از فرایند سفارش)، بررسی کنند. این موضوع به این اشاره دارد که بانک داده‌های توالی‌های DNA توکسیک و عفونت‌زا<sup>۱</sup> می‌بایست در دسترس باشد. می‌بایست این شرکت‌ها توانایی پیگیری توالی‌های خطرناک احتمالی را در پیش از سنتز داشته باشند. نرم‌افزاری تحت عنوان Black Watch با هدف پیگیری سنتز توالی DNAهایی که می‌توانند خطرناک باشند، به صورت آزاد، در دسترس می‌باشد. این نرم‌افزار و یا نرم‌افزارهای مشابه که در آمریکا طراحی شده‌اند، می‌توانند میلیون‌ها سفارش در ماه را در سراسر جهان، رصد کنند (۷).

---

<sup>1</sup> Database Directive

## ۳-۵- منابع فصل سوم

- 1) Biology, S. T. E. O. S. 27 Oct. 2010. Synthetics: The Ethics of Synthetic Biology [Online]. Centre for Ethics and Technology. Available: <https://www.stopogm.net/sites/stopogm.net/files/webfm/plataforma/synthetics322.pdf> [Accessed Aug. 2007].
- 2) Issues, U. S. P. C. F. T. S. O. B. 2010. New directions: the ethics of synthetic biology and emerging technologies, Presidential Commission for the Study of Bioethical Issues.
- 3) Newson, A. J. 2015. Synthetic Biology: Ethics, Exeptionalism and Expectations. *Macquarie LJ*, 15, 45.
- 4) Douglas, T. & Savulescu, J. 2010. Synthetic biology and the ethics of knowledge. *Journal of medical ethics*, 36, 687-693.
- 5) Stemerding, D., Rerimassie, V., Srinivas, R. & Zhang, W. Feb 2014. Ethics debates on synthetic biology in three regions.
- 6) ECNH, F. E. C. O. N.-H. B. May 2010. Synthetic biology - Ethical considerations. Federal Ethics Committee on Non-Human Biotechnology ECNH.
- 7) Nielsen, L. 2010. Ethics of synthetic biology. Ethics of Synthetic Biology by the European Group on Ethics in Science and New Technologies to the European Commission. European Commission.
- 8) Deplazes, A., Ganguli-Mitra, A. & Biller-Andorno, N. 2010. The Ethics of Synthetic Biology: Outlining the Agenda. In: Schmidt, M., Kelle, A., Ganguli-Mitra, A. & Vriend, H. (eds.) *Synthetic Biology: The technoscience and its societal consequences*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- 9) ROGERS, W. 2015. Ethical Issues in Synthetic Biology: A Commentary. *Macquarie LJ*, 15, 39.

- 10) Bensaude Vincent, B. 2013. Between the possible and the actual: Philosophical perspectives on the design of synthetic organisms. *Futures*, 48, 23-31.
- 11) Boldt, J. April 2010. Synthetic Biology: Origin, Scope, and Ethics. *Minding Nature Journal*, Vol. 3, No. 1.
- 12) A, R., W, S., Woegerbauer, M., Peterseil, V., M, K., C, T., Brueller, W., Hohegger, R., Gansberger, M. & I. Und Leonhardt C, W. 2014. Synthetic Biology.
- 13) Wikipedia contributors. 2017, March 11. Registry of Standard Biological Parts. [Online]. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Registry\\_of\\_Standard\\_Biological\\_Parts&oldid=769710148](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Registry_of_Standard_Biological_Parts&oldid=769710148) [Accessed Retrieved 08:10, April 8, 2018].
- 14) Wikipedia contributors. 2018, January 13. International Genetically Engineered Machine [Online]. In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=International\\_Genetically\\_Engineered\\_Machine&oldid=820088507](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=International_Genetically_Engineered_Machine&oldid=820088507) [Accessed Retrieved 08:15, April 8, 2018].
- 15) Co-Operation, O. F. E. & Development 2014. Emerging Policy Issues in Synthetic Biology, OECD.
- 16) Parliament, H. O. & Technology, P. O. O. S. A. May 2015. Regulation of Synthetic Biology.
- 17) Bubela, T., Hagen, G. & Einsiedel, E. 2012. Synthetic biology confronts publics and policy makers: challenges for communication, regulation and commercialization. *Trends in biotechnology*, 30, 132-137.
- 18) Stermerding, D. & Rerimassie, V. July 2013. Ethics debates on synthetic biology in the eu.
- 19) Martin, P. & Balmer, A. 2008. Synthetic biology: social and ethical challenges. *Biotechnology and Biological Sciences Research Council*.
- 20) Mercer, D. 2015. iIdentity and governance in synthetic biology: Norms and counter norms in the international genetically engineered machine (iGEM) competition. *Macquarie LJ*, 15, 83.

- 21) Schmidt, M., Ganguli-Mitra, A., Torgersen, H., Kelle, A., Deplazes, A. & Biller-Andorno, N. 2009. A priority paper for the societal and ethical aspects of synthetic biology. *Systems and Synthetic Biology*, 3, 3.
- 22) Mooallem, J. 2010. Do-it-yourself genetic engineering. *New York Times*, 10.
- 23) Schmidt, M. 2008. Diffusion of synthetic biology: a challenge to biosafety. *Systems and synthetic biology*, 2, 1-6.
- 24) Dhyanaatha, K. 10 Dec 2015. How synthetic biology can benefit from open source. *Suyati* [Online]. Available from: <https://suyati.com/blog/how-synthetic-biology-can-benefit-from-open-source/> [Accessed 10 Dec 2015].
- 25) Bentham, H. J. Sep 9, 2014. An open source future for synthetic biology [Online]. Available: <https://ieet.org/index.php/IEET2/more/bentham20140909> [Accessed].
- 26) Nelson, B. 2014. Synthetic biology: Cultural divide. *Nature*, 509, 152.
- 27) European Science Commission DG Sanco. 18-19 March 2010, Brussels. Synthetic Biology Workshop: From Science to Governance. Workshop.
- 28) Willemarck, N., Pauwels, K., Breyer, D., Baldo, A. & Herman, P. Synthetic Biology: latest developments, biosafety considerations and regulatory challenges. In: *EUROPEAN BIOSAFETY*, A., ed., 2013.
- 29) Wei W, P. L. S. M. & Xu, J. 2014. Biosafety Considerations of Synthetic Biology: Lessons Learned from. *Current Synthetic and Systems Biology*, 2.
- 30) Kelle, A. 2013. 4. Synthetic Biology as a Field of Dual-Use Bioethical Concern. *Pharmaceutical biotechnology*, 87, 75-86.

پیوست

زیرساخت‌های پزشکی سیستمی

در نقشه جامع علمی کشور در گستره سلامت



## مقدمه

هم اکنون پزشکی در گذار انقلابی است که ماهیت و مراقبت‌های سلامت را از حالت واکنش به بیماری‌ها، به سوی پیشگویی و پیشگیری آن‌ها سوق خواهد داد. واکنشی به معنای آن است که هنگامی که بیماری پدیدار می‌شود، دانش پزشکی به کنش برانگیخته می‌شود. اما پیشرفت‌های فناوری (مانند فناوری‌های امیکس)، مباحث تئوریک (مفاهیم شبکه‌ها و سیستم‌های پیچیده) و نیز مفاهیم (بیولوژی سیستمی) که حداقل طی دهه گذشته روی داده‌اند، موجب انتقال پزشکی به سوی «پزشکی سیستمی» شده‌اند که هسته مرکزی آن سلامت است نه بیماری و به زبان دیگر «نگهداشت سلامت» و نه «مبارزه با بیماری» (۱).

فناوری‌های با توان عملیاتی بالا جهت توالی‌یابی DNA و آنالیز ترانس کریپتوم‌ها، پروتئوم‌ها و متابولوم‌ها، بنیانی را برای آشکارسازی ساختار، تنوع و عملکرد ژنوم انسانی و ارتباط آن‌ها با سلامت و بیماری فراهم آورده‌اند. کارایی بالای توالی‌یابی DNA، امکان آنالیز مقادیر عظیمی از ژنوم‌ها و ترانس کریپتوم‌های فرد را فراهم آورده و ترسیم متابولوم‌ها و پروتئوم‌های مرجع، به صورت کامل با به کار گیری شیوه‌های آنالیتیک قدرتمند بر اساس کروماتوگرافی، اسپکترومتری

جرمی و NMR امکان پذیر شده‌اند. از سوی دیگر، ابزارهای محاسباتی و ریاضیاتی و توسعهٔ رهیافت‌های سیستمی (جهت آشکار سازی شبکه‌های تنظیمی و عملکردی رفتار سیستم‌های بیولوژیک پیچیده) فراهم شده‌اند. افزون بر این، به توسعهٔ مفهومی و روش‌شناسی این ابزارها برای یکپارچه‌سازی گونه‌های داده‌های متنوع در سطوح چندگانهٔ سازمان و مقطع‌های زمانی (که از ویژگی‌های رشد و نمو انسان، فیزیولوژی و بیماری است) نیز نیاز است (۲). مجموعهٔ این تغییرات و روندها در توسعهٔ علم و فناوری در گسترهٔ پزشکی موجب شده‌اند که «دوران پساژنومیک پزشکی» که بر اساس پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های محاسباتی و تجربی با توان عملیاتی بالا، رشد یافته بود با در بر گرفتن زمینه‌ای از بیولوژی سیستمی، به سوی پزشکی سیستمی که (سیمایی جامع‌تر دارد)، میل کند (۵-۳).

از این رو پزشکی آینده، «پزشکی سیستمی» خواهد بود که می‌تواند بر پیچیدگی‌های بیماری‌ها چیرگی یافته و با آنالیز و هدف‌گیری شبکه‌های آشوب زده با بیماری داروهای نوین را نوید دهد (۶ و ۷). بر اساس تئوری مفهومی پزشکی سیستمی، بیماری برخاسته از پیامد «شبکه‌های آشوب زده با بیماری» در ارگان دچار بیماری است که از یک یا تعدادی شبکه‌های آشوب زده با بیماری به بسیاری دیگر (با پیشرفت بیماری) سرایت می‌کند. این آشوب‌های بیماری اولیه ممکن است ژنتیکی (مانند جهش‌ها) و یا محیطی (مانند ارگان‌سیم‌های عفونی)

باشند. این آشوب اطلاعاتی را که در این شبکه‌ها به صورت دینامیک بیان می‌شوند تغییر داده و این تغییر در جریان دینامیک اطلاعات می‌تواند پاتوفیزیولوژی بیماری را توصیف نموده و رهیافت‌های نوینی را در تشخیص و درمان ارائه دهد (۸).

در این چشم‌انداز به بیماری، مطالعات پاتوژنز بیماری که در سطح شبکه از طریق رهیافت سیستمی انجام می‌پذیرند، می‌توانند راهبردهای بهتری را جهت تشخیص و درمان، از طریق هدف قرار دادن این «شبکه‌های آشوب زده با بیماری» عرضه نمایند. بر پایه همین چشم‌انداز است که می‌توان پنج اصل بنیادین را در پزشکی آینده متصور شد:

۱/ نگرستن به بیولوژی و در نتیجه پزشکی به صورت دانش اطلاعات که این دو دانش می‌توانند به عنوان کلید آشکارسازی پیچیدگی نقش ایفا نمایند.

۲/ زیرساخت‌های بیولوژی سیستمی و راهبرد آن یعنی «سه گانه مقدس بیولوژی» (کاربرد بیولوژی پیش‌ران فناوری و فناوری پیش‌ران توسعه محاسبات)، فرهنگ میان‌رشته‌ای، دموکراتیزه کردن تولید داده‌ها و ابزارهای آنالیز داده‌ها را مورد حمایت قرار می‌دهند.

۳/ رهیافت‌های تجربی سیستمی، جامع‌نگر و هولستیک، بینش‌های ژرفی را نسبت به مکانیسم‌های بیماری‌ها و رهیافت‌های نوینی را به سوی تشخیص و درمان آن‌ها از طریق آنالیز دینامیسم فرایندهای بیماری‌ها امکان‌پذیر می‌نمایند.

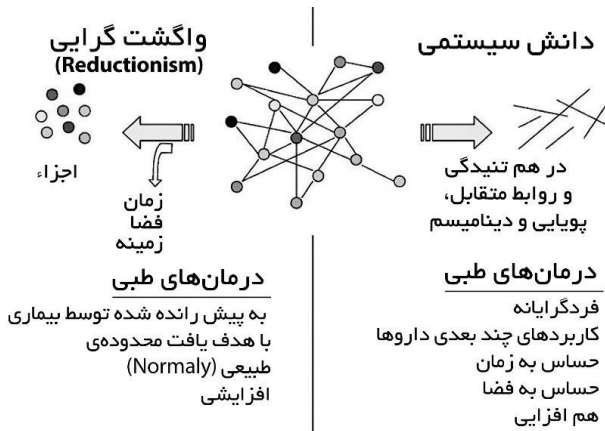
۴/ فناوری‌های نوپدید، امکان دست‌یابی به داده‌های با مقیاس عظیم را فراهم آورده و اجازه کشف ابعاد جدید فضای داده‌ای بیمار را خواهند داد.

