

فصلنامه آموزش مهندسی ایران فصلنامه علوم جمهوری اسلامی ایران

گروه علوم مهندسی

ویژه مهندسی شیمی

شماره ۱۰۳ ■ سال بیست و ششم ■ پاییز ۱۴۰۳

- ◆ پیشگفتار / محمد سلطانیه
- ◆ مروری بر آموزش مهندسی شیمی: گذشته، حال و جهت گیری های آینده در ایران و جهان / محمد سلطانیه، رهبر رحیمی، تورج محمدی، سید نظام الدین اشرفی زاده و سهیل ضرغامی
- ◆ مهندسی شیمی سبز / ابراهیم واشقانی فراهانی و سعید رفیعیان
- ◆ نقش فناوری های دیجیتال در ارتقای آموزش مهندسی شیمی / علی محمد سهیل الدین و رحمت ستوده قره باغ
- ◆ فناوری نانو در مهندسی شیمی / امیرحسین مشتاقی، ریحانه باباخانلو، مهدیه یآوری، علی مؤذنی و مجتبی شریعتی نیاسر
- ◆ زیست فناوری در مهندسی شیمی / منوچهر وثوقی، محمد جواد ثقفی و فاطمه فولادی تالاری
- ◆ نقش مهندسی شیمی در توسعه مهندسی (زیست) پزشکی / ابراهیم واشقانی فراهانی و سعید رفیعیان
- ◆ نقش محوری تجربه زیسته مهندسان در نوآوری و ارتقای کیفیت آموزشی / سلوا شاهگلی، آرین پور ابراهیمی علمداری، رضا ال محمود و رحمت ستوده قره باغ
- ◆ چکیده انگلیسی مقالات



E-ISSN: 2676-4881
ISSN: 1607-3316
DOI: 10.22034/ijee
DOR: 20.1001.1.160.73316

بسم الله الرحمن الرحيم



گروه علوم مهندسی

فصلنامه آموزش مهندسی ایران

سال بیست و ششم، شماره ۱۰۳، پاییز ۱۴۰۳

صاحب امتیاز: فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

مدیر مسئول: دکتر محمود یعقوبی

سرمدیر: دکتر محمود یعقوبی

دبیر تخصصی: دکتر جعفر توفیقی

مدیر داخلی: دکتر میترا ملائی پروری

ویراستار: عاطفه قنبری

صفحه‌آرایی: مجید میراب‌زاده

پژوهش و طراحی هنری: دکتر محمدحسین حلیمی

طراحی کامپیوتری نقش هندسی: مریم دهنادی

طراحی و صفحه‌آرایی روی جلد: خیرالله اصغری

مقالات منتشر شده در سامانه فصلنامه در دسترس عموم قرار دارد

نشانی: تهران، ۳۳۱۱۱-۱۵۳۷۶

بزرگراه حقانی (غرب به شرق)، خروجی فرهنگستان‌ها و کتابخانه ملی

فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران

صندوق پستی: ۵۳۱۸-۱۹۳۹۵

تلفن: ۰۲۱-۸۸۱۹۰۴۳۳-۸۸۱۹۰۲۱، دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۵۶۲۱۶

وبگاه: <http://ijee.ias.ac.ir>

رایانامه: ijee78@ias.ac.ir

شاپا: ۲۳۱۶-۱۶۰۷ / شاپای الکترونیکی: ۴۸۸۱-۲۶۷۶

شناسه دیجیتال: (DOI) / [10.22047/ijee](https://doi.org/10.22047/ijee)

شناسه دیجیتال: (DOR): ۲۰.۱۰۰۱.۱۶۰۷۲۳۱۶

لیتوگرافی و چاپ و صحافی: باغ هنر

تهران، خیابان مفتاح شمالی، کوچه ششم پلاک ۵، واحد ۱

هیأت تحریریه

دکتر سعید سهراب‌پور / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر محمدرضا اسلامی / عضو پیوسته فرهنگستان علوم
دکتر مهدی سهرابی / عضو وابسته فرهنگستان علوم	دکتر گودرز احمدی / استاد رابرت هیل، دانشگاه کلارکسون - آمریکا
دکتر ابراهیم شیرانی / عضو وابسته فرهنگستان علوم	دکتر خدایار ایبیلی / دانشگاه تهران
دکتر محمد شاهیده پور / استاد و رئیس گروه مهندسی برق و کامپیوتر در موسسه فناوری ایلینوی - آمریکا	دکتر مهدی بهادری نژاد / عضو پیوسته فرهنگستان علوم
دکتر حسن ظهور / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر جعفر توفیقی / عضو پیوسته فرهنگستان علوم
دکتر جواد فیض / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر پرویز جبه دار مارالانی / عضو پیوسته فرهنگستان علوم
دکتر محمد مدرس یزدی / عضو وابسته فرهنگستان علوم	دکتر جلال حجازی / عضو وابسته فرهنگستان علوم
دکتر عزت الله نادری / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر محمد حسین حلیمی / عضو پیوسته فرهنگستان علوم
دکتر غلامعلی منصوری / استاد دانشگاه ایلینوی شیکاگو - آمریکا	دکتر رضوان حکیم زاده / دانشگاه تهران
دکتر محمود یعقوبی / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر پرویز دوامی / عضو پیوسته فرهنگستان علوم
	دکتر رهبر رحیمی / دانشگاه سیستان و بلوچستان

هیأت مشاوران

دکتر ناصر طالب بیدختی / دانشگاه شیراز	دکتر علی اشرفی زاده / دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دکتر محمدرضا عارف / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر عباس افشار / دانشگاه علم و صنعت ایران
دکتر طاهره کاغذچی / دانشگاه صنعتی امیر کبیر	دکتر فرامرز افشار طارمی / دانشگاه صنعتی امیر کبیر
دکتر علی کاوه / عضو پیوسته فرهنگستان علوم	دکتر محمد حسن پنجه شاهی / دانشگاه تهران
دکتر ناصر کنعانی / دانشگاه برلین	دکتر ناصر توحیدی / دانشگاه تهران
دکتر مجتبی محزون / دانشگاه شیراز	دکتر علی حائریان اردکانی / دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر علی مقداری / دانشگاه صنعتی شریف	دکتر علی خاکی صدیقی / دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دکتر علی موقر رحیم آبادی / دانشگاه صنعتی شریف	دکتر جلیل آقا راشد محصل / دانشگاه تهران
دکتر حسین معاریان / عضو وابسته فرهنگستان علوم	دکتر محمود شاکری / دانشگاه صنعتی امیر اکبیر
دکتر معصومه نصیری کناری / دانشگاه صنعتی شریف	دکتر عباس شجاع الساداتی / دانشگاه تربیت مدرس
دکتر منوچهر وثوقی / دانشگاه صنعتی شریف	دکتر محمود مهرداد شکریه / دانشگاه علم و صنعت ایران

فصلنامه آموزش مهندسی ایران از همکاری صمیمانه انجمن آموزش مهندسی ایران سپاسگزار است

پایگاه‌ها

پایگاه استنادی جهان اسلام (ISC)

DOAJ	ProQuest
Civilica	Google Scholar
CC (Creative Commons)	Eurasian Scientific Journal Index (ESJI)
Magiran	EBESCO
Pearson	World Book
BRITANNICA	VIRA SCIENCE
J-Gate	ROAD
Scientific Indexing Services (SIS)	Science Explore
Research bib (Academic Resource Index)	Advanced Sciences Index (ASI)

گنجینه اسناد کتابخانه ملی

پایگاه اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی (SID)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی

فهرست مطالب

فصلنامه آموزش مهندسی

سال ۲۶، شماره ۱۰۳، پاییز ۱۴۰۳

- ۱..... پیشگفتار
محمد سلطانیه
- ۷..... مروری بر آموزش مهندسی شیمی: گذشته، حال و جهت‌گیری‌های آینده در ایران و جهان
محمد سلطانیه، رهبر رحیمی، تورج محمدی، سید نظام‌الدین اشرفی‌زاده و سهیل ضرغامی
- ۵۳..... مهندسی شیمی سبز
ابراهیم واشقانی فراهانی و سعید رفیعیان
- ۶۷..... نقش فناوری‌های دیجیتال در ارتقای آموزش مهندسی شیمی
علی محمد سهل‌الدین و رحمت ستوده قره‌باغ
- ۹۳..... فناوری نانو در مهندسی شیمی
امیرحسین مشتاقی، ریحانه باباخانلو، مهدیه یآوری، علی مؤذنی و مجتبی شریعتی نیاسر
- ۱۲۹..... زیست فناوری در مهندسی شیمی
منوچهر وثوقی، محمدجواد ثقفی و فاطمه فولادی تالاری
- ۱۴۱..... نقش مهندسی شیمی در توسعه مهندسی پزشکی (زیست) پزشکی
ابراهیم واشقانی فراهانی و سعید رفیعیان
- ۱۶۷..... نقش محوری تجربه زیسته مهندسان در نوآوری و ارتقای کیفیت آموزشی
سلوا شاهگلی، آرین پورابراهیمی علمداری، رضا آل محمود و رحمت ستوده قره‌باغ
- ۱..... چکیده انگلیسی مقالات

نشریه آموزش مهندسی ایران حاوی مقاله‌ها و دستاوردهای پژوهشی در حوزه آموزش

مهندسی و علوم است

اصلاح و خلاصه کردن مطالب با نظر نویسندگان انجام می‌شود و مسئولیت محتوای مقالات بر

عهده آنان است. نقل مطالب این فصلنامه با ذکر منبع آزاد است

پیشگفتار

از پیدایش رشته مهندسی شیمی و آموزش‌های آن در جهان بیش از ۱۳۰ سال می‌گذرد. طی این مدت، آموزش‌های مزبور تحولات بسیاری پیدا کرده است. مهندسی شیمی که بیشتر به دلیل نیازهای صنایع فرآیندی به متخصصان فنی، به‌ویژه نفت و گاز و پتروشیمی شکل گرفت، اکنون وارد مباحث بسیار گسترده‌تر نظیر صنایع غذایی و داروسازی، مهندسی بیوشیمی و بیوملکولی، مهندسی پزشکی و سلامت، مهندسی بافت و ژنتیک، انرژی و محیط زیست، آب و پساب، پلیمرهای پیشرفته، تحول دیجیتال و هوش مصنوعی شده است.

اما با توجه به اینکه طی چند دهه اخیر در آموزش مهندسی شیمی ایران به روز رسانی عمیق و موثری صورت نگرفته است و بنا به دعوت سردبیر محترم فصلنامه آموزش مهندسی فرهنگستان علوم به مناسبت بیست و پنجمین سال انتشار این فصلنامه، شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان برآن شد که شماره ویژه‌ای با عنوان "آموزش مهندسی شیمی" تهیه کند تا در آن ضمن مروری بر مقاله‌های منتشر شده مرتبط با مهندسی شیمی طی بیست و پنج سال گذشته، با ذکر تاریخچه پیدایش و سیر تحولات این زمینه مهندسی، زمینه‌های جدید و روش‌های نوین آموزش این رشته با توجه به نیازهای آتی کشور و جهان، مورد بررسی قرار گیرند.

با توجه به محدودیت در تعداد صفحات فصلنامه، در این ویژه‌نامه هفت مقاله با عنوان‌های زیر نگارش شده است. البته موارد بسیار بیشتری از زمینه‌های جدید در مهندسی شیمی وجود دارند که در آینده قابل بررسی و نگارش هستند. عنوان‌های این هفت مقاله به همراه چکیده‌ای از هر کدام عبارتند از:

۱. مروری بر آموزش مهندسی شیمی: گذشته، حال و جهت گیری های آینده در ایران و جهان

چکیده: در این مقاله مروری، پس از بررسی اجمالی تاریخچه مهندسی شیمی در جهان و ایران، مروری بر انتشارات مرتبط با مهندسی شیمی در فصلنامه آموزش مهندسی ایران طی بیست و پنج سال گذشته ارایه شده است. در بخش آموزش، به معرفی رویکردهای نوین آموزش در مهندسی شیمی شامل آموزش از راه دور، آموزش مبتنی بر بازی، واقعیت مجازی و دستاوردهای به دست آمده از این روشها می پردازد. همچنین آخرین جهت گیری های تحقیقاتی روز مهندسی شیمی شامل پلیمرهای پاسخگو به محرک؛ دارورسانی؛ درمان سرطان؛ فیلم های بسته بندی فعال ضد میکروبی؛ کاربردهای بسته بندی فعال برای مواد غذایی؛ منسوجات بر پایه نانوالیاف الکترونیسی شده؛ توسعه و کاربرد زیست مواد در پزشکی، کاربردهای ترمیم زخم؛ فناوری های پیشرفته تصفیه آب و پساب؛ کاربردهای نانومواد و یون های فلزی؛ انرژی های سبز و تجدید پذیر و کاربردهای یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در مهندسی شیمی بررسی شده است. سپس با رویکرد آینده نگری، تحولات اخیر در جهان نظیر چالش های زیست محیطی، محدودیت منابع و مواد اولیه و نیز دسترسی به انرژی و بالاخره ملاحظات توسعه پایدار، زمینه های نوین مهندسی شیمی و آینده این رشته با تاکید بر آموزش مهندسی شیمی مورد بررسی قرار گرفته است. با گسترش بسیاری از زمینه های بین رشته ای، نظیر انرژی های نو و کربن زدایی، و همچنین حوزه های آب، غذا، هوا، بهداشت و امور پزشکی، پیش بینی می شود تحولات شگرفی در آموزش مهندسی رخ دهد.

۲. مهندسی شیمی سبز

چکیده: در این مقاله، مفهوم مهندسی شیمی سبز به عنوان نقطه تلاقی «شیمی سبز» و «مهندسی سبز» معرفی شده و بر اهمیت آن در برنامه درسی مهندسی شیمی تأکید می شود. این مقاله ابتدا اهداف و اصول دوازده گانه «شیمی سبز» و «مهندسی سبز» را تشریح می کند و نقش آن ها را در ارتقای پایداری زیست محیطی و کاهش رد پای اکولوژیکی فرآیندهای شیمیایی برجسته می کند. پس از این مقدمه، مهندسی شیمی سبز با تمرکز بر معیارهای پایداری آن و نحوه اعمال این اصول برای ایجاد فرآیندهای شیمیایی سازگارتر با محیط زیست و پایدار، با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می گیرد. سپس بحث به این سو می رود که چگونه مفهوم مهندسی شیمی سبز می تواند به طور یکپارچه در برنامه درسی مهندسی شیمی ادغام شود و تغییرات و اضافاتی را به دوره های موجود پیشنهاد می کند تا موضوعات مهندسی پایدار را در برگیرد. در نهایت، مقاله با خلاصه ای کوتاه به پایان می رسد و خواستار گنجاندن اصول سبز در چارچوب آموزشی برای آماده سازی مهندسان آینده برای چالش های توسعه پایدار است و بر اهمیت تجهیز آن ها به دانش و مهارت های لازم برای نوآوری در یک محیط زیست مسئولیت پذیر تأکید می کند.

۳. نقش فناوری‌های دیجیتال در ارتقای آموزش مهندسی شیمی

چکیده: این مقاله به بررسی تأثیر فناوری‌های دیجیتال بر آموزش مهندسی شیمی می‌پردازد. با توسعه روزافزون فناوری‌ها، ابزارها و محیط‌های آموزشی نیز تغییر و روش‌های سنتی آموزش به روش‌های مدرن و تعاملی تبدیل شده‌اند. در این نوشته، ابتدا به مزایای استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آموزش اشاره و سپس به ابزارهای مختلفی که در این حوزه استفاده می‌شوند، از جمله صفحه گسترده‌ها، نرم‌افزارهای ریاضی، شبیه‌سازهای صنعتی، واقعیت مجازی و افزوده و ابزارهای متنوع هوش مصنوعی پرداخته می‌شود. همچنین فرصت‌ها و چالش‌های موجود در استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی نیز بررسی می‌شوند. به علاوه، استنتاج‌های کلیدی برای استفاده بهینه از فناوری‌های دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی و توسعه مهارت‌های حرفه‌ای دانشجویان ارائه می‌شود. این مقاله می‌تواند به دانشجویان، استادان و پژوهشگران در حوزه مهندسی شیمی کمک کند تا با استفاده از فناوری‌های دیجیتال، آموزش مهندسی شیمی را بهبود و ضمن تبدیل چالش‌ها به فرصت‌های جدید برای خلق ابزارهای پیشرفته، راهکارهایی مناسب را برای استفاده بهینه از این فناوری‌ها در برنامه‌های آموزشی ایجاد و تجربه نمایند.

۴. فناوری نانو در مهندسی شیمی

چکیده: مهندسی شیمی به مسائلی می‌پردازد که حل آن‌ها مستلزم داشتن هم‌زمان علم مهندسی و عمومی مرتبط با شیمی و زیست‌شناسی است. فرآیندهای مورد بررسی در این حوزه به شدت متأثر از خواص مواد بوده و از آنجا که یکی از پیشرفت‌های انجام شده در دهه‌های اخیر دستیابی دانشمندان به نانوذرات است، استفاده از فناوری نانو در مهندسی شیمی به عنوان راهکاری برای افزایش کارایی و بهبود عملکرد فرآیندها معرفی شده است. در این مقاله به معرفی کاربردهای مختلف فناوری نانو در شاخه‌های مختلف مهندسی شیمی پرداخته شده است. در این راستا مثال‌هایی از صنایع نفت و گاز، دارورسانی، محیط زیست، کاتالیست و صنایع غذایی ذکر می‌گردد.

۵. زیست فناوری در مهندسی شیمی

چکیده: زیست فناوری علمی است که از کشفیات جدید در باره نقش مخمر و سایر موجودات زنده در تخمیر مواد مختلف شکل گرفت. این علم گاهی با تغییرات نظریه‌ای روبه‌رو شد و به پیشرفت‌های علمی و صنعتی منجر گردید. زیست فناوری به طور عمومی علم گسترده و رو به رشدی است که آن را می‌توان به عنوان فرآیندهای مبتنی بر فناوری‌های زیستی اطلاق کرد. در این مقاله برای شناخت بهتر گذشته و آینده این علم رو به رشد و پیدا کردن روش مناسب رشد و نمو این علم در فناوری ایران لازم است که ابتدا با این علم و روند تکامل آن آشنا شویم. آنگاه به بررسی نهادهای مؤثر بین‌المللی

شامل نهادهای اقتصادی و پژوهشی پرداخته شد و در نهایت پس از بررسی وضعیت نهادهای مشابه در ایران و نقش مهندسی شیمی در پیشبرد آن پیشنهادهایی برای توسعه این فناوری در آموزش مهندسی ایران صورت گرفت.

۶. نقش مهندسی شیمی در توسعه مهندسی زیست پزشکی

چکیده: در این مقاله، نخست به نقش مهندسی شیمی در کاربردهای سلامت انسان، با تمرکز ویژه بر مهندسی زیست پزشکی اشاره می‌شود. سپس سابقه تاریخی این نقش در آغاز فعالیت مهندسان شیمی در این زمینه با تأکید بر موارد مهم بررسی خواهد شد. در ادامه افق‌های پیش روی مهندسی شیمی در چند زمینه مهم کاربرد مهندسی شیمی در پزشکی مانند زیست مواد، سامانه‌های دارو رسانی و مهندسی بافت به صورت فشرده توضیح داده می‌شوند. سپس چگونگی کاربرد اصول مهندسی شیمی در پیوند مهندسی شیمی و مهندسی بافت/پزشکی بالینی به صورت فشرده بیان می‌شود. آنگاه به چگونگی پدیدار شدن درس‌های مربوط به گرایش مهندسی زیست پزشکی در برنامه آموزشی مهندسی شیمی و توسعه آن تا امروز، از جمله برنامه آموزشی دوره کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - گرایش زیست پزشکی، در ایران پرداخته و در پایان نتیجه‌گیری کوتاه ارائه خواهد شد.

۷. نقش محوری تجربه زیسته مهندسان در نوآوری و ارتقای کیفیت آموزشی

چکیده: در حال حاضر، نظام آموزشی مهندسی در ایران عمدتاً بر مهارت‌های سخت و سنتی تمرکز دارد و فاقد برنامه‌ای مدون برای آموزش مهارت‌های نرم به مهندسين است. ارتقای کیفیت دوره‌های کارشناسی مستلزم تلفیق آموزش با دانش تجربی کسب شده در بستر جامعه، دستگاه‌های اجرایی و بنگاه‌های اقتصادی است. این امر می‌تواند نوآوری آموزشی و پیشرفت شغلی آینده مهندسين را به طور چشمگیری ارتقا دهد. استفاده از تجارب حرفه‌ای مهندسين در ساختار دروس دانشگاهی یا فعالیت‌های فوق برنامه، یکی از اقدامات مؤثر برای ارتقای کیفیت آموزش مهندسی به شمار می‌رود. این تجارب می‌توانند به عنوان پلی ارتباطی بین دانشگاه و صنعت عمل کرده و دانشجویان را با چالش‌ها و فرصت‌های واقعی حرفه‌ای آشنا سازند. در این پژوهش، به بررسی و تحلیل این ایده در چندین ورودی مختلف دوره کارشناسی دانشگاه تهران پرداخته شده است. به منظور ارزیابی تأثیرگذاری تجارب حرفه‌ای مهندسين موفق بر آموزش دانشجویان کارشناسی، یک نظرسنجی تخصصی و اصولی طراحی و با معیارهای روانشناسی مورد ارزیابی قرار گرفت. بازخورد دقیق دانشجویان جمع‌آوری و نتایج حاصله تحلیل شد. در نهایت، بر اساس یافته‌های این تحقیق، پیشنهادهاتی برای بهبود کیفیت آموزش مهندسی ارائه شده است. اجرای جدی و مستمر این اقدامات می‌تواند نقش مهمی در توسعه و ارتقای نظام آموزشی مهندسی کشور ایفا و دانشجویان را به نحو مطلوب برای حضور در محیط حرفه‌ای آماده سازد.

امید است که انتشار این شماره ویژه بتواند برای جامعه مهندسی شیمی کشور، به ویژه استادان دانشگاه‌ها و نیز دانشجویان، مؤسسات و مهندسان تحقیق و توسعه صنعتی در برنامه‌ریزی‌های آموزشی و پژوهشی همگام با سیر تحولات جهانی و نیازهای جامعه، مفید باشد و زمینه را برای بررسی‌های بیشتر و عمیق‌تر فراهم آورد. شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم از نظرات پیشنهادی دانشگاه‌ها، مراکز پژوهشی و نیز جامعه صنعتی کشور در مورد محتوای این شماره ویژه استقبال می‌کند.

در پایان از اعضای شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم که مشوق نگارش این ویژه‌نامه بودند، به ویژه از جناب آقای دکتر جعفر توفیقی که در دوره ریاست ایشان در گروه علوم مهندسی فرهنگستان نگارش این ویژه‌نامه مورد تأیید قرار گرفت و دبیری تخصصی این شماره ویژه را پذیرفتند، کمال تشکر و قدردانی می‌شود. همچنین از آقایان رهبر رحیمی، دکتر رحمت ستوده قره باغ، دکتر مجتبی شریعتی نیاسر، دکتر تورج محمدی، دکتر ابراهیم واشقانی فراهانی و دکتر منوچهر وثوقی نویسندگان مقالات و نیز از سرکار خانم دکتر طاهره کاغذچی، دکتر سیدعباس شجاع السادات و دکتر بهرام دبیر، اعضای محترم شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم برای داوری مقالات سپاسگزاری می‌شود. از استادان مدعو آقایان دکتر سید نظام الدین اشرفی‌زاده، استاد دانشگاه علم و صنعت ایران و دکتر علی محمد سهل‌الدین استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دکتر سهیل ضرغامی، استادیار دانشگاه صنعتی اصفهان که در نگارش و ویرایش مقالات مشارکت نمودند، و نیز از کلیه همکاران مولف مقالات صمیمانه تشکر و قدردانی می‌شود.

به یاد و سپاس از خدمات استادان پیشکسوت مهندسی شیمی کشور در بنیان‌گذاری و توسعه مهندسی شیمی در ایران، به ویژه استادان فقیه عضو شاخه مهندسی شیمی، شادروان دکتر مرتضی سهرابی، دکتر ایرج گودرزنی و دکتر منصور طاهری، این شماره ویژه به آن‌ها تقدیم می‌گردد.

محمد سلطانیه

رئیس شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم

مروری بر آموزش مهندسی شیمی: گذشته، حال و جهت‌گیری‌های آینده در ایران و جهان

محمد سلطانیه^۱، رهبر رحیمی^۲، تورج محمدی^۳، سید نظام‌الدین اشرفی‌زاده^۴ و سهیل ضرغامی^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۳

DOI: 10.22047/ijee.2024.453157.2073

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.1.0

چکیده: در این مقاله مروری، پس از بررسی اجمالی تاریخچه مهندسی شیمی در جهان و ایران، انتشارات مرتبط با مهندسی شیمی در فصلنامه آموزش مهندسی ایران طی بیست و پنج سال اخیر مرور شده است. در بخش آموزش، به معرفی رویکردهای نوین آموزش در مهندسی شیمی شامل آموزش از راه دور، آموزش مبتنی بر بازی، و واقعیت مجازی پرداخته شده است. آخرین جهت‌گیری‌های تحقیقاتی مهندسی شیمی شامل بسپارهای پاسخگو به محرک، تحویل دارو، درمان سرطان، فیلم‌های بسته‌بندی فعال ضد میکروبی، کاربردهای بسته‌بندی فعال برای مواد غذایی، منسوجات بر پایه نانوالیاف الکترونیسی شده، کاربردهای ترمیم زخم، فناوری‌های پیشرفته تصفیه آب و پساب، کاربردهای نانومواد و یون‌های فلزی، انرژی‌های سبز و تجدیدپذیر و کاربردهای یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در مهندسی شیمی بررسی شده است. سپس با رویکرد آینده‌نگری، تحولات اخیر در جهان نظیر چالش‌های محیط زیستی، محدودیت منابع و مواد اولیه و نیز دسترسی به انرژی و ملاحظات توسعه پایدار، زمینه‌های نوین مهندسی شیمی و آینده این رشته با تأکید بر آموزش مهندسی شیمی مورد بررسی قرار گرفته است. با گسترش بسیاری از زمینه‌های بین‌رشته‌ای، نظیر انرژی‌های نو و کربن‌زدایی از سیستم‌های انرژی و همچنین حوزه‌های آب، غذا، هوا، بهداشت و امور پزشکی، پیش‌بینی می‌شود تحولات شگرفی در آموزش این رشته مهندسی رخ دهد.

واژگان کلیدی: آموزش مهندسی شیمی، چشم‌انداز مهندسی شیمی، زیست‌فناوری، مهندسی پزشکی، نانوفناوری و ریزسیال‌ش، مهندسی شیمی سبز، توسعه پایدار

۱- استاد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف و عضو شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم (نویسنده مسئول).
msoltanieh@sharif.edu

۲- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه سیستان و بلوچستان و عضو شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم. rahbarrahimi@gmail.com

۳- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران و عضو شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم. torajmohammadi@iust.ac.ir

۴- استاد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران. ashrafi@iust.ac.ir

۵- استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران. zarghami@iut.ac.ir

۱. تاریخچه، مقدمه و اهداف

پیشینه علم شیمی یا فن کیمیاگری که نقطه عطف پژوهش‌های تبدیل مس به طلا، کشف الکل توسط ابوبکر محمد بن زکریای رازی (۲۵۲-۳۱۳ ه. ق.)، فرایندهای تخمیری و تقطیر است، به قرن‌ها قبل برمی‌گردد. در اوایل قرن بیستم میلادی، نیاز بشر به تولید انبوه مواد شیمیایی، از جمله سوخت‌ها، مواد سنتزی نظیر لاستیک و پلاستیک، مواد غذایی، سیمان، داروها و غیره، به تأسیس رشته مهندسی شیمی در دانشگاه‌های آن زمان منجر گردید. در این خصوص و برای پاسخگویی به نیاز جامعه بشری برای تولید محصولات شیمیایی در مقیاس انبوه و به صورت پیوسته، با تأسیس انجمن مهندسی شیمی آمریکا در سال ۱۹۰۸ میلادی و تلفیق بخش‌هایی از رشته‌های شیمی و مهندسی مکانیک، رشته مهندسی شیمی به صورت زیر تعریف شد:

مهندسی شیمی حرفه‌ای است که در آن تلفیقی از علوم ریاضیات، شیمی و سایر علوم طبیعی که از مطالعه، تجربه، و تمرین به دست می‌آید، با تبحر علمی به کار می‌رود تا راه‌های اقتصادی استفاده از مواد و انرژی را به نفع بشریت توسعه دهد^۱.

از زمانی که مفهوم عملیات واحد را جورج دیویس^۲ (۱۹۰۸) و آرتور لیتل^۳ (۱۹۱۵)، و پدیده‌های انتقال را بیرد^۴، استیوارت و لایت فوت (۱۹۶۰) ارائه دادند و علم مهندسی شیمی تثبیت شد، دگرگونی‌های بسیاری هم در آموزش و هم در تنوع تولید محصولات شیمیایی به وقوع پیوسته است. به ویژه در دهه‌های اخیر، تحولات بسیاری در دنیای علم و صنعت اتفاق افتاده که بر آموزش مهندسی شیمی، بازار کار، و اشتغال دانش‌آموختگان تأثیر عمیق داشته است (Van Antwerpen, 1980).

بدیهی است که با حفر اولین چاه نفت در ایران و ایجاد پالایشگاه نفت، نیروی انسانی ماهر باید تربیت می‌شد. در ایران جدا از مدرسه صنعتی ایران و آلمان (هنرسرای عالی یا دانشگاه علم و صنعت ایران فعلی، ۱۳۰۸ ه. ش.) که طی یک دوره دوساله کارشناس مهندسی شیمی تربیت می‌نمود، تربیت مهندس شیمی در انستیتو نفت آبادان (دانشگاه صنعت نفت آبادان فعلی) و تأسیس دوره‌های مهندسی شیمی در دانشکده فنی دانشگاه تهران (۱۳۱۳ ه. ش.) و پلی‌تکنیک تهران (دانشگاه صنعتی امیرکبیر ۱۳۳۶ ه. ش) را می‌توان شروع رسمی آموزش مهندسی شیمی در کشور دانست. ساختار آموزشی دوره‌ها در ابتدا مبتنی بر تربیت نیروی انسانی برای صنایع نفت، به ویژه پالایشگاه‌ها بود. شناخت فرایند پالایش و بهره‌برداری از آن و همچنین کارآموزی و کارورزی در کنار استادان باتجربه، دانش‌آموختگانی زبده در اختیار صنعت نفت قرار داد، مهندسان کارآمدی که اداره پالایشگاه را به خوبی انجام می‌دادند. نیاز به افزایش نیروی انسانی که علاوه بر رفع نیاز صنعت نفت بتواند احتیاجات صنایع پتروشیمی و گاز را نیز برآورده نماید، مبنایی برای

1- Chemical engineering is the profession in which knowledge of mathematics, chemistry, and other natural sciences gained by study, experience, and practice is applied with judgment to develop economic ways of using materials and energy for the benefit of mankind.

2- George Davis

3- Arthur Little

4- Bird, Stewart and Lightfoot

تأسیس رشته مهندسی شیمی در دانشگاه شیراز در سال ۱۳۴۳، دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۴۵، دانشگاه سیستان و بلوچستان و دانشگاه صنعتی اصفهان در سال ۱۳۵۶ و سپس، در چندین دانشگاه بزرگ کشور گردید (Goodarzniya, 2000; Rashtchian & Shayegan, 2001).

در برنامه‌ریزی دهه اول پس از انقلاب اسلامی، به خصوص در اوایل دهه ۱۳۶۰، به صنایعی از جمله صنایع غذایی، بسیاری، معدنی، و داروسازی نیز علاوه بر صنایع پتروشیمی و نفت و گاز توجه شد و دانش‌آموختگان دوره مقطع کارشناسی، با گرایش‌های خاص از دانشگاه وارد جامعه شدند. البته رشد و نیاز صنایع به آن میزان که دانش‌آموختگان با گرایش‌های مختلف را جذب نمایند، وجود نداشت و در نتیجه گرایش‌های تخصصی جایگاه اولیه را از دست دادند، به طوری که پس از چند سالی از اجرای این گرایش‌ها، مجدداً برنامه دوره کارشناسی مهندسی شیمی، به صورت قبل بازگشت و اکنون با عنوان مهندس شیمی بدون ذکر هیچ‌گرایشی به بازار کار معرفی می‌شوند. در این ساختار، مهندسان شیمی با گذراندن دروس عمومی (۲۲ واحد)، دروس پایه (۶۰ واحد)، دروس اصلی (۵۰ واحد) و دروس تکمیلی و تخصصی (اجباری و اختیاری) (۱۰ واحد)، جمعاً ۱۴۲ واحد به بازار کار وارد می‌شوند. روش آموزشی مذکور، مشکل تناسب نیروی کار و نیاز بازار کار را تا حدودی مرتفع نموده است. اما با توجه به اختیارات محدودی که توسط وزارت علوم، تحقیقات و فناوری به برخی از دانشگاه‌ها به منظور برنامه‌ریزی دروس اختیاری داده شده است و البته انعطاف‌پذیری اندک برنامه آموزشی مهندسی شیمی، ضعف برون‌داد دانشگاه در تطابق با نیاز صنعت مشهود است.