۵/ ابزارهای آنالیز کننده دگرگون‌ساز، امکان آشکار نمودن میلیاردها داده نقطه‌ای را برای هر فرد فراهم خواهد کرد و به ترسیم منظرهای تندرستی و بیماری، به شکلی با جزئیات فرادقیق خواهند پرداخت (۹).

با کاربرد این پنج اصل، پزشکی سیستمی می‌تواند به شبکه‌های بیمار شده و آشوب‌زده، با بزرگ‌نمایی و آشکارسازی در حد مقیاس ملکولی پردازد. بر اساس این تفکر سیستمی و نگریستن به شبکه‌های بیماری است که می‌توان به این درک رسید که پاره‌ای از رویدادهای بیماری‌ها را می‌توان در پیش از تظاهر بیماری، با تشخیص زودرس شناسایی نموده و با چنگ‌اندازی بر نقاط گره‌ای شبکه‌های آشوب‌زده با بیماری، به شناخت تشخیصی و اقدامات درمانی پرداخت.

در پزشکی آینده، ارگان‌های دچار بیماری، بافت‌ها و خون بیمار، نمونه‌هایی عالی برای ارزیابی سیستمیک شرایط بیمار، در زمان و فضاهای گوناگون خواهند بود. توالی‌یابی ژنوم و ترانس کریپتوم، پروتئومیک هدفمند از طریق اسپکترومتری جرمی، چیپس‌های پروتئینی، آنالیز تک سلولی و سیستم‌های شناسایی اسید نوکلئیک هدفمند از ابزارهایی هستند که پزشکی سیستمی با آن‌ها در داده‌های بیمار به جستجو می‌پردازد. چنین است که احتمالاً در ۱۰ سال آینده، هر فرد با ابری مجازی از میلیاردها داده نقطه‌ای احاطه خواهد شد. چالش

کلیدی، یکپارچه سازی این تیپ داده های متنوع، یافت همبستگی آن ها با فنوتیپ بالینی خاص و تدوین پانل های مارکرهای زیستی معنادار جهت هدایت کارهای بالینی خواهد بود (۹). از این رو پزشکی سیستمی، راهبردهای کلیدی و فناوری های منحصر به خود را جهت آشکارسازی پیچیدگی های بیماری ها دارا است.



شکل (۱) مقایسه درمان های طبی در دو تغییر پارادایمی واگشت گرایی و دانش سیستمی

با این منظر هرگز نباید پزشکی سیستمی آینده را «پزشکی ژنومیک» نامید. زیرا پزشکی ژنومیک تنها یک منظر از ماهیت پزشکی سیستمی است که به اطلاعات نهفته در اسیدهای نوکلئیک می پردازد. در حالی که پزشکی سیستمی یک دیدگاه جامع و هولستیک است که از

تمام گونه‌های اطلاعات بیولوژیک استفاده می‌کند (مانند DNA، RNA، پروتئین‌ها، متابولیت‌ها، ملکول‌های کوچک، برهم‌کنش‌ها، سلول‌ها، ارگان‌ها، افراد، شبکه‌های اجتماعی و پیام‌های زیست محیطی بیرونی) و آن‌ها را به گونه‌ای یکپارچه می‌سازد که به مدل‌های کنش‌پذیر و پیشگویی‌کننده برای سلامت و بیماری تبدیل می‌کند (۱۰). بنابراین، مدل‌سازی بیماری به صورت یکپارچه، یک بخش تفکیک‌ناپذیر از پزشکی سیستمی خواهد بود (۱۱).

در هر صورت همگرایی رهیافت‌های سیستمی به بیماری‌ها فناوری‌های برتر، تصویرنگاری و اندازه‌گیری‌های نوین و ابزارهای محاسباتی و ریاضیاتی جدید، موجب تولد پزشکی سیستمی آینده خواهد شد که بیش از آن که منتظر شود که بیماری بر فرد چیره شود تا واکنش نشان دهد، طی ۱۰ سال آینده مدلی ارائه خواهد داد که پزشکی ماهیت فردگرایانه، پیشگویی‌کنندگی، پیشگیرانه و مشارکت‌جویانه خواهد داشت که نه تنها «هزینه - اثر بخش‌تر» خواهد بود بلکه به صورت فزاینده‌ای نیز بر تندرستی تمرکز خواهد کرد. این مدل مفهومی ارائه شده از پزشکی سیستمی که P4 نامیده می‌شود توسط لروی‌ای. هود و دیوید جی. گالاس ارائه شده است (۱۰).

بر اساس تئوری پزشکی P4، مطالعهٔ پیچیدگی‌های بیولوژیک بر سه فرض بنیادین استوار است:

۱/ دو گونه اطلاعات بیولوژیک موجود است؛ اطلاعات ژنومی

دیجیتالی و اطلاعات محیطی در بیرون از ژنوم که اطلاعات دیجیتالی را تعدیل می‌نماید.

۲/ اطلاعات بیولوژیک برداشت، فرآوری و یکپارچه‌سازی گردیده و توسط شبکه‌های بیولوژیک (RNA)، پروتئین‌ها، بخش‌های کنترلی ژن‌ها و ملکول‌های کوچک) به سیستم‌های ملکولی که فعالیت حیاتی را به انجام می‌رسانند انتقال می‌یابند.

۳/ اطلاعات بیولوژیک در یک سلسله مراتب چند مقیاسی شامل DNA، RNA، پروتئین‌ها، برهم‌کنش‌ها، شبکه‌های بیولوژیک، بافت‌ها، ارگان‌ها، افراد و در نهایت اکولوژی‌ها، کدگذاری می‌شوند. باید در نظر گرفت که محیط زیست بر هر سطح از این سلسله مراتب نیز اثر گذاشته و دریافت اطلاعات دیجیتالی را از ژنوم تعدیل می‌نماید.

بر اساس تئوری پزشکی P4، در طی ۵ تا ۲۰ سال آینده پیشرفت‌های فناورانه و محاسباتی، امکان تجزیه و تحلیل پیچیدگی‌ها برای کاربردهای بالینی و ارائه مراقبت‌های سلامت را فراهم خواهد آورد. از این رو پزشکی آینده فردگرا است؛ یعنی اساس آن بر اطلاعات ژنتیکی هر فرد استوار خواهد بود، پیشگویی کننده است زیرا اطلاعات فردی خواهند توانست خطر بعضی از بیماری‌ها را در هر فرد تعیین کند؛ پیشگیرانه خواهد بود زیرا تخمین خطر، امکان اقدامات پروفیلاکتیک (مانند تغییر شیوه زندگی و یا اقدامات درمانی) جهت کاستن خطر وجود خواهد داشت؛ در نهایت مشارکتی خواهد بود، زیرا در بسیاری از اقدامات

پیشگیرانه به مشارکت بیماران نیاز خواهد بود (۱).

تلاش به رازگشایی از ناشناخته‌های بیماری‌ها و بیولوژی انسان و ترسیم سلامت و بیماری در سیمای پزشکی آینده (پزشکی سیستمی)، موجب ایجاد فشار بر مطالعات و پژوهش‌ها و سوق آن‌ها به نقطه‌ای شده است که رشد و پیشرفت فناوری‌های نوینی را می‌طلبد تا بتوانند ابعاد فضای داده‌ای بیمار را به تصویر بکشانند. از این دیدگاه می‌توان به فناوری‌های زیر اشاره نمود (۱۲):

۱/ توالی‌یابی ژنوم خانوادگی

۲/ پروتئومیکس

۳/ متابولومیکس

۴/ آنالیز تک سلولی

۵/ تصویربرداری ملکولی

۶/ فناوری سلول‌های بنیادی پرتوان القاء شده

گرچه در دهه گذشته، علم و فناوری که پشتیبان رشد پزشکی سیستمی بوده است رشدی بی‌همتایی را از خود نشان داده است ولی هنوز به پیشرفت‌های جدیدی برای این که پزشکی P4 به ظهور برسد نیاز است:

۱/ توسعه شیوه‌هایی برای تعیین ساختار ژنوم‌های فردی (توالی‌یابی

ژنوم‌های فردی)

۲/ تکنیک‌های میکروفلوئیدیک، آنالیز سلول‌ها به صورت تک و

## تصویربرداری ملکولی

۳/ شناسایی و اعتبارسنجی پروتئین ویژه ارگانی، micro RNA و

## دیگر مارکرهای ملکولی

۴/ شیوه‌های ریاضیاتی و محاسباتی جدید مانند شبکه‌های دینامیک

که امکان مطالعه آشوب‌های ایجاد شده توسط درمان در

شبکه‌های بیولوژیک را فراهم می‌نمایند.

افزون بر این، تغییرات عمده‌ای نیز به همان میزان لازم است که در

آموزش بیماران و دست‌اندرکاران مراقبت‌های سلامت، پیرامون پزشکی

P4 انجام گیرد (۱).

در یک فراگرد کلی پزشکی سیستمی راهبردها، ابزارها و

توانمندی‌های محاسباتی و آنالیتیکی را جهت تجزیه و تحلیل انبوه

اطلاعات فراهم می‌آورد (۲). پزشکی P4 این راهبردها و ابزارها را جهت

مبارزه با بیماری‌ها و حفظ تندرستی فرد به کار می‌برد (۱۲).

بی‌شک در سال‌های نه‌چندان دور، پرتوهای پزشکی سیستمی نیز

بر کشور ما تابان خواهد شد و بر سیستم پزشکی و مراقبت‌های سلامت

ایران نیز تأثیری شگرف خواهد گذاشت و نظام سلامت را در کشور متحول

خواهد کرد.

در این گذر ما می‌توانیم دو رهیافت داشته باشیم؛ یا به صورت کنشی

به دستاوردها و پیشرفت‌های این تغییر پارادایمی در پزشکی پاسخ دهیم

و تنها مصرف‌کننده باشیم و یا این که خود در خلق آن سهیم شویم.

سهیم بودن در مسیر پرشتاب دانش پزشکی سیستمی نیاز به ساختارهای فرادقیقی در سیستم توسعه علم و فناوری در کشور دارد که بایستی چهارچوب آن در نقشه علمی کشور در گستره سلامت تبلور یابد. هدف این نوشتار آن است که با نگرستن به زوایای نقشه علمی کشور در گستره سلامت دریابد که آیا در این نقشه راه، چهارچوب‌ها و زیرساخت‌های لازم برای تجلی و رشد و شکوفایی پزشکی سیستمی در پیکره نظام سلامت کشور پیش بینی و طراحی گردیده است.

اما پیش از آن با همین هدف، به نقشه علمی آمریکا در گستره سلامت می‌نگریم تا بتوانیم در مقام مقایسه، به فرصت‌ها و چالش‌های موجود در نقشه علمی ایران در حوزه سلامت آگاهی بیابیم. بدین منظور از متدلوژی تحلیلی منظرهای پزشکی سیستمی تدوین شده در کارگاه «از بیولوژی سیستمی به سوی پزشکی سیستمی» کمیسیون اروپا (۱۴-۱۵ ژوئن ۲۰۱۰) (۱۳)، جهت شناسایی «فرصت‌ها، تنگناها و نیازهای توسعه فناوری»، موجود در نقشه‌های علمی آمریکا و ایران در گستره سلامت استفاده می‌کنیم.

### نقشه علمی آمریکا در گستره سلامت

بنیاد ملی سلامت آمریکا (NIH) به عنوان بزرگ‌ترین سازمان پژوهش‌های زیست پزشکی جهان، با ۱۲۵۰ پژوهشگر سازمانی و با بیش از ۲۰۰ هزار دانشمند و پژوهشگر از ۳۱۰۰ سازمان ملی و بین‌المللی،

تاکنون پرچم‌دار توسعه علوم زیست - پزشکی در دنیا بوده است. پس از این که در ماه می ۲۰۰۲ دکتر الیاس زرحونی ریاست بنیاد ملی سلامت آمریکا را به دست گرفت، مجموعه‌ای از گردهمایی‌هایی را به منظور ترسیم نقشه پژوهش‌های پزشکی قرن ۲۱ ترتیب داد. مقصود از این کوشش‌ها، یافت فرصت‌های عمده و شکاف‌های موجود در تحقیقات زیست-پزشکی بود که هیچ‌کدام از انستیتوهای وابسته به بنیاد ملی سلامت آمریکا نمی‌توانستند خود رأساً به آن بپردازند و در نتیجه تلاش مستقل بنیاد ملی سلامت را طلب می‌کرد (۱۶-۱۴).