از سویی دیگر، صنایع مبتنی بر زیست‌فناوری، نانوفناوری و هوش مصنوعی، انرژی‌های تجدیدپذیر، محیط زیست و بازیافت مواد و انرژی و نیز فناوری سبز، به سرعت در جهان در حال گسترش هستند. مسائل زیست‌محیطی، تغییرات اقلیمی و به تبع آن، نیاز به کربن‌زدایی و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و رقابت‌های جهانی اقتصادی بسیار مهم است و مهندسان شیمی به دانش ژرف‌تری نیاز دارند. هم‌اکنون خودرویی بدون نیاز به سوخت فسیلی و خودران، واقعیتی تجاری است و انتظار احداث پالایشگاه "خودران" یا تمام‌اتوماتیک با کمترین میزان آلاینده‌گی و با اندک کارکنان نیز انتظاری بسیار نزدیک به واقعیت است^۱. بسیاری از زمینه‌های بین‌رشته‌ای، از جمله مواد پیشرفته، مصارف پزشکی و مهندسی پزشکی وجود دارند که نیاز به توجه ویژه دارند. در نتیجه نیازمندی‌های صنایع نوپدید مزبور، تحول بنیادی در آموزش مهندسی امری اجتناب‌ناپذیر بوده و ساختار آموزش و محتوای آن ناگزیر از تغییر است. به علاوه، تمامی این تحولات بر اقتصاد، اخلاق مهندسی و اجتماع تأثیرگذار هستند (Davari Ardakani, 2010).

آموزش و پژوهش دو بازوی مهم در توسعه علم هستند که از هم جدا نمی‌شوند. این دو، مانند دو

بالی هستند که علم را به پرواز درمی آورند. پاسخ به این سؤال که کدام یک از آموزش یا پژوهش مقدم بوده است، پیچیده و گنگ است. به نظر می رسد اولین متون آموزشی، نتیجه یافته های پژوهشی اولیه باشند. مهندسی شیمی یک رشته علمی است که بیش از ۱۳۰ سال قدمت دارد و ابتدا به فرایندهای شیمیایی و مکانیکی محدود بوده است اما با گذشت زمان، چنان گسترش یافته است که امروزه به سختی می توان حد و مرزی برای آن قائل شد. به عبارت دیگر، امروزه مهندسی شیمی در زمینه های زیست فناوری، نانوفناوری، پزشکی و محیط زیست نیز حضور دارد (Dobbelare et al., 2021; Dutta, 2012; Ogawa, 2007; Rashtchian & Shayegan, 2001).

در این مقاله پس از مروری بر پژوهش های مرتبط با آموزش مهندسی شیمی که طی بیست و پنج سال اخیر (۱۳۷۸-۱۴۰۲) در ایران انجام شده و در فصلنامه آموزش مهندسی (از انتشارات فرهنگستان علوم) منتشر شده اند، سیر تحولات مهندسی شیمی از ابتدای شکل گیری در جهان و ایران تا کنون، زمینه ها و رشته های جدید در مقاطع مختلف آموزش مهندسی شیمی، جایگاه و نقش مهندسان شیمی در توسعه علم و فناوری... در گذشته و حال، و چالش ها و فرصت های پیش روی مهندسان شیمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

۲. مروری بر مقالات منتشر شده در فصلنامه آموزش مهندسی ایران، در خصوص آموزش مهندسی شیمی (۱۳۷۸-۱۴۰۲)

در این بخش، پژوهش های منتشر شده در فصلنامه آموزش مهندسی ایران طی ۲۵ سال اخیر و پیشنهادهای ارائه شده توسط اعضای هیئت علمی دانشگاه ها، به منظور بهبود برنامه آموزشی مهندسی شیمی، به اختصار ارائه شده است.

گودرزنیایا در سال ۱۳۷۸ ضمن تبیین زمینه های پیدایش آموزش مهندسی شیمی و مرور تاریخچه توسعه آن (Goodarzniya, 2000)، مطالعه جامعی از روند تکوین رشته مهندسی شیمی در ایران را ارائه داده است (Goodarzniya, 2012). خوشنودی در سال ۱۳۷۹ به بررسی تغییرات، نقاط عطف و سوگیری های مهندسی شیمی در قرن بیستم، شرایط حال حاضر، گرایش های مختلف و کاربردهای آنها در صنعت و پیش بینی آینده مهندسی شیمی تا سال ۲۰۲۰ پرداخت (Khoshnoodi, 2000). طاهری و رحیمی در سال ۱۳۷۹ برنامه آموزش مهندسی شیمی در ایران را نقد و بررسی کرده اند و پیشنهادهایی را به منظور بهبود آن با توجه به نیازهای صنعت و پیشرفت های علمی دنیا ارائه کردند (Taheri & Rahimi, 2000). رشتچیان و شایگان در سال ۱۳۷۹ به بیان ضرورت منحصراً نساختن محتویات برنامه آموزشی مهندسی شیمی دانشگاه های مختلف به یک برنامه خاص و لزوم متناسب سازی دروس و موضوعات برنامه آموزشی مهندسی شیمی با ظرفیت ها و امکانات بومی هر دانشگاه و همچنین نیازهای صنعتی و منابع طبیعی آن منطقه پرداختند (Rashtchian & Shayegan, 2001). نگرش های مختلف

برای گنجاندن مباحث ایمنی در برنامه آموزش مهندسی شیمی و بیان اهمیت این مبحث و همچنین فهرست دروس مربوط، توسط فرخزاد در سال ۱۳۷۹ مورد بحث و بررسی گسترده قرار گرفت (Farokhzad, 2001). نقش مهندسی شیمی در تحلیل مسائل مربوط به تولید و مصرف انرژی در صنایع فرایندی و بررسی جایگاه انرژی در برنامه آموزش مهندسی شیمی و ضرورت تعمیق آنها توسط پنجه‌شاهی، در سال ۱۳۷۹ مورد مطالعه و نقد و بررسی قرار گرفت (Panjeshahi, 2001). دبیر و همکاران، حوزه CFD را معرفی کردند و به مرور کاربردهای آن در مهندسی شیمی پرداختند (Dabir et al., 2001). مرور آماري پتانسیل‌ها و ضعف‌های موجود در آموزش مهندسی شیمی ایران و دلایل احتمالی بروز آنها، موضوع پژوهشی توسط اشرفی‌زاده در سال ۱۳۷۹ بود. در این پژوهش با الگوبرداری از شیوه‌های مدرن و با توجه به مقدرات بومی، پیشنهادهایی به منظور رفع مشکلات موجود ارائه گردید (Ashrafizadeh, 2001). بررسی وضعیت مهندسی شیمی در سطح جهانی و نقش آن در توسعه فناوری‌ها و همچنین ضرورت توسعه برنامه آموزشی مهندسی شیمی و تغییرات لازم برای پاسخگویی به تحولات علمی و صنعتی، به طور مبسوط توسط واشقانی‌فرهانی صورت پذیرفت (Vasheghani Farahani, 2001). طاهری و رحیمی، معایب برنامه آموزشی مهندسی شیمی در ایران را بررسی کردند و به معرفی نیازها و اولویت‌های موجود و ارائه راهکارهایی به منظور برطرف کردن معایب مذکور پرداختند (Taheri & Rahimi, 2001). اهمیت توجه به آموزش فناوری اطلاعات و نقش این آموزش‌ها در توسعه مهندسی شیمی در دوره گذار از "عصر صنعتی" به "عصر اطلاعات"، طی مطالعه‌ای توسط ستوده قره‌باغ مورد بحث و بررسی قرار گرفت (Sottu-deh, 2002). با توجه به ظرفیت‌ها و پتانسیل‌های صنایع شیمیایی معدنی در جذب دانش‌آموختگان مهندسی شیمی، اشرفی‌زاده طی پژوهشی، پیشنهاد تعریف گرایش صنایع شیمیایی معدنی و تربیت نیروهای مورد نیاز این بخش صنعتی را مطرح نمود (Ashrafizadeh, 2003) و طرح برنامه درسی پیشنهادی دوره کارشناسی رشته مهندسی شیمی در گرایش صنایع شیمیایی معدنی را پیشنهاد کرد (Ashrafizadeh, 2003). با عنایت به جنبه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی از یک طرف و وجود ذخایر گازی غنی در کشور از طرف دیگر، کاغذچی و همکاران طی پژوهشی ضمن بررسی دوره‌های آموزشی و پژوهشی رشته‌های نفت و گاز در دانشگاه‌های متعدد خارجی، پیشنهاد ارائه گرایش "مهندسی تبدیل گاز طبیعی" در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی شیمی را ارائه نمودند (Kaghazchi et al., 2003).

مطالعات مختلفی در زمینه نحوه تدریس، نحوه ارزیابی، سرفصل‌ها و محتوای دروس برنامه آموزشی مهندسی شیمی صورت پذیرفته است. (Farhadi et al., 2004) وجود اشتراکات متعدد بین محتوای دروس پایه مهندسی شیمی و دبیرستان را موجب بی‌میلی دانشجویان و افت تحصیلی آنان دانستند و پیشنهاد واگذاری اختیارات تعریف محتوای دروس پایه، با توجه به قابلیت‌ها، استعدادها و کیفیت دانشگاه‌ها را ارائه کردند (Farhadi et al., 2004). ضرورت آموزش و شیوه تدریس دروس "اقتصاد و طرح مهندسی" و "سینتیک و طراحی راکتورهای شیمیایی" به دانشجویان مهندسی شیمی در مقطع

کارشناسی و نحوه ارزیابی دانشجویان این دروس در سال ۱۳۸۳، به ترتیب توسط شایگان (Shaye-gan, 2004) و مقدس و حقیقی (Moghaddas & Haghghi, 2004) تشریح گردید. فرهادی لزوم تدریس "انتقال حرارت کاربردی" به منظور آموزش کاربردهای انتقال حرارت در صنعت را تشریح کرد و به معرفی سرفصل‌ها، نحوه تدریس و روش‌های ارزیابی دانشجویان پرداخت (Farhadi, 2004).

اهمیت درس "موازنه انرژی و مواد" و همچنین بهینه‌سازی روش‌های تدریس آن، موضوع پژوهشی توسط شایگان و پهلوان‌زاده بوده است (Shayegan & Pahlavanzadeh, 2004). "آشنایی با مهندسی شیمی" درس دیگری بود که اهمیت آموزش، روش تدریس و منابع موجود آن توسط شایگان و موسویان تشریح شد (Shayegan & Mosaviyan, 2004). فرهادی و تقدیسیان طی پژوهشی، استفاده از امکانات سمعی و بصری و همچنین بهره‌گیری از تشابه بین پدیده‌های انتقال را به منظور تسهیل در تدریس مفاهیم ناملموس انتقال جرم پیشنهاد کردند (Farhadi & Taghdisiyan, 2004). بزرگمهری و شاهرخی به بررسی ضرورت بازنگری در سرفصل‌های درس "کنترل فرایند" با هدف افزایش مقولات جدید و مورد نیاز صنعت، از جمله جنبه تقویت استفاده از رایانه در آن پرداختند (Bozorgmehri & Shahrokh, 2004). طاهری و رحیمی به بررسی معایب برنامه آموزش مهندسی شیمی در ایران و معرفی اولویت‌های اساسی این حوزه پرداختند. در این رابطه، ضمن نقد رویکردهای موجود، حذف گرایش‌ها در دوره کارشناسی برای افزایش فرصت‌های شغلی دانش‌آموختگان و کاهش ضریب درس شیمی در گزینش دانشجویان جهت جذب افراد مستعدتر، دو اولویت اساسی آموزش مهندسی شیمی کشور معرفی شدند (Taheri & Rahimi, 2004). ستوده قره‌باغ و ظریفی، ضمن بیان اهمیت و کاربرد شبیه‌سازی فرایندها در صنایع وابسته به مهندسی شیمی، بر ضرورت ایجاد درسی در ارتباط با "شبیه‌سازی فرایند به کمک رایانه" تأکید کردند (Sotudeh & Zarifi, 2005).

لزوم بازنگری در برنامه آموزشی مهندسی شیمی در دوره کارشناسی با تکیه بر تحولات علمی و نیازهای صنعت و با تأکید بر اعتبارسنجی گروه‌های آموزشی درگیر در تربیت مهندسان شیمی و تقسیم‌بندی تخصصی آنها بر اساس توانمندی‌های علمی و منطقه‌ای، حفظ چارچوب و اصول اساسی آموزش رشته مهندسی شیمی، کاربردی کردن دروس تخصصی، اصلاح روش و نگرش مربوط به ارائه دروس اختیاری، آموزش نرم‌افزارهای تخصصی کاربردی، افزایش کمی و کیفی دوره‌های کارآموزی، استفاده از متخصصان صنعت در آموزش و برگزاری دوره‌های بازآموزی و نوآموزی برای متخصصان صنعت از طرف مراکز آموزش مهندسان شیمی در دانشگاه، توسط رحیمی و آقامیری مورد بحث قرار گرفت (Rahimi & Aghamiri, 2006). اشرفی‌زاده و همکاران طی مقاله‌ای به معرفی زیست‌فناوری و نقش مهندسی شیمی در آن پرداختند و کاربردهای عوامل زیستی در توسعه فرایندهای شیمیایی را بررسی کردند و بدین وسیله، به منظور آشنایی مقدماتی داوطلبان تحصیل در گرایش زیست‌فناوری، یک جزوه راهنما ارائه نمودند (Ashrafizadeh et al., 2006). کاربرد مهندسی شیمی در طیف وسیعی از

صنایع و همچنین مسئولیت‌ها و موقعیت‌های متنوعی که دانش‌آموختگان این رشته بسته به گرایش تحصیلی ممکن است داشته باشند، آشنایی آنان با علم مدیریت را اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. در همین راستا، پردشتی و همکاران، به بیان اهمیت تدریس یک واحد درسی که تأمین‌کننده نیازهای مدیریتی برای دانش‌آموختگان مهندسی شیمی باشد، پرداختند (Pirdashti et al., 2010). معصومی گودرزی و همکاران به مقایسه برنامه آموزشی مهندسی شیمی در دانشگاه‌های معتبر دنیا با دانشگاه‌های ایران پرداختند و راهکارهایی، از جمله افزایش تعداد واحدهای آزمایشگاهی و کارگاهی، تدریس نرم‌افزارهای تخصصی، پررنگ‌تر کردن نقش واحد کارآموزی، هر چه بیشتر کردن ارتباط با صنعت و تدوین دروس جدید متناسب با نیازهای روز را به منظور بهبود برنامه آموزش مهندسی شیمی در ایران استنباط و ارائه کردند (Masoumi Godarzi et al., 2011). دانشفر و ارجمند به ریشه‌یابی علت ضعف دانشجویان مهندسی شیمی در درس موازنه انرژی و مواد که پیش‌نیاز دروس اصلی رشته مهندسی شیمی است، پرداختند و به عنوان راه حل، راهکارهایی از جمله استفاده از اساتید باتجربه، در نظر گرفتن یک واحد آزمایشگاهی برای این درس یا کاهش تعداد واحد آن را پیشنهاد کردند (Daneshfar & Arjomand, 2013). نانو-ریزیالش^۱، دانش و فناوری کنترل حجم‌های بسیار کوچک سیالات، در جنبه‌های مختلف مهندسی شیمی مانند جداسازی، سنتز نانوذرات، ریزرآکتورها و... تحولات چشمگیری ایجاد کرده است و پیش‌بینی می‌شود که آینده مهندسی شیمی تحت تأثیر توسعه آن، دچار انقلابی مشابه انقلاب صنعت رایانه پس از ظهور ریزتراشه‌ها گردد. در این راستا، گنجی‌زاده و اشرفی‌زاده، ضمن معرفی حوزه ریزیالش، کاربردهای آن در مهندسی شیمی و نحوه پرداختن به آن در دانشگاه‌های دنیا، پیشنهاد گنجاندن دروس مرتبط با این حوزه در دوره آموزش مهندسان شیمی را ارائه کردند (Ganjizadeh & Ashrafizadeh, 2017).

در سال‌های اخیر توسعه زیست‌شناسی به پیدایش حوزه‌های میان‌رشته‌ای مانند زیست‌فناوری^۲، مهندسی بافت^۳، مهندسی زیست‌مولکولی^۴ و... منجر شده است. با توجه به ارتباط تنگاتنگ این رشته‌ها با مهندسی شیمی، طی سال‌های اخیر بسیاری از دانشگاه‌های تراز اول دنیا (برخلاف دانشگاه‌های ایران) به انحاء مختلف، آموزش مهندسی شیمی را با مفاهیم علم زیست‌شناسی و کاربردهای آن آمیخته‌اند تا متخصصانی قادر به فعالیت در حوزه‌های فوق تربیت کنند. بر همین اساس، گنجی‌زاده و همکاران ضمن بیان اهمیت تغییر برنامه آموزشی مهندسی شیمی، گنجاندن دروس مرتبط با زیست‌شناسی، و تربیت دانش‌آموختگانی آشنا با حوزه‌های نوظهور فوق، رویکرد دانشگاه‌های مختلف در این زمینه را مورد بررسی و مقایسه قرار دادند (Ganjizadeh et al., 2017).

با توجه به گستردگی صنعت و همچنین فاصله موجود بین نیازهای صنایع و محتوای آموزشی

دانشگاه‌ها، خردمندی‌نیا و ستوده، طی پژوهشی، ضمن دسته‌بندی فرصت‌های شغلی موجود در بازار کار ایران برای مهندسان شیمی، زمینه‌های کار در شرکت‌های مهندسی مشاور و مهارت‌های مورد نیاز آنها در مراحل مختلف طراحی پروژه، پیشنهاد ارائه برخی آموزش‌های اولیه با هدف ایجاد شناخت در دانشجویان مهندسی شیمی از فرصت‌های شغلی، شکل‌گیری انتخاب آگاهانه زمینه شغلی و همچنین جهت‌دهی به مطالعات و کسب مهارت‌های جانبی را مطرح کردند (Kheradmandinia & Sotudeh, 2018).

علی‌رغم این که مهندسی شیمی نقشی اساسی در طراحی محصول شیمیایی یا مهندسی محصولات شیمیایی^۱، که در دهه‌های آغازین قرن بیست و یکم میلادی بسیار فراگیر شده است، ایفا می‌کند، آموزش طراحی محصولات شیمیایی و همچنین فرایندهای ناپیوسته و عموماً ناپایای تولید آنها در نظام آموزشی مهندسی شیمی ایران مغفول مانده است. رحیمی در سال ۱۳۹۸ ضمن پیشنهاد بهره‌گیری از الگوهای موجود برای آموزش مهندسی محصولات شیمیایی به دانشجویان مهندسی شیمی، به بررسی افق‌های آینده مهندسی شیمی در مهندسی محصولات شیمیایی پرداخته است (Rahimi, 2019).

به منظور بهبود کیفیت آموزش مهندسی شیمی در ایران، مقدس و همکاران طی پژوهشی به بررسی برنامه درسی رشته مهندسی شیمی و روش‌های رایج تدریس دروس آن در دانشگاه‌های برگزیده آمریکا و همچنین مقایسه برنامه‌ها و روش‌های مذکور با برنامه و روش‌های تدریس در دانشگاه‌های ایران پرداختند. از جمله راهکارهای پیشنهادی پژوهش مزبور، تغییر مداوم برنامه درسی، به روز نگه داشتن و هم‌راستا کردن آن با نیازهای صنعتی و موضوعات روز جهانی، توجه بیشتر به دروس آزمایشگاهی و گسترده‌تر کردن دید عملی دانشجویان بوده است (Moghaddas et al., 2019).

با توجه به ظهور فناوری‌های جدید که مجموعه داده‌های متنوعی را در علم مهندسی شیمی ایجاد می‌کنند، تربیت متخصصان آگاه به علم داده^۲ برای ذخیره‌سازی، تجزیه و تحلیل و مدیریت داده‌ها اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. لواسانی و همکاران طی پژوهشی، ضمن بیان ضرورت تدریس دروس مرتبط با علم داده و آموزش روش‌های ارزیابی داده‌های کلان به دانشجویان مهندسی شیمی، به مرور دروس مرتبط با علم داده در دانشگاه‌های برتر دنیا، سرفصل‌های مرتبط با آنها و نحوه ارائه آنها پرداختند (Lavasani et al., 2021). با توجه به اینکه برنامه درسی ترمودینامیک II قادر به پوشش کافی تعادلات فازی غیر از گاز-مایع نیست، پیشنهاد بازنگری در محتوا و سرفصل این درس، در راستای همگام‌سازی آن با نیازهای صنعتی و همچنین روند کلی این رشته در جهان، توسط زرگرزاده و پازوکی ارائه گردید. در این راستا، کتاب‌های مرجع و روش‌های رایج تدریس ترمودینامیک در دنیا مرور شده و برنامه پیشنهادی جدیدی برای بهبود طراحی درس و آموزش آن ارائه گردیده است (Zargarzadeh & Pazuki, 2023).

در جمع‌بندی مطالعات انجام شده طی بیست و پنج سال گذشته در خصوص کم و کیف آموزش مهندسی شیمی که در فصلنامه وزین آموزش مهندسی ایران منتشر شده است، ذکر این واقعیت ضروری است که علی‌رغم دغدغه دست‌اندرکاران و متخصصان این حوزه، به دلیل عدم استفاده مفید و به موقع کمیسیون‌های وزارت علوم در بررسی پیشنهادها و ابلاغ دستورالعمل‌های مربوط، شاهد تحول چشمگیری در روش‌ها و محتوای آموزش مهندسی شیمی طی دوره مذکور در کشور نبوده‌ایم. از طرفی طی دوره زمانی مورد اشاره، تلاش‌ها و پیگیری‌های در حد وسع انجمن مهندسی شیمی ایران در این خصوص، قابل ستایش و تقدیر است.

۳. تحولات و چشم‌اندازهای پیش رو در آموزش و پژوهش

در ادامه این پژوهش، تحولات و چشم‌اندازهای پیش رو مبتنی بر دو رویکرد آموزشی و پژوهشی در دو بخش مجزا، بررسی شده است. در بخش رویکردهای جدید در آموزش مهندسان شیمی، روش‌های گوناگون و جدید مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیشرفت فناوری و همچنین نیازهای دوران مدرن، همه رشته‌های تحصیلی، از جمله مهندسی شیمی، نیاز به تحقیق و توسعه پویا دارند چرا که نتایج چنین تحقیقاتی، موجب ارتقای کارایی فرایندها، حل مسائل پیچیده مهندسی شیمی و توسعه اقتصادی می‌شود. از این رو در ادامه، جبهه‌های تحقیق و جهت‌گیری‌های جدید پژوهشی در مهندسی شیمی بررسی شده‌اند.

۳-۱. رویکردهای جدید در آموزش مهندسان شیمی

دانشجویان در آموزش مهندسی نقش بسیار مهمی دارند. آموزش به دانشجویان کمک می‌کند تا مهارت‌های لازم برای انجام کارهای مهندسی را کسب کنند. با توجه به پیشرفت فناوری، آموزش به صورت الکترونیکی^۱ نیز مورد توجه قرار گرفته است. در آموزش الکترونیکی، از فناوری‌های رایانه‌ای برای ارائه محتوای آموزشی استفاده می‌شود. این روش آموزشی به دانشجویان این امکان را می‌دهد که به صورت برخط و در هر زمانی که بخواهند، به محتوای آموزشی دسترسی داشته باشند.

با توجه به تصویر موضوعی به دست آمده از نرم‌افزار وی‌اواس ویوور^۲ (شکل ۱)، می‌توان به ارتباط بین آموزش مهندسی، آموزش الکترونیکی و دانشجویان پی‌برد. مطالعات قابل توجهی در حوزه آموزش مهندسان شیمی، با مشارکت دادن بیشتر دانشجویان با هدف بهبود انتقال مطالب انجام شده است. شکل ۲ تراکم هر کدام از کلیدواژه‌ها را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود کلمات دانشجوی، آموزش از راه دور^۳، یادگیری تلفیقی^۴، یادگیری برخط و واقعیت مجازی^۵ بیشتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند.

1- E-learning

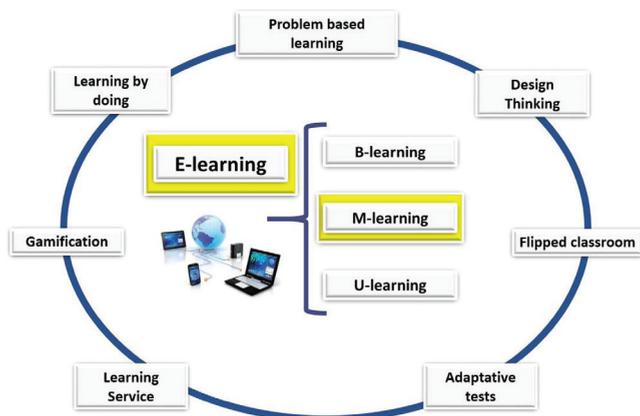
2- VOS viewer

3- Distance education

4- Blended learning (B-learning)

5- Virtual reality (VR)

یادگیری الکترونیکی در واقع، استفاده از دستگاه‌های الکترونیکی به عنوان وسیله و ابزار آموزش و یادگیری است. به عبارت دیگر، یادگیری الکترونیکی شامل یک سری روش‌شناسی^۱ مانند یادگیری تلفیقی، یادگیری فراگیر^۲ و یادگیری همراه^۳ است. یادگیری تلفیقی ترکیبی از یادگیری متداول^۴ و یادگیری مبتنی بر اینترنت^۵ است که مزایای اصلی هر دو روش را ارائه می‌دهد. یادگیری فراگیر شامل استفاده از رایانه‌ها و ابزارهایی، مانند ویدئوکنفرانس یا واقعیت افزوده^۶ است که برای هر موضوعی و در هر مکان و زمانی قابل استفاده است. یادگیری همراه از امکاناتی استفاده می‌کند که توسط دستگاه‌های همراه فراهم می‌شوند و به دانشجویان این امکان را می‌دهد که بدون این که در یک مکان ثابت باشند، یاد بگیرند. در واقع، یادگیری همراه در سال‌های اخیر توجه بیشتری را به خود جلب کرده است چرا که بیشتر مواقع با دسترسی به اینترنت، یک محیط یادگیری پویا را با پشتیبانی از دستگاه‌های فناوری کوچک و قابل حمل، از جمله تبلت یا تلفن‌های همراه، فراهم می‌کند. شکل ۳ یک طرح‌واره از روش‌هایی را که برای بیشترین دفعات استفاده شده‌اند، نشان می‌دهد که می‌تواند با یادگیری الکترونیکی و به طور خاص، یادگیری همراه ترکیب شود (Díaz-Sainz et al., 2021).



شکل ۳. روش‌هایی که می‌توانند در یادگیری الکترونیکی (E-learning) استفاده شوند (Díaz-Sainz et al., 2021)

۳-۱-۱. آموزش از راه دور

با گسترش بیماری کووید-۱۹ در مارس ۲۰۲۰، آموزش چهره به چهره^۷ تعطیل و آموزش از راه دور به یک روش آموزشی اجباری تبدیل شد. در مطالعه‌ای در دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه امارات متحده عربی^۸ در طول قرنطینه ناشی از ویروس کووید-۱۹ (از مارس ۲۰۲۰ تا دسامبر ۲۰۲۰)، به

1- Methodologies

4- Conventional

7- Face-to-face approach (F.T.F)

2- Ubiquitous learning (U-learning)

5- Internet based learning

8- Department of Chemical and Petroleum Engineering, United Arab Emirates University

3- Mobile learning (M-learning)

6- Augmented reality

بررسی عملکرد آموزش از راه دور بر وضعیت تحصیلی دانشجویان مهندسی شیمی پرداخته شد. این نظرسنجی بر روی ۶۵ دانشجوی سال سومی که در درس مهندسی و مقاومت مصالح^۱ ثبت نام کرده بودند، انجام شد. تمامی دانشجویان به پرسش نامه پاسخ دادند. همچنین، ۸۳ نفر از ۱۲۵ دانشجوی سال چهارم که در درس طراحی راکتور^۲ شرکت کرده بودند، در نظرسنجی شرکت کردند. نظرسنجی دوم به موارد مرتبط با پروژه فارغ التحصیلی (از جمله منابع علمی کتابخانه و مسائل علمی و...) پرداخت. پاسخ دانشجویان در آن دو درس به پرسش نامه مرتبط با محیط خانگی^۳، اکثراً با بازخورد مثبت همراه بود. به عبارتی، نزدیک به یا بیشتر از ۵۰٪ با انتخاب گزینه‌های موافق یا کاملاً موافق^۴ پاسخ داده بودند. چندین دانشجو با مشکلات فنی اینترنت روبه‌رو شده بودند. با این حال، بیشتر دانشجویان معتقد بودند که در حین دوره‌های آموزشی برخط، تمرکز کردن امر مشکلی است. در مورد ابزارهای ارزیابی برخط^۵، انتظارات دانشجویان بیشتر بر پاسخ‌هایی در دامنه خنثی تا موافق^۶ تمرکز داشت. پاسخ‌های دریافتی از هر دو درس تقریباً مشابه بودند. در مقایسه با حالت معیار روش آموزش چهره به چهره، دانشجویان سال آخر که در حال انجام پروژه فارغ التحصیلی به صورت برخط بودند، با مشکلاتی نظیر مکالمات علمی با مشاوران دانشگاهی و اعضای گروه در انجام وظایف هفتگی پروژه فارغ التحصیلی خود روبه‌رو شده بودند (Ghasem & Ghannam, 2021).

۳-۱-۲. آموزش مبتنی بر بازی^۷

نسل کنونی نوجوانان و جوانان، تلفن‌های هوشمند را به ابزاری مهم در زندگی جاری خود تبدیل کرده‌اند و از آن برای انجام امور مختلف، نظیر تبادل پیام، مشاهده فیلم، گوش دادن به موسیقی، جستجوی اطلاعات در اینترنت و انجام بازی استفاده می‌کنند.

مزایای استفاده از عناصر بازی در زمینه‌های آموزشی، از زمان افلاطون در یونان باستان در مراجع گزارش شده است. مطالعات اخیر، بازی‌ها را از جنبه‌های مختلف (رفتاری، انگیزشی یا شناختی) دارای مزایایی در آموزش می‌دانند. یک بازی زمانی می‌تواند به عنوان یک بازی سازمان یافته تعریف شود که دارای قوانین و اهداف مشخص باشد و با هدف ارائه سرگرمی طراحی شده باشد. اصطلاح "بازی‌سازی"^۸ توسط یک طراح بازی به نام نیک پلینگ^۹ در سال ۲۰۰۲ ابداع شد. بازی‌سازی بعداً در امر آموزش نیز اعمال شد و با وجود تعاریف متعدد، می‌توان از تعریف ارائه شده توسط دتردینگ^{۱۰} و همکارانش به عنوان مرجع استفاده کرد: "استفاده از عناصر بازی در زمینه‌های غیربازی"^{۱۱}، جایی که عناصر بازی

1- Engineering and strength of materials

4- Agree or strongly agree

7- Game-based learning

10- Deterding

2- Reactor design

5- Online assessment tools

8- Gamification

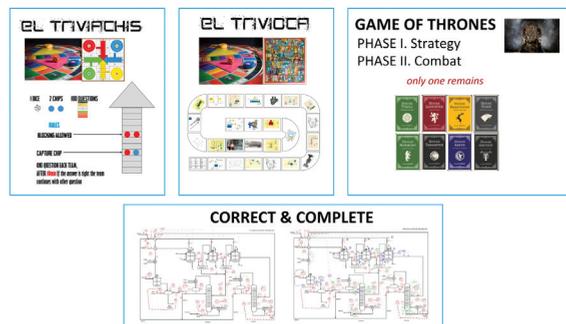
11- The use of game elements in non-game contexts

3- Household environment

6- Neutral to agree

9- Nick pelling

ممکن است شامل پاداش‌ها، نشان‌ها، سطح‌ها، امتیازها، رتبه‌ها، جدول‌های رده‌بندی یا گواهینامه‌ها باشند. درس کنترل فرایند^۱ در دوره چهارساله کارشناسی مهندسی شیمی، به منظور توسعه و درک راهبردهای کنترل تجهیزات مختلف موجود در صنایع فرایندی (تبادل‌کننده‌های حرارتی، رآکتورها، ستون‌های تقطیر، برج‌های جذب، کوره‌ها، پمپ‌ها و...) ارائه می‌شود. دانشجویان باید بدانند چگونه راهبرد کنترل کلیه بخش‌های یک فرایند را بر اساس نقشه جریان^۲ و توضیح کوتاه بسازند. این به معنای آن است که دانشجویان باید درک کاملی از نحوه عملیات قابل کنترل و پیامدهای تمام واحدها در یک فرایند داشته باشند. این ارتباطات و مفاهیم برای بسیاری از دانشجویان به سختی قابل درک هستند و لذا فقط استفاده از روش تدریس سنتی کافی نیست. عدم وجود بازخورد موجب می‌شود دانشجویان ضعیف‌تر نتوانند با روند کلاس همراه شوند و مدرس از میزان درک دانشجویان از مفاهیم مطلع نباشد. علاوه بر این، امروزه حفظ توجه، مشارکت و انگیزه دانشجویان دشوارتر شده است. همه این موارد باعث می‌شود که استفاده از روش‌های آموزشی نوآورانه (مانند کلاس‌های معکوس^۳، آموزش همتایان^۴ یا بازی‌های جدی^۵) بسیار مفید باشد. در این راستا، دیاز و همکاران اجرای بازی‌های جدی را در جلب توجه دانشجویان مفید و مثرم ثبت یافتند (شکل ۴) (Díaz et al., 2024).