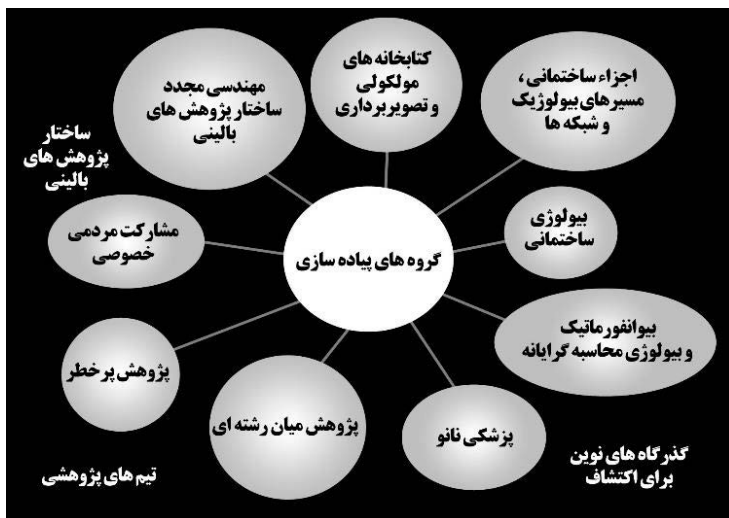
همگام با برون‌دادهای گردهمایی‌هایی با شرکت بیش از ۳۰۰ تن از برجسته‌های شناخته شده ملی از بخش‌های آکادمیک، صنعت، دولت و مردم، نقشه علمی بنیاد ملی سلامت، چهارچوبی را برای اولویت‌های این بنیاد فراهم آورده است که سرمایه‌گذاری بر بخش پژوهش را سنجش نموده و چشم‌اندازی را برای سامانه زاینده و مؤثر پژوهش‌های پزشکی ترسیم کرده است. این نقشه علمی، فرصت‌های برجسته‌ای را فراروی ما گشوده است که شامل گذرگاه‌های نوین برای اکتشاف، تیم‌های پژوهشی آینده و مهندسی مجدد در ساختار پژوهش‌های بالینی می‌باشند (۱۶).

نقشه علمی بنیاد ملی آمریکا یک چشم‌انداز جامع برای ژرفا بخشیدن به درک ما از بیولوژی و تحریک تشکیل تیم‌های تحقیقاتی میان رشته‌ای می‌باشد که تحقیقات بالینی را آن گونه باز شکل‌دهی

خواهد کرد که موجب شتاب گرفتن اکتشافات پزشکی و بهبود سلامت مردم آمریکا خواهد شد. بسیاری از پروژه‌ها، از سال ۲۰۰۰ آغاز گردیده‌اند (۱۷).

پدیدار شدن تغییر پارادایمی جدید، موجب تأثیر بر نقشه علمی سلامت آمریکا و میل آن به سوی «پزشکی سیستمی» گردید که شامل بیولوژی با فناوری‌های با توان عملیاتی بالا، پروژه ژنوم انسانی، خلق بیولوژی میان رشته‌ای و بیولوژی سیستمی می‌باشند (۱۰). از این رو می‌بینیم که چگونه این تغییر پارادایمی بر راهبردهای بنیاد ملی سلامت آمریکا اثر گذاشته و برنامه‌های پژوهشی این بنیاد حول این تغییرات پارادایمی چیدمان شده‌اند.

این تغییرات پارادایمی یعنی ۱/ به دست آوردن اطلاعات دیجیتالی ژنومی و اطلاعات محیطی بیرون ژنومی ۲/ نگاه به شبکه‌های بیولوژیک تا حد سیستم‌های ملکولی به عنوان کارگزاران علمکردهای حیاتی و ۳/ نگاه سلسله مراتبی به چیدمان حیات از سطح اسیدهای نوکلئیک، پروتئین‌ها، برهم کنش‌ها، شبکه‌های بیولوژیک، بافت‌ها و ارگان‌ها، افراد و در نهایت اکولوژی‌ها که حاوی اطلاعات کدگذاری شده‌اند، موجب شده‌اند که اصول پزشکی سیستمی در میان نقشه علمی آمریکا، راه خود را به خوبی باز نمایند.



شکل ۲) گروه‌های پیاده‌سازی نقشه علمی بنیاد ملی سلامت آمریکا

### تحلیل نقشه علمی آمریکا

در ادامه بر اساس تغییرات پارادایمی در حوزه علم و فناوری علوم زیست پزشکی، به تحلیل نقشه علمی آمریکا در دو بُعد می‌پردازیم. بُعد نخست نگاه به پیش بینی و ساماندهی زیرساخت‌های مورد نیاز پذیرش این تغییرات پارادایمی است که نه تنها موجب زایش پزشکی سیستمی شده‌اند بلکه موجب رشد و شکوفایی آن گردیده و به عنوان پیش‌ران آن نیز عمل می‌کنند. بُعد دوم نگاه به انقلاب دیجیتالی و ساماندهی داده‌های عظیم و تبدیل آن به دانایی است که نیاز است به چهارچوب و زیرساخت‌های پیش بینی شده در این نقشه از منظر فناوری اطلاعات زیست پزشکی و بیوانفورماتیک نگریسته شود.

## الف / زیرساخت‌هایی برای فناوری‌های نوپدید در گستره علوم زیست - پزشکی

### ۱/ پروژه بیان ژنوتیپ - بافت (GTEx)

هدف این پروژه، تأمین منبعی برای مطالعه بیان و تنظیم ژن انسانی و ارتباط آن با تنوع ژنتیکی است. در این پروژه تعداد زیادی از بافت‌های انسانی از دهنندگان گردآوری و آنالیز خواهند شد تا تنوع ژنتیکی در ژنوم آن‌ها ارزیابی شود. با آنالیز بیان RNA به صورت جامع در بافت‌های منفرد و نگاه به سطوح بیان ژن‌ها به صورت صفات کمی، تنوع در بیان ژن که بسیار با تنوع ژنتیکی همبستگی دارد را می‌توان به صورت لوکوس‌های صفتی کمی (eQTLs) مورد شناسایی قرار داد. یافت همبستگی میان ژنوتیپ و بیان ژن ویژه بافتی کمک به شناسایی مناطقی از ژنوم که اثر می‌گذارد که آیا و چه مقدار از یک ژن بایستی بیان شود خواهد کرد. با وجود پیشرفت‌های اخیر در مطالعات GWAS که در جهت شناسایی تغییرات ژنتیکی که با بیماری‌های انسانی شایع مانند بیماری‌های قلبی - عروقی، سرطان، دیابت، آسم و سکت‌های مغزی انجام گردیده‌اند، مقدار عظیمی از این تغییرات ژنتیکی در بیرون از مناطق کدکننده پروتئین ژن‌ها قرار داشته و حتی اغلب در بیرون از خود ژن‌ها قرار دارند. از این رو بسیار دشوار است که بتوان معین کرد که چه ژن‌هایی اثر گذاشته شده و با یک مکانیسم به شناسایی جامع eQTLs انسانی، در شناخت ژن‌هایی که بیان آن‌ها با تنوع ژنتیکی اثر گذاشته می‌شوند کمک خواهد کرد و پایه ارزشمندی را برای مطالعه

مکانیسم‌هایی که چگونه آن ژن تنظیم می‌شود فراهم می‌آورد (۱۸ و ۱۹).

## ۲/ رشد فناوری‌های برتر جهت شناخت اجزاء ساختمانی،

### مسیرهای بیولوژیک و شبکه‌ها

در مجموعه پروژه‌های نقشه علمی بنیاد سلامت آمریکا، پژوهشگران توجه خود را بر روی توسعه فناوری‌ها و شبکه‌ها معطوف داشته‌اند. یکی از اجزاء مرکزی چنین شبکه‌هایی، مجموعه‌ای از پروتئین‌هایی هستند که توسط ژنوم ارگانیسم کد گردیده و مجموعاً تحت عنوان پروتئوم نامیده می‌شوند. برای درک بهتر پروتئوم نیاز به ابزارهای نوآورانه‌ای است تا بتوان در زمان حقیقی میزان، جایگاه و ارتباطات تعداد عظیمی از پروتئین‌ها که در سلول واحدی وجود دارند را مشخص سازند. بنیاد ملی سلامت آمریکا، مجموعه‌ای از مراکز تکنولوژیک ملی برای شبکه‌ها و مسیرها را تأسیس نموده‌اند تا تکنولوژی‌های پروتئومیک جدید را ارتقاء دهند. چنین توانمندی، برای گسترش شناسایی مسیرهای بیولوژیک و یافتن بیماری‌های

زایش یافته از چنین مسیرهایی، بسیار کارآیی خواهند داشت (۱۷).

کانون بحرانی دیگر آن است که برای پژوهشگران، ابزارهای تجزیه و تحلیل نوینی برای درک بهتر اجزاء متابولیک و شبکه‌های موجود در سلول که مجموعاً به آن متابولوم گفته می‌شود فراهم گردد. به ویژه پژوهشگران مشتاق تکنولوژی‌هایی هستند که اندازه‌گیری غلظت‌های «در مکان خود» کربوهیدرات‌ها، لیپیدها، آمینواسیدها و دیگر

متابولیت‌ها را که در سلول واحد یا حتی در یک بخش ویژه‌ای از یک سلول وجود دارند، امکان‌پذیر گردانند. این گونه اطلاعات جامع، راه را برای شیوه‌های پیشرفته‌تر شناسایی اختلالات متابولیک، در میان سلول‌های طبیعی و بیمار، باز می‌کنند (۱۷، ۲۴-۲۰).

### ۳ / توسعه فناوری‌های نوین به دام اندازی پروتئین

هدف این پروژه نقشه علمی بنیاد ملی آمریکا، تحریک توسعه تکنولوژی‌های فرا عملکردی برای تولید کتابخانه‌های متنوع از ملکول‌های کوچک است که به شکل ویژه و اختصاصی بتوانند به پروتئین‌های انسانی متصل و آن‌ها را «به دام ببند/زند» یا بتوانند در میان تنوع طبیعی یک ملکول واحد، افتراق ایجاد نمایند. این پروژه مکمل تلاش‌های درحال انجام در انستیتوها و مراکز بنیاد ملی سلامت آمریکا که بر روی تکنولوژی‌های آنتی‌بادی کار می‌کنند خواهد بود.

افزون بر این، این پروژه با برنامه‌های دیگر نقشه علمی در بخش‌های کتابخانه‌های ملکولی، نانوپزشکی و بیولوژی ساختمانی ارتباط می‌یابد؛ البته به دلیل ویژگی فراکانونی و اهداف بسیار تعیین شده آن، با این بخش‌ها تمایز بسیار خواهد داشت (۱۷، ۲۵ و ۲۶).

### ۴ / کتابخانه‌های ملکولی و تصویربرداری ملکولی

برای پژوهشگران ثابت شده است ملکول‌های کوچک با وزن ملکولی

۵۰۰ یا زیر آن، جهت کشف عملکردها در سطح ملکولی، سلولی و *in vivo* فوق‌العاده مهم هستند. همچنین ثابت شده است که این ملکول‌ها برای درمان بیماری‌ها با ارزش می‌باشند و اکثر داروهایی که امروز در بازار وجود دارند از این طبقه هستند. نقشه کتابخانه‌های ملکولی به پژوهشگران زیست - پزشکی در بخش مردمی، توانایی دسترسی به ظرفیت «غربالگری در مقیاس گسترده» را خواهد داد تا ملکول‌های کوچک را شناسایی کرده و به عنوان پروب‌های شیمیایی جهت مطالعه عملکرد ژن‌ها، سلول‌ها و مسیرهای بیوشیمیایی مورد استفاده قرار دهند. این خود موجب گشایش راه‌های جدید برای کشف عملکرد ژن‌ها و مسیرهای پیام‌رسانی در سلامت و بیماری خواهد شد (۱۷، ۲۷ و ۲۸).

##### ۵/ کتابخانه امضاهای سلولی بر پایه شبکه یکپارچه (LINCS)

اجزاء پایه سیستم‌های بیولوژیک (ژن‌ها، پروتئین‌ها، متابولیت‌ها و دیگر ملکول‌ها) با یکدیگر به صورت بسیار منظم در درون سلول‌ها کار می‌کنند تا رشد و نمو طبیعی را ارتقاء داده و سلامت را ابقاء نمایند. درک آن که چگونه این اجزاء به هم تنیده شبکه‌ها و مسیرهای بیولوژیک در سلامت نگهداری شوند و چگونه با استرس‌های ژنتیکی محیطی آشوب زده می‌شوند و تولید بیماری می‌نمایند، یک چالش بزرگ ولی ضروری است تا بتوان بر اساس آن درمان‌های بهتر و جدیدتر را جهت برگشت شبکه‌های آشوب زده به سطح طبیعی توسعه داد.