شکل ۴. بازی‌های جدی در کنترل فرایند (Díaz et al., 2024)

در چند سال اخیر، روش آموزشی مبتنی بر استاد به روش آموزشی مبتنی بر دانشجو تغییر کرده است. آموزش مبتنی بر بازی یک روش آموزشی است که از بازی‌ها برای تسهیل و پشتیبانی از نتایج یادگیری استفاده می‌کند. بازی‌ها می‌توانند برای جذب دانشجویان، ایجاد انگیزه در آنها، افزایش درک آنها از مفاهیم و توسعه مهارت‌هایشان استفاده شوند. با این حال، علی‌رغم توسعه آموزش‌های مبتنی بر بازی، هنوز هیچ تعریف واحدی از این روش آموزشی وجود ندارد زیرا انواع مختلف بازی‌ها و

محیط‌های آموزشی می‌توانند ویژگی‌ها و اهداف متفاوتی داشته باشند (Whitton, 2012). داسیلوا جونیور و همکارانش (da Silva Júnior et al., 2021) در سال ۲۰۲۱ یک برنامه مبتنی بر بازی چندزبانه را برای گوشی‌های هوشمند با سامانه عامل اندروید^۲ و آی‌اواس^۳ معرفی کردند. این بازی با ارائه بیش از ۶۰۰ سؤال چندگزینه‌ای، به دانشجویان شیمی و مهندسی شیمی امکان داد تا واکنش‌های آلی را به صورت جذاب و سرگرم‌کننده مرور کنند. دانشجویان کارشناسی این بازی را آزمایش کردند و نتایج نشان داد که این بازی را به عنوان یک ابزار آموزشی تکمیلی دوست داشتند و بازی توانسته بود در یادگیری آنها مؤثر باشد. یک بازی مناسب باید دارای ویژگی‌هایی نظیر تعاملی بودن، در دسترس بودن برای دستگاه‌های اندروید و آی‌اواس، کاربرپسند بودن، سرگرم‌کننده بودن، چالشی بودن، رایگان و بدون تبلیغات بودن، چندزبانه بودن و مهم‌تر از همه آموزنده بودن نسبت به تصادفی برنده شدن و نیز ارائه بازخورد به عملکرد شخص باشد.

کاهوت یک برنامه بازی آموزشی است که با استفاده از گوشی هوشمند، یا تبلت یا رایانه، دانشجویان می‌توانند به سؤالات استاد خود پاسخ دهند. کاسترا و همکارانش (Caserta et al., 2021) نتایج استفاده از سامانه پاسخگویی دانشجوی مبتنی بر گوشی هوشمند را که به طور گسترده در کلاس‌های درس ترمودینامیک و با استفاده از برنامه آموزشی کاهوت انجام شده بود، منتشر کردند. کاهوت با ایجاد رقابت و همکاری در کلاس درس، یادگیری را جذاب و سرگرم‌کننده می‌کند. دانشجویان می‌توانند بازی‌های آماده را انتخاب کنند یا بازی‌های خود را بسازند.

در جدول ۱ سکوه‌های^۴ مختلف، از جمله کاهوت که با استفاده از آنها مطالعات موردی در زمینه آموزش مهندسی شیمی نیز انجام شده است، آورده شده‌اند. به طور خلاصه، یک بازی باید (حداقل) دارای ویژگی‌های زیر باشد (Díaz et al., 2024):

- **اهداف:** اهداف واضح، معنی‌دار، مرتبط و قابل دستیابی
- **بازخورد:** بازخورد فوری، مفید و روشن و تقویت‌کننده مثبت
- **بازی اجتماعی:** ایجاد ارتباط و تعامل اجتماعی، فراهم کردن وسایل برای همکاری و رقابت، برقراری امکان مقایسه عملکرد دانشجو با عملکرد سایر دانشجویان
- **محتوای تطبیقی و خلاقیت:** ایجاد تطبیق میان وظایف و پیچیدگی‌ها، فراهم کردن چالش‌ها، اجازه دادن به دانشجویان برای گسترش بازی یا ایجاد محتوای جدید
- **کاوش:** اجازه دادن برای انتخاب بین گزینه‌ها، فراهم کردن مسیرهای راهنمایی و اجازه دادن به دانشجویان برای کاوش آزاد

جدول ۱. سکوهای مختلف مورد استفاده در مطالعات موردی در رشته مهندسی شیمی (Diaz-Sainz et al., 2021)

هدف آموزشی	سکوی مورد استفاده	آدرس
Testing students	Kahoot	https://kahoot.com/
	Socrative	https://socrative.com/
	Mentimeter	https://www.mentimeter.com/
Improving the quality of classroom learning	Mindomo	https://www.mindomo.com/
	Genially	https://www.genial.ly/en
	Social networks	https://www.youtube.com/
		https://www.instagram.com/
		https://www.snapchat.com/l/es/ https://twitter.com/explore
Quizlet	https://quizlet.com/es	
Sharing contents	Padlet	https://padlet.com/
	Google Classroom	https://classroom.google.com/h
	Moodle	https://moodle.org/?lang=en
	Concept Warehouse	http://jimi.cbee.oregonstate.edu/concept_warehouse/

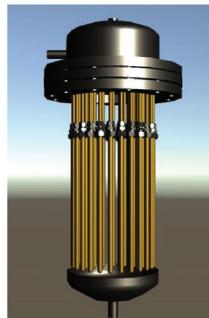
۳-۱-۳. واقعیت مجازی

با ظهور دیجیتال سازی^۱، آموزش در مهندسی شیمی طی دو دهه گذشته تغییرات قابل توجهی کرده است. با این حال، دانشجویان مقطع کارشناسی، گاهی فاقد تجربه صنعتی کافی هستند و قادر به تصویرسازی پیچیدگی‌های موجود در کارخانه‌های واقعی فرایندی نیستند. لذا، دانشجویان مزبور ممکن است بدون تجربه عملی فارغ‌التحصیل شوند. به همین دلیل، در صنایع فرایندی، شبیه‌سازهای آموزشی برای آموزش آنها به طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. با این حال، شبیه‌سازهای آموزشی سنتی، اغلب در شبیه‌سازی واقعیت‌های فرایندی ناتوان هستند و به کاربر امکان تجربه سناریوهای غیرمنتظره و خطرناک را نمی‌دهند. در این زمینه‌ها، واقعیت مجازی به عنوان یک فناوری، امیدبخش به نظر می‌رسد که می‌تواند به نیازهای هم‌زمان صنعت و دانشگاه پاسخ دهد.

فناوری واقعیت مجازی سه بعدی پیشرفته، مشابه با آنچه که در صنایع فیلم و بازی رایانه‌ای استفاده می‌شود، می‌تواند امکان ایجاد سریع محیط‌های مجازی برخط واقع‌گرایانه را به توسعه‌دهندگان آموزشی بدهد. این فناوری برای تولید یک محدوده از محیط‌های یادگیری مبتنی بر واقعیت مجازی برخط، در طیف گسترده‌ای از صنایع و حوزه‌های کاربردی آموزشی (مانند آموزش خلبانان) استفاده شده است. در زمینه آموزش مهندسی شیمی، انتظار می‌رود که استفاده از واقعیت مجازی به مزایای قابل توجهی، شامل موارد زیر منجر شود (Herink et al., 2022; Kumar et al., 2021; Schofield, 2012):

۱. کاربران (دانشجویان) می‌توانند بدون هیچ محدودیتی از نظر مکان و زمان، به رابط مجازی دسترسی داشته باشند. به علاوه، کاربران می‌توانند حرکت دوربین مجازی را در داخل محیط یادگیری تعاملی

- کنترل کنند و این، اجازه می‌دهد با سرعت مورد نظر خود یاد بگیرند، در حالی که در یک کارخانه واقعی چنین امکانی وجود ندارد.
۲. در صورت استفاده از تجهیزات مجازی فرایندی، امکان 'باز' کردن و مشاهده عملیات داخلی تجهیزات وجود دارد. این کار در حالت واقعی و در حین استفاده از یک تجهیز فیزیکی عملیاتی، به سختی میسر است. تجهیز واقعی اغلب عایق بندی و محصور می‌شود و به همین دلیل، فقط به عنوان یک تجهیز 'جعبه سیاه' قابل مشاهده است (شکل ۵).
۳. واقعیت مجازی به کاربران امکان می‌دهد که در محیطی امن، کنترل شده و بدون خطر یاد بگیرند. این شامل بازیابی و تجربه دستیابی به صحنه‌ها و شرایط خطرناک مختلف می‌شود، در حالی که در یک کارخانه شیمیایی واقعی ممکن است عملی نباشد (شکل ۶).
۴. کاربران فرایندی می‌توانند سناریوهای مختلف "چه می‌شود-اگر" را که نیاز به کار گروهی قوی و هماهنگی زیاد دارند، تجربه کنند. این کار با ایجاد شخصیت‌های مجازی، از کاربران یا دانشجویان



شکل ۵. دیدگاه دانشجویان نسبت به (چپ) راکتور غشایی واقعی و (راست) راکتور غشایی مجازی (Kumar et al., 2021)



شکل ۶. واقعیت مجازی، اطفاء حریق در یک پالایشگاه (Herink et al., 2022)

برای تجربه کار گروهی در زمان تعطیلی، اضطراری و اخلاف امکان‌پذیر است. فعالیت‌های مشابه چند نفره می‌توانند توانمندی‌های دانشجویان دانشکده را برای پذیرفتن موقعیت‌های صنعتی بعد از

فارغ التحصیلی تقویت نمایند.

۵. محتوای آموزشی با استفاده از مشارکت فعال دانشجویان، نه تنها به عنوان کاربران بلکه در برنامه ریزی و ایجاد محتوا، بهبود می یابد و به روز می شود. به عنوان مثال، توسعه یک کتابخانه از طراحی فرایندهای شیمیایی در محیط مجازی، شامل تلاش های موفق و ناموفق، برای دانشجویان و استادان مفید خواهد بود.

۶. محیط مجازی فرصت های عالی را برای استفاده از روش آموزش هم تاین فراهم می کند زیرا ایجاد واقعیت مجازی برای دانشجویان (برای مثال، یک طراحی فرایند شیمیایی) می تواند به طور کاملاً ناشناس انجام شود و توسط هم دانشجویان ارزیابی گردد.

۲-۳. جبهه های تحقیق و جهت گیری های جدید پژوهشی در مهندسی شیمی

جبهه های تحقیق در مهندسی شیمی اهمیت بسیاری دارند چرا که حوزه صنایع شیمیایی، به عنوان یکی از مهم ترین بخش های صنایع تولیدی در جهان شناخته می شود و در زمینه های مختلفی، از جمله آب و انرژی، سلامت، محیط زیست، پزشکی، غذایی، دارویی و بسیاری از صنایع دیگر مؤثر است. در مطالعه حاضر، موضوعات جدید و در حال گسترش که بیشتر مورد توجه محققان بین المللی قرار دارند، آورده شده اند. همچنین بر اساس جهت گیری های پژوهش های صورت گرفته و نتایج منتشر شده در انتشارات معتبر، کلیدواژه های قابل توجه تر انتخاب شده اند و در پایگاه شاخص های اساسی علم^۱ در بخش جبهه های تحقیق مورد جستجو قرار گرفته اند. بر این اساس و در مجموع پنج زمینه مختلف که در ادامه آورده شده اند، به عنوان جهت گیری های جدید و روبه رشد تحقیقاتی در این حوزه پیش بینی می شوند.

۱-۲-۳. مایسل های بسیاری پاسخگو به محرک^۲، تحویل دارو^۳، درمان سرطان^۴

سرطان، یکی از جدی ترین بیماری ها و علت اصلی مرگ در سراسر جهان است. شیمی درمانی همچنان یکی از راه های متداول درمان سرطان است. اگر چه تا کنون چندین نوع از حامل های نانوسپاری برای درمان سرطان مورد تأیید قرار گرفته اند اما جستجو برای سامانه های بهبود یافته و مواد جایگزین، همچنان ادامه دارد. مایسل های بسیاری پاسخگو به محرک، به عنوان یک سکوی نوظهور و جذاب برای انتقال داروهای کم حلال برای درمان سرطان، در پاسخ به محرک های خارجی (مانند تغییرات دما، نور، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی یا شدت اولتراسونیک) و داخلی (مانند تغییرات pH، غلظت) به کار می روند. در مقایسه با سامانه های سنتی انتقال دارو، مایسل های بسیاری دارای

1- Essential Science Indicators, ESI

3- Drug delivery

2- Stimuli-responsive polymeric micelles

4- Cancer therapy

ویژگی‌هایی نظیر اندازه کوچک، پایداری خوب، نفوذپذیری و دفع بهبودیافته^۱، حلالیت بهبودیافته داروهای کم حلال و سمیت کم داروها هستند. مایسل‌های بسیاری همچنین می‌توانند خطرات مرتبط با نورکافت^۲ و معضلات مرتبط با مسمومیت در حین استفاده از آفت‌کش‌ها را کاهش دهند (Dai et al., 2019; X. Xu et al., 2015; Yang et al., 2022; Zhang et al., 2023).

۲-۲-۳. فیلم‌های بسته‌بندی فعال ضد میکروبی^۳، فیلم‌های کامپوزیت آنتی‌اکسیدان ژلاتین/کرکمین^۴، بسته‌بندی فعال برای مواد غذایی^۵

ضایعات غذایی در حال حاضر یک مشکل مهم امنیت غذایی در سطح جهان است. در واقع، ضایعات غذایی در سال ۲۰۱۱ بیش از ۱/۳ میلیارد تن است و در سال ۲۰۱۹، ارزش اقتصادی بیش از ۹۹۰ میلیارد دلار داشته است. در نتیجه کاهش کیفیت، آلودگی میکروبی و آسیب بسته‌بندی، در طول زنجیره تأمین غذا، از تولید محصولات کشاورزی و دامداری تا حمل‌ونقل، فرآوری، ذخیره‌سازی، فروش و مصرف ضایعات مواد غذایی رخ می‌دهند. آلودگی به سموم یا ریزاندامگان‌های مسبب بیماری ممکن است مشکلات جدی ایمنی غذایی ایجاد کند. مطابق گزارش سازمان بهداشت جهانی، بیش از ۲۰۰ بیماری به علت آلودگی‌های غذایی ایجاد می‌شوند. بنابراین، توسعه روش‌های مؤثر برای بهبود کیفیت، پایداری و ایمنی غذا امری ضروری است. بسته‌بندی‌های غذایی به گونه‌ای طراحی می‌شوند تا از غذاها در برابر آسیب‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی محافظت کنند. مواد بسته‌بندی سنتی، تنها برای برآورده کردن نیازهای اساسی از جمله استحکام، انعطاف‌پذیری، دوام و حفاظت از غذا طراحی شده‌اند. اخیراً بسته‌بندی‌های هوشمند که قابلیت نظارت بر کیفیت، تازگی و ایمنی غذاها را دارند، بر اساس تغییرات در شرایط محیطی یا غذایی مانند نور، دما، رطوبت، اتمسفر، pH، مواد شیمیایی خاص و فعالیت آنزیمی توسعه یافته‌اند. حسگرهای درون بسته‌بندی‌های غذایی، امکان نمایش نشانگرهای کیفیت و ایمنی غذاها را بسته‌بندی‌شده در طول زنجیره تأمین را فراهم می‌کنند. سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند برای نظارت بصری بر تازگی غذاها، نقش کلیدی در زمینه کیفیت و ایمنی غذایی ایفا می‌کنند. افزودنی‌هایی مانند ضد میکروب‌ها، آنتی‌اکسیدان‌ها، مسدودکننده‌های نور و کنترل‌کننده‌های اتمسفر در بسته‌بندی‌های فعال می‌توانند به طولانی کردن عمر مفید غذاها کمک کنند. توسعه فیلم‌های بسته‌بندی سبز، ایمن و زیست‌تخریب‌پذیر به عنوان جایگزینی برای بسته‌بندی‌های پلاستیکی رایج اهمیت زیادی دارد. اخیراً انواع مختلفی از پلی‌ساکاریدها (مانند نشاسته، کیتوزان، سدیم آلزینات)، پروتئین‌ها و مواد چربی به عنوان مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند

1- Enhanced permeability and retention, EPR

3- Antimicrobial active packaging films

5- Active food packaging

2- Photolysis

4- Antioxidant Gelatin/Curcumin composite films

۶- ریزاندامگان برابر نهاده فرهنگستان برای واژه میکروارگانیسم است.

(Liu et al., 2024; Rojas et al., 2024; Xia et al., 2023; H. Xu et al., 2022; Zhao et al., 2023)

۳-۲-۳. منسوجات بر پایه نخ نانوالیاف الکتروریسی شده پیشرفته^۱، کاربردهای ترمیم زخم^۲ پوست بدن اولین و مهم‌ترین مانع در برابر تهدیدات خارجی است. اگر این محافظ آسیب ببیند، زندگی انسان آسیب‌پذیر خواهد شد. فرایند بهبود زخم، به عنوان یک سازوکار پویا، همواره به دلیل اهمیت سرعت التیام آن توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. پوشش‌های زخم به بهبود آن کمک می‌کنند. یک پوشش زخم ایده‌آل باید به عنوان یک حائل برای باکتری‌ها عمل کند. پوشش‌های سنتی زخم، از جمله اسفنج‌ها و بانداژها، با توجه به ظرفیت کم جذب آنها از نظر تورم، توانایی محدودی برای بهبود زخم‌ها دارند. زخم‌پوش‌های جدید، مانند نانوالیاف کامپوزیتی متشکل از ترکیب بسپار و دارو، با هدف رفع معایب زخم‌پوش‌های سنتی توسعه یافته‌اند و هم‌زمان با آزادسازی کنترل‌شده مواد دارویی در مناطق بافت‌های آسیب‌دیده و اجرای سامانه‌های مدرن، تحویل دارو را کنترل می‌کنند. الکتروریسی، روشی کارآمد برای تولید لیاف بسپاری است. در دو دهه اخیر، نانوالیاف الکتروریسی شده به طور گسترده در چندین کاربرد پزشکی استفاده شده‌اند (Habibi et al., 2023). با طراحی و کنترل فرایند، امکان تنظیم قطر، تخلخل، جهت‌گیری، پایداری، زیست‌تخریب‌پذیری و استحکام مکانیکی فراهم می‌شود تا نانوالیافی تولید شوند که تحرک سلولی را برای بازسازی بافت‌های آسیب‌دیده افزایش دهند. آنها همچنین برای کمک به درمان سرطان مورد استفاده گرفته‌اند. الکتروریسی به عنوان یک روش ریسندگی برای تولید لیاف با قطرهایی تا چند صد نانومتر شناخته می‌شود که حداقل ده برابر کوچک‌تر از لیاف ساخته شده به روش‌های سنتی الکتروریسی مذاب، خشک و تر هستند (Kanjwal & Ghaferi, 2022; Rezvani Ghomi et al., 2022; Wu et al., 2022).

۴-۲-۳. فناوری‌های تصفیه آب و پساب، نانومواد و یون‌های فلزی، فناوری‌های حذف، انرژی‌های سبز و تجدیدپذیر، تولید هیدروژن

یکی از چالش‌های حیاتی که جوامع انسانی با آن روبه‌روست، کمبود آب و فراهم کردن منابع آب مناسب برای اهداف مختلف، از جمله کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی و همچنین آب آشامیدنی است. تغییرات اقلیم و گرمایش جهانی و نیز افزایش جمعیت با تشدید بحران بی‌آبی، موجب رخدادهای اقتصادی، اجتماعی و سیاسی مختلف شده‌اند (Shabani et al., 2020).

انواع گسترده‌ای از آلاینده‌ها، از زباله‌های بزرگ‌اندازه تا مواد بسیار ریز (شامل ذرات فلزات سنگین، از جمله مس، جیوه، سرب، نیکل، کروم، کادمیوم و انواع مختلف رنگ‌ها و پسماندهای دارویی) وارد

رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، آب‌های زیرزمینی و در نهایت دریاها و اقیانوس‌ها می‌شوند. اگر این روند ادامه یابد، حذف آلودگی آب بسیار دشوار خواهد بود. روش‌هایی مانند جذب، تصفیه طبیعی، ترسیب، واکنش‌های الکتروشیمیایی و فیلتراسیون لایه‌ای، برای حذف آلاینده‌ها از آب‌های آلوده استفاده شده‌اند اما هرکدام، مزایا و معایب خود را دارند (Bimiwa et al., 2024).

فناوری‌های نوظهور، نوعی از پیشرفت‌های فناورانه در حوزه تصفیه آب و پساب هستند که به طور گسترده مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. فرایندهای سنتی تصفیه مشکلات زیادی دارند که از جمله آنها می‌توان به عدم توانایی در مقابله با آلاینده‌های نوظهور در فاضلاب، به دلیل رشد سریع صنایع اشاره کرد. روش‌های اکسایش پیشرفته^۱ مجموعه‌ای از روش‌های اکسایش نوین برای پالایش فاضلاب‌ها هستند که در سال‌های اخیر، به عنوان فرایندهای نسل جدید مورد توجه قرار گرفته‌اند. فناوری سلول‌های الکترولیز میکربی^۲ یک فناوری نوین است که می‌تواند جایگزین روش‌های سنتی، مانند روش‌های معمول تصفیه هوازی و غیرهوازی فاضلاب شود. مهم‌ترین ویژگی سلول‌های الکترولیز میکروبی این است که این سلول‌ها تبدیل محتوای آلی موجود در فاضلاب را به گاز هیدروژن ممکن می‌سازند (Sangamneri et al., 2023).

فناوری‌های جداسازی غشایی^۳ به عنوان روش‌هایی مؤثر برای تولید آب با کیفیت بالا شناخته می‌شوند. اسمز معکوس^۴، نانوفیلتراسیون^۵، اولترافیلتراسیون^۶ و میکروفیلتراسیون^۷ به عنوان فرایندهای غشایی با گرادیان فشاری، اسمز مستقیم فشاری^۸ و اسمز مستقیم^۹ به عنوان فرایندهای غشایی با اختلاف فشار اسمزی (غلظت)، تقطیر غشایی^{۱۰} به عنوان فرایندهای غشایی با گرادیان دمایی، الکترودیالیز^{۱۱} به عنوان فرایندهای غشایی با اختلاف پتانسیل الکتریکی، دیالیز^{۱۲}، غشای مایع^{۱۳} و غشاهای مولکول نگاری شده^{۱۴} به عنوان فرایندهای غشایی با گرادیان غلظت برای تصفیه آب و پساب استفاده می‌شوند (Shabani et al., 2020; Zarghami et al., 2022).

تغلیظ انجمادی^{۱۵} یک فناوری نوظهور بازیافت آب در صنعت است. این روش نسبت به روش‌های سنتی تبخیر مزایایی دارد و با انرژی کمتری کار می‌کند زیرا آنتالپی ترمودینامیکی انجماد، هفت برابر کمتر از آنتالپی تبخیر آب خالص است. در این فرایند، آب موجود در محلول، منجمد و به صورت یخ متبلور می‌شود تا محلول غلیظ‌تری در حجم کمتری باقی بماند. در نتیجه انرژی کمتری برای سوزاندن فاضلاب غلیظ‌تر مورد نیاز است. اسمز مستقیم و تغلیظ انجمادی یک فرایند نمک‌زدایی ترکیبی نویدبخش است که قادر به تولید آب پاک از آب‌های آلوده معادن و پساب‌های صنایع فراوری مواد

1- Advanced oxidation process technologies, AOP

3- Membrane process technologies

6- Ultrafiltration

9- Forward osmosis

12- Dialysis

15- Freeze concentration

4- Reverse osmosis

7- Microfiltration

10- Membrane distillation

13- Liquid membrane

2- Microbial electrolysis cell technology (MEC)

5- Nanofiltration

8- Pressure retarded osmosis

11- Electrodialysis

14- Molecularly imprinted membrane

معدنی و فلزات، به ویژه در مناطق سردسیری است و می‌تواند حجم پساب‌های صنعتی را کاهش دهد (Kolliopoulos et al., 2022; Sangamnere et al., 2023; C. Xu et al., 2022).

فناوری‌های انرژی‌های پاک و پایدار در حال گسترش و تجاری‌سازی هستند تا اثرات گرم شدن زمین در طول قرن گذشته را کاهش دهند. استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، به عنوان یک راه حل پایدار برای جبران آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، توجه فراوانی را به خود جلب کرده است. در چند دهه گذشته، تولید پایدار هیدروژن مورد توجه محققان بوده است. به همین دلیل، فناوری‌های جدید با کارایی بالا برای تولید هیدروژن از منابع مختلف گسترش یافته‌اند. هیدروژن یک گزینه اثبات‌شده به منظور کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تحقق اهداف توسعه پایدار سازمان ملل است (Asif et al., 2023; Hassan et al., 2023).

هیدروژن از منابع مختلف انرژی، مانند منابع فسیلی یا تجدیدپذیر تولید می‌شود. در مقیاس تجاری، هیدروژن عمدتاً با روش اصلاح بخار^۱ تولید می‌شود که منجر به انتشار دی‌اکسیدکربن نیز می‌شود. اخیراً، محققان و دولت‌های کشورهای توسعه‌یافته تلاش بیشتری برای توسعه منابع تجدیدپذیر سازگار با محیط‌زیست برای تولید هیدروژن انجام داده‌اند. این کوشش در بهره‌گیری بیشتر از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر، منجر به طراحی سامانه‌های تولید سوخت کارآمد بیشتری شده است. راه‌های تولید هیدروژن تجدیدپذیر از طریق شکافت آب^۲ (شامل الکترولیز^۳، نورکافت^۴، گرماکافت^۵)، تبدیل ترموشیمیایی زیست‌توده^۶ (آذرکافت زیست‌توده^۷ و گازی‌سازی زیست‌توده^۸) و تبدیل زیستی^۹ (شامل نورکافت زیستی^{۱۰} و تخمیر^{۱۱}) توسعه یافته‌اند (Sarmah et al., 2023; Wang et al., 2024).

۳-۲-۵. کاربردهای یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در مهندسی شیمی^{۱۲}

در سال‌های گذشته، استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای مهندسان شیمی بسیار ارزشمند بوده است تا بتوانند فرایندهای شیمیایی را درک و طراحی کنند. اکتا لونسپیل^{۱۳} حتی اظهار داشت که به‌کارگیری مدل‌سازی، به عنوان پیشرفت مقدماتی در مهندسی شیمی ضروری است. مهندسان شیمی روزانه برای تحقیق، تصمیم‌گیری و طراحی، اغلب ضمن کاهش هزینه‌ها و ایمنی قابل توجهی، به مدل‌ها اعتماد می‌کنند. تلاش‌های چند دهه اخیر، برای ترکیب هوش مصنوعی و مهندسی شیمی برای مدل‌سازی، نتوانسته است انتظارات را برآورده کند. در پنج سال گذشته، افزایش قابل ملاحظه داده‌ها و منابع محاسباتی منجر به تجدید حیات در تحقیقات مبتنی بر یادگیری ماشین شده است. یادگیری

1- Steam reforming

2- Water splitting

3- Electrolysis

4- Photolysis

5- Thermolysis

6- Thermochemical conversion of biomass

7- Biomass pyrolysis

8- Biomass gasification

9- Biological conversion

10- Biophotolysis

11- Fermentation

12- Applications of machine learning and artificial intelligence in chemical engineering

13- Octave Levenspiel

ماشین مزایای قابل توجهی، مانند انعطاف پذیری و دقت و سرعت اجرا نسبت به فنون مدل سازی سنتی دارد. امروزه بزرگترین تهدید در تحقیقات هوش مصنوعی، استفاده نادرست از آن است زیرا بیشتر مهندسان شیمی، آموزش محدودی در علوم رایانه و تحلیل داده دارند. با این حال بدون شک، در آینده نزدیک یادگیری ماشین بخش قابل اطمینانی در جعبه ابزار مدل سازی مهندسان شیمی خواهد شد (Dobbelaere et al., 2021).

امروزه هوش مصنوعی به محور تحقیقات تبدیل شده است و به بسیاری از حوزه های تحقیقاتی، مانند خودروهای بدون راننده، پردازش زبان طبیعی، رباتیک هوشمند، تشخیص چهره و تشخیص بیماری ها انرژی تازه ای بخشیده است. روش های هوشمند به همراه علوم رایانه ای توسعه یافته در سال های اخیر به روزرسانی شده اند و فرصت های نوآوری در زمینه تصفیه آب را ایجاد کرده اند. برای مثال، روش های هوش مصنوعی قادر هستند پارامترهای آماده سازی مواد (غشا) و فرایند (ساخت غشا) را در تصفیه آب آشامیدنی بهینه سازی کنند تا هزینه های تولید آب را کاهش دهند. در نهایت، با توجه به ویژگی های یادگیری خودکار و خودتشخیصی هوش مصنوعی، امکان ایجاد سازوکارهایی برای دریافت بازخورد کامل و یک سامانه کنترل خودکار بادقت بالا بر مبنای فناوری های هوش مصنوعی وجود دارد (Li et al., 2021).

امروزه به کارگیری طراحی آزمایش^۱، استخراج حداکثر اطلاعات با حداقل تلاش را ممکن ساخته است. این امر موجب شده است که زمان و منابع، به طور بهینه صرف شوند. با یکپارچه سازی دو فرایند یادگیری ماشین و طراحی آزمایش، یک طراحی آزمایش انعطاف پذیرتر و کارآمدتر به دست می آید. این مفهوم، به نام یادگیری ماشین فعال^۲، انتخاب مؤثرتر شرایط آزمایشی را ممکن می سازد (Ureel et al., 2023). پیشرفت هایی که تاکنون در یادگیری ماشین حاصل شده است، راهکارهای جدیدی را برای حل مشکلات چالش برانگیز مهندسی واکنش، از جمله طراحی کاتالیست، شناسایی سازوکار و پیش بینی شرایط و محصولات واکنش، فراهم کرده است. امروزه مشخص شده است که فناوری یادگیری ماشین بسیار مفید است و می تواند از تجربه گذشته بیاموزد و الگوهای پیچیده را از داده های موجود به دست آورد. فناوری مزبور قادر است برای جایگزینی برخی از آزمایش ها یا محاسبات زمان بر و کارآمد مورد استفاده قرار گیرد (Gao, 2024).

۴. آینده و چشم انداز مهندسی شیمی در ایران و جهان

با گذشت بیش از یک قرن از پیدایش رشته مهندسی شیمی در دانشگاه های جهان، تحولات بسیاری در این رشته مهندسی صورت گرفته است. این تحولات بر حسب نیاز روز جامعه و به تدریج انجام

شده است. می‌توان گفت که مهندسی شیمی، ابتدا بر اساس فرایندهایی نظیر نفت و گاز و پتروشیمی، صنایع لاستیک و پلاستیک، رنگ و رزین، سیمان و شیشه و صنایع غذایی شکل گرفت و تکامل یافت و سپس در حوزه‌هایی نظیر زیست‌فناوری، تولید پایدار با ملاحظات زیست‌محیطی، اقتصاد چرخشی، کربن‌زدایی در چرخه تولید، تأمین و امنیت انرژی، انرژی‌های نو، آب، غذا، پزشکی، دارویی و بهداشت، نانو فناوری، تحول دیجیتال، داده‌کاوی و هوش مصنوعی و غیره تکوین پیدا کرد. در ادامه توضیح بیشتری در خصوص این حوزه‌های نو ارائه خواهد شد.

همچنین نشان داده شد که زمینه دانش و فن مهندسی شیمی بسیار گسترده است و بسیاری از جنبه‌های علمی و فنی را در برمی‌گیرد. در این بررسی مروری نشان داده شده است که طی چند دهه اخیر، زمینه‌های جدیدی در حوزه مهندسی شیمی پدید آمده‌اند که در چشم‌انداز آینده هم ادامه خواهند داشت. زمینه‌های بسیاری نیز به صورت بین‌رشته‌ای و فرارشته‌ای شکل گرفته‌اند که به برخی از آنها در ادامه اشاره می‌شود.

۴-۱. جهت‌گیری‌های نو در حوزه مهندسی شیمی

اخیراً مطالعه گسترده‌ای توسط کارگروه مهندسی شیمی آکادمی علوم آمریکا، تحت عنوان: "جهت‌گیری‌های نو در مهندسی شیمی" درباره جهت‌گیری‌های آینده مهندسی شیمی طی ده تا سی سال آینده انجام شده است که فعالیت آن در فوریه ۲۰۲۰ میلادی آغاز شد و در سال ۲۰۲۲ در ۳۶۸ صفحه منتشر گردید و در اختیار عموم قرار گرفت. گزارش مزبور به دنبال گزارش قبلی آن کارگروه، تحت عنوان "آینده مهندسی شیمی چیست؟" که در دهه ۱۹۸۰ تهیه شده بود، منتشر شده است. با وجودی که تمرکز گزارش بر وضعیت مهندسی شیمی در ایالات متحده آمریکا است، ولی جهت‌گیری این رشته در سطح جهان نیز مد نظر قرار گرفته است، چرا که به علت سرعت انتقال اطلاعات و فناوری‌ها در سطح جهان، جهانی شدن اقتصاد و تولید، محدود بودن منابع طبیعی، تأمین آب، انرژی و غذا، مشکلات محیط زیستی جهانی و منطقه‌ای و غیره، نتایج و دیدگاه‌های گزارش مذکور را کم و بیش می‌توان در سطح جهان از جمله ایران تعمیم داد. مطالعه اصل گزارش مزبور به جامعه مهندسان شیمی کشور توصیه می‌گردد. لیکن به دلیل محدودیت حجم و تعداد صفحات در مقاله مروری حاضر، ترجمه خلاصه گزارش مذکور عیناً به شرح زیر آورده شده است.

لزوم بازنگری عمده در حرفه مهندسی شیمی در قرن بیست‌ویکم، ابتدا در سال ۲۰۱۶ در جلسه و میزگرد انجمن مهندسی شیمی آمریکا^۱ مورد تأکید قرار گرفته بود. بعدها قرار شد که گزارش اخیر،

1- New directions for chemical engineering (2022); available at: <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26342/new-directions-for-chemical-engineering>

2- American institute of chemical engineers (AIChE)

به دنبال گزارش انجمن مذکور در دهه ۱۹۸۰ در مورد آینده مهندسی شیمی که به گزارش اموندسون^۱ معروف شد، تهیه گردد. در تهیه این گزارش علاوه بر استادان دانشگاه‌ها و پژوهشگران با تخصص‌های گوناگون، کارشناسان باتجربه و زبده صنعت هم همکاری کرده‌اند و از طریق یک پرسش‌نامه، از آنان نظرسنجی شده است. نظرسنجی مزبور که قرار بود از طریق برگزاری کارگاه آموزشی و جلسات مشورتی انجام شود ولی به دلیل شیوع بیماری کووید میسر نشد، شامل هم چالش‌ها و فرصت‌های آینده مهندسی شیمی و هم آموزش و کارآموزی در مهندسی شیمی بود. نظر به این که مهندسی شیمی تنها رشته مهندسی است که در فرایندهای آن، ساختار مولکولی یا زیستی مواد تغییر می‌کند و در مواردی نیز موجب آثار زیان‌بار بر محیط زیست می‌شوند (مثل پلاستیک‌ها، مواد زیستی و گازهای گلخانه‌ای، و...)، آینده‌نگری همواره باید توأم با نگاه بر پیشینه این فرایندها صورت پذیرد.

بیان مسئله:

هدف از اقدام آکادمی علوم آمریکا، تهیه گزارشی بود که وضعیت موجود، چالش‌ها و فرصت‌های امیدبخش را برای مهندسی شیمی بیان کند. به ویژه در نظر بود که گزارش مزبور اهداف زیر را مشخص نماید:

- توصیف پیشرفت‌ها و تغییرات عمده در مهندسی شیمی در سه دهه گذشته، که شامل اهمیت و تأثیرگذاری (یا سهم) این رشته در جامعه، پیشرفت‌ها و دستاوردهای عمده آن، تغییرات اصلی در تحقیق و توسعه^۲ و نیز عوامل اقتصادی و اجتماعی که بر این رشته تأثیرگذار بوده‌اند
- بررسی آینده مهندسی شیمی در ده تا سی سال آتی و پیشنهاد و رهنمود به جامعه مهندسی شیمی در موارد زیر:

- مشخص کردن چالش‌ها و فرصت‌هایی که مهندسی شیمی اکنون با آنها روبه‌روست یا در ۱۰ تا ۳۰ سال آینده روبه‌رو خواهد شد، شامل تأثیر مهندسی شیمی بر فناوری‌های در حال ظهور، نیازهای ملی و نیز فراتر از آن، جامعه علمی و مهندسی
- شناسایی مجموعه‌ای از زمینه‌های موجود و جدید مهندسی شیمی که دارای فرصت‌های امیدبخش هوشمندانه و سرمایه‌گذاری هستند، جهت‌گیری‌های جدید در آینده و نیز زمینه‌های علمی که در آنها کمبود وجود دارد
- شناسایی جنبه‌هایی از آموزش کارشناسی و تحصیلات تکمیلی مهندسی شیمی نیازمند تغییر، به منظور آماده کردن دانشجویان و شاغلان این رشته در دورنمای آینده حرفه مهندسی شیمی
- در نظر گرفتن روندهای جدید این رشته در ایالات متحده، در مقایسه با پژوهش‌های مشابه که در سطح بین‌المللی در حال انجام است و ارائه پیشنهادهایی برای ارتقای این همکاری‌ها، به منظور

توسعه پژوهش و آموزش در برخی از زیررشته‌های مهندسی شیمی که مشخص خواهند شد.

مخاطبین و کاربران این گزارش، جامعه درگیر با حرفه مهندسی شیمی، شامل پژوهشگران در دانشگاه‌ها و در صنعت، استادان و دانشجویان و نیز تصمیم‌گیران در دولت فدرال و ایالت‌ها هستند. پیش‌بینی می‌شود که این گزارش، توسط مخاطبین زیر مورد استفاده قرار گیرد:

- دانشجویان و استادان، برای جهت‌گیری‌های پژوهشی و طراحی برنامه‌های درسی
- کارشناسان و مهندسان صنعتی، برای ایجاد برنامه‌های تحقیق و توسعه
- دانشگاه‌ها و کالج‌ها، برای بهبود و اصلاح برنامه‌های درسی و تنوع‌بخشی به جمعیت دانشجویان خود
- مسئولان برنامه‌ریزی در دولت و سازمان‌های حامی پژوهش، برای طراحی و تنظیم برنامه‌های خود

فصول مختلف گزارش اخیر برای مخاطبین فوق‌الذکر طراحی شده‌اند که جزئیات آن در اصل گزارش آمده است. شایان ذکر است که گزارش حول محورها و چالش‌هایی که جامعه بشریت با آنها روبه‌رو است، انرژی و دوران گذر از آن، آب، هوا، غذا، بهداشت و مراقبت‌های پزشکی، تولید و اقتصاد چرخشی، مواد و منابع طبیعی، تهیه شده است.

گزارش مزبور در ده فصل به شرح فهرست زیر، حول محورهای ذکرشده در بالا نگاشته شده است و حاوی اطلاعات باارزشی است که مطالعه آن به مخاطبین این مقاله توصیه می‌شود.

خلاصه گزارش

فصل اول: مقدمه

فصل دوم: مهندسی شیمی امروز

فصل سوم: کربن‌زدایی از سامانه‌های انرژی

فصل چهارم: راه‌حل‌های پایدار مهندسی برای سامانه‌های محیط زیستی

فصل پنجم: مهندسی پزشکی هدفمند و قابل دسترسی

فصل ششم: تولید انعطاف‌پذیر و اقتصاد چرخه‌ای^۱

فصل هفتم: مواد جدید و اصلاح‌شده برای قرن بیست‌ویکم

فصل هشتم: ابزار توانمندسازی آینده مهندسی شیمی

فصل نهم: آموزش و پرورش نسل بعدی مهندسان شیمی

فصل دهم: رهبری بین‌المللی مهندسی شیمی

۱- منظور از اقتصاد چرخه‌ای، مدلی برای تولید و مصرف است که شامل مشارکت، اجاره، استفاده دوباره، تعمیر دستگاه‌ها، بازسازی و حداکثر بازگردانی مواد و محصولات است. به این ترتیب چرخه عمر محصولات افزایش می‌یابد. در عمل، این به معنی به حداقل رساندن ضایعات و مصرف انرژی، آب و منابع طبیعی است.

۴-۲. خلاصه گزارش

مهندسی شیمی، مهندسی سامانه‌هایی در مقیاس‌های مولکولی تا بسیار بزرگ یا ماکروسکوپی است که اجزای شیمیایی، فیزیکی و زیستی را برای طراحی فرایندها و تولید مواد و محصولات، به منظور رفاه و بهره‌برداری جامعه با هم ترکیب^۲ می‌کند. نظر به این که تبدیل‌های شیمیایی در قلب فناوری‌هایی هستند که جامعه مدرن را توانمند می‌کنند، لذا کار مهندسان شیمی بر زندگی جوامع در سراسر جهان تأثیرگذار بوده است. به عنوان مثال، بدون کودهای شیمیایی که با فرایندهای شیمیایی تولید می‌شوند، وقوع انقلاب سبز برای تغذیه جهان امکان‌پذیر نمی‌شد. بدون اختراع کاتالیست زیگلر-ناتا، پلی‌الفین‌ها وجود نداشتند و منافع بی‌شمار پلاستیک‌ها واقعیت پیدا نمی‌کرد. در صورتی که بسیاری سخت و پایدار، مثل تفلون و کولار کشف نشده بودند، وسایل پزشکی و تجاری که از این بسپارها ساخته می‌شوند، وجود نداشتند. بدون مشارکت تعداد زیادی از مهندسان شیمی، تراشه‌های سیلیکونی، مواد شیشه‌ای و پلاستیکی که در ساخت ادوات الکترونیکی به کار می‌روند هم وجود نداشتند و بالاخره، بدون انبوهی از مهندسان شیمی، نفت و گازی برای تأمین توان و انرژی جهان یا مواد مورد نیاز پزشکی و واکسن‌ها برای تأمین یک زندگی طولانی و سالم وجود نداشتند. بالاخره، اخیراً مهندسان شیمی در اصلاح عملکرد پروتئین‌ها، مسیرهای متابولیکی و انبوهی از ژن‌ها^۳ نیز نقش مؤثر داشته‌اند.

از طرفی، جنبه‌های زیان‌بار پیشرفت فناوری نیز شامل کشفیات مهندسان شیمی شده است. تولید مواد شیمیایی که در محیط زیست به صورت نامحدود ماندگارند، انتشار گازهای گلخانه‌ای که موجب تغییر اقلیم می‌شوند، تولید مواد پلاستیکی که در محل دفن زباله و اقیانوس‌ها انباشته می‌شوند و سلاح‌های شیمیایی که آثار زیان‌بار درازمدت بر سلامتی انسان و محیط زیست دارند، از این موارد قلمداد شده‌اند.

لذا امروزه رشته مهندسی شیمی با فرصت‌ها و چالش‌هایی روبه‌رو است که نه تنها به نوآوری آینده، بلکه همچنین نوآوری در درمان و جبران عواقب ناخواسته سوء گذشته، راهکار ارائه نماید. مهندسی شیمی رشته و حرفه‌ای است که ریشه آن در شیمی صنعتی و کاربردی است که به نوبه خود از فرایندهای قدیمی، مثل تخمیر و دباغی چرم نشئت گرفته است. سابقه دانشگاهی آن به اواخر سال ۱۸۸۰ بر می‌گردد، هنگامی که ماشین‌های بخار، برای جهان تأمین انرژی می‌کردند و موتورهای درون‌سوز (احتراق داخلی)، ایده‌ای نو بودند. البته از آن زمان به بعد جهان تغییر کرده است و همان‌گونه که فناوری‌های جدید روش‌ها و سازمان‌ها را تحت تأثیر قرار داده‌اند، این تغییر همچنان با سرعت زیاد ادامه دارد. در عین حال، هسته مرکزی مهندسی شیمی طی چند دهه گذشته، با وجودی که چالش‌های مهندسی گسترش یافته و عمیق‌تر شده‌اند، با سرعت کمتری تغییر کرده است. اساساً، مهندسی باید به حل

مشکلات بپردازد و طبیعی است که انتظار داشته باشیم وقتی یک مسئله حل می‌شود، مسائل دیگری پیش می‌آیند و به تدریج پراهمیت‌تر می‌شوند. چالش‌هایی که امروزه با آنها روبه‌رو هستیم، نه تنها تغییر اقلیم و دوران گذر انرژی است، بلکه کاهش مصرف مواد خام و افزایش بازگشت مواد برای انتقال از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخه‌ای، تولید و توزیع غذا برای کل جهان همراه با کاهش مصرف آب و سایر منابع، و ایجاد و افزایش مقیاس مواد پزشکی و درمان، است. در تمام این کاربردها، مهندسان شیمی با تفکر سازمان‌یافته، فرصت‌های بررسی مهم‌ترین مسائل روز را با همکاری چندین رشته دیگر به عهده دارند. برای استفاده از این فرصت‌ها، چه در حال حاضر و چه در دهه‌های آتی، مهندسی شیمی نیاز به بازتعریف و پیگیری مسیرهای نو دارد. با این هدف، گزارش حاضر جزئیات آینده آموزش، پژوهش و نوآوری را در مهندسی شیمی ارائه می‌کند. همچنین، ضمن بررسی وضعیت فعلی آموزش مهندسی شیمی، در مورد ابزار و فناوری‌های مورد نیاز برای توانمندسازی مهندسان شیمی در راستای پیشرفت در این زمینه‌ها بحث می‌شود.

۴-۳. کربن‌زدایی از سامانه‌های انرژی

اقدامات کاهش انتشار کربن برای جلوگیری از تغییر اقلیم، اگر سخت‌ترین مسئله‌ای نباشند که بشریت و کره زمین با آن روبه‌روست، یکی از بزرگ‌ترین دشواری‌ها هستند. پرداختن به این مشکل، نیازمند کربن‌زدایی از سامانه‌های موجود تولید انرژی است، چالشی که به علت پیچیدگی و بزرگی دورنمای انرژی و در نتیجه عدم توان فقط یک حامل انرژی برای تأمین تقاضا در بخش‌های مختلف در آینده‌ای نزدیک، مشکل‌تر به نظر می‌رسد. حوزه مهندسی شیمی به ایفای نقش خود در افزایش مقیاس، ارائه، جمع‌آوری سامانه‌ها و نیز بهینه‌سازی آمیزه‌ای از حامل‌های انرژی که پاسخگوی تقاضای انرژی در مناطق مختلف و بخش‌های مختلف جامعه به همراه انتشار کمتر کربن و هزینه کمتر باشند، ادامه می‌دهد. مهندسان شیمی پیشرفت‌های فناورانه را در هر نقطه از زنجیره ارزش انرژی^۱، از منبع تا مصارف پایین دستی، توانمند خواهند ساخت و تفکر سازمان‌یافته لازم برای برقراری توازن بین توسعه اقتصادی و آسیب‌های محیط زیستی را برای دوران گذر به سامانه انرژی کم‌کربن ایجاد می‌کنند.

برای مثال، افزایش ورود ماشین‌های برقی به عنوان وسیله نقلیه شخصی، نیازمند تصویری نو از پالایشگاه‌های نفت است که برای تولید محصولات اصلی بنزین و گازوئیل طراحی شده بودند. دوران گذر به سامانه انرژی کم‌کربن، نیازمند یک راهبرد برای پل زدن و ایجاد تغییر است که متکی بر سامانه‌های هیبریدی، شامل آمیزه‌ای از سوخت‌ها است. مهندسی شیمی در تبدیل انرژی ذخیره‌شده در حامل‌های انرژی، به انواع دیگر انرژی و به مواد شیمیایی تبحر دارد و مهندسان شیمی، فرصت

مهمی برای ادامه به‌کارگیری این تبحر در منابع و حامل‌های انرژی غیرفسیلی در اختیار دارند. در درازمدت، حصول به انتشار کربن صفر خالص^۱، نیازمند پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در فوتوشیمی، الکتروشیمی و مهندسی است تا بتوان به طور مؤثر از انرژی غالب روی زمین، یعنی انرژی خورشیدی استفاده کرد. با این هدف، سامانه‌های نوینی برای بهبود بازده جذب و تبدیل فوتون به الکترون، بهبود ذخیره‌سازی الکترون‌ها و پیشرفت در مورد تبدیل مستقیم یا غیرمستقیم فوتون‌ها به حامل‌های انرژی از طریق واکنش با آب، نیتروژن و دی‌اکسیدکربن، به ترتیب برای تولید هیدروژن، آمونیاک و سوخت‌های مایع، لازم خواهد بود. همچنین، برای کاهش آثار زیان‌بار تغییر اقلیم، لازم است مهندسان شیمی با سایر رشته‌ها، از جمله شیمی، زیست‌شناسی، اقتصاد، علوم اجتماعی و غیره همکاری کنند. در بخش انرژی، هماهنگی بین پژوهشگران دانشگاهی و صنعت و نیز همکاری‌های بین‌المللی، برای حصول اطمینان از این که راه حل‌ها از لحاظ اقتصادی قابل رقابت و به‌کارگیری در مقیاس بزرگ هستند، حیاتی است.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

۱. در تمام زنجیره ارزش انرژی، حمایت مالی دولت از پژوهش‌ها باید به سمت پیشرفت فناوری‌هایی برود که سبب انرژی به سوی منابعی با کربن کمتر پیش بروند. فناوری‌های کم‌کربن یا با کربن صفر توسعه پیدا کنند، حوزه فوتوشیمی پیشرفت کند، آب مصرفی در سامانه‌های تولید انرژی به حداقل برسد و روش‌های اقتصادی و مطمئن جداسازی، استفاده و ذخیره‌سازی دی‌اکسیدکربن توسعه پیدا کنند.
۲. پژوهشگران در دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های دولتی و در صنعت باید همکاری‌های بین‌رشته‌ای و بین‌بخشی را با تمرکز بر پروژه‌هایی در مقیاس نیمه‌صنعتی، مدل‌سازی و تحلیل برای فناوری‌های انرژی کم‌کربن برقرار کنند.

۴-۴. راه حل‌های مهندسی پایدار برای سامانه‌های محیط زیست

از نقطه نظر تاریخی، مهندسان شیمی هر چند نقشی محوری در بخش انرژی داشته‌اند ولی سهم آنها در حل مسائل بین‌بخشی آب، غذا و کیفیت هوا محدود و نسبتاً ناچیز بوده است. علی‌رغم این واقعیت که آب، غذا و هوا از سال‌های دور مورد توجه سایر رشته‌ها بوده‌اند، مهندسان شیمی با قدرت تحلیل در سطح مولکولی و سامانه‌ای، تلاش‌های پیشگامانه‌ای را در این فضای بسیار درهم‌تنیده دارند. وقتی مهندسان شیمی فراتر از مقیاس عملیات واحد سنتی و در مقیاس جهانی فکر کنند، تأثیر مثبت آنها بیشتر خواهد شد. افزایش بیشتر جمعیت جهان به افزایش تقاضا برای منابع منتهی می‌شود، چالشی که در تعریف آینده مهندسی شیمی کلیدی است.

مهندسان شیمی می‌توانند در صرفه‌جویی مصرف آب از طریق فرایندهایی با بازده بالاتر و نیز

توسعه روش‌های جایگزینی آب با سایر سیالات، حمایت فنی به عمل آورند. فرصت‌های پژوهشی در این حوزه، از شناخت بهتر ساختار و دینامیک آب گرفته تا توسعه غشاها و سایر روش‌های جداسازی هستند. در عرصه مصرف و خالص سازی آب، مهندسان شیمی از همکاری با مهندسان عمران و سایر کارشناسان و مهندسان در نواحی خشک و کم‌آب، که دارای تجربه در نمک‌زدایی از آب دریا هستند، می‌توانند بهره‌مند شوند.

فشار جهانی مرتبط با تغییر اقلیم و رشد جمعیت، نیازمند تغییر عمده در منابع غذایی دارد، نیازی که مهندسان شیمی می‌توانند از طریق فناوری‌های توانمندسازی، به آن کمک کنند. فرصت‌های ویژه‌ای که برای مهندسان شیمی وجود دارد، شامل کشاورزی دقیق^۱، غذای غیرحیوانی و تولید مواد غذایی با شدت کمتر تولید کربن و کاهش یا حذف پسماند غذا است. لازمه روش‌های کشاورزی پیشرفته که برای بهبود بهره‌وری و کاهش تقاضا به کار می‌روند، همکاری با سایر رشته‌ها و نیز روش‌های سازمان‌یافته نظیر ارزیابی چرخه عمر^۲، را می‌طلبد. فرصت باارزش و ویژه دیگر، همکاری با پژوهشگرانی است که در زمینه مواد غذایی تولیدشده در آزمایشگاه در مقیاس کوچک پیشگام بوده‌اند.

کشاورزی دقیق یک راهبرد مدیریت کشاورزی است که بر مشاهده، اندازه‌گیری و پاسخگویی به تغییرات زمانی و مکانی به منظور بهبود پایداری تولید کشاورزی تأکید دارد. این راهبرد در تولید محصولات کشاورزی و دامی مورد استفاده قرار می‌گیرد. کشاورزی دقیق اغلب از فناوری‌ها برای اتوماسیون عملیات کشاورزی استفاده می‌کند که تشخیص، تصمیم‌گیری یا انجام آنها را بهبود می‌بخشد. اولین پژوهش‌های مفهومی در زمینه کشاورزی دقیق و کاربردهای عملی آن، به دهه ۱۹۸۰ برمی‌گردد. هدف تحقیقات در زمینه کشاورزی دقیق، تعریف یک سامانه پشتیبان تصمیم^۳ برای مدیریت کلی مزرعه با هدف بهینه‌سازی بازگشت آب مصرفی، در حالی که منابع حفظ می‌شوند، است. جو زمین، با گستره مکانی و زمانی زیاد، چالش‌های قابل توجهی را برای مهندسان شیمی ارائه می‌کند. مهندسان شیمی در درک بنیادی در این زمینه سهیم بوده‌اند و فعالیت آنها برای بهبود کیفیت هوا، از طریق حذف دی‌اکسیدکربن و سایر گازهایی که گرما را محبوس می‌کنند، ادامه خواهد یافت. مهندسان شیمی در فهم فعلی ما از ذرات، به ویژه آئروسول‌ها، نقش داشته‌اند و در آینده هم فرصت کمک به بهبود کیفیت هوا با پیشبرد شناخت بیشتر از ماهیت و فیزیک آئروسول‌ها و کاربرد فناوری‌های جداسازی و نیز تفکر مولکولی و سامانه‌ای که برای این چالش جهانی لازم خواهد بود را در اختیار دارند. علوم جوی در حال حاضر یک زمینه بین‌رشته‌ای، شامل شیمی، فیزیک، هواشناسی و اقلیم‌شناسی است که مهندسان شیمی می‌توانند با همکاری بیشتر، در توسعه آن دخیل باشند.

1- Precision agriculture (PA) [Ref]: https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_agriculture

2- Life cycle assessment

3- Decision support system (DSS)

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

۱. دولت باید هم به سمت پژوهش پایه و هم به سمت پژوهش کاربردی برای درک بنیادی ساختار و دینامیک آب جهت‌گیری کند و فناوری‌های جداسازی پیشرفته را برای حذف و بازیابی آلاینده‌های چالش‌برانگیز، توسعه دهد.
۲. برای به حداقل رساندن زمین، آب و تقاضای مواد مغذی تولیدی کشاورزی، پژوهشگران در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های دولتی و صنایع باید همکاری‌های بین‌رشته‌ای را با تمرکز بر افزایش مقیاس نوآوری‌ها در مهندسی متابولیک، توسعه زیست فناوری و غذاهای تولیدشده در آزمایشگاه و نیز توسعه فناوری‌های پایدار برای نگهداری، انبار کردن و بسته‌بندی مواد غذایی برقرار کنند.

۴-۵. مهندسی پزشکی هدفمند و قابل دسترسی

تعداد محدودی از زمینه‌های علوم و مهندسی وجود دارند که سرعت پیشرفتشان به اندازه پیشرفت‌های زیست‌شناسی و زیست‌شیمی با هدف درمان‌ها و معالجه بیماری‌های انسان بوده است و این روند ادامه دارد. مشارکت‌های ویژه مهندسان شیمی، شامل طراحی راکتور و جداسازی و اخیراً مهندسی سلول، فرمولاسیون، و دیگر جنبه‌های تولید دارو است. از زمان نخستین تلاش‌ها برای جداسازی مولکول‌های کوچک از اندامگان‌های زیستی و کنترل و بازمهندسی رفتار سلول، توسعه محصولات مشتق‌شده زیستی، با پیشرفت‌های عمده ناشی از فناوری نو ترکیب DNA، تعیین توالی ژنوم‌ها، توسعه واکنش زنجیره‌ای بسپار، کشف سلول‌های بنیادی پرتوان القایی و کشف و به‌کارگیری ویرایش ژن افزایش یافته است.

همه این چالش‌ها فرصت‌هایی را برای مهندسان شیمی فراهم می‌کنند تا رویکردهای نظام‌مند^۲ در مقیاس‌های مختلف از مولکول‌ها، تأسیسات تولیدی و هماهنگی و همکاری بین‌رشته‌ای را به کار برند. این فرصت‌ها، شامل استفاده از مهارت‌های مهندسی شیمی کمی^۳ در ایمنی‌شناسی، مانند ایمنی درمانی سرطان، طراحی واکسن و دارودرمانی بیماری‌های عفونی و اختلالات خودایمنی می‌شود. توسعه روش‌های کاملاً غیرتهاجمی برای داروسازی، یک مرز هیجان‌انگیز راهبردهای دستگاه‌محور و مواد پایه را نشان می‌دهد.

مهندسان شیمی همچنین موقعیت خوبی برای پیشبرد کار با مخازن دارویی^۴ با رهش پایدار و دارورسانی هدفمند، دارند. افزون بر این، تقاضا برای پادتن‌های تک‌دودمانی^۵، پروتئین‌های درمانی و داروهای پیام‌رسان ریبونوکلیک اسید^۶، تا حدی در پاسخ به پیری جمعیت ایالات متحده، به رشد خود ادامه خواهد داد. در عین حال، هزینه تولید زیست‌داروها و هزینه پی‌آمدی برای مصرف‌کننده، فشاری را برای بهبود انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه‌ها ایجاد می‌کند تا برابری مراقبت‌های سلامت با

۱- اندامگان برابر نهاده فرهنگستان برای واژه ارگانسیم است.

2- Systems-level
5- Monoclonal

3- Quantitative chemical engineering
6- mRNA

4- Depots

حفظ قابلیت اطمینان و ثبات در طول تولید و توزیع افزایش یابد. این چالش، فرصتی را برای مهندسان شیمی، به منظور توسعه فرایندهای زیستی نوین و بهبودهای سلول-پایه، از طریق همکاری با زیست شناسان و زیست شیمی دان‌ها فراهم می‌کند.

تمام این چالش‌ها، فرصت‌هایی را برای مهندسان شیمی فراهم می‌کنند تا از رویکردهای نظام‌مند در مقیاس‌هایی از مولکول‌ها تا تولید انبوه صنعتی بهره‌گیرند و هماهنگی و همکاری بین رشته‌ها را اجرا کنند. فرصت‌ها برای استفاده از مهارت‌های مهندسی شیمی در ایمنی‌شناسی^۱، شامل درمان‌های ایمنی نظام‌مند سرطان، طراحی واکسن‌ها و درمان‌های واکسنی برای بیماری‌های عفونی و اختلالات ایمنی خودکار وجود دارند. توسعه روش‌های کاملاً غیرمخرب برای انتقال دارو، یک مرز هیجان‌انگیز در راهبردهای دستگامی و مبتنی بر مواد است. مهندسان شیمی همچنین دارای موقعیت مناسبی برای پیشرفت در زمینه ره‌ایش کنترل‌شده دارو و تحویل هدفمند داروها هستند.

علاوه بر این، تقاضا برای آنتی‌بادی‌های تک‌کلانه، پروتئین‌های درمانی و درمان‌های RNA پیام‌رسان^۲ به طور مداوم رشد خواهد کرد. این افزایش تقاضا، در پاسخ به پیر شدن جمعیت است. در عین حال، هزینه تولید مواد زیستی و هزینه‌های بعدی برای مصرف‌کننده، فشاری ایجاد می‌کند که انعطاف‌پذیری را افزایش و هزینه‌ها را کاهش دهد تا تعادل در ارائه خدمات بهداشتی را افزایش دهد، ضمن این که در خلال تولید و توزیع، پایداری و استحکام را حفظ می‌کند. این چالش فرصتی برای مهندسان شیمی ایجاد می‌کند تا از طریق همکاری با زیست شناسان و زیست شیمی دان‌ها، فرایندهای زیستی نوین و بهبودهای مبتنی بر سلول را توسعه دهند.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

۱. سرمایه‌گذاری‌های پژوهشی دولت در مهندسی زیست مولکولی باید به پژوهش بنیادی یا پایه هدایت شود تا پزشکی شخصی^۳ و مهندسی مولکول‌های زیستی، شامل پروتئین‌ها، نوکلئیک‌اسیدها و سایرین نظیر ویروس‌ها و سلول‌ها، پل بین مواد، لوازم پزشکی و سلامتی، پیشرفت کند. اصلاح استفاده از ابزار سامانه‌ها و زیست‌شناسی سنتزی برای فهم شبکه‌های زیستی و فصول مشترک با علم داده‌ها و روش‌های محاسباتی، به منظور کاهش هزینه‌ها و بهبود عدالت و دسترسی به خدمات پزشکی لازم است.
۲. پژوهشگران در دانشگاه‌ها، آزمایشگاه‌های دولتی و نیز در صنعت باید همکاری بین‌رشته‌ای و بین‌بخشی را برای توسعه پروژه‌هایی در مقیاس پایلوت و نیمه‌صنعتی در فرایندهای داروسازی پیشرفته تشکیل دهند.

۴-۶. تولید انعطاف‌پذیر و اقتصاد چرخه‌ای^۴

مهندسی شیمی به عنوان یک رشته تخصصی برای کار روی مواد خام ناهمگون یا هتروژن، به ویژه نفت،

بنیان گذاشته شد و در دوره گذار به مواد خوراک پایدارتر، این نیاز بیشتر تقویت خواهد شد. اکنون تولید و ساخت مواد و مولکول‌های مفید توسط مهندسی شیمی، همان مسائل پیش‌بینی نشده قبل را ایجاد می‌کنند که باید در مقیاس لازم حل شوند. مهندسی شیمی نقش حیاتی در تولید دارد و لذا می‌تواند از طریق بهره‌وری، سرعت عمل و دقت و نیز اصلاحات عمده تشدید فرایند^۱ وارد عمل شود. یک آینده پایدار، مستلزم گذار به اقتصاد چرخه‌ای است که در آن پایان عمر محصولات با استفاده از توسعه و پیشرفت‌های جدید در شیمی و مهندسی سبز در نظر گرفته می‌شود. این تغییر، برای مهندسان شیمی فرصت دیگری را برای نوآوری از مقیاس‌های مولکولی تا تولیدی فراهم می‌کند. پیشران پیوسته به سوی فرایندهای تولید کارآمدتر، سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه از دامنه گسترده‌تری از مواد اولیه برای تولید مواد شیمیایی و سایر مواد سود خواهد برد. چالش انعطاف‌پذیری مواد اولیه، به مهندسان شیمی فرصتی را برای توسعه پیشرفت در شیمی کاهنده (الکترون گیرنده) و فرایندهایی که امکان استفاده از مواد اولیه اکسیژن دار، مانند زیست‌توده لیگنوسلولزی را فراهم می‌کنند، ارائه می‌دهد. مهندسان شیمی همچنین فرصت‌های قابل توجهی برای توسعه سامانه‌های تولیدی کوچک مقیاس و توزیع شده و فرایندهای نوآورانه در مقیاس بزرگ دارند که می‌توانند با تبدیل منابع فسیلی رقابت کنند.