جهت دست یابی به این هدف برنامه LINC، هدف توسعه کتابخانه امضاهای ملکولی بر اساس بیان ژن و دیگر تغییرات سلولی را دنبال می کند.

این تغییرات سلولی بیانگر پاسخی هستند که سلول های گوناگون در زمانی که به عوامل آشوبگر متنوع برمی خورند از خود ساطع می کنند که شامل siRNA و ملکول های فعال زیستی می باشند. رهیافت غربالگری با توان عملیاتی بالا جهت جستجوی سلول ها و رهیافت های ریاضیاتی به منظور توصیف تغییرات ملکولی و الگوهای پاسخ مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این داده ها در یک شیوه منظم، یکپارچه و استاندارد شده، جهت ارتقاء پیوستگی و مقایسه در گونه های متفاوت سلولی، گردآوری می شوند. پیش فرض زمینه ای برنامه LINC بر آن است که ایجاد اختلال در هر یک از این چندین گام در یک فرایند بیولوژیک، موجب تغییرات وابسته در خصوصیات، رفتار و عملکرد سلولی (فنوتیپ سلولی) و ملکولی خواهند شد. مشاهده آن که چگونه و چه هنگام یک فنوتیپ سلولی با استرس زهای خاصی تغییر می کند می تواند نشانه هایی را پیرامون مکانیسم های زمینه ای که ایجاد آشوب زدگی در شبکه های سلولی ملکولی می کنند و در نهایت در ایجاد بیماری مؤثرند را به دست دهد.

داده های LINC به صورت منبع عمومی در دسترس قرار خواهد گرفت که می توان به آسانی از آن استفاده کرده و آن را تقویت نمود تا گستره ای وسیع از پرسش های پایه را پاسخ داده و شناسایی هدف های

بیولوژیک جهت یافت درمان‌های جدید بیماری‌ها تسهیل گردد (۲۹).

## ۶/ آنالیز تک سلول

شواهد اخیر از مطالعه سلول‌های منفرد، این واقعیت را آشکار کرده‌اند که سلول‌های تک در یک جمعیت، با یکدیگر به صورت شگرفی متفاوت هستند و این تفاوت‌ها پیامدهای مهمی را در گستره سلامت و بیماری جمعیت کلی از خود نشان می‌دهند. رهیافت‌های تجربی که تنها به خصوصیات در سطح جمعیتی این سلول‌ها می‌پردازند، نمی‌توانند از ویژگی‌های متفاوت سلولی پرده بردارند.

این در حالی است که نیاز به رهیافت‌های جدید برای آنالیز تک سلول جهت رازگشایی از اصول بیولوژیک پایه و در نهایت بهبودی در تشخیص و درمان بیماری‌ها بسیار احساس می‌شود. از این رو در نقشه علمی آمریکا در بنیاد ملی سلامت این کشور، تأکید فراوانی بر پروژه‌ها و مراکزی شده است که به یکپارچه سازی و ترجمان فناوری‌ها جهت ترسیم ویژگی‌های سلول‌های تک می‌پردازند و به شدت از ابزارها و رهیافت‌های نوآورانه در این زمینه حمایت می‌کند. همچنین از مراکزی که تلاش می‌نمایند امضاهای نسخه برداری سلول‌های انسانی منفرد را جهت اندازه‌گیری و آنالیز ناهمگنی سلولی و تعریف تیپ‌های سلولی ویژه در یک جمعیت، هدف قرار داده‌اند پشتیبانی می‌کند (۳۰). مجموعه این فعالیت‌ها، راه را برای پزشکی فردگرا آینده باز می‌نماید.

## ب/ متدهای محاسباتی و ریاضیاتی نوین و بهبود زیرساخت فناوری اطلاعات

### ۱/ بیوانفورماتیک و بیولوژی محاسبه گرایانه

از پروژه‌های بنیادی نقشه علمی بنیاد ملی سلامت آمریکا، پروژه‌های «بیوانفورماتیک و بیولوژی محاسبه‌گرایانه» است که یک سامانه مهندسی نرم‌افزار ملی را خلق خواهد نمود. از طریق یک شبکه کامپیوتری زیست‌شناسان، شیمیدان‌ها، فیزیکدانان، دانشمندان علوم کامپیوتر و پزشکان در هر کجای کشور، قادر خواهند بود داده‌ها را به کمک یک مجموعه از ابزارهای نرم‌افزاری مشترک به اشتراک گذاشته و آنالیز نمایند. با رهسپار شدن بر کشتی پروژه‌های بیوانفورماتیک و بیولوژی محاسبه‌گرایانه، نقشه علمی بنیاد ملی سلامت آمریکا، آینده را از طریق «ابراه اطلاعات» که مختص پژوهش‌های پزشکی پیشرفته است، طی مسیر می‌کند (۳۱).

### ۲/ تصویرسازی از ژنوم با توان دارویی

هدف غایی این برنامه، افزایش درک خصوصیات و عملکرد پروتئین‌هایی است که در چهار خانواده پروتئینی معروف (که هدف داروها) هستند جای دارند؛ که شامل گیرنده‌های جفت یافته با پروتئین G (GPCRs)، گیرنده‌های هسته‌ای، کانال‌های یونی، کینازهای یونی و کینازهای پروتئینی هستند. این برنامه با یک فاز پایلوت سه ساله

آغاز می‌شود که هدف اولیه این پروژه پایلوت، بنیان نهادن یک مرکز مدیریت دانش توسعه راه حل انفورماتیکی یکپارچه است که جزء تکمیلی این مرکز، حمایت از پیشرفت یک پورتال شبکه‌ای است که داده‌ها را از منابع گوناگون داده‌ای گردآوری کرده و به شناسایی شکاف در دانش موجود در مورد این پروتئین‌ها می‌پردازد. در نهایت هدف این برنامه، تقویت پژوهش‌های پایه با انبوه نمودن داده‌های ژنومیک جهت آگاهی از دانش موجود از پروتئوم است. با این هدف، کسب و کارهای کوچک و صنعت دارویی می‌توانند درمان‌های نوینی را جهت افزایش سلامت انسانی طراحی نمایند (۳۲).

### ۱۳ / سیستم اطلاعاتی اندازه‌گیری پیامدهای گزارش شده توسط بیماران (PROMIS)

هدف این سیستم اطلاعاتی، اندازه‌گیری پیامدهای گزارش شده توسط بیمار (PROs)، مانند درد، خستگی، کارایی فیزیکی، اختلال خلقی و مشارکت اجتماعی است که اثر فراوانی را بر کیفیت زندگی در گستره‌ای از بیماری‌های مزمن ایجاد می‌کنند. اندازه‌گیری بالینی پیامدهای سلامت مانند آزمایش‌های بالینی و تصویربرداری، ممکن است پیوستگی کمی را با عملکرد روز به روز بیماران با بیماری‌های مزمن داشته باشند. اغلب بهترین حالتی که بیماران می‌توانند اثر بخشی درمان‌ها را قضاوت کنند، مطالعه تغییرات در نشانگان و علائم است. هدف برنامه PROMIS بهبودی

در گزارش دهی و کیفیت تغییرات در پیامدهای گزارش شده توسط بیمار است. این برنامه، پارادایم‌های جدیدی را برای چگونگی گردآوری، کاربرد و گزارش دهی اطلاعات پژوهشی بالینی خلق می‌کند. این برنامه یک سیستم بر پایه وب را توسعه می‌دهد که دسترسی پژوهشگران بالینی را به بانک اطلاعات و سیستم آزمون سازگارمند رایانه‌ای (CAT) توان یافته با روان متری را امکان پذیر می‌نماید (۳۳).

#### ۴ / شبکه‌های پژوهش‌های بالینی و نکتار

«تحقیقات و کارآزمایی‌های بالینی الکترونیکی ملی» به طور خلاصه «نکتار»، زیرساخت‌های انفورماتیکی که نقش ستون فقرات شبکه‌های تحقیقاتی کارا و به هم ارتباط یافته را دارند خلق خواهد کرد. تشکیل شبکه‌های پژوهش‌های بالینی و یا نکتار که امکان آزمون درمان‌های جدید و راهبردهای پیشگیرانه در تعداد عظیم تری از بیماران را سریع تر می‌نماید، از نقاط کلیدی راهبرد شبکه‌سازی بنیاد ملی سلامت آمریکا است (۱۷).

#### ۵ / تبدیل داده‌های بزرگ به دانش (BD2K)

همزمان با پیشرفت فزاینده فناوری و ابزارهای زیست پزشکی، پژوهشگران انبوه فزاینده‌ای از داده‌های بیولوژیک پیچیده تولید و تحلیل می‌کنند. ابزارهای تحلیلی نوینی جهت استخراج دانش بحرانی، از این

توده داده‌ای مورد نیاز است و سیاست‌های تشویقی جدید بایستی جهت به اشتراک‌گذاری نرم‌افزاری و داده‌ای تدوین گردند تا ارزش داده‌ها برای تمامی پژوهشگران گستره پژوهش‌های زیست پزشکی افزایش یابد. افزون بر این استانداردهای داده‌های و متاداده‌ها که تضمین‌کننده کیفیت و یک‌دستی آن‌ها باشند بایستی توسعه داده شوند.

بنیاد ملی سلامت آمریکا در این برنامه تلاش می‌کند که کاربرد داده‌های بزرگ زیست - پزشکی را تسهیل کرده، شیوه‌های تحلیل داده‌ها و نرم‌افزارهای مربوطه را توسعه بخش نموده، در تربیت نیروی انسانی رشته‌های وابسته به آنالیز داده‌ها در مقیاس عظیم اهتمام ورزیده و مراکز تعالی را برای داده‌های بزرگ زیست پزشکی بنیان نهد (۲۷). این برنامه جدید بنیاد ملی سلامت آمریکا که از سال ۲۰۱۳ آغاز گردیده است می‌تواند تحول عظیمی را در پژوهش‌های زیست پزشکی و مراقبت‌های سلامت ایجاد نماید زیرا تلاش می‌کند داده‌های عظیم را به دانش‌کنش پذیر جهت ارتقاء سلامت و توسعه علم تبدیل نماید (۳۴).

## زیرساخت‌های نقشه علمی ایران برای پزشکی آینده (پزشکی سیستمی)

نقشه جامع علمی کشور در گستره سلامت، بخشی از نقشه جامع علمی کشور است که هدف آن تدوین برنامه بلند مدت علم، فناوری و نوآوری در ایران است و تلاش می‌کند تا پژوهش، آموزش و بهره‌برداری

از دانش را از یک اتفاق، به یک جریان منظم و در راه توسعه کشور قرار دهد. برای تهیه نقشه علمی سلامت کشور، بیش از ۳۰۰ نفر از پژوهشگران، مدیران و خبرگان نظام آموزش، پژوهش، ارائه خدمات و پشتیبانی سلامت طی مدتی نزدیک به یک سال در ۱۳ پانل (آموزشی، ارائه خدمات سلامت، پزشکی ملکولی، پژوهش، تجهیزات پزشکی، دارو، زیست فناوری، سلامت زنان، امنیت غذا و تغذیه، فناوری اطلاعات، محیط زیست، مدیریت و سیاست گذاری سلامت، منابع مالی و انسانی و نانوفناوری) با روش های شناخته شده و علمی آینده پژوهی به تدوین نقشه همت گذاشتند.

ماحصل این تلاش جمعی و ساختارمند همراه با متدولوژی علمی در گستره آینده پژوهی، به صورت مونوگرافی توسط کمیته تخصصی سلامت و علوم زیستی شورای عالی انقلاب فرهنگی در وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی تحت عنوان «نقشه جامع علمی سلامت» در اسفند ۱۳۸۸ انتشار یافت (۳۵).

این سند بالا دستی در حوزه علم و فناوری کشور، به دلیل این که نخستین تلاش نظام وار و علمی ایران در گستره دانش و فناوری می باشد بسیار در خور تحسین است و بی شک در شتاب علوم زیست پزشکی در کشور نقش مهمی را ایفاء خواهد کرد.