چالش‌های موجود در طراحی فرایند، شامل لزوم بهبود تولید توزیع شده زمینه‌هایی از تشدید فرایند هستند که پژوهشگران حوزه مهندسی شیمی می‌توانند در آنها، رهبری هوشمندانه داشته باشند. همکاری بین پژوهشگران دانشگاهی و دست‌اندرکاران صنعت، برای رسیدن به مقیاس صنعتی مهم است. برای گذر از اقتصاد خطی به اقتصاد چرخشی، فرصت‌های ویژه‌ای برای مهندسان شیمی وجود دارند. بازنگری طراحی فرایندها و محصولات، برای حذف یا کاهش آلودگی، توسعه راه‌های نو برای کاهش و بازگردانی ضایعات، طراحی محصولاتی که مدت بیشتری مورد استفاده قرار گیرند و قابل بازیافت باشند و نیز طراحی فرایندها و محصولاتی که از مواد اولیه پایدار استفاده کنند، از جمله فرصت‌های مذکور هستند.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

۱. تأمین مالی پژوهش توسط دولت و صنعت باید هم به پژوهش پایه و هم به پژوهش کاربردی در زمینه تولید توزیع شده و تشدید فرایند و نیز فناوری‌های نوآورانه، شامل اصلاح طراحی محصول و فرایندهای بازیافت هدایت شود که لازمه گذار به اقتصاد چرخه‌ای است.
۲. پژوهشگران در دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های دولتی و دست‌اندرکاران صنعت باید همکاری‌های بین‌رشته‌ای و بین‌بخشی را با تمرکز بر تولید پیشرفته در مقیاس نیمه‌صنعتی تشکیل دهند. مورد اخیر، شامل فرایندهای کاهش مقیاس یافته و یا با تولید کمتر، تشدید فرایند و گذر از خوراک‌های آلی با منبای فسیلی و نیز خوراک‌های مبتنی بر

1- Process intensification (When applied to chemical plants, Process Intensification (PI) is the strategy of making dramatic improvements in manufacturing and processing, substantially decreasing, equipment size to output ratio, waste production, and energy consumption).

مواد معدنی بکر، به خوراک‌هایی با پایداری بیشتر^۱، برای تولید مواد شیمیایی است.

۴-۷. مواد جدید و اصلاح شده برای قرن بیست و یکم

مهندسان شیمی نقشی کلیدی در توسعه مواد و فرایندهای جدید، از مقیاس مولکولی تا مقیاس بزرگ دارند. ترکیبی از تئوری، مدل سازی، شبیه سازی، آزمایش و یادگیری ماشین، موجب شتاب‌گیری در کشف، طراحی و نوآوری در مواد جدید و فرایندهای جدید شده است.

مهندسان شیمی می‌توانند در توسعه مواد، در گستره‌ای از نوع مواد و کاربرد آنها، نقش داشته باشند. ترکیبی از درک مولکولی و مفاهیم ترمودینامیک و پدیده‌های انتقال، بینش عمیق و پیشرفته‌ای را ایجاد می‌کند. به ویژه، مهندسان شیمی نقش منحصربه‌فردی را در تداوم توسعه علم و مهندسی بسیار ایفا می‌کنند که به علت درک آنها از سنتز شیمیایی و کاتالیز، ترمودینامیک، پدیده‌های انتقال و رئولوژی و نیز طراحی فرایند و سامانه است. همچنین، مهندسی شیمی دارای جایگاهی منطقی برای تحقیق و توسعه در زمینه سیالات پیچیده و ماده نرم^۲ است. علم کاربرد نانوذرات، هم در صنعت و هم در پزشکی، به سرعت توسط مهندسان شیمی در حال شتاب‌گیری است و این فرصتی برای پیشرفت‌های بزرگ و مهم فراهم می‌آورد. مهندسان شیمی نقشی اساسی در پیشبرد توسعه مواد زیستی^۳، هم برای مهندسی بازسازی^۴ و هم برای فناوری اندام روی تراشه^۵، دارند و اصول مهندسی شیمی، در قلب درک و اصلاح تحویل هدفمند دارو^۶، هم به صورت مکانی و هم به صورت زمانی قرار دارند. تخصص مهندسی شیمی در طرح رآکتور، جداسازی‌ها و تشدید فرایند برای موفقیت و رشد صنعت مواد الکترونیکی حیاتی است.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

سرمايه‌گذاري دولت و صنعت باید به سمت علم و مهندسی بسیار، با تمرکز روی ملاحظات چرخه عمر^۷، شبیه سازی چندمقیاسه^۸، هوش مصنوعی، و راه‌های ساختار/ خاصیت/ فرایندی^۹، پژوهش‌های پایه در مورد ایجاد دانش جدید از سیالات پیچیده و ماده نرم، سنتز و ساخت ذرات نانو با هدف ایجاد مواد جدید و نیز اصلاح در ایمنی و مؤثر بودن درمان با نانوذرات، جهت‌گیری شود. بالاخره، کشف و طراحی رآکتور و فرایندهای خالص سازی، با تمرکز مداوم بر تشدید فرایند، به ویژه برای کاربردها در مواد الکترونیکی، مورد توجه خواهد بود.

۴-۸. ابزار توانمندسازی آینده مهندسی شیمی

لازم است که مهندسان شیمی فعلی و آتی، در فصل مشترک بین جهان طبیعی و داده‌هایی که این

1- Sustainable feedstock

2- Complex fluids and soft matter

3- Biomaterials

4- Regenerative engineering

5- Organ-on-a-chip technology

6- Targeted drug delivery

7- Life-cycle considerations

8- Multiscale simulation

9- Structure/property/processing

جهان را توصیف می‌کند، سیر نمایند. همچنین، آنها باید از ابزارهای استفاده کنند که داده‌ها را به اطلاعات مفید، دانش و فهم تبدیل نمایند. برخی از ابزارهای درحال ظهور، در رشته‌های دیگر توسعه پیدا خواهند کرد ولی تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کار مهندسان شیمی خواهند گذاشت. ابزار دیگری نیز توسط مهندسان شیمی توسعه پیدا خواهند کرد و به طور وسیع‌تری بر علم و مهندسی تأثیرگذار خواهند بود. اگر چه فهرست ابزارها و توانمندی‌هایی که بسیاری از آنها، وقتی به طور همزمان استفاده شوند، نامحدود است و موجب نوآوری می‌گردند، در این گزارش، توجه ما روی علم داده‌ها، ابزار محاسباتی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی و نیز ابزار و حسگرهای جدید متمرکز می‌شود.

در دهه‌های آینده، یکی از مشارکت‌ها و کمک‌های کلیدی مهندسان شیمی به جامعه، توسعه ابزارهایی است که داده‌های موجود، توسط آنها در زمان واقعی^۱ و چارچوب‌ها یا مدل‌هایی که داده‌ها را به اطلاعات و دانش کاربردی تبدیل می‌کنند، باشند. این تصور ساده است که در آینده نه‌چندان دور برحسب تقاضا، داده‌ها در مورد همه چیز و در هر سطحی از دقت، به راحتی و آنی در اختیار باشند. چنین آینده‌ای فرصت‌های هیجان‌برانگیز و قابل ملاحظه‌ای را برای مهندسان شیمی فراهم می‌کند، مهندسانی که برای انتگراسیون فرایند و تبحر در تفکر نظام‌مند، که لازمه تبدیل داده‌های متنوع و پایگاه‌های داده‌ها به اطلاعات و دانش است، آموزش دیده‌اند. تفکر نظام‌مند، روش‌های تحلیلی و مهارت‌های حل مسئله که امروزه دانش‌آموختگان مهندسی شیمی از آنها برخوردارند، به آنان مزیت متمایزی برای به‌کارگیری هوش مصنوعی در حل مسائل واقعی جهان عرضه می‌کند. تکامل هوش مصنوعی در دهه آینده، پیامدهای بی‌شماری، نه تنها در انواع مسائلی که مهندسان شیمی برای حل آنها توانایی خواهند داشت، بلکه در حل خود این مسائل نیز وجود خواهد داشت. مهندسان شیمی سهم به‌سزایی در توسعه ابزار مدل‌سازی و شبیه‌سازی که آموزش، پژوهش، و صنعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دارند. آنها به توسعه و اشاعه روش‌ها، الگوریتم‌ها، فنون و کدهای با دسترسی آزاد^۲ ادامه می‌دهند، به طوری که استفاده از ابزار محاسباتی برای پژوهش علمی توسط غیرمتخصصان آسان‌تر شود. افزایش پیچیدگی‌های عملیاتی و کاهش سرمایه‌گذاری اولیه و محدودیت حاشیه‌های اقتصادی در صنعت پتروشیمی، توأم با سخت‌تر شدن معیارهای محیط زیستی و کیفیت محصول در تولید مواد شیمیایی خاص و بسپارها، موجب به‌کارگیری بیشتر مدل‌سازی و شبیه‌سازی برای اجرای سناریوها و آزمایش‌های فرضی خواهد شد. در حالی که صنعت داروسازی در استفاده از ابزار شبیه‌سازی از صنعت شیمیایی عقب‌تر است، تغییراتی بنیادی در ملزومات مقررات حاکم بر این صنایع، انگیزه‌ای برای استفاده بیشتر از مدل‌ها و شبیه‌سازی، به خصوص در بخش تولیدات زیستی، خواهد بود.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

سرمایه‌گذاری دولتی و صنعت باید به سمت پیشبرد استفاده از هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و سایر ابزار علم داده‌ها، بهبود توانمندی‌ها در مدل‌سازی و شبیه‌سازی و ارزیابی چرخه عمر و نیز توسعه ابزار و حسگرهای نوین جهت داده شود. چنین سرمایه‌گذاری‌هایی باید در زمینه‌های پژوهش در کاربرد مهندسی شیمی پایه و توسعه مواد، شتاب دادن حرکت به سمت سامانه‌های انرژی کم‌کربن، اصلاح در تولید پایدار غذا، مدیریت آب و تولید و افزایش دسترسی به مراقبت‌های سلامت متمرکز گردد.

۴-۹. آموزش و پرورش نسل بعدی مهندسان شیمی

در بسیاری از حرفه‌ها و سطوح شغلی، تقاضای قابل توجهی برای مهندسان شیمی وجود دارد و مهندسی شیمی مبانی ممتازی را برای بسیاری از مسیرهای شغلی فراهم می‌کند. دوره کارشناسی مهندسی شیمی به این رشته به خوبی خدمت می‌کند و به تکامل خود در پاسخ به کشفیات علمی، پیشرفت‌های فناوری و نیاز جامعه، به‌آهستگی ادامه می‌دهد. دوره کارشناسی چارچوب ریاضی لازم برای طراحی فرایندهای (الکترو- فوتو- زیست) شیمیایی و فیزیکی را در مقیاس‌های گسترده مکانی و زمانی تأمین می‌کند. علم داده‌ها و آمار را به خوبی می‌توان در یک درس جداگانه، درون دوره مهندسی جا داد. به علاوه، آموزش توأم با آزمایش و کار یا آموزش میدانی، حائز اهمیت است و اکثر مهندسان شیمی که مورد نظر سنجی قرار گرفتند، بر لزوم تعمیق کارآموزی و دیگر تجربیات عملی تأکید داشتند. البته ذکر این نکته حائز اهمیت است که همواره تعداد موقعیت‌های موجود برای کارآموزی، به مراتب کمتر از تعداد دانشجویان است. همچنین تراکم دروس دوره کارشناسی فضای چندانی برای گنجاندن دروس آزمایشگاهی و کارورزی در اوایل دوره باقی نمی‌گذارد.

دوره فعلی کارشناسی مهندسی شیمی، به خوبی دانشجویان را برای تنوع گسترده‌ای از مشاغل صنعتی آماده می‌کند. پژوهش‌های تحصیلات تکمیلی نیز به طور فزاینده‌ای، بازه گسترده‌تری از عناوین را در برمی‌گیرد. در حال حاضر تمام آن دانشی که از دوره‌های تحصیلات تکمیلی رایج به دانشجویان منتقل می‌شود، برای انجام این پژوهش‌ها لازم نیستند. بنابراین، دوره تحصیلات تکمیلی ممکن است نیاز به تغییرات یا تنظیماتی داشته باشد. هم اکنون، دوره‌های کارآموزی در تحصیلات تکمیلی نادر هستند و باید مطابق مدل‌های جدیدی، به موضوعاتی نظیر برابری (عدالت) و شمول (بدون تبعیض)، پرداخت‌های مناسب، ملاحظات مالکیت معنوی و راهنمایی و سرپرستی پرداخته شود.

در مقایسه با جمعیت کلی جامعه، بانوان و اقشاری که به طور تاریخی مورد تبعیض قرار داشته‌اند، در مهندسی شیمی، حتی در مقایسه با شیمی و زیست‌شناسی و علوم مربوط، کمتر حضور داشته‌اند.

1- Experiential learning (Experiential learning is an engaged learning process whereby students "learn by doing" and by reflecting on the experience. Experiential learning activities can include, but are not limited to, hands-on laboratory experiments, internships, practicums, field exercises, study abroad, undergraduate research and studio performances).

بنابراین، تنوع بخشی به حرفه مهندسی شیمی برای بقاء و آثار احتمالی آن، ضروری است. طی دوره تحصیل، دانشجویان مهندسی شیمی نیازمند الگوها و سرپرستان ویژه‌ای هستند که دارای سوابق متنوع تحصیلی و حرفه‌ای باشند. استفاده حداکثری از انجمن‌های حرفه‌ای و گروه‌های وابسته به آنها می‌تواند حمایت ارزشمندی برای افرادی باشد که با زمینه‌های متنوع شغلی به این رشته وارد می‌شوند. همچنین حمایت قوی دانشگاه از بخش‌های دانشجویی سازمان‌های حرفه‌ای، دسترسی‌ها و موفقیت دانشجویان را بهبود می‌بخشد.

به‌علاوه، کالج‌های محلی که عموماً از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌اند، برای طیف وسیعی از دانش‌آموزان سال آخر دبیرستان، چه آنهایی که اقتصادی فکر می‌کنند و چه دانشجویان غیرتمام‌وقت (مثلاً نیمه‌وقت)، جذابیت دارند. بنابراین افزایش دانشجویان انتقالی معرف فرصتی است که مشارکت و دسترسی به حرفه مهندسی شیمی را گسترده می‌کند.

هم دانشجویانی که از کالج‌های دوساله فارغ‌التحصیل شده‌اند و هم آنهایی که رشته اصلی خود را به مهندسی شیمی تغییر می‌دهند، از باز طراحی دوره مهندسی شیمی که موجب تکمیل شدن تحصیلات آنها در مدت زمان کمتر می‌شود، بهره‌مند می‌شوند. برای چنین دانشجویانی، حمایت دانشگاهی و اجتماعی بهتری مورد نیاز است که بتوانند مدرک تحصیلی خود را در مدت زمان کوتاه‌تری اخذ نمایند. روش‌های جدیدی که بتوان بخشی از دوره را به صورت توزیع شده گذراند و نیز تغییر ساختار کلی در برنامه، ممکن است به انعطاف‌پذیری در طراحی دوره و تغییر در سیاست‌های دانشگاه و شرایط فارغ‌التحصیلی و ملزومات تعیین اعتبار دوره نیاز داشته باشد.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

۱. دانشکده‌های مهندسی شیمی باید در برنامه‌های دوره کارشناسی خود تجدید نظر کنند تا به دانشجویان در درک این موضوع که هریک از مفاهیم درسی چگونه در عمل به کار آنها می‌آید، کمک نمایند. این شامل آموزش‌های آزمایشگاهی در مراحل نخست دوره و شبیه‌سازی‌های مجازی و نیز به کارگیری ریاضیات و آمار در هسته مرکزی دوره با یک روش بهتر سازمان‌دهی شده یا با تکمیل دوره‌های موجود یا توسط جایگزینی برخی از آموزش‌ها که در حال حاضر خارج از چارچوب اصلی تدریس می‌شوند (منظور استفاده از نرم‌افزارها و رایانه است) قابل تأمین است.
۲. فراهم کردن امکان فرصت‌های آموزش‌های میدانی یا توأم با کار و آزمایش برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی. دانشگاه‌ها، صنایع، آژانس‌های تأمین مالی و انجمن مهندسی شیمی باید به صورت هماهنگ در برنامه‌های آموزش تحصیلات تکمیلی تجدید نظر کنند تا با رفع موانع، فرصت‌هایی را برای دوره‌های کارآموزی تحصیلات تکمیلی فراهم نمایند.
۳. برای افزایش پذیرش و سرویس دادن به بانوان، سیاه‌پوستان، بومی‌ها و رنگین‌پوست‌ها در دوره‌های کارشناسی (در ایالات متحده)، دانشکده‌های مهندسی شیمی باید بر ایجاد فرصت‌ها برای این گروه‌های اقلیتی که به طور تاریخی کنار گذاشته شده‌اند، تأکید نمایند تا تأثیر مثبتی بر جامعه بگذارند و برای این اقبال‌کنار گذاشته شده یک ساختار هدایتی و حمایتی ایجاد نمایند. برای ایجاد فرصت‌های بیشتر برای چنین دانشجویانی، دانشکده‌های مهندسی شیمی باید بازنگری و طراحی مجدد دوره کارشناسی را مدنظر قرار دهند تا امکان ورود دانشجویان از کالج‌های

- دوساله و یا آنهایی که تغییر رشته داده‌اند، فراهم گردد. بدون این که دوره آموزشی آنها برای اتمام دوره تمدید شود و ساختارهای لازم برای حمایت از دانشجویان انتقالی برای نگه داشتن و اتمام موفقیت‌آمیز دوره آنها ایجاد گردد.
۴. برای افزایش پذیرش دانشجویان از اقشار اقلیتی مذکور به دوره‌های تحصیلات تکمیلی، دانشکده‌های مهندسی شیمی باید در روش‌ها و معیارهای پذیرش خود تجدید نظر کنند و موانع موجود را که این قبیل دانشجویان با آنها روبه‌رو هستند، بردارند. به عنوان مثال، می‌توان به دانشجویانی که در دانشگاه‌هایی با جاهت یا شهرت کمتر درس خوانده‌اند یا دانشجویانی که در برنامه پژوهشی دوره کارشناسی شرکت نکرده‌اند، اشاره نمود. به منظور فراهم کردن فرصت‌های بیشتر برای بانوان، سیاه‌پوستان، بومی‌ها و رنگین‌پوستان (در ایالات متحده)، دانشکده‌ها باید پذیرش دانشجویانی با درجه کارشناسی در رشته‌های نزدیک و مرتبط با مهندسی شیمی را در نظر بگیرند و به دوره تحصیلات تکمیلی خود، اجزاء اصلی دوره کارشناسی را بیافزایند، به طوری که برای کارشناسان و مهندسان در تحصیلات تکمیلی مفید واقع شوند.
۵. کنسرسیومی از دانشگاه‌ها به همراه انجمن مهندسی شیمی باید انگیزه‌ها و روش‌های لازم را برای ساختن و به اشتراک گذاشتن محتوای مهندسی شیمی، به منظور استفاده در دانشگاه‌ها و صنعت، ایجاد نمایند. چنین مشارکتی می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌ها و پیشبرد دسترسی گسترده به محتوای باکیفیت، هم برای دانشجویان و هم برای مهندسان حرفه‌ای گردد که قصد دارند آموزش بیشتری ببینند یا صنعت مورد نظرشان را بعداً تغییر دهند.
۶. دانشگاه‌ها، صنعت، سازمان‌های دولتی تأمین منابع مالی و انجمن‌های حرفه‌ای باید یک گردهمایی مشترک را ایجاد کنند و دور هم جمع شوند تا روش‌های جاری را در سراسر زیست‌بوم ذی‌نفعان توسعه حرفه‌ای مهندسی شیمی به اشتراک بگذارند. چنین گردهمایی‌هایی به دنبال نیازها، موانع و فرصت‌هایی در مورد آموزش توانمندشده با فناوری و زیرساخت‌های مهندسی شیمی، از دانشگاه گرفته تا محل کار، است.

۴-۱۰. رهبری بین‌المللی

رهبری دانشگاهی ایالات متحده آمریکا در مهندسی شیمی، هم از نظر مقدار کمی پژوهش که با تعداد انتشارات اندازه‌گیری می‌شود و هم از نظر کیفیت پژوهش که با تعداد استناد یا ارجاعات اندازه‌گیری می‌شود، در ۱۵ سال گذشته به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. واقعیت مزبور موجب می‌شود که ایالات متحده، پیش‌تاز بودن را در مقایسه با رقبای بین‌المللی، به ویژه چین، از دست بدهد. لذا در ارزیابی جایگاه رهبری، ایالات متحده در برخی از زمینه‌های فناوری مهندسی شیمی، هنوز در جایگاه پیشرو قرار دارد، در حالی که در تعدادی از سایر زمینه‌ها، در مقایسه با دیگر کشورهای جهان، جایگاه پیش‌تاز را از دست داده است.

افزایش خروجی پژوهش در چین، نتیجه سرمایه‌گذاری گسترده در طیف وسیعی از زمینه‌های فناوری است که بسیاری از آنها، یا در هسته مرکزی و یا بسیار مرتبط با مهندسی شیمی هستند. سطوح مشابهی از سرمایه‌گذاری در بخش پژوهش ضروری است. گزارش اخیر خلاصه‌ای از فرصت‌های متعددی را که مهندسان شیمی می‌توانند در آنها مشارکت کنند، مثل زمینه‌های انرژی، آب، غذا، هوا، بهداشت و پزشکی، تولید، پژوهش روی مواد، و توسعه ابزار (محاسباتی) ارائه می‌کند. همان‌گونه که در بالا اشاره شد، بدون سرمایه‌گذاری پایدار توسط سازمان‌های پژوهشی دولتی، حفظ موقعیت رهبری پژوهشی برای ایالات متحده غیرممکن خواهد بود. در عین حال، مهندسی شیمی ایالات متحده با

افزایش هماهنگی و همکاری در سراسر این رشته، بخش‌ها و مرزهای سیاسی خود را، تقویت خواهد کرد. تقریباً تمام زمینه‌های پژوهشی که در این گزارش مورد بحث قرار گرفت، ماهیت بین‌رشته‌ای دارند و نیازمند همکاری نزدیک بین پژوهشگران در دانشگاه‌ها و آزمایشگاه‌های دولتی و دست‌اندرکاران صنعت هستند تا کاربردهایی را توسعه دهند که از لحاظ اقتصادی پایدار و قابل تغییر مقیاس باشند. همان‌گونه که در سراسر این گزارش توصیه شد، چنین همکاری‌های بین‌بخشی دارای منافع مضاعف برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی و نیز اعضای هیئت علمی خواهند بود.

توصیه‌های نهایی در این بخش عبارتند از:

در تمام زمینه‌های مهندسی شیمی، علاوه بر پیشبرد درک بنیادی از زمینه مزبور، سرمایه‌گذاری‌های پژوهشی باید برای حمایت از پژوهش در زمینه‌های بین‌رشته‌ای، بین‌بخشی و همکاری‌های بین‌المللی در مورد انرژی، آب، غذا، هوا، بهداشت و پزشکی، تولید، پژوهش روی مواد، توسعه ابزار (محاسباتی)، و فراتر از آنها، با هدف اتصال پژوهش ایالات متحده به نقاط قوت دیگر کشورها، انجام شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، سیر تحولات رشته مهندسی شیمی و حرفه مهندسی شیمی، از بدو تأسیس آن در جهان مورد بررسی قرار گرفت. پس از مروری بر مقالات منتشرشده در فصلنامه آموزش مهندسی ایران طی ۲۵ سال گذشته در خصوص مهندسی شیمی و با تکیه بر آموزش این رشته، تاریخچه این رشته نشان می‌دهد که مهندسی شیمی بیش از یک قرن پیش به نیاز آن زمان برای توسعه صنایع شیمیایی در مقیاس بزرگ و صنعتی، به ویژه صنایع نفت، گاز و پتروشیمی و بسپار، شامل انواع لاستیک و پلاستیک، به طور موفقیت‌آمیزی پاسخ داد و به عنوان یک رشته مستقل، به خوبی شناسایی شد و مقبول افتاد. تغییرات رشته مهندسی شیمی در نیمه اول قرن بیستم نسبتاً کند بود تا اینکه پس از جنگ جهانی دوم، با توسعه نیمه‌هادی‌ها و پیدایش رایانه در دو دهه اول نیمه دوم قرن بیستم، تغییرات عمده‌ای در این رشته به وجود آمد که عمدتاً در روش‌های رایانه‌ای در طراحی و کنترل فرایندها گردید. در چند دهه آخر قرن بیستم و دو دهه قرن بیست‌ویکم، تحولات نوظهور دیگری در رشته مهندسی شیمی صورت گرفت که عبارتند از: زیست‌فناوری و مهندسی زیست‌مولکولی، مهندسی پزشکی، نانوفناوری، تحول دیجیتال و هوش مصنوعی و بالاخره بازنگری در روش‌های طراحی و تولید با ملاحظات زیست‌محیطی، نظیر آلودگی‌ها و تغییرات اقلیمی، آلودگی آب‌ها و بازیافت آب، پسماندهای جامد، محدودیت‌های دسترسی به انرژی و منابع کره زمین، پیوند انرژی و آب و غذا، که در مجموع به آن مهندسی شیمی سبز یا اقتصاد چرخه‌ای یا تشدید (فشرده شدن) فرایند می‌گویند. بنابراین، بازنگری در آموزش و پژوهش مهندسی شیمی، اکنون یک ضرورت است تا بتواند نیازهای فعلی و آتی جوامع را برطرف نماید. به دلیل سرعت انتقال اطلاعات و فناوری‌های گوناگون در سراسر جهان، این تحولات به یک کشور یا

منطقه خاص محدود نمی‌شود و روند توسعه علم و فناوری و نیاز به بازنگری در آموزش و پژوهش مهندسی شیمی باید به صورت مستمر و به‌روز انجام پذیرد. نکته بسیار مهمی که باید بر آن تأکید نمود، روند تغییرات آموزش و پژوهش بین‌رشته‌ای است که در مورد مهندسی شیمی بسیار گوناگون و گسترده است. به عنوان چند نمونه، علاوه بر ماهیت اولیه بین‌رشته‌ای خود مهندسی شیمی که ترکیبی از شیمی، فیزیک، ریاضیات و مهندسی مکانیک بود، اکنون با بسیاری از رشته‌های دیگر در علوم و مهندسی وجه اشتراک دارد. از جمله می‌توان به زیست‌شناسی، مهندسی پزشکی، کشاورزی و غذا، مهندسی عمران و محیط زیست، علم و مهندسی مواد، اقتصاد و تولید، انرژی، داده‌پردازی، شبیه‌سازی رایانه‌ای و هوش مصنوعی اشاره کرد. سرانجام، باید به اخلاق مهندسی در تمام مراحل آموزش و حرفه مهندسی شیمی تأکید نمود زیرا بسیاری از خطاهای گذشته در این حرفه و البته سایر علوم مهندسی، ناشی از کمبود و ضعف در اخلاق مهندسی بوده است.

در سال‌های گذشته رشد فناوری دیجیتال، کمک شایانی به پیشرفت حوزه‌های علمی مختلف داشته است. با توجه به روش‌های معرفی شده بر مبنای آموزش الکترونیکی، لازم است تا در تدریس دروس مختلف، این روش‌ها مورد آزمایش قرار گیرند و در مباحث جداگانه و سرفصل‌های متنوع استفاده شوند تا با شناسایی آسیب‌ها و معایب احتمالی، بتوانند به صورت مستمر در کلاس‌های درس مورد استفاده قرار گیرند. همچنین توجه به جهت‌گیری‌های تحقیقاتی می‌تواند مزایای اساسی برای رشته مهندسی شیمی ایجاد کند که از جمله آنها می‌توان به تکمیل فرایند یادگیری مهندسان شیمی، توسعه فناوری‌های مدرن در قالب شرکت‌های رویشی و دانش‌بنیان، اشتغال‌زایی و افزایش رشد اقتصادی و سطح رفاه اجتماعی اشاره کرد. این جهت‌گیری‌ها به مهندسان شیمی فرصت می‌دهند تا به راه حل‌های خلاقانه برای رفع چالش‌های پیچیده صنعتی دست یابند.

تشکر و قدردانی

از سردبیر محترم فصلنامه آموزش مهندسی، برای اختصاص یک شماره ویژه فصلنامه آموزش مهندسی به مهندسی شیمی، صمیمانه سپاسگزاری می‌شود. همچنین از کلیه اعضای شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم که مشوق نویسندگان مقالات این شماره ویژه فصلنامه آموزش مهندسی بودند و راهنمایی‌های ایشان قدردانی می‌شود.

References

- Ashrafizadeh, N. (2001). Chemical engineering and challenges for the year 2001. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 29-44 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2029>.
- Ashrafizadeh, N. (2003a). The specialty of inorganic chemical industries in chemical engineering, the opportunity of chemical engineers. *Iranian Journal of Engineering Education*, 5(18), 85-107 [in Persian]. <https://doi.org/>

- org/10.22047/ijee.2003.2109.
- Ashrafizadeh, N. (2003b). Revision of chemical engineering bachelor's curriculum with an approach towards the inorganic chemical industries. *Iranian Journal of Engineering Education*, 5(17), 29–54 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2003.2098>.
 - Ashrafizadeh, N., Nikbaksh, S., & Alavi, Z. (2006). Biotechnology and chemical engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 8(29), 1–15 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2006.500>.
 - Asif, M., Sidra Bibi, S., Ahmed, S., Irshad, M., Shakir Hussain, M., Zeb, H., Kashif Khan, M., & Kim, J. (2023). Recent advances in green hydrogen production, storage and commercial-scale use via catalytic ammonia cracking. *Chemical Engineering Journal*, 473, 145381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145381>.
 - Birniwa, A. H., Habibu, S., Abdullahi, S. S., Mohammad, R. E. A., Hussaini, A., Magaji, H., Al-dhawi, B. N. S., Noor, A., & Jagaba, A. H. (2024). Membrane technologies for heavy metals removal from water and wastewater: A mini review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100538. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100538>.
 - Bozorgmehri, R., & Shahrokhi, M. (2004). Updating process control syllabus to fulfill chemical and petroleum industry requirements and standards in new millennium. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 79–89 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2423>.
 - Caserta, S., Tomaiuolo, G., & Guido, S. (2021). Use of a smartphone-based student response system in large active-learning chemical engineering thermodynamics classrooms. *Education for Chemical Engineers*, 36, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2021.02.003>.
 - da Silva Júnior, J. N., Sousa Lima, M. A., Ávila Pimenta, A. T., Nunes, F. M., Monteiro, Á. C., de Sousa, U. S., Leite Júnior, A. J. M., Zampieri, D., Oliveira Alexandre, F. S., de Sousa, U. S., Pacioni, N. L., & Winum, J.-Y. (2021). Design, implementation, and evaluation of a game-based application for aiding chemical engineering and chemistry students to review the organic reactions. *Education for Chemical Engineers*, 34, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2020.11.007>.
 - Dabir, B., Hormozi, F., & Alaie, S. M. (2001). CFD as a new tool for research and education in chemical engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 45–53 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2030>.
 - Dai, Y., Chen, X., & Zhang, X. (2019). Recent advances in stimuli-responsive polymeric micelles via click chemistry. *Polymer Chemistry*, 10(1), 34–44. <https://doi.org/10.1039/C8PY01174E>.
 - Daneshfar, M. A., & Arjomand, M. (2013). Consideration of chemical engineering B.Sc students weakness in energy & mass balance unit. *Iranian Journal of Engineering Education*, 15(58), 101–111 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2013.3597>.
 - Davari Ardakani, R. (2010). Considerations on ethics in the world of science and engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 12(46), 1–15 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2010.670>.
 - Díaz-Sainz, G., Pérez, G., Gómez-Coma, L., Ortiz-Martínez, V. M., Domínguez-Ramos, A., Ibañez, R., & Rivero, M. J. (2021). Mobile learning in chemical engineering: An outlook based on case studies. *Education for Chemical Engineers*, 35, 132–145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cec.2021.01.013>.
 - Díaz, I., González, E. J., González-Miquel, M., & Rodríguez, M. (2024). Application of serious games in chemical engineering courses. *Education for Chemical Engineers*, 46, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.cec.2023.10.002>.
 - Dobbelaere, M. R., Plehiers, P. P., Van de Vijver, R., Stevens, C. V., & Van Geem, K. M. (2021). Machine learning in chemical engineering: strengths, weaknesses, opportunities, and threats. *Engineering*, 7(9), 1201–1211. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.019>.
 - Dutta, S. (2012). Applications and development of nanomaterials and nanotechnology: role of chemical engineers. *Recent Patents on Chemical Engineering*, 5(3), 197–205.
 - National academies of sciences, engineering and medicine, E. (2022). *New directions for chemical engineering*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26342>.
 - Farhadi, F. (2004). Content of applied heat transfer course in undergraduate chemical engineering curriculum.

- Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 53–58 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2420>.
- Farhadi, F., & Taghdisiyan, H. (2004). Mass transfer in chemical engineering undergraduate education. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 59–64 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2421>.
 - Farhadi, F., Taghdisiyan, H., & Minapor, S. (2004). Comparative review of undergraduate basic courses in chemical engineering curriculum. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 17–28 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2417>.
 - Farokhzad, A. (2001). Safety in process, as a lost chain in the chemical engineering education. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 71–83 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2032>.
 - Ganjizade, A., Vahidi, O., & Ashrafzadeh, S. N. (2017a). Biology; A new main element in chemical engineering transition from “chemical” to “chemical and biological” engineering, Part 1: necessity, curriculum’s and research areas. *Iranian Journal of Engineering Education*, 19(74), 1–22 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2017.80006.1449>.
 - Ganjizade, A., Vahidi, O., & Ashrafzadeh, S. N. (2017b). Biology; a new main element in chemical engineering transition from “chemical” to “chemical and biological” engineering, Part 2: graduate education and industrial achievements. *Iranian Journal of Engineering Education*, 19(75), 1–21 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2017.55103>.
 - Ganjizade, A., & Ashrafzadeh, S. N. (2017). Micro/nanofluidics, a new aspect in chemical engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 19(73), 139–168 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2017.67731.1424>.
 - Gao, H. (2024). *Chapter 5 – Machine learning in reaction engineering* (M. Soroush & R. B. T.-A. I. in M. D Braatz (eds.); pp. 139–166). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99135-3.00007-5>.
 - Ghasem, N., & Ghannam, M. (2021). Challenges, benefits & drawbacks of chemical engineering on-line teaching during Covid-19 pandemic. *Education for Chemical Engineers*, 36, 107–114. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.04.002>.
 - Goodarzniya, E. (2000). The trends of chemical engineering education in Iran. *Iranian Journal of Engineering Education*, 1(4), 69–98 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2000.2361>.
 - Goodarzniya, E. (2012). Evolution of chemical engineering education and its background in the world. *Iranian Journal of Engineering Education*, 1(1), 105–127 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.1999.2332>.
 - Habibi, S., Mohammadi, T., H., M., Shirazi, R., Atyabi, F., Kiani, M., & Asadi, A. A. (2023). A bilayer mupirocin/bupivacaine-loaded wound dressing based on chitosan/poly (vinyl alcohol) nanofibrous mat: Preparation, characterization, and controlled drug release. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124399. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124399>.
 - Hassan, Q., Abdulateef, A. M., Hafedh, S. A., Al-Samari, A., Abdulateef, J., Sameen, A. Z., Salman, H. M., Al-Jiboory, A. K., Wieteska, S., & Jaszczur, M. (2023). Renewable energy-to-green hydrogen: A review of main resources routes, processes and evaluation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(46), 17383–17408. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.175>.
 - Herink, T., Bělohav, V., Jirout, T., & Bělohav, Z. (2022). Opportunities of experiential education in chemical technology and engineering. *Education for Chemical Engineers*, 41, 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.08.003>
 - Kaghazchi, T., Sohrabi, M., & Solemani, M. (2003). Teaching new courses in chemical engineering (Gas conversion engineering). *Iranian Journal of Engineering Education*, 5(17), 71–82 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2003.2101>.
 - Kanjwal, M. A., & Ghaferi, A. Al. (2022). Hybrid nanofibers opportunities and frontiers– A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(6), 108850. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108850>.
 - Kheradmandinia, Sh., & Sotudeh Gharebagh, R. (2018). Complementary skill educations for chemical engineers from engineering consultant company’s view perspective. *Iranian Journal of Engineering Education*, 20(77), 1–17 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2018.126629.1531>.
 - Khoshnoodi, M. (2000). Chemical engineering; past, present and future. *Iranian Journal of Engineering Education*,

- 2(7), 51–62 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2000.2022>.
- Kolliopoulos, G., Xu, C., Martin, J. T., Devaere, N., & Papangelakis, V. G. (2022). Hybrid forward osmosis – freeze concentration: A promising future in the desalination of effluents in cold regions. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102711. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102711>.
 - Kumar, V. V., Carberry, D., Beenfeldt, C., Andersson, M. P., Mansouri, S. S., & Gallucci, F. (2021). Virtual reality in chemical and biochemical engineering education and training. *Education for Chemical Engineers*, 36, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.05.002>
 - Lavasani, M., Ziaei-Halimejani, H., Sotudeh Gharebagh, R., Zarghami, R., & Mostoufi, N. (2021). Application of data science in chemical engineering education. *Iranian Journal of Engineering Education*, 23(90), 21–25 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2021.239468.1759>.
 - Li, L., Rong, S., Wang, R., & Yu, S. (2021). Recent advances in artificial intelligence and machine learning for nonlinear relationship analysis and process control in drinking water treatment: A review. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126673. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2020.126673>.
 - Liu, L., Swift, S., Taylor, J., Nutsford, A. N., Tollemache, C., Lu, Z., Yadav, P., Zujovic, Z., Ross, J., Vella, J., Chen, S., Perera, J., Li, D., & Kilmartin, P. A. (2024). One-pot fabrication of potent antimicrobial and antiviral films with eco-friendly in situ after-use disposal. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148406. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2023.148406>.
 - Masoumi Godarzi, S., Sotudeh gharebagh, R., & Gorji kandi, S. (2011). Retrospective glance at the improvement of chemical engineering education in Iran. *Iranian Journal of Engineering Education*, 13(51), 75–99 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2011.1109>.
 - Moghaddas (Soltan Mohammadzadeh), J., Haghghi, M., (2004). Kinetic and reactor design in chemical engineering curriculum. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 65–78 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2422>.
 - Moghaddas, J., Yasrebi, N., Shojaosadati, A., & Taghavi, M. (2019). Study and comparison of curriculum and methodology of chemical engineering in American and Iranian universities. *Iranian Journal of Engineering Education*, 25, 45–81 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee>.
 - National academies of sciences, engineering, and medicine. 2022. New directions for chemical engineering. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26342>.
 - Ogawa, K. (2007). *Information Entropy, Chapter 1* (K. B. T.-C. E. Ogawa (ed.); pp. 1–20). Elsevier Science B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-044453096-7/50003-X>.
 - Panjeshahi, M. H. (2001). Chemical engineering and energy. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 55–70 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2031>.
 - Pirdashti, M., Ghadi, A., & Noorshahi, N. (2010). Necessity of management course for chemical engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 11(44), 37–49 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2010.653>.
 - Rahimi, A., & Aghamiri, F. (2006). The necessity of inspection of undergraduate educational programs for chemical engineers according to the requirement of industries. *Iranian Journal of Engineering Education*, 7(28), 13–27 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2006.2552>.
 - Rahimi, R. (2019). Chemical engineering prospective; chemical product engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 21(82), 1–13 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2019.176619.1628>.
 - Rashtchian, D., & Shayeghan, J. (2001). Conception of chemical engineering education and employment. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 85–106 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2033>.
 - Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Neisiany, R. E., Shakiba, M., Zare, M., Lakshminarayanan, R., Chellappan, V., Abdouss, M., & Ramakrishna, S. (2022). Advances in electrospinning of aligned nanofiber scaffolds used for wound dressings. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, 22, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.cobme.2022.100393>
 - Rojas, A., Mistic, D., Zizovic, I., Dicastillo, C. L. de, Velásquez, E., Rajewska, A., Rozas, B., Catalán, L., Vidal, C. P., Guarda, A., & Galotto, M. J. (2024). Supercritical fluid and cocrystallization technologies for designing

- antimicrobial food packaging PLA nanocomposite foams loaded with eugenol cocrystals with prolonged release. *Chemical Engineering Journal*, 481, 148407. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148407>
- Moghaddas (Soltan Mohammadzadeh), J., & Haghghi, M. (2004). Kinetics and reactor design in chemical engineering curriculum. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 65–78 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2422>.
 - Sangamner, R., Misra, T., Bherwani, H., Kapley, A., & Kumar, R. (2023). A critical review of conventional and emerging wastewater treatment technologies. *Sustainable Water Resources Management*, 9(2), 58. <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00829-y>.
 - Sarmah, M. K., Singh, T. P., Kalita, P., & Dewan, A. (2023). Sustainable hydrogen generation and storage – a review. *RSC Advances*, 13(36), 25253–25275. <https://doi.org/10.1039/D3RA04148D>.
 - Schofield, D. (2012). Mass effect: A chemical engineering education application of virtual reality simulator technology. *Journal of Online Learning and Teaching*, 8(1), 63.
 - Shabani, Z., Zarghami, S., & Mohammadi, T. (2020). Chapter 6 – Nanomaterials for fouling-resistant RO membranes. In A. Amrane, S. Rajendran, T. A. Nguyen, A. A. Assadi, & A. M. B. T.-N. in the B. I. Sharoba (Eds.), *Micro and Nano Technologies* (pp. 151–184). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819941-1.00006-7>.
 - Shayegan, J., & Mosaviyan, M. (2004). Introducing an orientation course for freshmen in chemical engineering. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 29–40 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2418>.
 - Shayegan, J. (2004). An analytical approach to plant design and economics course and methods of teaching. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 91–102 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2424>.
 - Shayegan, J., & Pahlavanzadeh, H. (2004). An analytical approach to mass and energy balances course. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 41–51 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2419>.
 - Sotudeh Gharebagh, R., (2002). Information technology and its application in chemical engineering, *Iranian Journal of Engineering Education*, 4(14), 1–26 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2002.2068>.
 - Sotudeh Gharebagh, R., & Zarifi, M. (2005). Computer aided process simulation course for chemical engineers and necessity of its inclusion in B. S. program. *Iranian Journal of Engineering Education*, 7(25), 27–44 [in Persian]. <https://ijee.ias.ac.ir/article.2533.html>.
 - Taheri, M., & Rahimi, A. (2000). A new approach to chemical engineering education based on technical developments. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(7), 35–49 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2000.2021>.
 - Taheri, M., & Rahimi, A. (2001). Chemical engineering education; problem, solutions and priorities. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 1–13 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2027>.
 - Taheri, M., & Rahimi, A. (2004). Basic change in chemical engineering education in Iran. *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(21), 7–15 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2004.2416>.
 - Ureel, Y., Dobbelaere, M. R., Ouyang, Y., De Ras, K., Sabbe, M. K., Marin, G. B., & Van Geem, K. M. (2023). Active machine learning for chemical engineers: A bright future lies ahead! *Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.02.019>.
 - van Antwerpen, F. J. (1980). The origins of chemical engineering. In *History of Chemical Engineering* (Vol. 190, p. 1). American Chemical Society. <https://doi.org/doi:10.1021/ba-1980-0190.ch001>.
 - Vasheghani Farahani, E. (2001). Chemical engineering education and research. *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 15–27 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2001.2028>.
 - Wang, Y., Liu, Y., Xu, Z., Yin, K., Zhou, Y., Zhang, J., Cui, P., Ma, S., Wang, Y., & Zhu, Z. (2024). A review on renewable energy-based chemical engineering design and optimization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 114015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114015>.
 - Whittton, N. (2012). *Games-based learning BT – Encyclopedia of the Sciences of Learning* (N. M. Seel (ed.); pp. 1337–1340). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_437.
 - Wu, S., Dong, T., Li, Y., Sun, M., Qi, Y., Liu, J., Kuss, M. A., Chen, S., & Duan, B. (2022). State-of-the-art

- review of advanced electrospun nanofiber yarn-based textiles for biomedical applications. *Applied Materials Today*, 27, 101473. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101473>.
- Xia, J., Sun, X., Jia, P., Li, L., Xu, K., Cao, Y., Lü, X., & Wang, L. (2023). Multifunctional sustainable films of bacterial cellulose nanocrystal-based, three-phase pickering nanoemulsions: A promising active food packaging for cheese. *Chemical Engineering Journal*, 466, 143295. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143295>.
 - Xu, C., Kolliopoulos, G., & Papangelakis, V. G. (2022). Industrial water recovery via layer freeze concentration. *Separation and Purification Technology*, 292, 121029. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121029>.
 - Xu, H., Chen, L., Julian McClements, D., Hu, Y., Cheng, H., Qiu, C., Ji, H., Sun, C., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2022). Progress in the development of photoactivated materials for smart and active food packaging: Photoluminescence and photocatalysis approaches. *Chemical Engineering Journal*, 432, 134301. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134301>.
 - Xu, X., Lü, S., Gao, C., Wang, X., Bai, X., Duan, H., Gao, N., Feng, C., & Liu, M. (2015). Polymeric micelle-coated mesoporous silica nanoparticle for enhanced fluorescent imaging and pH-responsive drug delivery. *Chemical Engineering Journal*, 279, 851-860. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.05.085>.
 - Yang, H., Lu, H., Miao, Y., Cong, Y., Ke, Y., Wang, J., Yang, H., & Fu, J. (2022). Non-swelling, super-tough, self-healing, and multi-responsive hydrogels based on micellar crosslinking for smart switch and shape memory. *Chemical Engineering Journal*, 450, 138346. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138346>.
 - Zargarzadeh, L., & Pazuki, G. (2023). Chemical engineering thermodynamics: Revising content and teaching methods. *Iranian Journal of Engineering Education*, 25(99), 11-26 [in Persian]. <https://doi.org/10.22047/ijee.2023.402217.1986>.
 - Zarghami, S., Mohammadi, T., & Sadrzadeh, M. (2022). Superhydrophobic/superhydrophilic polymeric membranes for oil/water separation. In *Oil-Water Mixtures and Emulsions, Volume 1: Membrane Materials for Separation and Treatment* (Vol. 1407, pp. 119-184 SE - 4). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2022-1407.ch004>.
 - Zhang, X., Niu, J., Zhou, Z., Tang, G., Yan, G., Liu, Y., Wang, J., Hu, G., Xiao, J., Yan, W., & Cao, Y. (2023). Stimuli-responsive polymeric micelles based on cellulose derivative containing imine groups with improved bioavailability and reduced aquatic toxicity of pyraclostrobin. *Chemical Engineering Journal*, 474, 145789. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145789>.
 - Zhao, Y., Li, C., Xia, X., Tan, M., Wang, H., Lv, Y., Cheng, Y., Tao, Y., Lu, J., Li, D., & Du, J. (2023). Eco-friendly and intelligent cellulosic fibers-based packaging system for real-time visual detection of food freshness. *Chemical Engineering Journal*, 474, 146013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146013>.



◀ **دکتر محمد سلطانی:** که دوره کارشناسی را در دانشگاه صنعتی شریف گذرانده و درجه کارشناسی ارشد در گرایش محیط زیست و پدیده‌های انتقال و دکتری را در گرایش فرایندهای غشایی و نمکزدایی از آب از دانشگاه ایالتی نیویورک در سال ۱۳۵۸ کسب نموده، از سال ۱۳۴۹ به عنوان عضو هیات علمی دانشگاه صنعتی شریف مشغول به خدمات آموزشی، پژوهشی و اجرایی بوده و از ابتدای سال ۱۳۹۷ بازنشسته شده‌اند. دکتر سلطانی دریافت کننده چند لوح تقدیر و جوایز ملی و بین‌المللی می‌باشد. در حال حاضر ایشان عضو پیوسته و رئیس شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم می‌باشند.



◀ **دکتر رهبر رحیمی:** مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را از دانشگاه‌های آستن و باث انگلستان در رشته مهندسی شیمی گرایش توسعه و آنالیز فرایندها و انتقال حرارت در ستون‌های حیاتی اخذ نموده است. و از سال ۱۳۵۸ تا ۱۴۰۰ که با رتبه استادی به درجه بازنشستگی نائل شده‌اند عضو هیات علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان بودند. استاد هم اکنون عضو هیات مدیره انجمن مهندسی شیمی و عضو مدعو شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم ایران می‌باشند.



◀ **دکتر تورج محمدی:** مدرک دکتری تخصصی خود را در رشته مهندسی شیمی از دانشگاه NSW استرالیا اخذ کرده‌اند. ایشان از سال ۱۳۷۵ فعالیت خود را به عنوان هیات علمی در دانشگاه علم و صنعت ایران آغاز کرده و هم اکنون به عنوان استاد ممتاز دانشگاه و مدیر قطب علمی ساخت غشاها و طراحی، راهبری و نگهداری فرایندهای غشایی مشغول به فعالیت می‌باشند.



◀ **دکتر سید نظام‌الدین اشرفی‌زاده:** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی شیمی از دانشگاه امیرکبیر و مدارک کارشناسی ارشد و دکتری خود را از دانشگاه مگگیل کشور کانادا اخذ نموده و از سال ۱۳۷۵ بعنوان عضو هیات علمی در گروه جداسازی دانشگاه علم و صنعت ایران مشغول خدمت بوده است. فرایندهای جداسازی غشایی و همچنین مبتنی بر پدیده‌های سطحی و میکرو/نانوفلوئیدیک از حوزه‌های عمده فعالیت علمی دکتر اشرفی‌زاده می‌باشد.



◀ **دکتر سهیل زرغامی:** مدرک دکتری تخصصی خود را در رشته مهندسی شیمی با کسب عناوین دانش آموخته رتبه اول آموزشی و پژوهشگر برتر در دانشگاه علم و صنعت ایران اخذ کرده‌اند. ایشان از سال ۱۴۰۱ فعالیت خود را به عنوان هیات علمی در دانشگاه صنعتی اصفهان آغاز کرده و هم اکنون به عنوان مدیر گروه مهندسی شیمی مشغول به فعالیت هستند.

مهندسی شیمی سبز

ابراهیم واشقانی فراهانی^۱ و سعید رفیعیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۳

DOI: 10.22047/ijee.2024.447623.2063

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.2.1

چکیده: در این مقاله، مفهوم مهندسی شیمی سبز، به عنوان نقطه تلاقی «شیمی سبز» و «مهندسی سبز» معرفی شده است و بر اهمیت آن در برنامه درسی مهندسی شیمی تأکید می‌شود. این مقاله ابتدا اهداف و اصول دوازده‌گانه «شیمی سبز» و «مهندسی سبز» را تشریح می‌کند و نقش آنها را در ارتقای پایداری زیست محیطی و کاهش ردپای بوم‌شناختی^۳ فرایندهای شیمیایی برجسته می‌کند. پس از این مقدمه، مهندسی شیمی سبز با تمرکز بر معیارهای پایداری آن و نحوه اعمال این اصول برای ایجاد فرایندهای شیمیایی سازگارتر با محیط زیست و پایدار، با جزئیات بیشتری مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس بحث به این سو می‌رود که چگونه مفهوم مهندسی شیمی سبز می‌تواند به طور یکپارچه در برنامه درسی مهندسی شیمی ادغام شود و تغییرات و اضافاتی را به دوره‌های موجود پیشنهاد می‌کند تا موضوعات مهندسی پایدار را دربرگیرد. سرانجام، مقاله با خلاصه‌ای کوتاه به پایان می‌رسد و خواستار گنجاندن اصول سبز در چارچوب آموزشی، برای آماده‌سازی مهندسان آینده به منظور چالش‌های توسعه پایدار است و بر اهمیت تجهیز آنها به دانش و مهارت‌های لازم برای نوآوری و مسئولیت‌پذیری در حفظ محیط زیست برای توسعه پایدار تأکید می‌کند.

واژگان کلیدی: مهندسی شیمی، مهندسی شیمی سبز، فرایندهای شیمیایی، محیط زیست، برنامه درسی

۱- دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). evf@modares.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. saeed_rafiayan@modares.ac.ir

3- Green Chemistry

4- Green Engineering

۵- بوم‌شناسی برابرنباده فرهنگستان برای واژه اکولوژی است.

۱. مقدمه

توسعه صنعتی باعث بالا رفتن معیارهای زندگی و افزایش چشمگیر جمعیت جهانی (با وجود روند کاهشی رشد جمعیت کشورهای صنعتی در دو دهه اخیر) شده است. اما به طور هم‌زمان منجر به آلودگی محیط زیست و مسئله گرم شدن زمین و تغییرات آب‌وهوایی، به علت مصرف روزافزون انرژی‌های فسیلی شده است.

تولید محصولات شیمیایی، اگر چه نیازهای زندگی روزمره را برآورده می‌سازد اما میزان قابل توجهی از منابع طبیعی را مصرف می‌کند و با محصولات جانبی ناخواسته همراه است. مهندسان شیمی برای حل مشکلاتی چون کمبود انرژی و مواد خام، تأمین آب پایدار و تصفیه پساب، جذب و استفاده کربن، منابع انرژی تجدیدپذیر و پاک و تولید اقتصادی واکسنها و داروها تلاش میکنند. مهندسی شیمی مدرن به طور گسترده درگیر فرایندهای صنعتی است و به تلاشهای پژوهشی بسیاری برای بهینه‌سازی طراحی فرایندهای شیمیایی و توسعه کاتالیستهای کارآمد با رویکرد حفظ محیط زیست و پایداری^۱ نیاز دارد. با این ملاحظات "مهندسی شیمی سبز" در فصل مشترک "شیمی سبز" و "مهندسی سبز" با رویکرد پایداری، برای دستیابی به توسعه پایدار در فرایندهای شیمیایی/زیست‌شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است. از این رو، بازنگری برنامه‌های آموزش مهندسی شیمی متناسب با آن، در دهه قبل میلادی آغاز شده است و ادامه دارد.

۲. هدف و اصول دوازده‌گانه شیمی سبز

۲-۱. هدف شیمی سبز

هدف شیمی سبز طراحی و تولید محصولات و فرایندهای شیمیایی هزینه-رقابتی^۲ برای دستیابی به بالاترین تراز پیشگیری از آلودگی با سلسله‌مراتب زیر است (Anastas & Warner, 1998). هدف شیمی سبز طراحی و تولید محصولات و فرایندهای شیمیایی هزینه-رقابتی برای دستیابی به بالاترین تراز پیشگیری از آلودگی با سلسله‌مراتب زیر است.

۱. کاهش منبع و پیشگیری از خطرهای شیمیایی با رویکردهای:

- طراحی محصولات شیمیایی که برای سلامتی انسان و محیط زیست کم‌خطرتر باشند؛ تهیه محصولات شیمیایی از مواد اولیه، معرف‌ها و حلال‌هایی که برای سلامتی انسان و محیط زیست کم‌خطرتر هستند؛ طراحی سنتز و دیگر فرایندها با پسماند شیمیایی کاهش یافته یا بدون پسماند؛ طراحی محصولات شیمیایی برای استفاده دوباره یا بازیابی
- ۲. تیمار مواد شیمیایی برای کم‌خطر کردن آنها پیش از عرضه

۳. عرضه مواد شیمیایی تیمار نشده به صورت امن، تنها اگر گزینه‌های دیگر امکان پذیر نباشد

۲-۲. اصول دوازده‌گانه شیمی سبز

اصول دوازده‌گانه شیمی سبز عبارتند از (Anastas & Warner, 1998):

۱. پسماند را پیشگیری کن: سنتر شیمیایی را برای پیشگیری پسماند طراحی کن، پسماندی برای تصفیه و پاک کردن به جا نگذار.

۲. اقتصاد اتمی را ببین: سنترهایی را طراحی کن که محصول نهایی دارای حداکثر نسبت از مواد اولیه باشد، تعداد کمی یا هیچ اتمی هدر نرود.

۳. کم‌خطرترین سنتر شیمیایی را طراحی کن: سنترهایی را طراحی کن که موادی با حداقل سمیت یا غیرسمی برای انسان یا محیط زیست استفاده یا تولید کند.

۴. محصولات و مواد شیمیایی امن تر طراحی کن: محصولاتی شیمیایی را طراحی کن که کاملاً مؤثر اما دارای سمیت کم یا غیرسمی باشند.

۵. از حلال‌ها و شرایط واکنش امن تر استفاده کن: از حلال‌ها، عوامل جداسازی یا دیگر مواد شیمیایی کمکی پرهیز کن، اگر باید از این مواد استفاده کنی، امن تر را استفاده کن.

۶. بهره‌وری انرژی را افزایش بده: واکنش‌های شیمیایی را در دما و فشار اتاق هرگاه که ممکن است انجام بده.

۷. مواد اولیه تجدیدپذیر استفاده کن: از مواد اولیه تجدیدپذیر به جای پایان یافتنی استفاده کن. منبع مواد اولیه تجدیدپذیر، اغلب محصولات کشاورزی یا پسماندهای فرایندهای دیگر است و منبع مواد اولیه پایان یافتنی، اغلب سوخت‌های فسیلی (نفت، گاز طبیعی یا زغال سنگ) یا فرآورده‌های معدنی است.

۸. از مشتقات شیمیایی پرهیز کن: از پوشاندن یا حفاظت گروه‌های عاملی یا هرگونه اصلاحات موقتی، در صورت امکان پرهیز کن. مشتقات، عوامل اضافی را استفاده و تولید پسماند می‌کنند.

۹. از کاتالیست‌ها استفاده کن نه واکنشگرها (معرف‌های استوکیومتری): پسماند را با استفاده از کاتالیست‌ها کمینه کن. کاتالیست‌ها در مقدار کم برای انجام یک واکنش، چندین بار به کار می‌روند و بر معرف‌های استوکیومتری که در مقادیر اضافی برای انجام واکنش برای تنها یک بار به کار می‌روند، برتری دارند.

۱۰. محصولات و مواد شیمیایی ای را طراحی کن که پس از مصرف تخریب می‌شوند: محصولات شیمیایی ای را طراحی کن که به مواد بی‌ضرر تجزیه می‌شوند و پس از مصرف در محیط انباشته نمی‌شوند.

۱۱. به‌هنگام آنالیز کن تا از آلودگی پرهیز کنی: کنترل و پایش به‌هنگام بر فرایند را در طی سنتر برقرار کن تا تشکیل محصولات جانبی کمینه یا حذف شود.

۱۲. پتانسیل حوادث را کمینه کن: مواد شیمیایی و حالت‌های فیزیکی (جامد، مایع، گاز) را به‌گونه‌ای طراحی کن که پتانسیل حوادث شیمیایی، شامل انفجار، آتش‌سوزی و رها شدن در محیط زیست کمینه باشد (نویسنده: البته طراحی آرمانی باید به‌گونه‌ای باشد تا انفجاری رخ ندهد).

۳. اصول دوازده‌گانه مهندسی سبز

اصول دوازده‌گانه مهندسی سبز عبارتند از (Anastas & Zimmerman, 2003):

۱. ذاتی به جای موقعیتی: طراحان لازم است تلاش کنند تا اطمینان دهند که همه مواد و انرژی ورودی و خروجی، تا حد امکان به طور ذاتی غیرخطرناک باشند.
۲. پیشگیری به جای تیمار (درمان): پیشگیری از پسماند بهتر از تصفیه و پاک‌کردن پسماند پس از تشکیل آن است.
۳. طراحی برای جداسازی: عملیات جداسازی و خالص‌سازی باید برای کمینه‌سازی مصرف انرژی و مواد طراحی شوند.
۴. بیشینه‌سازی بهره‌وری: محصولات، فرایندها و سامانه‌ها باید برای بیشینه‌سازی بهره‌وری جرم، انرژی، فضا و زمان طراحی شوند.
۵. برون‌داد یا محصول محور در برابر درون‌داد یا خوراک‌محور: محصولات و مواد باید به جای درون‌داد محور، برون‌داد محور از طریق استفاده انرژی و مواد باشند. به عبارت دیگر، برون‌داد پایه به جای درون‌داد پایه باشند.
۶. پیچیدگی یا هم‌تافتگی^۳ را نگهدار: آنتروپی و پیچیدگی‌های جای‌گرفته باید هنگام گزینه‌های تصمیم‌گیری درباره بازگرداندن، استفاده دوباره یا آرایش مفید، به عنوان سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شود.
۷. دیرپایی به جای جاودانگی: دیرپایی هدفمند و نه جاودانگی باید یک هدف طراحی باشد.
۸. برآوردن نیاز، کمینه‌سازی موارد اضافی^۴: طراحی برای ایجاد ظرفیت یا توانمندی غیرضروری (به طور مثال، "یک اندازه برانزده همه است") باید یک کاستی طراحی در نظر گرفته شود.
۹. تنوع مواد را کمینه کن: تنوع مواد در محصولات چندجزئی، برای ارتقای پیاده کردن (باز کردن) و نگهداری ارزش باید کمینه شود.
۱۰. جریان‌های مواد و انرژی را یکپارچه کن: طراحی محصولات، فرایندها و سامانه‌ها باید شامل یکپارچه‌سازی و درهم پیوستگی با جریان‌های انرژی و مواد در دسترس باشند.
۱۱. برای "زندگی پس از مرگ"^۵ طراحی کن: محصولات فرایندها و سامانه‌ها باید برای کارایی در یک زندگی پس از مرگ طراحی شوند (پرهیز از تأثیرات غیرضرور پس از پایان یافتن عمر مفید یک محصول یا

1- Pulled-Out
4- Excess

2- Input-Pushed
5- After-Life

3- Complexity

فرایند، و قابل بازگشت به حالت اولیه یا قابل استفاده بودن).

۱۲. **تجدیدپذیر به جای پایمان یافتنی**: مواد انرژی ورودی باید به جای پایمان یافتنی، تجدیدپذیر باشند. اصول ۲۴گانه شیمی سبز و مهندسی سبز برای استفاده آسان تر، به صورت فشرده به شرح زیر، در جدول ۱ معرفی شده اند (Tang et al., 2008). با توجه به ارتباط الفبائی این اصول، این جدول به زبان انگلیسی درج می شود.

جدول ۱. اصول مهندسی شیمی سبز

Principles of Green Chemistry	Principles of Green Engineering
P - Prevent wastes	I - Inherently non-hazardous and safe
R - Renewable materials	M - Minimize material diversity
O - Omit derivatization steps	P - Prevention instead of treatment
D - Degradable chemical products	R - Renewable material and energy inputs
U - Use safe synthetic methods	O - Output-led design
C - Catalytic reagents	V - Very simple
T - Temperature, Pressure ambient	E - Efficient use of mass, energy, space & time
I - In-process monitoring	M - Meet the need
V - Very few auxiliary substances	E - Easy to separate by design
E - E-factor, maximize feed in product	N - Networks for exchange of local mass & energy
L - Low toxicity of chemical products	T - Test the life cycle of the design
Y - Yes it's safe	S - Sustainability throughout product life cycle

۴. مهندسی شیمی سبز

مهندسی شیمی سبز به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها برای دست یابی به توسعه پایدار در فرایندهای صنایع شیمیایی/زیست شیمیایی شناخته شده است.

مهندسی شیمی سبز به دو بخش عمده دسته بندی شده است (Riadi, 2019):

- مهندسی محصول سبز^۱: توسعه کاتالیست های نو و توسعه و استفاده از منابع تجدیدپذیر (مانند: انرژی خورشیدی و زیست توده)
- مهندسی فرایند سبز^۲: فشرده سازی (تشدید) فرایند^۳، محیط واکنش جدید، نگه داری^۴ انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای، رآکتورهای نوین، روش های جداسازی جدید و...

۵. معیارهای پایداری^۵

سه ستون اصلی پایداری عبارتند از: شکوفایی اقتصادی، حفاظت از محیط زیست، و توسعه اجتماعی - معیارهای ارزیابی پایداری متشکل از عامل های اقتصادی، محیط زیستی و اجتماعی است. جنبه های فناورانه و سیاسی می توانند بر اقتصاد، محیط زیست و کارایی های اجتماعی تأثیر بگذارند

1- Green product engineering
4- Conservation

2- Green process engineering
5- Sustainability

3- Process intensification

و از این رو، در این معیارها قرار می‌گیرند.

- چهارده معیار، با در نظر گرفتن چهار جنبه موضوعات اقتصادی، محیط زیستی، فناورانه و سیاسی اجتماعی برای ارزیابی پایداری سامانه‌های صنعتی مختلف، به شرح زیر تعیین شده است (Ren et al., 2016).

۱-۵. معیارهای اقتصادی

معیارهای اقتصادی عبارتند از:

۱. هزینه سرمایه‌گذاری: هزینه دستگاه‌ها، انتقال و ساخت هر واحد
۲. هزینه بهره‌برداری و نگهداری: هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری و نگهداری از هر واحد
۳. هزینه خوراک: هزینه‌های مواد خام
۴. هزینه تولید: هزینه کلی تولید محصولات هدف‌گذاری شده
۵. دسترس پذیری منابع: ظرفیت ذخیره خوراک کلیدی مورد استفاده در سامانه صنعتی شاخصی برای ظرفیت توسعه فناوری سامانه است. به طور مثال، ذخایر مختلف گیاه جاتروفا^۱، لوبیای سویا، روغن نخل و تخم شلغم روغنی بر مسیرهای تولید سوخت زیستی با استفاده از ذخایر متفاوت تأثیر می‌گذارد.

۲-۵. معیارهای زیست محیطی

معیارهای زیست محیطی عبارتند از:

۱. پتانسیل گرم شدن کره زمین: انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و متان، توسط سامانه‌های صنعتی جایگزین با واحد معادل گرم دی‌اکسیدکربن اندازه‌گیری می‌کند.
۲. پتانسیل اسیدی کردن: انتشار اسیدهای وارد شده در خاک و آب توسط سامانه صنعتی مختلف با واحد معادل گرم دی‌اکسید گوگرد

۳-۵. معیارهای فناورانه

معیارهای فناورانه عبارتند از:

۱. بلوغ: میزان بلوغ فناوری با چگونگی گسترش آن در تراز بین‌المللی و ملی
۲. بهره‌وری انرژی^۲: نسبت انرژی که می‌تواند توسط محصول تولید شود به انرژی لازم برای تولید محصول
۳. بهره‌وری کار مفید: نسبت حداکثر کار مفید خروجی توسط محصول به کل حداکثر کار مفید ورودی برای تولید محصول

۴. نوآوری فناوری: میزان نوآوری یکپارچه فناوری های جایگزین از نظر تجدیدپذیری چشم انداز آینده و دسترسی

۴-۵. معیارهای سیاسی - اجتماعی

معیارهای سیاسی - اجتماعی عبارتند از:

۱. پذیرش اجتماعی: اندازه گیری دیدگاه کلی مردم محلی درباره صنایع یا فناوری های مختلف
۲. تأثیر بر امنیت انرژی: اندازه گیری اثر سامانه صنعتی یا فناوری بر امنیت انرژی و کاهش وابستگی به وارد کردن انرژی با معرفی این فناوری (به ویژه انرژی های تجدیدناپذیر)
۳. کاربست پذیری سیاست: میزان سازگاری سامانه صنعتی با فناوری و سیاست های دولتی، مقررات و قوانین، این معیارها به دو نوع سخت^۱ و نرم^۲ با تعریف زیر تقسیم بندی می شوند: معیارهای سخت می توانند به طور مستقیم با استفاده از داده های موجود در کتاب ها، مقاله ها، گزارش های فنی و پیمایش واحدهای تولیدی و نیمه صنعتی امتیازبندی شوند، اما کمی کردن معیارهای نرم، توسط ذی نفعان و تصمیم گیران مشکل است.