در این بخش از نوشتار به فرصت های موجود در نقشه علمی کشور در گستره سلامت، تنگناها، زیرساخت ها و فناوری های مورد لزوم برای

پذیرش پایه‌های پزشکی نوین (پزشکی سیستمی با پزشکی P4) و رشد و گسترش آن می‌پردازیم:

## الف / فرصت‌های نقشه علمی کشور در گستره سلامت برای توسعه پزشکی سیستمی

### ۱ / توجه به فناوری اطلاعات

در نظام سلامت و محورهای چشم‌انداز نقشه علمی کشور به «مدیریت اطلاعات و دانش سلامت»، به عنوان زیرساخت نگرین شده است. از این رو در راهبردهای کلان نقشه به «استفاده از فناوری اطلاعات و شبکه جهت تسهیل ارتباطات و همکاری‌ها» اشاره شده است و گسترش آموزش‌های آکادمیک و غیرآکادمیک دانش عمومی فناوری اطلاعات (IT) در تمام مقاطع تحصیلی مورد تأکید قرار گرفته است. زیرساخت فناوری اطلاعات برای دیجیتالی کردن گزارش‌های پزشکی در پزشکی سیستمی، برای هر فرد بیمار که در حد گیگابایت داده پزشکی و بیولوژیک دارد، بسیار حیاتی می‌باشد (۳۶) و از سوی دیگر امکان مدیریت تبدیل داده‌های بزرگ به دانش را فراهم می‌آورد. در حقیقت برآمدن بر چالش تبدیل داده‌های بزرگ به دانش، وظیفه اساسی پزشکی سیستمی است (۱۰). در راهبردهای کلان نقشه نیز به یکپارچه‌سازی نظام طبقه‌بندی، حفظ و نگهداری موجودی دانش ملی در حوزه سلامت پافشاری شده است.

## ۲ / شبکه سازی

در نقشه علمی سلامت ایران، شبکه سازی جهت استفاده از قابلیت‌ها و امکانات مرکز تخصصی دولتی و غیردولتی به صورت یک راهبرد در نظر گرفته شده است و تأسیس سامانه شبکه ملی کارآزمایی بالینی و همچنین ایجاد شبکه جامع الکترونیک آموزش و تصمیم‌گیری سلامت برای بهره‌برداری همگانی و گروه‌های ارائه‌کننده خدمات نیز اقدامات اساسی محسوب شده‌اند.

## ۳ / رهیافت‌های میان رشته‌ای

در راهبردهای کلان نقشه علمی کشور در گستره سلامت تقویت علوم پایه سلامت، ژرف‌نگری و ژرف‌یابی برای گسترش مرزهای دانش و توسعه همکاری‌های بین رشته‌ای سلامت (پایه - کاربرد) و در بخش الزامات نقشه نیز به تشکیل انجمن‌های میان رشته‌ای موضوع محور اشاره شده است.

## ۴ / نوآوری و خطرپذیری

سازمان‌های قرن بیست و یکمی در پی آن هستند تا کارکنان خود را به نوآوران و سازمان خود را به ماشین نوآوری بدل کنند. چرا که بدون نوآوری، هیچ مفهومی نوین، محصول، تکنولوژی، فرایند و هیچ رشد اقتصادی، رقابت‌پذیری و بهره‌وری، روی نخواهد داد (۱۷). از این رو حمایت

از پژوهش‌های پرخطر، جهت تشویق متفکرین خلاق بسیار اساسی است. تسهیل شکل‌گیری بنگاه‌های اقتصادی برای حمایت از پژوهش‌های خطرپذیر از راهبردهای کلان نقشه علمی کشور می‌باشد.

### ۵/ نگاه هولستیک و جامع‌نگر به سلامت

بیماری‌های غیرواگیر مانند بیماری‌های قلبی - عروقی، تنفسی، متابولیک، روماتولوژیک، نورولوژیک و سرطان‌ها از مسائل عمده و برجسته قرن ۲۱ هستند و به نظر می‌رسد که راهبرد هولستیک به این بیماری‌ها با در نظر گرفتن اثر ژن - محیط زیست و برهم‌کنش‌های اقتصادی - اجتماعی می‌تواند فوتیپ پیچیده آن‌ها را ترسیم نماید (۳۷). در بخش اقدامات نقشه علمی کشور تحت عنوان انجام پژوهش در خصوص تحول شبکه سلامت کشور با رویکردهای سلامت‌نگر، تعیین‌کننده‌های اجتماعی سلامت، عدالت، تقویت همکاری‌های بین‌بخشی و مبتنی بر نظام علم، فناوری و نوآوری، به تعیین‌کننده‌های اجتماعی سلامت، نگاهی ویژه انداخته شده است.

### ب/ تنگناهای توسعه پزشکی سیستمی در نقشه علمی ایران در

#### گستره سلامت

- عدم نگاه به بیولوژی و علم پزشکی به عنوان یک دانش اطلاعاتی
- نبود زیرساخت برای آموزش، گسترش و پژوهش در زمینه دانش

## بیولوژی سیستمی

- عدم وجود نگاه یکپارچه به پاتوژنز، تشخیص و درمان بیماری‌های
- بر اساس دیدگاه‌های سیستمی با رهیافت‌های سیستمی
- عدم توجه به برنامه‌های پژوهشی یکپارچه در مقیاس بزرگ در
- پژوهش‌های زیست پزشکی
- نبود زیرساخت‌های لازم برای مطالعات میان رشته‌ای
- عدم توجه به فناوری‌های نوپدید و فناوری‌های برتر به عنوان
- راهبردی بنیادین
- عدم توجه به بیولوژی محاسباتی و بیوانفورماتیک
- عدم توجه به مشارکت بیمار در سیستم تشخیصی، درمانی و
- پژوهشی و طراحی زیرساخت‌های لازم برای پزشکی مشارکتی
- نگاه به پزشکی به شکل واکنشی بوده و نه کنش‌گرا و در نتیجه
- توجه به سوی بیماری معطوف گشته است و نه به سوی
- تندرستی (شکل ۳)

هر چند در نقشه علمی کشور، بهره‌گیری از فناوری‌هایی که کشور را در استفاده از مزیت‌های نسبی و خلق ثروت یاری می‌رسانند به «فناوری‌های زیستی»، «پزشکی»، «ملکولی و سلول‌های بنیادین» و «نانوفناوری» توجه خاص عنایت شده است و از اولویت‌های علم و فناوری سلامت محسوب شده‌اند ولی در بُعد راهبردی نقشه، از توجه ویژه به فناوری‌های پزشکی ملکولی و سلول‌های بنیادین و تدوین برنامه‌های عملیاتی و پروژه‌های مرزکن نشانی نیست.



شکل (۱) نمایی از علوم زیستی محاسبه گرایانه:  
علوم زیستی محاسبه گرایانه یک برنامه میان رشته ای است.

این در حالی است که توسعه علمی دانش ژنومیک، پروتئومیک و فناوری های مرز شکن مانند بیوانفورماتیک و تصویر برداری های ملکولی در دهه اخیر، امکان به واقعیت پیوستن پزشکی سیستمی را هموار کرده اند. همچنین در نقشه علمی کشور سکوهایی برای ذخیره سازی داده ها برای زمانی طولانی و نیز سکوهایی برای یکپارچه سازی و تحلیل داده های چند متغیری بیماران، دیده نشده است. این در حالی است که در آینده ای

نزدیک، با انباشتی از داده‌های برخاسته از آنالیز تک سلولی رو به رو خواهیم شد که اطلاعات ترانس کریپتومی و پروتئومی این سلول‌های را نیز شامل می‌شود (۳۸ و ۳۹). توسعه دیگر که می‌بایست در نقشه علمی کشور صورت پذیرد نگاه به دانش جدید «سیستم‌های پیچیده» و «شبکه‌ها» است. در این نگاه شبکه‌های پیچیده ملکولی و مسیره‌های بیولوژیک در سطح شبکه‌های پیچیده بیماری‌ها تبلور می‌یابند و خود شبکه بیماری‌ها نیز از شبکه اجتماعی- اقتصادی نیز اثر می‌پذیرد. از این رو می‌بایست به بیماری‌های واگیر و عفونی، سرطان‌ها، بیماری‌های قلبی - عروقی، تنفسی و عصبی نیز از منظری سیستمی نگرین (۴۳-۴۰). این نگرین به این بیماری‌ها، چیزی فراتر از این است که تنها به تعیین کننده‌های اقتصادی و اجتماعی این بیماری‌ها نگاه کرد و باید چشمانداز چنان گسترده باشد تا تمام عوامل به شکلی در آن جای گیرند تا امکان تجلی پزشکی P4 در ابعاد گوناگون آن، به ویژه بعد پیشگویی کنندگی و فردگرایانه آن فراهم آید (۴۴-۴۰). با همین دید نیز می‌بایست به فناوری‌های تصویربرداری، به ویژه تصویربرداری ملکولی نیز نگرین شود (۴۲).

منظری دیگر که می‌بایست در توسعه نقشه علمی کشور نگرین شده شود، بحث مشارکت جویانه پزشکی آینده (پزشکی P4) است. بخش جدایی ناپذیر پزشکی آینده، پزشکی مشارکتی است که راهبردهای مشارکتی یکی از راه‌های الزام‌آور است که می‌توان پزشکی P4 را به بیماران عرضه نمود (۱۰). از سوی دیگر بیماران توانمند شده با ابزارها و

اطلاعات می‌توانند در آینده نقش فعالی را در سلامت خود ایفاء نمایند، در حقیقت در پزشکی مشارکتی آینده، آن‌ها با ارائه دهندگان خدمات سلامت و پزشکان خود، در طراحی، مدیریت و دستیابی به اهداف خود، به صورت مشارکتی نقش ایفا خواهند کرد. از این رو بایستی به بنیان شبکه بیماری‌ها در حد فراگیر که شامل پژوهشگران آکادمیک، سیاست‌گذاران جامعه، ارائه دهندگان خدمات سلامت و نیز توده بیماران و مردم است در توسعه نقشه علمی کشور توجه ویژه نمود. همین شبکه‌های بیماری‌ها هستند که می‌توانند در یک گستره وسیع‌تر، با شبکه‌های به پیش‌رانده شده بیماران، یکپارچه شده و مفاهیم و اهداف پزشکی مشارکتی را در صحنه عمل به ظهور رسانند (۴۵ و ۴۶).

هر چند که طی دهه گذشته در سایه اندیشه‌های استاد گرانقدر عرصه سلامت، جناب آقای دکتر حسین ملک افضلی، تلاش‌های نوآورانه و بی‌همتایی جهت آشنایی جامعه با مفاهیم پزشکی مشارکتی انجام گردید و می‌رفت که این مفاهیم نه تنها در سطح چهارچوب‌های پژوهشی بلکه در گستره سلامت فراگیر شود ولی در نقشه علمی کشور به زیرساخت‌ها و نیز مفاهیم پزشکی مشارکتی و نقشی که می‌تواند در تحول نظام سلامت داشته باشد (۴۹-۴۵) اعتنایی نشده است.

در یک فراگرد کلی مقایسه نقشه علمی کشور در گستره سلامت با نقشه راه بنیاد ملی سلامت آمریکا، این حقیقت را آشکار می‌سازد که در تدوین نقشه علمی آمریکا، تغییرات پارادایمی در حوزه علم و فناوری‌های

وابسته به علوم زیست پزشکی به خوبی درک شده و بر راهبردهای نقشه اثر گذاشته است (۱۷). این در حالی است که در نقشه علمی کشور ما، توجه‌ای بنیادین به تغییر پارادایم‌های اثر فناوری‌های با توان عملیاتی بالا بر عرصه پژوهش‌های زیست - پزشکی صورت نگرفته است و به پروژه ژنوم انسانی، بیولوژی سیستم‌ها و بیولوژی محاسبه گرایانه و نیز به ویژه به مطالعات میان رشته‌ای توجه‌ای نشان داده نشده است.

بنیاد ملی سلامت آمریکا، بهترین پروژه‌های پیش‌آهنگ را برای آغاز برنامه‌های میان رشته‌ای در انستیتوهای تحت نظارت خود به اجرا در آورده است و بسیاری از پروژه‌های پژوهشی میان رشته‌ای، در قالب کنسرسیوم‌های میان رشته‌ای برای حل مسائل پیچیده و غامض سلامت و بیماری را سامان داده است و برنامه‌هایی تربیتی و آموزشی برای آشنایی پژوهشگران در تمام مقاطع تا سطوح پسادکتر فراهم کرده و توسعه فناوری‌ها و روش‌های پیشرفته تحلیل‌ی میان رشته‌ای را مورد حمایت خود قرار داده است. این در حالی است که هنوز در بسیاری از دانشگاه‌ها و مراکز آکادمیک پزشکی جهان، هر چند که از لحاظ فکری و تئوریک از برنامه‌های میان رشته‌ای حمایت می‌کنند ولی هنوز در چهارچوب مرزهای رشته‌ای سنتی خود دست و پا می‌زنند. چنین به نظر می‌رسد که میل سیاست‌های راهبردی پزشکی به سوی برنامه‌های میان رشته‌ای، برخاسته از دو بینش «تفکر سیستمی» و در هم تنیدگی «فاکتورهای بیولوژیک و اجتماعی» در پژوهش‌های سلامت و بیماری باشد (۵۰).

طراحی نقشه علمی سازمان هوشمند بنیاد ملی سلامت آمریکا چنان است که پروژه‌هایی را به انجام می‌رساند که هیچ سازمان یا واحد دیگری نتواند و نخواهد توانست انجام دهد. چنین است که این سازمان، پیشگامی در پروژه‌های اکتشافی حیطه‌های نو و پایه علوم بیومدیکال را در رأس جنبش علمی هزاره جدید خود قرار داده است. از این رو این سازمان می‌خواهد جایگاه شماره یک خود را که در دوران صنعتی داشته و حامی اقتصاد کاپیتالیستی بوده است در دوران پسا سرمایه‌داری اقتصاد دانایی محور که به آن کاپیتالیسم فکری نام نهاده‌اند نیز حفظ کند. به زبان دیگر، این سازمان هوشمند کاپیتالیسم عقلانی قرن بیست و یکم، در پی آن است که برتری جویی امپریالیستی آمریکا را در حوزه‌های زیست پزشکی پاس بدارد. بنابراین شکاف در دانایی و طبقاتی شدن جوامع از دیدگاه مقیاس دانایی، رو به فزونی پرشتاب است (۱۷).

به زبان دیگر هر چند در آینده‌ای نزدیک تغییر پارادایمی پزشکی سیستمی همه گستره مراقبت‌های سلامت را در بخش‌های دولتی و خصوصی و کسب و کار و صنایع وابسته به آن را دچار تغییرات شگرف می‌کند، اما باید به این نکته نیز اشاره کرد که کشورهای جنوب و در حال توسعه که در علم «پزشکی سیستمی» آینده که به شدت دیجیتالی و فناورانه است و ارائه خدمات سلامت در ابعاد پیشگویی کنندگی به شدت بر فناوری‌های نو تکیه خواهد کرد، به عنوان مصرف‌کنندگان کالای پزشکی سیستمی محسوب شده‌اند و طراحان آینده در نظام پسا سرمایه‌داری آمریکا

در سودای انتقال این کالا به قیمتی ارزان به کشورهای در حال توسعه می‌باشند و نام این حرکت را دموکراتیزه کردن پزشکی آینده نامیده‌اند (۱۲). تنها راه فراروی ما، تدوین دقیق نقشه راه آینده کشور به شکلی هوشمندانه است و بایستی کلان روندهای حوزه علم و فناوری و نیز تغییرات پارادایمی دانش پزشکی را رصد کرده و با تدوین راهبردهای کنش‌پذیر، بنیان برافکن و مرزشکن، با پذیرش انقلاب دیجیتالی و اطلاعاتی در تمام گستره‌ها و فراهم آوردن رشد و نمو زیرساخت‌های فناوری‌های نو همانند فناوری‌های وابسته به ژنومیکس، پروتئومیکس و امیکس‌ها، فناوری آنالیز تک سلول و فناوری‌های میکروفلوئیدیک و همانند آن، بسته‌های لازم را برای شکوفایی و به واقعیت رساندن ریشه‌ای پزشکی سیستمی در کشور و تبدیل نظام سلامت از بیمار - محور به تندرستی - محور و سیمای کنش‌گرا (۵۱) گام برداریم.

از سوی دیگر هرگز فراموش نکنیم که مفهوم توسعه پایدار که به عنوان یک آرمان در چشم‌انداز جوامع کنونی مطرح شده است، ابعاد پیچیده‌ای دارد که نیل به آن توسط ابزارهایی امکان‌پذیر است که تحلیل سیستمی را در سرلوحه کار خود قرار داده‌اند. همچنین، در اندیشه هر آینده پژوه، مفهوم توسعه پایدار به عنوان «کار آینده پژوهی» جای دارد. به زبان دیگر، آینده پژوهی همچون ابزاری برای نیل به توسعه پایدار جلوه می‌کند. در نهایت بایستی به این ادراک دست یابیم که هدف نهایی آینده پژوهی، نیل به توسعه پایدار در فضای جهانی سرشار از پیچیدگی و تغییر است (۵۲).

## منابع پیوست

- 1) Sobradillo P, Pozo F, Agustí A. P4 medicine: the future around the corner. *Arch Bronconeumol* 2011; 47: 35-40.
- 2) Auffray C, Chen Z, Hood L. Systems medicine the future of medical genomics and healthcare. *Genome Med* 2009; 1: 2.
- 3) Ahn AC, Tewari M, Poon CS, et al. The clinical applications of a systems approach. *PLoS Med* 2006; 3: e209.
- 4) Schadt EE, Lamb J, Yang X, et al. An integrative genomics approach to infer causal associations between gene expression and disease. *Nat Genet* 2005; 37: 710-7.
- 5) Butte AJ. Medicine. The ultimate model organism. *Science* 2008; 320: 325-7.
- 6) Yan Q. The integration of personalized and systems medicine: bioinformatics support for pharmacogenomics and drug discovery. *Methods Mol Biol* 2008; 448: 1-19.
- 7) Kumar D, RAO KV. Systems biology and medicine. *Curr Trends Sci* 2009: 379-393.
- 8) Del Sol A, Balling R, Hood L, et al. Diseases as network perturbations. *Curr Opin Biotechnol* 2010; 21: 566-71.
- 9) Hood L, Tian Q. Systems approaches to biology and disease enable translational systems medicine. *Genomics Proteomics Bioinformatics* 2012; 10: 181-5.

- 10) Hood L, Flores M. A personal view on systems medicine and the emergence of proactive P4 medicine: predictive, preventive, personalized and participatory. *N Biotechnol* 2012; 29: 613-24.
- 11) Younesi E, Hofmann-Apitius M. From integrative disease modeling to predictive, preventive, personalized and participatory (P4) medicine. *EPMA J* 2013; 4: 23.
- 12) Hood L, Balling R, Auffray C. Revolutionizing medicine in the 21st century through systems approaches. *Biotechnol J* 2012; 7: 992-1001.
- 13) Report on European Commission, DG Research, Directorate of Health Workshop: From systems biology to systems medicine. Brussels, 14-15 June 2010.
- 14) Overview of the NIH Roadmap, NIH Roadmap for Medical Research. (Accessed 13 May 2008 at <http://nihroadmap.nih.gov/overview.asp>).
- 15) Zerhouni EA. US biomedical research: basic, translational, and clinical sciences. *JAMA* 2006; 294: 1352-8.
- 16) Shimada J. Strategy of the National Institutes of Health (NIH) of the US to Accelerate Biomedical Research (NIH Roadmap). *Mis Quarterly* 2004; No 12: 11-5.
- 17) Nabipour I. NIH Road Map and knowledge-based development. Bushehr University of Medical Sciences Press, 2007.
- 18) Genotype-Tissue Expression (GTEx). National Institutes of Health. (Accessed 15 March 2014 at <http://commonfund.nih.gov/GTEx/overview>).
- 19) GTEx Consortium. The Genotype-Tissue Expression (GTEx) project. *Nat Genet* 2013; 45: 580-5.

- 20) Building Blocks, Biological Pathways, and Networks, NIH Roadmap for Medical Research. (Accessed 13 May 2008 at <http://nihroadmap.nih.gov/buildingblocks>).
- 21) Castle AL, Fiehn O, Kaddurah-Daouk R, et al. Metabolomics Standards Workshop and the development of international standards for reporting metabolomics experimental results. *Brief in Bioinform* 2006; 7: 159-65.
- 22) Ideker T, Winslow LR, Lauffenburger AD. Bioengineering and System Biology, *Ann Biomed Eng* 2006; 34: 257-264. (Accessed 25 February 2008 at <http://www.cdpcenter.org/files/pubs/ideker-bioengineering-06.pdf>).
- 23) Sheeley DM, Breen JJ, Old SE. Building integrated approaches for the proteomics of complex, dynamic systems: NIH programs in technology and infrastructure development. *J Proteome Res* 2005; 4: 1114-22.
- 24) Zerhouni EA. Clinical research at a crossroads: the NIH roadmap. *J Investig Med* 2006; 54: 171-3.
- 25) Zerhouni E. *Medicine. The NIH Roadmap*. Science New York, NY 2003; 302: 63-72.
- 26) Zehrouni AE. Translational and Clinical Science – Time for a New Vision. *N Eng J Med* 2005; 353: 1621-3. (Access 25 February 2008 at <http://content.nejm.org/cgi/reprint/353/15/1621.pdf>).
- 27) Shi ZD, Wu H, Ruddy B, Griffiths GL. Imaging Probe Development Center: a National Institutes of Health core synthesis resource for imaging probes. *J Biomed Opt* 2007;12: 051502.
- 28) *Molecular Libraries and Imaging, NIH Roadmap for Medical Research*. (Accessed 13 May 2008 at <http://nihroadmap.nih.gov/molecularlibraries>).

- 29) Library of Integrated Network-Based Cellular Signatures (LINCS). (Accessed 15 March 2014 at <http://commonfund.nih.gov/LINCS/overview>).
- 30) Single Cell Analysis. (Accessed 15 March 2014 at <http://commonfund.nih.gov/Singlecell/snapshot>).
- 31) Bioinformatics and Computational Biology, NIH Roadmap for Medical Research. (Accessed 13 May 2008 at <http://nihroadmap.nih.gov/bioinformatics>).
- 32) Illuminating the Druggable Genome-Overview. (Accessed 15 March 2014 at <http://commonfund.nih.gov/idg/overview>).
- 33) Cella D, Yount S, Rothrock N, et al. The Patient-Reported Outcomes Measurement Information System (PROMIS): progress of an NIH Roadmap cooperative group during its first two years. *Med Care* 2007;45: 3-11.
- 34) Big Data to Knowledge. (Accessed 15 March 2014 at <http://commonfund.nih.gov/Bd2k/overview>).
- 35) Health Ministry of I.R.Iran. Especial Committee of health and biosciences. Health Road Map. 2008.
- 36) Hood L, Galas D. P4 Medicine Personalized, Predictive, Preventive, Participatory a change of view that changes everything. (Accessed 15 March 2014 at [http://www.cra.org/ccc/files/docs/init/P4\\_Medicine.pdf](http://www.cra.org/ccc/files/docs/init/P4_Medicine.pdf)).
- 37) Bousquet J, Anto JM, Sterk PJ, et al. Systems medicine and integrated care to combat chronic noncommunicable diseases. *Genome Med* 2011; 3: 43.
- 38) Ma C, Fan R, Ahmad H, et al. A clinical microchip for evaluation of single immune cells reveals high functional heterogeneity in phenotypically similar T cells. *Nat Med* 2011; 17: 738-43.

- 39) Vermesh U, Vermesh O, Wang J, et al. High-density, multiplexed patterning of cells at single-cell resolution for tissue engineering and other applications. *Angew Chem Int Ed Engl* 2011; 50: 7378-80.
- 40) Bengoechea JA. Infection systems biology: from reactive to proactive (P4) medicine. *Int Microbiol* 2012; 15: 55-60.
- 41) Agusti A, Sobradillo P, Celli B. Addressing the complexity of chronic obstructive pulmonary disease: from phenotypes and biomarkers to scale-free networks, systems biology, and P4 medicine. *Am J Respir Crit Care Med* 2011; 183: 1129-37.
- 42) Hood L, Friend SH. Predictive, personalized, preventive, participatory (P4) cancer medicine. *Nat Rev Clin Oncol* 2011; 8: 184-7.
- 43) Tian Q, Price ND, Hood L. Systems cancer medicine: towards realization of predictive, preventive, personalized and participatory (P4) medicine. *J Intern Med* 2012; 271: 111-21.
- 44) Bradley WG, Golding SG, Herold CJ, et al. Globalization of P4 medicine: predictive, personalized, preemptive, and participatory--summary of the proceedings of the Eighth International Symposium of the International Society for Strategic Studies in Radiology, August 27-29, 2009. *Radiology* 2011; 258: 571-82.
- 45) Hood L, Auffray C. Participatory medicine: a driving force for revolutionizing healthcare. *Genome Med* 2013; 5: 110.
- 46) Hood L. Systems Biology and P4 Medicine: Past, Present, and Future. *Rambam Maimonides Med J* 2013; 4: e0012.
- 47) Schwenk TL, Green LA. The Michigan Clinical Research Collaboratory: following the NIH Roadmap to the community. *Ann Fam Med* 2006; 4 (Suppl 1): S49-54.