۶. آموزش مهندسی شیمی سبز

شایستگی های اصلی دانشجویان برای برآوردن نیازهای بلندمدت مهندسی شیمی سبز عبارتند از (Haack & Hutchison, 2016):

۱. طراحی یا انتخاب مواد شیمیایی با عملکرد بهتر محصول و حفظ محیط زیست
۲. توسعه فرایندهای سنتز و واکنش جدید با بازدهی افزایش یافته؛
۳. ادغام مواد شیمیایی در محصولات یا فرمولاسیون برای افزایش عملکرد و کاهش اثرات در سراسر چرخه زندگی^۳.

تصمیم گیری در روبه رویی با عدم قطعیت یا مبادلات^۴ چندانکه

از این رو، گنجانیدن ابزارها و اصول مهندسی سبز در آموزش مهندسی شیمی، از مفهوم اولیه زیست محیطی به مفهوم گسترده تر "پایداری" انتقال یافته است. مفهوم پایداری در این دیدگاه عبارت است از "مسیری روبه جلو که به بشریت اجازه می دهد تا نیازهای کنونی محیطی و سلامت انسان، اقتصادی و اجتماعی را بدون به خطر انداختن پیشرفت و موفقیت نسل های آینده برآورده کند".

ابزار طراحی شامل هر دو اصل کلی، مانند ۱۲ اصل مهندسی سبز و همچنین تجزیه و تحلیل کمی بیشتر مواد، عملیات واحد و نقشه های جریان^۵ است که شامل استفاده از گروه های ابزار طراحی به

1- Hard

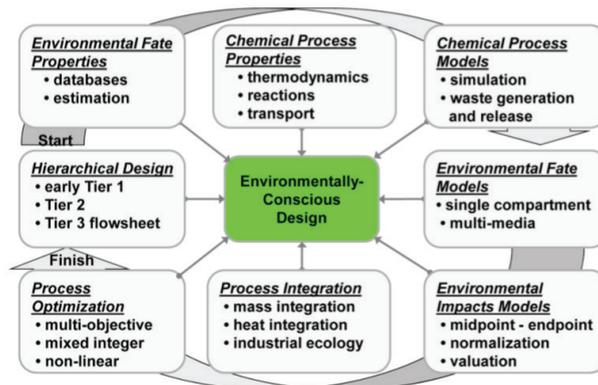
4- Trade-off

2- Soft

5- Fowsheets

3- life cycle

کمک رایانه است و به عنوان نمونه، در شکل ۱ نشان داده شده است (Allen et al., 2016).



شکل ۱. چارچوبی جامع برای طراحی محیطی آگاهانه. این چارچوب طراحی سلسله‌مراتبی، بهینه‌سازی فرایند، خواص فرایند شیمیایی، مدل‌های فرایند شیمیایی، مدل‌های سرنوشت زیست‌محیطی و مدل‌های اثرات زیست‌محیطی را برای ترویج شیوه‌های مهندسی پایدار یکپارچه می‌کند.

داشتن شایستگی‌های زیر برای دانش‌آموختگان مهندسی شیمی، توسط مؤسسه شیمی سبز انجمن شیمی آمریکا (ACS GCI) اعلام شده است (Reichmanis & Sabahi, 2017):

- طراحی و/ یا انتخاب مواد شیمیایی که عملکرد محصول و پایداری (اجتماعی/ انسانی، محیطی و اقتصادی) را از دیدگاه چرخه زندگی بهبود می‌بخشد
- طراحی و/ یا انتخاب فرایندهای شیمیایی‌ای که بسیار کارآمد هستند، از مواد اولیه جایگزین استفاده می‌کنند و این کار را در حالی انجام می‌دهند که کمترین مقدار پسماند را تولید می‌کنند
- درک چگونگی استفاده یا ادغام مواد شیمیایی در محصولات، برای دستیابی به بهترین مزیت برای مشتریان و در عین حال، به حداقل رساندن اثرات پایداری چرخه زندگی با در نظر گرفتن تفکر چرخه زندگی و تجزیه و واکاوای سامانه‌ها، فکر کنید و تصمیم بگیرید.

در حال حاضر، بسیاری از دانشگاه‌ها دانش، روش‌ها و مهارت‌های مهندسی سبز را در برنامه‌های آموزشی خود با تمرکز بر تدریس درس‌ها، گنجانده‌اند. از نظر روش تدریس، برخی از دانشگاه‌ها مفهوم مهندسی سبز را در درس‌های موجود گنجانده‌اند، مانند تولید شیمیایی سبز در درس مهندسی واکنش شیمیایی. برخی از دانشگاه‌ها، درس‌های جداگانه، مانند شیمی سبز و مهندسی سبز ارائه می‌دهند (Mason, 2020). برخی دیگر، تغییرات سبز را در فهرست مطالب درس موجود می‌کنند، مانند درس انتقال گرما (Flynn, 2005). شایان ذکر است که دانشکده^۲ شیمی و مهندسی شیمی سبز دانشگاه

تولید و ایالت اوهایو آمریکا، در سال ۲۰۱۱ میلادی تأسیس شد و برنامه آن برای دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد به شرح جدول‌های ۲ و ۳ است (Mason, 2020).

جدول ۲. درس‌های مهندسی شیمی و مهندسی شیمی سبز دانشگاه تولید و (Toledo) آمریکا

Course	Title	Credit hours
The following are required:		
CHEM 2410	Organic chemistry I	3
CHEM 2420	Organic chemistry II	3
CHEM 4200	Green chemistry	3
CHEE 4010*	Green engineering principles for chemical processes	3
Select at least one of the following courses:		
CHEM 4210	Environmental chemistry	3
CHEE 4110	Green engineering applications in chemical industries	3
Select at least one of the following courses:		
CHEM 3810	Chemistry of sustainable energy resources	3
CHEE 4120	Biofuels	3
EEES 4220	Environmental geochemistry	3
EEES 4450	Hazardous waste management	3
ECON 3240	Environmental economics	3
PSC 4340	Environmental policy	3
Total		21

جدول ۳. درس‌های مورد نیاز برای مدرک PSM در شیمی و مهندسی شیمی سبز دانشگاه تولید و (Toledo) آمریکا

Course	Title	Credit hours
CHEM 6200	Green chemistry	3
CHEM 6210	Environmental chemistry	3
CHEE 6010	Green engineering principles for chemical processes	3
CHEE 6110	Green engineering applications in chemical industries	3
BUAD 6600*	Supply chain management	3
EFSB 6690 OR	Technology commercialization	3

ادامه جدول ۳

Course	Title	Credit hours
EFSB 6590 OR	New venture creation	3
CHEM/CHEE 6970	Graduate industrial internship	6
	Elective courses in chemistry, chemical engineering, and materials science	12
Total		36

این رویکردها در گسترش مفهوم آموزش مهندسی شیمی سبز نقش مثبتی ایفا کرده‌اند. با این حال، هنوز نیاز به تقویت کاربرد عمیق اصول مهندسی سبز و بهبود کیفیت تربیت استعدادهایی با آگاهی از شیمی سبز وجود دارد (Yue et al., 2023).

جالب توجه است که به نظر پروفیسور چن و همکارش، مهندسی شیمی مقصر اصلی مشکلات زیست محیطی در "عصر سبز" تلقی می‌شود و برای مقابله با چالش‌های پیش روی صنعت، بخش‌های مرتبط در نظام آموزش عالی باید به فکر ارائه مجموعه‌ای از دوره‌هایی باشند که نیازهای عصر جدید را برآورده کند. جالب توجه است که در این ارتباط، ایشان توسعه آموزش مهندسی سامانه فرایندی (PSE) به ویژه کنترل فرایند را به امید ایفای نقش کلیدی در رهبری صنعت و بهبود رفاه انسان‌ها پیشنهاد کرده‌اند (Lee & Chen, 2016). ایشان پس از طرح نقدهایی به شیوه آموزش درس کنترل فرایند و کتاب درسی مربوط "دینامیک‌ها و کنترل فرایند"، چارچوب جدیدی را همراه با کتاب‌های درسی دیگر برای این درس پیشنهاد داده‌اند. پیشنهاد می‌شود همکاران محترمی که این درس را ارائه می‌دهند، به منبع مربوط مراجعه فرمایند.

پروفیسور ژانگ از دانشکده مهندسی شیمی کالج فنی و حرفه‌ای پویانگ^۱ چین نتیجه‌گیری کرده است که برای توسعه شیمی و مهندسی شیمی با استفاده از ایده "سبز"، باید روش‌های تولید سبز را به کار گرفت و توجه به تربیت استعدادها در این زمینه تخصصی، جهت و هدف اصلی تلاش‌های آینده این کشور در زمینه شیمی و مهندسی شیمی خواهد بود (Zhang, 2017).

در طراحی فرایند سبز برای پیشگیری از آلودگی، پایداری و بازطراحی^۲ می‌توان نرم‌افزارهایی، مانند گرین اسکوپ^۳، الگوریتم وار^۴، و ساستین پرو^۵ را به کار برد (Ruiz-Mercado et al., 2016). از این رو، پیشنهاد می‌شود از این‌گونه نرم‌افزارها، در آموزش درس "طراحی مفهومی فرایندهای شیمیایی" استفاده شود.

با توجه به ضرورت استفاده همه مهندسان از اصول مهندسی سبز، گنجاندن این مفهوم در برنامه

1- Puyang vocational and technical college

2- Retrofit

3- GREENSCOPE

4- WAR Algorithm

5- SustainPro

درسی مقطع کارشناسی اهمیت ویژه دارد. رویکرد اصلی در این ارتباط، ادغام مفاهیم مهندسی سبز در درس‌های مختلف مهندسی شیمی است. از این رو گنجاندن این مفهوم در درس‌هایی، مانند موازنه مواد و انرژی، پدیده‌های انتقال، ترمودینامیک به ویژه در سامانه‌های تک‌فاز و چند فاز، مهندسی واکنش‌های شیمیایی (طراحی رآکتور)، فرایند جداسازی، طراحی فرایند، کنترل فرایند و حتی درس‌های تخصصی زیست‌فناوری و فناوری نانو پیشنهاد شده است (García-Serna et al., 2007; Riadi, 2019). نخستین درسی که می‌توان مفهوم مهندسی سبز را در مهندسی شیمی گنجانند، موازنه مواد و انرژی است. جدول ۴ برخی از مباحث مفهومی مهندسی سبز ارائه شده در این درس را نشان می‌دهد (Slater & Hesketh, 2004).

جدول ۴. مباحث مهندسی سبز مفهومی در درس موازنه مواد و انرژی (Slater & Hesketh, 2004)

Green Engineering topic	M&E balances topic
Balances on recycle operation in green engineering process; green chemistry in stoichiometry; combustion process and environmental impact	Fundamentals of material balances
Various forms of energy in a green engineering process	Energy and energy balances
Use of heat capacity and phase change calculation; recovery of energy in process-energy integration; mixing and solution issues in green engineering	Nonreactive process balance
Energy use in green chemistry reaction, combustion process; overall mass and energy balances in green engineering on an overall plant design basis	Reactive process balance

نمونه‌ای دیگر از گنجاندن مهندسی سبز در برنامه درسی بخش مهندسی شیمی دانشگاه روئن آمریکا، در جدول ۵ نشان داده شده است (Mason, 2020).

جدول ۵. مباحث مهندسی شیمی سبز در دانشگاه Rowan آمریکا

Chemical Engineering Course	Green Engineering Topic
Freshman engineering clinic	Green engineering project drip coffee maker Introduction to environmental regulations Introduction to life cycle assessment
Sophomore engineering clinic	Life cycle assessment of a product Environmental regulations
Material & energy balances	Emissions terminology/calculations "Green" material and energy balances
Mass transfer/Equilibrium stage separations	Mass separating agent Risk assessment

ادامه جدول ۵

Chemical Engineering Course	Green Engineering Topic
Material science	Estimation of properties Life cycle assessment
Heat transfer	Introduction to heat integration
Chemical thermodynamics	Estimation of chemical properties
Separation processes	Pollution prevention strategies Novel "Green" separation process integration
Chemical reaction engineering	Pollution prevention strategies Green chemistry
Process/Plant design	Heat integration & mass integration Flowsheet analysis Life cycle assessment
Process dynamics & control	Pollution prevention modeling and control
Unit operations laboratory	Green engineering experiments
Design for pollution prevention	Heat and mass integration Process analysis
Senior engineering clinic/Senior project	Real industrial projects in green engineering

افزون بر مورد بالا، می‌توان به گنجاندن مفهوم مهندسی سبز در دو درس پشت سر هم "فرایندهای جداسازی"، در برنامه درسی مهندسی شیمی این دانشگاه اشاره کرد (Mariano et al., 2004). این مفهوم‌ها بر اساس مطالب کتاب درسی مربوط به نام "مهندسی سبز: طراحی آگاهانه فرایند شیمیایی از دیدگاه زیست‌محیطی" (Spargo, 2004) در این دو درس گنجانده شده‌اند. شایان ذکر است که این کتاب، شامل سه بخش اصلی (۱) راهنمای مهندس شیمی به مسائل و مقررات زیست‌محیطی، (۲) کاهش خطرات زیست‌محیطی برای فرایندهای شیمیایی، و (۳) حرکت فراتر از مرز واحد است. این دو درس به عنوان درس‌های مه‌اد دوره کارشناسی و دوره تحصیلات تکمیلی مهندسی شیمی طراحی شده‌اند. مفهوم «مهندسی سبز» در جدول‌های ۴ گانه، متناسب با موضوع انواع فرایندهای جداسازی برای راهنمایی مدرسان با توجه به هر فصل کتاب درسی یادشده، پوشش داده شده است. به دلیل تعداد زیاد جدول‌ها و گستردگی مطالب مربوط، امکان ارائه آنها در این مقاله کوتاه وجود ندارد و همکاران محترم دانشگاهی و صنعتی علاقه‌مند می‌توانند به منبع مربوط (Mariano et al., 2004) مراجعه کنند. در برنامه آموزشی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه‌های کنتابریا^۱ و ایالتی باسک^۲ اسپانیا، که شامل ۹۰ واحد بر اساس نظام آموزشی اروپا (ETCS) است، یک درس انتخابی^۳ واحدی به نام «ارزیابی

1- Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes

2- Cantabria

3- Basque

چرخه عمر محصول و فرایند» با تأکید بر آموزش مسئله محور پیرامون مهندسی سبز وجود دارد. با توجه به محدودیت تعداد درس ها و برنامه آموزشی، گنجاندن موضوعات مربوط به مهندسی شیمی سبز در درس های موجود توصیه می شود.

۷. نتیجه گیری

ادغام اصول مهندسی شیمی سبز در برنامه درسی مهندسی شیمی، نشان دهنده پیشرفت قابل توجهی به سمت توسعه پایدار در فرایندهای شیمیایی و زیست شیمیایی است. این رویکرد با تمرکز بر توسعه محصولات و فرایندهای سبز، در کنار تأکید بر اهمیت معیارهای پایداری شامل رقابت اقتصادی، حفاظت از محیط زیست و توسعه اجتماعی، مهندسان آینده را برای رسیدگی به چالش های پیچیده کاهش اثرات زیست محیطی و در عین حال افزایش منافع اقتصادی و اجتماعی آماده می کند. این مقاله بر ضرورت ترکیب ابزارها و اصول مهندسی سبز در سراسر آموزش مهندسی شیمی، از مقطع کارشناسی تا کارشناسی ارشد، برای پرورش نسل جدیدی از مهندسان مجهز به دانش و مهارت ها برای نوآوری برای آینده ای پایدار تأکید می کند. این راهبرد آموزشی جامع، نه تنها به نیاز توجه فوری به موارد محیط زیستی پاسخ می دهد بلکه با تقاضاهای در حال تحول حرفه مهندسی شیمی در قرن بیست و یکم نیز همسواست.

References

- Allen, D. T., Shonnard, D. R., Huang, Y., & Schuster, D. (2016). Green engineering education in chemical engineering curricula: a quarter century of progress and prospects for future transformations. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 5850–5854. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b01443>.
- Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: theory and practice*. Oxford University Press. <https://books.google.nl/books?id=SrO8QgAACAAJ>.
- Anastas, P. T., & Zimmerman, J. B. (2003). Design through the 12 principles of green engineering. *Environ Sci Technol*, 37(5), 94a–101a. <https://doi.org/10.1021/es032373>.
- Flynn, A. M. (2005). Assessing the incorporation of green engineering into a design-oriented heat transfer course. *Chemical Engineering Education*, 39, 320–327.
- Garcia-Serna, J., Pérez-Barrigón, L., & Cocero, M. J. (2007). New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering. *Chemical Engineering Journal*, 133(1), 7–30. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.02.028>.
- Haack, J. A., & Hutchison, J. E. (2016). Green chemistry education: 25 years of progress and 25 years ahead. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 5889–5896. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02069>.
- Lee, J.-Y., & Chen, C.-L. (2016). A proposal for charting the undergraduate process control course for the 21st century. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.044>.
- Mariano, S., Stephanie, F., Robert, H., & Slater, C. S. (2004/06/20). The novel use of green engineering concepts in teaching separations salt lake city, Utah. <https://peer.asee.org/13665>.
- Mason, M. R. (2020). Greening the curriculum at the University of Toledo School of green chemistry and engineering. *Physical Sciences Reviews*, 5(7). <https://doi.org/doi:10.1515/psr-2020-000>.

- Reichmanis, E., & Sabahi, M. (2017). Life cycle inventory assessment as a sustainable chemistry and engineering education tool. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(11), 9603–9613. <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.7b03144>.
- Riadi, L. (2019). Green chemical engineering: challenges in chemical industrial processes for a better life. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 703(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/703/1/012002>.
- Ruiz-Mercado, G. J., Carvalho, A., & Cabezas, H. (2016). Using green chemistry and engineering principles to design, assess, and retrofit chemical processes for sustainability. *ACS Sustain Chem Eng*, 4(11), 6208–6221. <https://doi.org/10.1021/acsschemeng.6b02200>.
- Slater, C. S., & Hesketh, R. (2004). Incorporating green engineering into a material and energy balance course. *Chemical Engineering Education*, 38, 48–53.
- Spargo, P. L. (2004). Green engineering: Environmentally conscious design of chemical processes by David T. Allen and David R. Shonnard. Prentice Hall PTR: New Jersey. 2002. 552 pp. £51.99. ISBN 0–13–061908–6. *Organic Process Research & Development*, 8(6), 1083–1083. <https://doi.org/10.1021/op049881a>.
- Tang, S. Y., Bourne, R. A., Smith, R. L., & Poliakoff, M. (2008). The 24 principles of green engineering and green chemistry: “Improvements productively” [10.1039/B719469M]. *Green Chemistry*, 10(3), 268–269. <https://doi.org/10.1039/B719469M>.
- Yue, C.-J., Gu, L.-P., Ma, S.-S., Sun, X., Dai, N., Zhang, Z.-W., & Liu, B.-L. (2023). Improving undergraduate graduation chemical design using green techniques based on green engineering principles. *Education for Chemical Engineers*, 44, 96–103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.05.003>.
- Zhang, Y. (2017). Discussion on the development of green chemistry and chemical engineering. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 94(1), 012136. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/94/1/012136>.



◀ **دکتر ابراهیم واشقانی فراهانی:** متولد ۱۳۳۳ و دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی شیمی از دانشگاه مگ گیل کانادا هستند. ایشان دوبار به عنوان استاد نمونه و چندبار به عنوان پژوهشگر برتر دانشگاه تربیت مدرس انتخاب شده‌اند. همچنین به عنوان استاد برجسته مهندسی شیمی سال ۱۴۰۰ از سوی فرهنگستان علوم جمهوری اسلامی ایران انتخاب شده‌اند و هم‌اکنون عضو وابسته شاخه مهندسی شیمی این فرهنگستان هستند. زمینه فعالیت‌های پژوهشی ایشان، شامل تهیه هیدروژل‌ها و کاربرد آنها در سامانه‌های نوین دارورسانی، سلول درمانی و مهندسی بافت است.



◀ **سعید رفعیان:** دانش‌آموخته مهندسی شیمی - مهندسی زیست‌پزشکی دانشگاه تربیت مدرس هستند. تمرکز تحقیقاتی ایشان بر استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پژوهش‌های مهندسی شیمی و مهندسی پزشکی است.

نقش فناوری‌های دیجیتال در ارتقای آموزش مهندسی شیمی

علی محمد سهل‌الدین^{*۱} و رحمت ستوده قره‌باغ^{*۲}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۴

DOI: 10.22047/ijee.2024.446961.2060

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.3.2

چکیده: این مقاله به بررسی تأثیر فناوری‌های دیجیتال بر آموزش مهندسی شیمی می‌پردازد. با توسعه روزافزون این فناوری‌ها، ابزارها و محیط‌های آموزشی نیز تغییر کرده‌اند و روش‌های سنتی آموزش، به روش‌های مدرن و تعاملی تبدیل شده‌اند. در این نوشته، ابتدا به مزایای استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آموزش اشاره می‌گردد و سپس به ابزارهای مختلفی که در این حوزه استفاده می‌شوند، از جمله صفحه گسترده‌ها، نرم‌افزارهای ریاضی، شبیه‌سازهای صنعتی، واقعیت مجازی و افزوده، و ابزارهای متنوع هوش مصنوعی پرداخته می‌شود. همچنین، فرصت‌ها و چالش‌های موجود، در استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی نیز بررسی می‌شوند. به علاوه، استنتاج‌های کلیدی، برای استفاده بهینه از فناوری‌های دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی و توسعه مهارت‌های حرفه‌ای دانشجویان ارائه می‌شود. این مقاله می‌تواند به دانشجویان، اساتید و محققان در حوزه مهندسی شیمی کمک کند تا با استفاده از فناوری‌های دیجیتال، آموزش مهندسی شیمی را بهبود و ضمن تبدیل چالش‌ها به فرصت‌های جدید، برای خلق ابزارهای پیشرفته، راهکارهایی مناسب را برای استفاده بهینه از این فناوری‌ها در برنامه‌های آموزشی ایجاد و تجربه نمایند.

واژگان کلیدی: فناوری‌های دیجیتال، آموزش مهندسی، شبیه‌سازی، هوش مصنوعی، واقعیت مجازی، واقعیت افزوده

*۱- استادیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). sahloodin@aut.ac.ir

*۲- استاد دانشکده مهندسی شیمی دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). sotideh@ut.ac.ir

۱. مقدمه

توسعه و فراگیری فناوری‌های دیجیتال از نیمه دوم قرن بیستم میلادی، این قرن را به عصر دیجیتالی مشهور کرد. با اختراع و آسان شدن دسترسی به رایانه‌های دیجیتال، استفاده از آنها در عرصه‌های اداری، صنعتی و آموزشی فراگیر شد. به عنوان مثال نرم‌افزارهای صفحه گسترده^۱، به عنوان ابزارهایی مفید و کاربردی برای نگهداری منظم و تحلیل داده و انجام محاسبات ریاضی متداول، جایگزین محاسبات دستی و کاغذی شد. در اواخر قرن بیستم و هم‌زمان با توسعه سخت‌افزاری و نرم‌افزاری ابزارهای دیجیتال و وابسته شدن جوامع به آنها، آموزش این ابزارها به دانشجویان و استفاده از آنها در برنامه درسی رشته‌های مختلف دانشگاهی، از جمله مهندسی مورد توجه برنامه‌ریزان آموزشی قرار گرفت. رشته مهندسی شیمی نیز به عنوان یکی از شاخه‌های مهندسی که ارتباط تنگاتنگی با مسائل طراحی و محاسباتی دارد، از این قاعده مستثنی نبوده است. به عنوان مثال، دروسی مانند کارگاه نرم‌افزار برای تدریس زبان‌های برنامه‌نویسی^۲ و نرم‌افزارهای شبیه‌سازی فرایند (Sotudeh-Gharebagh & Zia-Zarifi, 2005) به بخشی از برنامه مهندسی شیمی تبدیل شده‌اند. کتاب‌های متعددی نیز مانند (Adams II, 2022; Coker & Sotudeh-Gharebagh, 2022; Sotudeh-Gharebagh & Jabbari, 2021) در این خصوص برای دانشجویان تألیف شده است. برخی کتاب‌های اصلی مهندسی شیمی نیز که سال‌ها در دانشگاه‌های دنیا تدریس می‌شده است، مورد بازنگری قرار گرفته‌اند و در ویرایش‌های بعدی خود، از نرم‌افزارهای مرتبط برای بهبود انتقال مفاهیم و آموزش دانشجویان استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، کتاب سه جلدی "طراحی فرایند کاربردی برای کارخانه‌های شیمیایی و پتروشیمی" (Ludwig, 2001) که از مهم‌ترین کتاب‌های طراحی محسوب می‌شود، به درخواست ناشر و به وسیله یکی از نویسندگان بنام، به روزرسانی شده و به نام این نویسنده جدید، به چاپ رسیده است (Coker, 2007). در این به‌روزرسانی، مباحث جدیدی اضافه شده است تا خوانندگان بتوانند با نرم‌افزار اکسل و شبیه‌سازی^۳ به تجزیه و تحلیل کاربردی مسائل و طراحی فرایند و تجهیزات اقدام کنند. کتاب "مهندسی واکنش‌های شیمیایی" نوشته فاکلر (Fogler, 2021) نیز یک نمونه عالی از ترکیب ابزارهای متنوع دیجیتال و بسته‌های دیجیتالی تعاملی تحت وب را برای ارتقای یادگیری دانشجویان ارائه می‌دهد. همچنین کتاب دینامیک و کنترل فرایند (Seborg et al., 2017) در ویرایش‌های جدید خود، به معرفی و استفاده از ابزارهایی مانند Matlab simulink و Labview به منظور انتقال بهتر مفاهیم کنترل فرایند به دانشجویان پرداخته است.

با رشد سریع فناوری‌های دیجیتال در قرن بیست و یکم و افزایش نجومی سرعت محاسبات از هزار

1- Spreadsheets

2- <https://cutt.ly/awNavP3g>, accessed on Feb. 2024 (Amirkabir University of Technology)

3- UniSim©

گیگا فلاپس^۱ در سال ۱۹۹۷ به یک میلیارد گیگا فلاپس در سال ۲۰۲۲^۲، به ویژه پیشرفت علمی مانند هوش مصنوعی و علم داده، ابزارهای دیجیتال، مفهومی به مراتب فراتر از نرم‌افزارهایی محاسباتی با شبیه‌سازی پیدا کرده‌اند. دامنه این رشد و تجاری‌سازی‌های مرتبط با آن به حدی وسیع بوده است که از آن به عنوان انقلاب صنعتی چهارم^۳ یاد می‌شود. انتظار می‌رود انقلاب صنعتی چهارم به یکپارچه‌سازی هدفمند فناوری‌هایی، مانند هوش مصنوعی، علوم داده، محاسبات کوانتم، و اینترنت اشیا تغییرات اساسی در نحوه کارکرد صنایع منجر شود. نمونه این تغییرات، سوق دادن صنایع به سمت سطوح بالای اتوماسیون از طریق ایجاد بسترهای خودکار تبادل داده بین تجهیزات ماشینی و نیز بین اپراتور انسانی و این تجهیزات است. سطح بالای اتوماسیون می‌تواند نیاز به دخالت انسان در فرایندهای تولید را کاهش دهد و باعث افزایش بهره‌وری شود.

همگام با شروع انقلاب صنعتی چهارم و سوق تدریجی صنایع به دیجیتالی شدن^۴، این موضوع در کنار صنعت مورد توجه دانشگاه‌ها نیز قرار گرفته است. با تغییر رویکرد صنایع به سمت دیجیتالی شدن به عنوان یک ابررود^۵ (Udugama et al., 2023)، دانش‌آموختگان مهندسی شیمی امروز نه تنها باید دارای دانش کلاسیک مهندسی شیمی باشند، بلکه باید تا حدی نیز مجهز به دانش فناوری‌های دیجیتال و کاربردهای آن در صنایع مرتبط باشند. تنها در این صورت است که این افراد می‌توانند صنایع شیمیایی را با تکیه بر توان داخلی و استفاده مطلوب از کمک‌های بین‌المللی از نظر دیجیتالی شدن و افزایش بهره‌وری به‌روزرسانی کنند. طبق مشاهدات نویسندگان این مقاله، متأسفانه دانشجویان مهندسی شیمی، حتی در مقطع کارشناسی ارشد، با برخی ابزارهای متداول مهندسی شیمی، مانند صفحه گسترده‌ها، نرم‌افزارهای محاسباتی چون متلب^۶ یا شبیه‌سازهای فرایند آشنایی کافی ندارند یا حتی از آن استفاده نیز نکرده‌اند. این نشان می‌دهد در برخی از دانشگاه‌ها، آموزش مهارت‌های نرم‌افزاری یا استفاده از ابزارهای دیجیتال معمول در دروس مهندسی وجود ندارد یا به اندازه کافی جدی گرفته نمی‌شود. جهت ایجاد مهارت‌های دیجیتالی لازم در دانشجویان و به تبع آن در دانش‌آموختگان، لازم است نحوه تدریس و استفاده از ابزارهای دیجیتال در دانشگاه‌ها به‌روزرسانی شود. قدم اول در این راه، شناخت درست سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان درسی از مفاهیمی مانند دیجیتالی شدن و ابزارهای متداول دیجیتال در آموزش مهندسی است. این ابزارها از سویی می‌توانند به ارتقای آموزش مهندسی به دانشجویان کمک کند و از سوی دیگر، دانش‌آموختگان را مجهز به دانش لازم برای به‌روزرسانی صنایع با هدف استفاده بهینه از ابزارهای دیجیتال نمایند.

1- Floating-point operations per second (FLOPS)

2- <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386670>, accessed on Feb. 2024

3- https://en.wikipedia.org/wiki/Fourth_Industrial_Revolution

4- Digitalization

5- Megatrend

6- Matlab

امروزه ابزارهای دیجیتال، گستره وسیعی از نرم‌افزارهای قدیمی محاسباتی و شبیه‌سازی تا ابزارهای نوین مبتنی بر هوش مصنوعی را شامل می‌شود. کاربرد ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی به حدی است که گفته می‌شود تا ۴۰ درصد اشتغال جهانی می‌تواند تحت تأثیر آن واقع شود (Cazzaniga et al., 2024). این موضوع سؤالات متعددی را برای برنامه‌ریزان آموزشی که دغدغه به‌روزرسانی شیوه و محتوای آموزش مهندسی شیمی را دارند، ایجاد کرده است. از جمله:

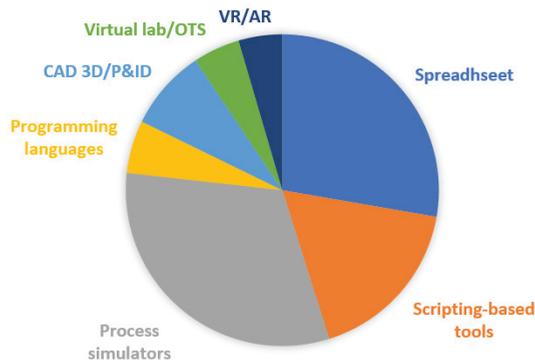
۱. در به‌روزرسانی برنامه درسی چه مطالبی باید آموزش داده شود تا به کارگیری ابزارهای دیجیتال توسط دانش‌آموختگان در صنایع تسهیل شود؟ (Udugama et al., 2023)
۲. چگونه می‌توان از ابزارهای دیجیتال در آموزش و پژوهش در مهندسی شیمی استفاده کرد؟ (Udugama et al., 2023)
۳. آزمایشگاه‌ها و تجهیزات نیمه‌صنعتی در دانشگاه‌ها چطور باید به فناوری‌های دیجیتال مجهز شوند؟
۴. اساتید چگونه باید برای استفاده از ابزارهای دیجیتال به دانشجویان آماده شوند؟
۵. سازمان‌های اعتباربخشی به برنامه‌های مهندسی، مانند ABET^۱ چگونه باید معیارها و شیوه ارزیابی خود را با روندهای دیجیتالی شدن تطبیق دهند؟

برای پاسخ به این گونه سؤالات باید پژوهش‌های جدی از سوی سیاست‌گذاران آموزشی صورت گیرد. در این راستا لازم است از دانشگاه‌ها که متولی امر آموزش هستند، تا دانش‌آموختگان شاغل در صنعت و صنایع به طور عام نظرسنجی‌های جداگانه و تخصصی صورت گیرد. تحلیل نتایج این نظرسنجی‌ها، به فهم بهتر نیازهای صنعت در حوزه دیجیتالی شدن و به تبع آن، برنامه‌ریزی آموزشی مناسب به منظور پاسخ به این نیاز در دانشگاه کمک شایانی خواهد کرد. تا آنجا که نویسندگان مطلع هستند، چنین نظرسنجی‌ای هنوز در ایران گزارش نشده است. اما اخیراً نظرسنجی‌هایی در کشورهایمانند نیوزلند (Udugama et al., 2023, 2022) انجام شده و نتایج آن به چاپ رسیده است. برای پاسخ به سؤال اول از فهرست بالا، (Udugama et al., 2022) سه نظرسنجی از دانش‌آموختگان مهندسی شیمی دانشگاه آکلند^۲، اساتید دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه این دانشگاه و متخصصان بین‌المللی فناوری‌های دیجیتال انجام دادند. جمع‌بندی مطالعه مذکور این بود که باید یک روش ترکیبی، شامل تعریف دروس جدید یا اضافه نمودن مباحث تکمیلی در خصوص مفاهیم دیجیتالی کردن در دروس فعلی به کار گرفته شود.