- 48) Macaulay AC, Nutting PA. Moving the frontiers forward: incorporating community-based participatory research into practice-based research networks. *Ann Fam Med* 2006; 4: 4-7.
- 49) Carlson B. P4 medicine could transform healthcare, but payers and physicians are not yet convinced. *Biotechnol Healthc* 2010; 7: 7-8.
- 50) Nabipour I. *Interdisciplinary theory in medicine*. Bushehr University of Medical Sciences Press, 2011.
- 51) Annual Meeting Reports. P4 Medicine (predictive, personalized, preventive, & participatory): catalyzing a revolution from reactive to proactive medicine. *Science Editor* 2012; 35: 17.
- 52) Nabipour I. *Forecasting in technology, a tool for sustainable development*. Bushehr University of Medical Sciences Press, 2010.

## نمایه

امنیت زیستی..... ۱۰۳، ۳۸،	ابراه اطلاعات..... ۱۴۰
۱۰۴، ۱۰۵، ۱۱۱، ۱۱۴	اتحادیه اروپا..... ۱۲، ۲۳، ۳۳، ۶۸، ۸۸
انتزاع..... ۵۱	اتوپوئسیس..... ۶۷، ۶۸
انتقال ژنی..... ۶۴، ۶۵، ۱۰۶	اتونومی..... ۷۰
انتولوژی..... ۸۸	اخلاق..... ۳۸، ۸۳، ۸۵، ۸۶
انجمن بیوتکنولوژی..... ۲۶، ۲۸	۸۸، ۹۶، ۹۹، ۱۱۱
انقلاب دیجیتال..... ۱۳۳، ۱۵۴	ادراک..... ۴۹، ۵۰، ۵۷، ۵۹، ۶۰، ۶۱، ۱۵۴
ایمنی زیستی..... ۳۵، ۳۸، ۹۷، ۱۰۳،	ارائه دهندگان خدمات سلامت..... ۱۵۱
۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۹، ۱۱۰، ۱۱۱، ۱۱۴	اسپکترومتری جرمی..... ۱۲۲، ۱۲۴
آرایه ژنتیکی..... ۶۵	اسید نوکلئوتیک..... ۱۲۴
آرتمیسینین..... ۲۰، ۵۱، ۱۰۱	اسیدهای آمینه سینتتیک..... ۱۰۸
آشوب..... ۱۲۲، ۱۳۷	اشتراک در منافع..... ۱۰۰
آکادمیک..... ۱۳۱، ۱۴۵، ۱۵۱، ۱۵۲	اصول سازماندهی..... ۷۰
آمریکا..... ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۶، ۳۸،	اطلاعات ژنتیکی..... ۳۲، ۶۸، ۱۲۷
۷۵، ۱۰۸، ۱۱۲، ۱۱۵، ۱۳۰، ۱۳۱،	اقتصاد..... ۱۵۳
۱۳۲، ۱۳۳، ۱۳۵، ۱۳۶، ۱۳۹، ۱۴۰،	اقتصاد دانایی..... ۱۵۳
۱۴۲، ۱۴۳، ۱۵۱، ۱۵۲، ۱۵۳	اقتصاد دانایی محور..... ۱۵۳
آموزش..... ۱۲۹، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۶، ۱۴۷	اکوسیستم..... ۲۳، ۱۰۷
آموزش پزشکی..... ۱۴۴	الگوریتم های رایانه ای..... ۴۵

- آنالیز تک سلولی.....۱۲۴، ۱۲۸، ۱۵۰
- آینده.....۱۲۴، ۱۲۵، ۱۲۶، ۱۲۷
- ۱۳۱، ۱۳۹، ۱۴۰، ۱۴۴، ۱۵۰، ۱۵۳، ۱۵۴
- آینده پژوهی ..... ۱۴۴، ۱۵۴
- بالینی.....۱۲۵، ۱۲۷، ۱۳۱، ۱۴۱
- ۱۴۲، ۱۴۶
- برنامه ..... ۱۴۰، ۱۴۲، ۱۴۳
- بنیاد ملی سلامت ..... ۱۳۰، ۱۳۱
- ۱۳۲، ۱۳۳، ۱۳۵، ۱۳۶، ۱۳۹، ۱۴۰
- ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۵۱، ۱۵۲، ۱۵۳
- بنیاد ملی علم آمریکا ..... ۲۸
- بهره‌وری ..... ۱۴۶
- بیماری‌های قلبی - عروقی.. ۱۳۴، ۱۴۷
- بیماری‌های مزمن ..... ۱۴۱
- بیماری‌های واگیر ..... ۱۵۰
- بیوانفورماتیک.. ۱۳۳، ۱۴۰، ۱۴۸، ۱۴۹
- بیولوژی ..... ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۸
- ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۳۲، ۱۳۶، ۱۴۰، ۱۴۷
- ۱۴۸، ۱۵۲
- بیولوژی خودگردان ..... ۹۷
- بیولوژی ساختمانی ..... ۱۳۶
- بیولوژی سیستمی ..... ۱۰، ۱۴، ۳۲
- ۳۳، ۵۷، ۷۱، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۳۰
- ۱۳۲، ۱۴۸
- بیولوژی سینتتیک.....۷، ۹، ۱۰، ۱۱
- ۱۲، ۱۳، ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹
- ۲۰، ۲۱، ۲۲، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۷، ۲۸
- ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶
- ۳۷، ۳۸، ۴۳، ۴۵، ۴۶، ۴۷، ۴۹، ۵۰
- ۵۱، ۵۲، ۵۴، ۵۵، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰
- ۶۱، ۶۲، ۶۶، ۶۷، ۷۱، ۷۵، ۷۶، ۷۷، ۸۳
- ۸۵، ۸۶، ۸۷، ۸۸، ۸۹، ۹۰، ۹۳، ۹۵
- ۹۶، ۹۸، ۹۹، ۱۰۰، ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳
- ۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۰۹، ۱۱۰، ۱۱۱
- ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۴
- بیولوژی محاسباتی ..... ۱۴۸
- بیولوژی محاسبه گرایانه ..... ۱۴۰، ۱۵۲
- بیولوژی ملکولی ..... ۲۸، ۴۶، ۵۰
- بیولوژیست‌های گاراژی ..... ۱۱۰
- بیولوژیک.....۱۲۲، ۱۲۶، ۱۲۷، ۱۲۹
- ۱۳۲، ۱۳۵، ۱۳۷، ۱۳۸، ۱۳۹، ۱۴۲
- ۱۴۵، ۱۵۰، ۱۵۲
- بیوهکر ..... ۹۷
- پاتوژن ..... ۱۲۳، ۱۴۸
- پاتوفیزیولوژی ..... ۱۲۳
- پاک‌سازی محیط زیست ..... ۱۵
- پتنت ..... ۹۵، ۹۶، ۹۸
- پروتئوسل ..... ۶۸
- پروتئوم ..... ۱۳۵، ۱۴۱
- پروتئومیکس ..... ۱۲۸، ۱۵۴
- پروژه‌های پیش‌آهنگ ..... ۱۵۲
- پزشکی ..... ۱۱، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹
- ۲۲، ۲۴، ۲۵، ۲۹، ۳۰، ۳۱، ۴۶، ۱۰۱
- ۱۱۹، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۲۵

- پیشگویی کننده ..... ۱۲۶، ۱۲۷، ۱۳۱، ۱۳۰، ۱۲۹، ۱۲۸، ۱۲۷، ۱۲۶، ۱۳۱، ۱۳۰، ۱۲۹، ۱۲۸، ۱۲۷، ۱۲۶
- پیشگیرانه ..... ۱۲۶، ۱۲۷، ۱۴۲، ۱۳۳، ۱۳۴، ۱۳۷، ۱۳۹، ۱۴۰، ۱۴۰، ۱۳۹، ۱۳۷، ۱۳۴، ۱۳۳، ۱۴۰، ۱۴۰
- پیشگیری ..... ۱۲۱، ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۵، ۱۴۷، ۱۴۸، ۱۴۸، ۱۴۷، ۱۴۵، ۱۴۴، ۱۴۳، ۱۴۲
- تبهگنی ..... ۶۳، ۱۵۰، ۱۵۱، ۱۵۲، ۱۵۳، ۱۵۴، ۱۵۴، ۱۵۳، ۱۵۲، ۱۵۱، ۱۵۰، ۱۴۹
- تجاری سازی ..... ۳۷، ۱۱۲، ۱۲۸، ۱۲۷، ۱۲۶، ۱۲۸، ۱۲۷، ۱۲۶
- ترانس کریپتوم ..... ۱۲۱، ۱۲۴، ۱۵۰، ۱۵۰، ۱۴۵، ۱۲۹
- ترجمان دانش ..... ۳۸، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۴، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۴
- تروریست های زیستی ..... ۱۱۵، ۱۲۷، ۱۲۸، ۱۴۳، ۱۵۰، ۱۵۴
- تروریسم زیستی ..... ۱۱۵، ۱۸، ۱۹، ۱۸، ۱۹
- تصویربرداری ملکولی ..... ۱۲۸، ۱۲۹، ۱۲۵، ۱۲۵، ۱۲۵، ۱۲۵
- ۱۳۶، ۱۵۰، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۱، ۱۲۲
- تفکر سیستمی ..... ۱۲۴، ۱۵۲، ۱۳۰، ۱۲۹، ۱۲۸، ۱۲۶، ۱۲۵، ۱۲۴
- تکنولوژی ..... ۱۴۶، ۱۳۲، ۱۳۳، ۱۴۳، ۱۴۵، ۱۴۷، ۱۴۹، ۱۴۹
- تندرستی ..... ۱۲۴، ۱۲۶، ۱۲۹، ۱۴۸، ۱۵۴، ۱۵۴، ۱۴۸، ۱۲۹، ۱۲۶، ۱۲۴، ۱۵۴
- توالی ..... ۱۴، ۱۹، ۳۲، ۷۲، ۷۳، ۱۳۹، ۱۳۹، ۱۳۹
- ۷۶، ۹۴، ۱۰۵، ۱۱۱، ۱۱۲، ۱۱۳، ۱۱۵، ۱۵۱، ۱۵۰، ۱۴۸، ۱۵۰، ۱۴۸
- ۱۲۱، ۱۲۴، ۱۲۸، ۲۸، ۲۸، ۲۸
- توالی یابی ..... ۱۲۱، ۱۲۴، ۱۲۸، ۱۲۸، ۱۲۴، ۱۲۱
- توالی یابی DNA ..... ۱۲۱، ۲۷، ۲۷
- توالی یابی ژنوم ..... ۱۲۴، ۱۲۸، ۱۴۲، ۱۴۲
- توسعه پایدار ..... ۱۵۴، ۱۴۷، ۱۴۷
- توسعه علمی ..... ۱۴۹، ۱۴۱، ۱۴۱
- تئوری دسته‌ای ..... ۷۰، ۵۳، ۵۱، ۴۹، ۳۲، ۷۰، ۵۳، ۵۱، ۴۹، ۳۲
- تئوری سیستمی ..... ۷۰، ۵۶، ۵۷، ۵۹، ۶۱، ۶۴، ۹۱، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۳
- تئوری های سامانه ..... ۷۰، ۱۲۵، ۱۲۶، ۱۲۷، ۱۵۴
- ثبت اختراع ..... ۹۵، ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۴۲، ۱۵۰، ۱۵۰
- جمعیت ..... ۱۳۹، ۶۸، ۵۳، ۶۸

زیست محیطی.....	۱۲۶	جینگو بیوورک.....	۲۱
زیستمدان.....	۱۰۷	چشم‌انداز.....	۱۲۳، ۱۳۱، ۱۴۵، ۱۵۴
ژن.....	۱۴۷، ۱۳۸، ۱۳۴	چلس.....	۹۱
ژن درمانی.....	۱۹، ۱۸، ۱۶	چیپس‌های پروتئینی.....	۱۲۴
ژنوتیپ.....	۱۳۴	حفاظت بیولوژیک.....	۱۱۵
ژنوتیپ - بافت.....	۱۳۴	حیات مصنوعی ..	۷۲، ۷۵، ۷۶، ۷۷، ۷۸
ژنوم.....	۱۲، ۱۳، ۳۲، ۳۴، ۴۶	خلق دانش.....	۴۷، ۴۹، ۵۰، ۵۳
.....	۵۱، ۵۲، ۵۴، ۶۷، ۶۹، ۸۷، ۸۸، ۹۱	.....	۵۷، ۵۸، ۶۰، ۶۱، ۸۷
.....	۹۶، ۱۰۵، ۱۰۶، ۱۲۱، ۱۲۴، ۱۲۷	خود تخریبی.....	۱۰۷، ۱۰۸
.....	۱۲۸، ۱۳۲، ۱۳۴، ۱۳۵، ۱۴۰، ۱۵۲	خون.....	۱۲۴
ژنوم انسان.....	۱۲۱، ۱۳۲، ۱۵۲	داده‌های بزرگ.....	۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۵
ژنوم صناعی.....	۱۲	دارو.....	۱۴۴
ژنوم کمینه.....	۱۳، ۴۶، ۵۲، ۶۷	دستکاری ملکولی.....	۴۵
.....	۸۷، ۸۸، ۹۱	دستگاه‌های بیولوژیک.....	۴۵، ۵۴، ۵۶
ژنومیک.....	۱۲۵، ۱۴۱، ۱۴۹	دولت.....	۱۳۱
ژنومیکس.....	۱۵۴	دیابت.....	۱۳۴
سامانه‌های زیستی.....	۱۰، ۱۴، ۴۶	رانش ژنتیکی.....	۶۵
.....	۴۹، ۵۰، ۵۴، ۵۷، ۵۸، ۵۹، ۶۰، ۶۱	رهیافت اخلاقی.....	۸۶
.....	۶۹، ۷۰، ۷۲، ۷۶، ۷۷، ۹۴، ۹۷، ۱۰۸	رهیافت‌های میان رشته‌ای.....	۱۴۶
سامانه‌های مصنوعی.....	۱۰، ۴۶	ریچارد فاینمن.....	۴۷، ۴۸
سامانه‌های مینی‌مال.....	۷۳	زرحونی.....	۱۳۱
سرطان.....	۱۳۴	زیست - پزشکی.....	۱۳۱، ۱۳۴
سلامت.....	۱۵، ۱۶، ۱۸، ۳۱، ۴۶	.....	۱۳۷، ۱۴۳، ۱۵۲
.....	۱۰۳، ۱۰۶، ۱۰۸، ۱۱۹، ۱۲۱، ۱۲۶	زیست پزشکی.....	۱۳۰، ۱۳۳، ۱۴۲
.....	۱۲۷، ۱۲۸، ۱۲۹، ۱۳۰، ۱۳۱، ۱۳۲	.....	۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۸، ۱۵۲، ۱۵۳
.....	۱۳۳، ۱۳۵، ۱۳۶، ۱۳۷، ۱۳۹، ۱۴۰	زیست فناوری.....	۱۴۴
.....	۱۴۱، ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۴، ۱۴۵، ۱۴۶	زیست محیط.....	۱۲۶

- ۱۴۱، ۱۳۰، ۱۱۵، ۱۱۴، ۱۱۳، ۱۱۲  
 ۱۵۳، ۱۵۱، ۱۴۸  
 طراحی منطقی ..... ۱۰، ۱۱، ۵۵،  
 ۷۷، ۶۶، ۶۵، ۶۴، ۵۷، ۵۶  
 عدالت ..... ۹۹، ۱۰۱، ۱۰۲، ۱۰۳، ۱۴۷  
 عدم قطعیت ..... ۸۶، ۸۹  
 علوم زیستی محاسبه گرایانه ..... ۱۴۹  
 علوم کامپیوتر ..... ۱۴۰  
 غذا ..... ۱۵، ۲۳، ۴۶، ۹۵، ۱۴۴  
 غربالگری ..... ۱۳۷، ۱۳۸  
 غشاء‌های بیولوژیکی ..... ۷۳  
 فناوریانه ..... ۱۲۷، ۱۵۳  
 فناوری ..... ۱۲۱، ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۸،  
 ۱۳۰، ۱۳۳، ۱۴۰، ۱۴۲، ۱۴۳، ۱۴۴،  
 ۱۴۵، ۱۴۸، ۱۴۷، ۱۵۴  
 فناوری اطلاعات ..... ۱۳۳، ۱۴۰، ۱۴۴، ۱۴۵  
 فناوری سکو ..... ۱۵، ۲۱  
 فناوری‌های اومیکس ..... ۱۲۱  
 فناوری‌های برتر ..... ۱۲۶، ۱۳۵، ۱۴۸  
 فناوری‌های زیستی ..... ۱۴۸  
 فناوری‌های نوپدید ..... ۱۲۴، ۱۳۴، ۱۴۸  
 فناوری‌های نوین ..... ۱۲۸، ۱۳۶  
 فنوتیپ ..... ۱۲۵، ۱۲۸، ۱۴۷  
 فیزیولوژی ..... ۱۲۲  
 قطعات زیستی ..... ۱۰۸، ۱۰۹، ۱۱۰  
 کاربرد دوگانه ..... ۱۱۱، ۱۱۲  
 کارگزاران ..... ۱۳۲
- ۱۵۴، ۱۵۳، ۱۵۲، ۱۵۱، ۱۴۸، ۱۴۷  
 سلول ..... ۱۳۵، ۱۳۹، ۱۵۴  
 سلول درمانی ..... ۱۷  
 سلول‌های کمینه ..... ۱۳، ۵۳  
 سلول‌های بنیادی ..... ۱۲۸، ۱۴۸  
 سلول‌های بنیادی پرتوان ..... ۱۲۸  
 سنتز ژن ..... ۱۴، ۳۱، ۵۲، ۷۴  
 سه گانه مقدس ..... ۱۲۳  
 سیستمی ..... ۱۲۲، ۱۲۳، ۱۲۵، ۱۲۶،  
 ۱۳۰، ۱۴۵، ۱۴۸، ۱۵۰، ۱۵۳، ۱۵۴  
 شاسی .. ۱۳، ۲۰، ۳۱، ۵۲، ۶۷، ۹۱، ۱۱۰  
 شبکه سازی ..... ۱۴۶  
 شبکه‌های اجتماعی ..... ۱۲۶  
 شبکه‌های آشوب زده ..... ۱۲۲، ۱۲۳،  
 ۱۲۴، ۱۳۷  
 شبکه‌های پژوهش‌های بالینی ..... ۱۴۲  
 شکاف دیجیتالی ..... ۱۰۳  
 شکاف نانویی ..... ۱۰۳  
 شورای مشورتی علوم آکادمیک  
 اروپا ..... ۲۳  
 صنعت ..... ۱۳۱، ۱۴۱  
 ضد هنجار ..... ۹۶  
 طراحی ..... ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۳، ۱۵،  
 ۲۱، ۲۲، ۳۴، ۳۶، ۳۷، ۴۵، ۴۹، ۵۱،  
 ۵۴، ۵۵، ۵۶، ۵۷، ۶۰، ۶۲، ۶۳، ۶۴، ۶۵،  
 ۶۶، ۷۰، ۷۱، ۷۳، ۷۷، ۸۷، ۹۲، ۹۴،  
 ۹۵، ۹۷، ۱۰۴، ۱۰۵، ۱۰۷، ۱۰۹، ۱۱۰

مدولاریتی.....	۵۸، ۵۷، ۵۲.....	کالج سلطنتی انگلستان.....	۳۳، ۲۹.....
مدیریت.....	۱۵۱، ۱۴۵، ۱۴۴، ۱۴۱.....	کتابخانه‌های قطعات.....	۹۵.....
مدیریت اطلاعات.....	۱۴۵.....	کتابخانه‌های ملکولی.....	۱۳۷، ۱۳۶.....
مراقبت‌های سلامت.....	۱۲۷، ۱۲۱.....	کدهای اخلاقی.....	۱۱۴، ۱۰۳، ۱۰۲.....
	۱۵۳، ۱۴۳، ۱۲۹	کروماتوگرافی.....	۱۲۱.....
مراکز تعالی.....	۱۴۳.....	کریگ ونتر.....	۵۲، ۴۶، ۳۸، ۱۲.....
مراکز تعالی پژوهش.....	۲۵.....	کسب و کار.....	۱۵۳، ۱۴۱.....
مزمین.....	۱۴۱.....	کلاچینگ.....	۵۸، ۵۶، ۵۵.....
مسائل پیچیده.....	۱۵۲.....	کلون سازی ژن.....	۳۵.....
مسیرهای بیولوژیک.....	۷۳، ۱۴، ۱۳.....	کلونینگ.....	۷۴.....
	۱۵۰، ۱۳۷، ۱۳۵	گرانر.....	۳۱، ۲۸.....
مسیرهای متابولیک.....	۹۲، ۱۵.....	مارکرهای زیستی.....	۱۲۵.....
مشارکتی.....	۱۵۱، ۱۵۰، ۱۲۷.....	ماشین.....	۶۴، ۶۲، ۶۱، ۵۷، ۱۱.....
منابع آزاد.....	۹۸، ۹۷، ۹۴.....	۶۵، ۶۶، ۷۳، ۷۵، ۷۶، ۸۷، ۸۹، ۹۰.....	
منابع ژنتیکی.....	۱۰۱، ۹۵.....		۹۲، ۱۱۰، ۱۴۶.....
موتیف‌ها.....	۵۴.....	ماشین‌های زنده... ۶۶، ۸۷، ۸۹، ۹۰.....	۹۲، ۹۰.....
مونتاژهای ژنتیکی.....	۹۷.....	مالکیت فکری.....	۹۹، ۹۶، ۹۵، ۳۷.....
مهندسی.....	۱۶، ۱۴، ۱۱، ۱۰، ۹.....	متابولوم.....	۱۳۵.....
	۳۲، ۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۶، ۲۰، ۱۸، ۱۷.....	متابولومیکس.....	۱۲۸.....
	۵۵، ۵۴، ۵۱، ۵۰، ۴۶، ۴۵، ۳۸، ۳۴.....	متابولیک.....	۱۴۷، ۱۳۵.....
	۷۱، ۷۰، ۶۶، ۶۴، ۶۳، ۵۹، ۵۸، ۵۷، ۵۶.....	متعارف سازی.....	۵۱.....
	۹۳، ۹۲، ۸۹، ۸۸، ۸۷، ۸۶، ۸۵، ۷۳.....	محاسبه گرایانه.....	۱۴۹.....
	۱۴۰، ۱۳۱، ۱۰۹، ۱۰۸، ۱۰۴، ۹۹.....	محیط زیست.....	۱۴۷، ۱۴۴، ۱۲۷.....
مهندسی بیولوژی.....	۹۲، ۸۸، ۹.....	مخمر.....	۱۰۱.....
مهندسی رو به جلو.....	۵۷، ۵۵، ۵۴.....	مدارهای ژنتیکی.....	۵۴.....
مهندسی ژنتیک.....	۶۶، ۴۶، ۲۶.....	مدارهای سینتتیک.....	۳۲، ۱۷.....
	۱۰۹، ۱۰۴، ۹۹، ۹۲، ۸۶.....	مدل‌های محاسباتی.....	۴۶.....

نقشهٔ جامع علمی.....	۱۴۳، ۱۴۴	مهندسی مجدد.....	۱۳۱
نکتار.....	۱۴۲	مهندسی معکوس.....	۵۴، ۵۷
نوآوری.....	۱۴۳، ۱۴۶، ۱۴۷	میان رشته‌ای.....	۱۲۳، ۱۳۱، ۱۳۲
نو ترکیبی.....	۶۵	.....	۱۴۶، ۱۴۸، ۱۴۹، ۱۵۲
نورولوژیک.....	۱۴۷	میان رشته‌ای.....	۲۸، ۲۹، ۳۰، ۳۳
نیروی کار.....	۳۳	.....	۳۴، ۱۲۳
وزیکول.....	۵۳، ۶۹، ۷۱	میکروارگانسیم مصنوعی.....	۴۶
همپوشانی عملکردی.....	۶۳	میکروفلوئیدیک.....	۱۲۸، ۱۵۴
هنجار.....	۹۷	میکوپلازما ژنی‌تالیوم.....	۵۲
هندوستان.....	۲۳	مینی مال.....	۵۲، ۶۷
هولستیک.....	۱۲۳، ۱۲۵، ۱۴۷	نانوفناوری.....	۱۴۴، ۱۴۸
یکانی.....	۵۱، ۵۷	ناهمبسته کردن.....	۵۱
DNA.....	۱۲۱، ۱۲۶، ۱۲۷	نسخه برداری.....	۱۳۹
		نظام سلامت.....	۱۲۹، ۱۳۰، ۱۴۵
			۱۵۱، ۱۵۴





# Philosophy, Ethics & Policy in **Synthetic Biology**

**Dr. Iraj Nabipour**



بنیاد ملی تحقیقات  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی  
کلان منطقه پنج



جمهوری اسلامی ایران  
وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی  
معاونت آموزشی



دانشگاه علوم پزشکی  
و خدمات بهداشتی درمانی بوشهر  
مرکز تحقیقات زیست فناوری دریایی خلیج فارس