برای پاسخ به سؤال دوم در خصوص چگونگی استفاده از ابزارهای دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی، اودوگاما^۳ و همکاران به مرور منابع علمی مرتبط در خصوص ابزارهای دیجیتال موجود، از نرم‌افزارهایی مانند اکسل گرفته تا واقعیت افزوده، پرداختند (Udugama et al., 2023). سپس این ابزارها

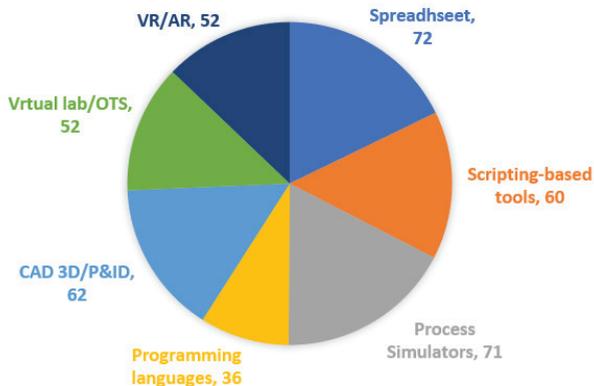
را تحت عنوان هفت فناوری کلی شامل ۱) نرم‌افزارهای صفحه‌گسترده مانند اکسل، ۲) نرم‌افزارهای کدنویسی و محاسبات مهندسی مانند متلب^۱، ۳) شبیه‌سازهای تجاری فرایند، ۴) زبان‌های برنامه‌نویسی، ۵) نرم‌افزارهای رسم سه‌بعدی مانند اتوکد، ۶) آزمایشگاه‌های مجازی و شبیه‌سازهای آموزش اپراتور^۲ و ۷) واقعیت مجازی و واقعیت افزوده دسته‌بندی کردند. با این دسته‌بندی، نظرسنجی هدفمندی را جهت شناسایی مزایا و نیز محدودیت‌های اقتصادی و عملی استفاده از این فناوری‌ها در آموزش دروس اصلی مهندسی شیمی، شامل ترمودینامیک، موازنه جرم و انرژی، انتقال جرم و حرارت، راکتور، فرایندهای جداسازی، طراحی فرایند، کنترل فرایند و ایمنی فرایند طراحی کردند. پاسخ‌دهندگان به این نظرسنجی باید اعلام می‌کردند که در هر یک از این دروس، از کدام یک از ابزارهای دیجیتال هفت‌گانه (در صورت موجود بودن) استفاده می‌کردند. پاسخ‌دهندگان همچنین اجازه داشتند برای یک درس معین، به بیش از یک ابزار اشاره کنند.

نظرات پاسخ‌دهندگان به تفکیک درس و ابزارهای دیجیتال مورد استفاده در هر درس، در (Udu- gama et al., 2023) گزارش شده است. در مقاله حاضر، با استفاده از داده‌های مرجع فوق، نتایج بدون تفکیک درس به صورت نمودار شکل ۱ آورده شده است. برای تهیه این نمودار، علاقه‌مندی پاسخ‌دهندگان به یک ابزار خاص (مانند شبیه‌سازی فرایند) در همه دروس مورد بحث، جمع زده شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ابزارهایی که بیشترین اقبال را از سوی مدرسان دارند، شبیه‌سازهای فرایند و نرم‌های صفحه‌گسترده مانند اکسل هستند. پس از آن نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی، مانند متلب در جایگاه سوم قرار دارد. پاسخ‌دهندگان به پرسش‌نامه، سهم کمی را برای ابزارهای دیجیتال دیگر در تدریس خود قائل هستند. البته این سهم کم لزوماً به معنای مفید نبودن ابزارهای دیگر، مانند واقعیت مجازی و افزوده در ارتقای تدریس نیست.



شکل ۱. تمایل پاسخ‌دهندگان به استفاده از ابزارهای دیجیتال در تدریس دروس

لازم به ذکر است که پاسخ‌دهندگان، به دلیل در دسترس نبودن ابزارهای پیشرفته و آشنا نبودن خود یا دانشجویان با نحوه استفاده از آنها، ترجیح داده‌اند از ابزارهای متداول‌تر که به مهارت کمتری نیاز دارند، استفاده کنند. به عنوان مثال زبان‌های برنامه‌نویسی مانند سی پلاس، علی‌رغم کاربرد فراوان، به دلیل نیاز به دانش تخصصی برنامه‌نویسی و صرف وقت بیشتر نسبت به متلب^۲، کمتر به عنوان یک ابزار کمک آموزشی در تدریس مورد اقبال دانشجویان و اساتید قرار می‌گیرند. شاهد این مدعی نمودار شکل ۲ است که مفید بودن هر یک از ابزارهای دیجیتال مذکور در تدریس را از نظر همان پاسخ‌دهندگان نشان می‌دهد. مانند نمودار دایره‌ای شکل ۱، این نمودار نیز از داده‌های مرجع (Udugama et al., 2023) استخراج شده است که در آن پاسخ‌دهندگان، مفید بودن هر یک از ابزارهای دیجیتال را برای ارتقای تدریس در مقطع کارشناسی به صورت کیفی با عبارات "عالی"، "خیلی خوب"، "خوب"، "متوسط"، و "ضعیف" رتبه‌بندی کردند. در مقاله حاضر با اختصاص ضرایب وزنی ۵، ۴، ۳، ۲، و ۱ به عبارات "عالی" تا "ضعیف" نتایج این نظرسنجی به صورت کمی درآمده و در نمودار دایره‌ای شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل ۲. مفید بودن هر یک از ابزارهای دیجیتال در تدریس دروس از نظر پاسخ‌دهندگان

اعداد نشان‌دهنده در کنار هر قطاع، بیانگر امتیاز مفید بودن ابزار مربوط از نظر پاسخ‌دهندگان و با در نظر گرفتن ضرایب وزنی است. جهت مقایسه، عدد ۸۰ بالاترین امتیازی است که یک ابزار می‌توانست کسب کند، در صورتی که همه پاسخ‌دهندگان میزان مفید بودن آن را "عالی" در نظر گرفته باشند. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، پاسخ‌دهندگان معتقد هستند که ابزارهای رسم سه‌بعدی و ابزارهای جدیدی مانند واقعیت مجازی و افزوده و آزمایشگاه مجازی، در ارتقای سطح تدریس بسیار

مفید هستند. لذا همان طور که گفته شد، علت عدم اقبال کافی پاسخ دهندگان به ابزارهای جدید را می توان صرفاً در سختی دسترسی به این ابزارها با توجه به امکانات فعلی در نظر گرفت و این نافی مفید بودن این ابزارها در تدریس نیست. در واقع عدم تمایل به استفاده از یک فناوری جدید مانند واقعیت مجازی در عین اعتقاد به اهمیت آن، نیروی محرکه ای است که می تواند باعث حرکت در دسترس پذیرتر شدن این فناوری ها شود. البته ذکر این نکته ضروری است که نظرسنجی انجام شده در (Udugama et al., 2023) از جمعیت آماری بسیار کوچک اما با تخصص های متنوع در حوزه مهندسی شیمی گرفته شده است. پیشنهاد می شود در آینده، مشابه این نظرسنجی، از دانشگاهیان داخلی و در یک جامعه آماری به مراتب بزرگتر انجام شود.

با توجه به حرکت پرشتاب صنایع شیمیایی به سمت دیجیتالی شدن و نقش فناوری های دیجیتال در افزایش بهره وری تولید و توسعه پایدار (Little, 2023)، نیاز است جایگاه این فناوری ها در برنامه درسی مهندسی شیمی ارتقا یابد. مقاله حاضر در تلاش است تا با مرور فناوری های دیجیتال در مهندسی شیمی و وضعیت فعلی استفاده از آنها در برنامه های درسی، فواید و چالش های استفاده از این فناوری ها، به ویژه فناوری های نوظهوری مانند هوش مصنوعی مولد^۱ را در برنامه آموزشی مهندسی شیمی مورد بررسی قرار دهد. طبعاً استفاده از این فناوری ها جهت ارتقای آموزش و سطح مهارت دانش آموختگان، ملزومات و چالش هایی دارد که در این مقاله به آن پرداخته می شود.

۲. فناوری های دیجیتال و کاربرد آنها در مهندسی شیمی

در این بخش فناوری های دیجیتال مورد استفاده در مهندسی شیمی، دسته بندی و معرفی می شوند. از آن جایی که همه این فناوری ها از لحاظ قدمت و گستره استفاده، یکسان نیستند، تقسیم بندی آنها در سه دسته فناوری های متداول، پیشرفته، و مبتنی بر هوش مصنوعی مولد انجام شده است.

۲-۱. فناوری های دیجیتال متداول در مهندسی شیمی

۲-۱-۱. نرم افزارهای صفحه گسترده

نرم افزارهای صفحه گسترده، به عنوان یک ابزار چندمنظوره، به طور وسیعی در مشاغل مختلف اداری و صنعتی مورد استفاده قرار می گیرند. مزیت های اصلی این نرم افزارها، استفاده آسان از آنها با حداقل آموزش، امکانات زیاد در انجام محاسبات معمول ریاضی و مصورسازی نتایج، در قالب انواع نمودارهای دو یا سه بعدی است. برای کاربردهای پیشرفته با بیش از ۳۰۰ تابع داخلی^۲ این نرم افزارها قابلیت هایی، مانند حل انواع معادلات، مسائل بهینه سازی غیرخطی و محاسبات فنی و اقتصادی را نیز ارائه

می‌دهند. کاربران پیشرفته می‌توانند با برنامه‌نویسی (مانند VBA^۱ در اکسل) و ایجاد ماکرو، مدل‌ها و محاسبات پیچیده را نیز در نرم‌افزارهای صفحه‌گسترده پیاده کنند.

نرم‌افزارهای صفحه‌گسترده می‌توانند در آموزش دروس مهندسی شیمی که با محاسبات سروکار دارند، مورد استفاده قرار بگیرند. انجام تحلیل حساسیت^۲ یا مطالعات موردی^۳، برازش^۴ منحنی و تخمین پارامترهای مدل، از کاربردهای مهم این نرم‌افزارها در دروسی مانند طراحی رآکتور و بهینه‌سازی فرایند است که به وسیله ابزارهای بهینه‌سازی نرم‌افزار قابل انجام است. در درس شبیه‌سازی فرایند نیز می‌توان از قابلیت‌های برنامه‌نویسی VBA برای توسعه مدل یک تجهیز جدید و اتصال آن به شبیه‌سازی فرایند، مانند اسپن پلاس^۵ بهره برد. البته صفحه‌گسترده‌ها بسیار متنوع هستند و فهرست ده صفحه‌گسترده کاربردی مهم در سایت Semrush با ویژگی‌های مثبت و منفی آنها آورده شده است.^۶

۲-۱-۲. نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی

منظور از نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی، نرم‌افزارهایی است که حاوی توابع محاسباتی تخصصی ازپیش‌نوشته‌شده^۷ هستند که می‌توانند با یک رابط گرافیکی کاربر (GUI)^۸ یا زبان برنامه‌نویسی سطح بالا^۹ مورد استفاده قرار گیرند. کاربر می‌تواند در محیط این نرم‌افزارها، بدون نیاز به دانش تخصصی برنامه‌نویسی، توابع محاسباتی را با دستورات معین فراخوانده و مدل‌های پیچیده فیزیکی را پیاده‌سازی و شبیه‌سازی کند. نرم‌افزارهایی مانند متلب^{۱۰}، پایتون^{۱۱}، اسکیلاب^{۱۲} و اکتاو^{۱۳}، از این دسته نرم‌افزارها هستند. نرم‌افزارهایی مانند متلب و پایتون، به طور گسترده در دروسی مانند محاسبات عددی، کاربرد ریاضیات در مهندسی شیمی، بهینه‌سازی فرایند و کنترل فرایند استفاده می‌شوند. شایان ذکر است که نرم‌افزار اکتاو به صورت رایگان ارائه می‌شود و به گونه‌ای توسعه داده شده است که کد و غالب دستورات متلب، در آن عیناً قابل اجرا باشد. نرم‌افزار اسکیلاب نیز رایگان است و دارای ابزارهای محاسبات تخصصی مشابه متلب است. به عنوان مثال ابزار اکسی‌اُس^{۱۴} در اسکیلاب مشابه سیمولینک^{۱۵} در متلب، یک محیط گرافیکی برای شبیه‌سازی دینامیک سامانه‌ها و کنترل ارائه می‌دهد که می‌تواند در درس کنترل فرایند مورد استفاده قرار گیرد. در درس شبیه‌سازی فرایند نیز دانشجویان می‌توانند از طریق پروتکل CAPE-OPEN^{۱۶} از این نرم‌افزارها برای پیاده‌سازی مدل تجهیزات خاص (مانند مازول غشایی) و جاسازی آن در شبیه‌سازی فرایند که این تجهیز در آن به صورت ازپیش‌ساخته وجود ندارد، استفاده کنند.

1- Visual Basic for Applications (VBA)

2- Sensitivity analysis

3- Case studies

4- Regression

5- Aspen Plus

6- <https://www.semrush.com/blog/spreadsheet-software>, accessed on Feb. 2024

7- Built-in

8- Graphic user interface (GUI)

9- High-level programming languages

10- Matlab

11- Python

12- <https://www.scilab.org>

13- Octave

14- xcos

15- Simulink

16- <https://www.colan.org>

۲-۱-۳. زبان‌های برنامه‌نویسی

بر خلاف نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی، زبان‌های برنامه‌نویسی مانند فرتن، C و ++C دارای توابع و ساختارهای آماده برای محاسبات مهندسی نیستند و استفاده از آنها، نیاز به حدی از دانش برنامه‌نویسی دارد که غالباً توقع نمی‌رود دانشجویان عادی از آن برخوردار باشند. اما در عوض، این زبان‌ها با داشتن ساختار برنامه‌نویسی نزدیک به زبان ماشین، به کاربران حرفه‌ای اجازه می‌دهد برنامه‌هایی را توسعه دهند که زمان اجرای به مراتب کوتاه‌تری نسبت به نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی مانند متلب داشته باشد. به عنوان مثال، فرایند تنسی ایستمن که به عنوان یک فرایند شاهد جهت آزمودن روش‌های بهینه‌سازی و کنترل در (Downs & Vogel, 1993) معرفی شد، به وسیله نویسندگان آن مقاله در زبان فرتن پیاده شد. لذا داشتن دانش متوسط برنامه‌نویسی در یک یا چند نوع از این زبان‌ها به دانشجویان توصیه می‌شود. در مواردی حتی استفاده از این زبان‌ها برای مهندسان شیمی که به شبیه‌سازی فرایندهای غیرمعمول می‌پردازند، اجتناب‌ناپذیر است. به عنوان مثال، برای شبیه‌سازی ماژول غشایی در اسپن‌پلاس، کاربر باید مدل مربوط را در زبان‌هایی مانند فرتن پیاده و به شبیه‌ساز اضافه کند. لذا تسلط به زبان‌هایی مانند فرتن و سی‌پلاس به همراه تفکر برنامه‌نویسی شی‌گرا، مزیت عمده‌ای به مهندسان شیمی در خلق ابزارهای دیجیتال جدید مرتبط با این رشته می‌دهد. به دلیل اهمیت این موضوع و این که دروس برنامه‌نویسی غالباً در سال آغازین که دانشجویان با مفاهیم مهندسی شیمی آشنا نیستند ارائه می‌شود، (Teles dos Santos et al., 2018) پیشنهاد کردند که درس برنامه‌نویسی دیگری به صورت اختیاری به دانشجویان سال آخر ارائه شود تا دانشجویان بتوانند برنامه‌نویسی پیشرفته را با مثال‌های مهندسی شیمی فرا بگیرند.

۲-۱-۴. نرم‌افزارهای کاربردی موضوع محور

منظور از نرم‌افزارهای موضوع محور برنامه‌هایی کاربردی است که برای یک درس یا موضوع خاص توسعه داده شده‌اند. به عنوان مثال، نرم‌افزار فست^۲ یک ابزار تخصصی تحلیل مخاطرات و ایمنی فرایندی است که در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نرم‌افزارهای موضوع محور محاسبات مورد نیاز از پیش تعریف شده است و تمرکز کاربر بر تعریف سناریو و استفاده از گزینه‌های مناسب نرم‌افزار برای حل یا تحلیل آن است. البته برخی نرم‌افزارها که لزوماً محاسبات خاصی را انجام نمی‌دهند و بیشتر حاوی داده‌های دستنامه‌ای^۳ مانند خواص مواد هستند را نیز می‌توان در این دسته جای داد. نرم‌افزار^۴ Chemical reactivity worksheet که برای بررسی مخاطرات شیمیایی مخلوط‌ها به کار می‌رود از این دسته است.

1- Object-oriented programming

2- <https://www.dnv.com/software/services/plant/consequence-analysis-phast.html>

3- Handbook

4- <https://www.aiche.org/ccps/resources/downloadinstall>

۲-۱-۵. ابزارهای رسم نمودارهای فرایندی و تصویرنمایی سه بعدی

نرم افزارهای رسم CAD^۱ با امکانات تخصصی خود، جایگاه ویژه‌ای در رسم و طراحی در رشته‌های مختلف مهندسی دارند. در مهندسی شیمی می‌توان از این نرم افزارها در رسم دیاگرام جعبه‌ای فرایند^۲، دیاگرام جریان فرایند^۳ و دیاگرام لوله‌کشی و ابزار دقیق^۴ استفاده کرد. در دروسی مانند کارگاه نقشه‌خوانی و نقشه‌کشی فرایند، دانشجویان از نرم افزار CAD برای رسم دیاگرام‌های مذکور استفاده می‌کنند. همچنین قابلیت‌های رسم و نمایش سه بعدی در برخی از این نرم افزارها، امکان درک بهتر ساختار فرایند، اندازه تجهیزات و اتصالات موجود در آن را به دانشجویان می‌دهد. لذا استفاده از این نرم افزارها باعث ارتقای کیفیت آموزش در دروسی مانند طراحی فرایند و حتی طراحی محصول می‌شود.

۲-۱-۶. شبیه‌سازهای صنعتی

شبیه‌سازهای تجاری از دهه‌ها پیش برای طراحی، بهبود و بهینه‌سازی فرایند و نیز ارزیابی اقتصادی و یافتن گلوگاه‌های بهره‌برداری مورد استفاده مهندسان شاغل در صنعت بوده است. همگام با این روند، آموزش آن در برنامه کارشناسی مهندسی شیمی، در دانشگاه‌های دنیا مورد توجه قرار گرفته است. از یک دیدگاه می‌توان شبیه‌سازها را به دو دسته زیر تقسیم کرد:

۶. شبیه‌سازهای تجهیزات یا پدیده‌های فرایندی، مانند Ansys Fluent، COMSOL، و OpenFOAM که برای بررسی دقیق پارامترهای وابسته به مکان و زمان در تجهیز با حل هم‌زمان معادلات پدیده‌های انتقال، شامل مومنتم، حرارت، جرم و نیز واکنش‌های شیمیایی مناسب به کار می‌روند. استفاده از این شبیه‌سازها در دروسی که به بررسی این پدیده‌ها درون تجهیزات می‌پردازد، توصیه می‌شود.

۷. شبیه‌سازهای فرایند (یا فلوشیت)، مانند Aspen Plus، Aspen HYSYS، و PROII که قادر هستند یک فرایند جامع حاوی تجهیزات مختلف را شبیه‌سازی کنند. این شبیه‌سازها در دروسی مانند ترمودینامیک، مکانیک سیالات، عملیات واحد، ایمنی فرایند، کنترل فرایند، طراحی فرایند، و طرح و اقتصاد مهندسی شیمی، کاربرد فراوان دارند.

در سال‌های اخیر شرکت‌های تولیدکننده شبیه‌سازهای فرایندی، مانند Aspen Technology، با شتاب قابل توجهی ارتقا یافته‌اند و تنوع بخشی محصولات خود را با استفاده از علوم داده و ابزارهای هوش مصنوعی از جمله یادگیری ماشینی در برنامه قرار داده‌اند. این حرکت در پاسخ به اشتیاق صنایع شیمیایی به افزایش بهره‌وری از طریق دیجیتالی شدن و استفاده از ابزارهای جدیدی، مانند دوقلوی دیجیتال و اینترنت اشیا صورت می‌گیرد. خوانندگان می‌توانند جهت جزئیات بیشتر به وب‌سایت شرکت Aspen Technology^۵ مراجعه کنند.

1- Computer-Aided Design (CAD)

2- Block Flow Diagram (BFD)

3- Process Flow Diagram (PFD)

4- Piping and Instrumentation Diagram (P&ID)

5- <https://www.aspentech.com/en>

۲-۲. فناوری‌های دیجیتال پیشرفته در مهندسی شیمی

با پیشرفت سریع فناوری‌های دیجیتال در سال‌های اخیر، ابزارهای جدیدی به وجود آمده است که تجربه‌ای به مراتب فراتر از فناوری‌های متداول را به کاربر می‌دهد. در جدول ۱ فهرست تعدادی از فناوری‌های منتخب دیجیتال پیشرفته با کاربرد آموزشی و صنعتی در مهندسی شیمی آورده شده است.

جدول ۱. فناوری‌های منتخب دیجیتال پیشرفته با کاربرد آموزشی و صنعتی در مهندسی شیمی

ردیف	نام فناوری	تعریف اجمالی	کاربردها
۱	دوقلوی دیجیتال	تقلید عملکرد دینامیکی یک تجهیز یا فرایند به صورت هم‌زمان با نسخه دیجیتال آن، بر مبنای شبیه‌سازی دقیق و به‌روزرسانی مستمر مدل با داده‌های واقعی (Guo et al., 2023)	<ul style="list-style-type: none"> پایش و پیش‌بینی زمان خرابی تجهیز بهینه‌سازی و بهبود فرایند، عیب‌یابی از راه دور
۲	مجازی	شبیه‌سازی تجربه فضای واقعی (مانند یک فرایند شیمیایی) با خلق رایانه‌ای محیط سه‌بعدی تعاملی با کاربر و استفاده از حسگرها و تجهیزات مصورسازی خاص جهت القای حس حضور فیزیکی کاربر	<ul style="list-style-type: none"> شبیه‌سازی آموزش بدون نیاز به محیط واقعی بازدید مجازی از کارخانه آزمایشگاه مجازی
	افزوده	افزودن لایه‌های دیجیتالی به دنیای واقعی (مانند تجهیز فرایندی) جهت ایجاد تعامل به‌هنگام و ارتقای تجربه و درک کاربر از تجهیز مورد نظر	<ul style="list-style-type: none"> آموزش ترکیبی محیط شبیه‌سازی-واقعی ایجاد فضای کار گروهی از راه دور با به‌اشتراک‌گذاشتن محیط مجازی واحد آزمایشگاه مجازی
۳	محاسبات ابری	انجام پردازش و ذخیره اطلاعات با به‌اشتراک‌گذاری منابع محاسباتی توزیع شده شبکه‌ای از سرورها در بستر اینترنت	<ul style="list-style-type: none"> کاهش هزینه زیرساختی و عملیاتی ذخیره حجم بالای اطلاعات قابلیت استفاده از خدمات ابری بدون پیش‌نیازهای سخت‌افزاری-نرم‌افزاری ویژه
۴	محاسبات کوانتومی	انجام محاسبات بسیار پیچیده و زمان‌بر با استفاده از اصول مکانیک کوانتوم با سرعتی به مراتب بالاتر نسبت رایانه‌های معمولی	<ul style="list-style-type: none"> شبیه‌سازی مولکولی طراحی مواد با خواص ارتقایافته طراحی انواع داروها طراحی فرمولاسیون‌های جدید (Little, 2023)

لازم به ذکر است که نمی‌توان مرزبندی دقیقی بین فناوری‌های دیجیتال متداول و پیشرفته انجام داد. برخی فناوری‌های پیشرفته، مانند دوقلوی دیجیتال، در واقع ترکیبی نو از فناوری‌های متداول، مانند شبیه‌سازی فرایند علوم داده و هوش مصنوعی (به همراه سخت‌افزارهای مربوط، مانند حسگرها) هستند. همچنین هوش مصنوعی، به عنوان یک ابزار بین‌رشته‌ای در فناوری‌هایی مانند واقعیت مجازی و افزوده نقش کلیدی دارد. در واقع هوش مصنوعی را می‌توان به عنوان یک ابزار قدرتمند دانست که سهم بزرگی را در ارتقای اغلب فناوری‌های دیجیتال و خلق ابزارهای نو مانند واقعیت مجازی و افزوده و هوش مصنوعی مولد ایفا کرده است. از طرفی، صنعت به سرعت در حال دیجیتالی شدن و

جذب سرمایه‌گذاری روی فناوری‌های جدید است (Little, 2023). لذا لازم است این فناوری‌ها جایگاه ویژه‌ای در آموزش مهندسی پیدا کنند (Feise & Schaer, 2021). برآوردهای بازار جهانی صنایع شیمیایی دیجیتال نشان می‌دهد که در ۱۰ سال آینده فناوری‌های اینترنت اشیا، چاپ سه بعدی، واقعیت مجازی^۱، واقعیت افزوده^۲، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال اهمیت زیادی پیدا خواهند کرد^۳. در این میان سهم بیش از ۶۰ درصدی در تولید ارزش افزوده در صنعت، به واقعیت مجازی و واقعیت افزوده اختصاص پیدا می‌کند^۴. لذا آموزش این دو فناوری در کنار هوش مصنوعی اهمیت ویژه‌ای دارد که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته می‌شود.

۲-۱. واقعیت افزوده و مجازی

موضوع استفاده از واقعیت افزوده و واقعیت مجازی، که می‌توان آن را به اختصار واقعیت افزازی نامید، به عنوان یک ابزار نوین یادگیری فعال در مهندسی شیمی اخیراً در مقالات متعددی مورد بحث واقع شده است. همان‌طور که در جدول ۱ ذکر شد، در واقعیت مجازی، کاربر حضور مجازی در یک فضای واقعی را تجربه می‌کند. در انواع پیشرفته واقعیت مجازی، کاربر به کمک ابزارهایی مانند دستکش‌های دارای حسگر و عینک‌های مخصوص، خود را به طور جزئی یا کامل^۵ غوطه‌ور در یک محیط شبیه‌سازی واقع‌گرایانه سه بعدی حس می‌کند. استفاده از این ابزار در آموزش که با طراحی و بهره‌برداری از تجهیزات فرایندی و پدیده‌های پیچیده فیزیکی- شیمیایی درون آن سروکار دارد، بسیار مفید خواهد بود. سابقه استفاده از واقعیت مجازی در آموزش مهندسی شیمی، به بیش از دو دهه پیش بازمی‌گردد. در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه میشیگان، یک واحد شیمیایی دارای رآکتور کاتالیستی، در قالب یک برنامه کاربردی واقعیت مجازی توسط (Bell & Fogler, 1996) توسعه داده شد. در این برنامه دانشجویان وارد یک واحد شیمیایی مجازی می‌شدند و می‌توانستند ضمن بررسی و راه‌اندازی یک رآکتور کاتالیستی در مقیاس ماکرو، با ورود به لایه‌های میکرویی شبیه‌ساز، پدیده نفوذ به حفره‌های کاتالیست و غیرفعال شدن آن را حتی در سطح مولکولی مشاهده کنند. در تلاشی دیگر، یک ابزار واقعیت مجازی برای آموزش واحد تقطیر نفت خام از طریق تور مجازی واحد توسط (Norton et al., 2008) توسعه داده و معرفی شد. در (Pirola et al., 2020) نیز یک ابزار واقعیت مجازی با تکیه بر شبیه‌ساز دینامیکی DYN-SIM برای واحد تقطیر نفت خام توسعه داده شد. واقعیت مجازی چنانچه با مدل‌های ریاضی فرایندی ترکیب شود، می‌تواند کاربردی به مراتب فراتر از مشاهده

1- Virtual Reality (VR)

2- Augmented Reality (AR)

3- <https://newsinsightace.com/2023/05/29/digital-chemical-industry-market-size-share-and-trends-analysis-report-2023-2031-2/>

4- <https://www.insightaceanalytic.com/report/global-digital-chemical-industry-market-/1190>

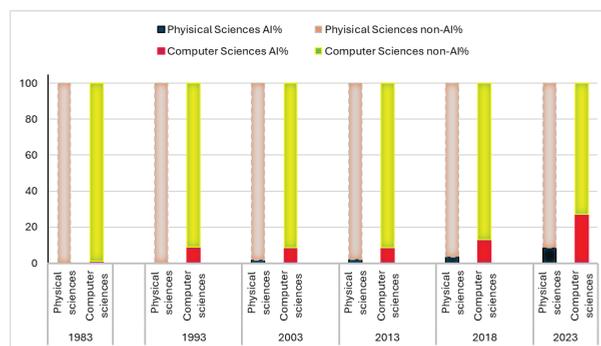
5- Semi- and fully immersive virtual reality

سه بعدی و تور مجازی داشته باشد (Kumar et al., 2021). در این صورت واقعیت مجازی می‌تواند برای شبیه‌سازی سناریوهای ایمنی و عملیاتی، مانند پدیده انفجار در راکتورها و طغیان در برج تقطیر، در دروسی مانند ایمنی فرایند و عملیات واحد استفاده شود.

در مواقعی که غوطه‌ور شدن کامل کاربر در محیط مجازی توجیهی ندارد و از طرفی نیاز است یک ارتباط تعاملی بین دنیای واقعی و مجازی ایجاد شود، فناوری واقعیت افزوده می‌تواند ابزار آموزشی کارآمدی باشد (Solmaz et al., 2021). در این فناوری، محتوای مجازی به صورت تعاملی، به دنیای واقعی افزوده می‌شود. اخیراً واقعیت افزوده در آموزش مهندسی شیمی مورد توجه قرار گرفته است (Udugama et al., 2023). در مقاله (Solmaz et al., 2021) یک ابزار واقعیت افزوده، برای آموزش مفاهیم مهندسی شیمی از طریق یک فرایند مجازی تولید صابون مایع ارائه شد. جهت مواجهه دانشجویان با چالش‌های افزایش مقیاس در اختلاط و یافتن طراحی بهینه، ابزار ارائه شده به شبیه‌ساز دینامیک سیالات محاسباتی نیز مجهز بود. ابزارهایی نیز برای آموزش عملکرد پمپ و مبدل حرارتی به کمک واقعیت افزوده توسط (Low et al., 2022) توسعه داده شد. در (Gunawan et al., 2021) نیز یک ابزار واقعیت افزوده، برای آموزش بهتر برج تقطیر در درس عملیات واحد توسعه داده شد.

۲-۳. فناوری‌های دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی مولد

در دهه‌های اخیر، اقبال به هوش مصنوعی در پژوهش‌های دانشگاهی روبه‌افزایش بوده است. شکل ۳، درصد مقالات منتشر شده‌ای را که مرتبط با هوش مصنوعی هستند، در دو حوزه علوم فیزیکی و علوم رایانه نشان می‌دهد (Van Noorden & Perkel, 2023) همان‌طور که مشاهده می‌شود، از دهه هشتاد میلادی (که سهم مقالات مرتبط با هوش مصنوعی بسیار ناچیز بوده است) تا سال ۲۰۲۳ سهم مقالات مرتبط با هوش مصنوعی در علوم فیزیکی و علوم رایانه به ترتیب به حدود ۸ و ۲۷ درصد رشد کرده است. نکته جالب توجه این است که این رشد در حوزه علوم رایانه به مراتب بیشتر بوده است چرا که



شکل ۳. درصد مقالات حوزه علوم فیزیکی و علوم رایانه مرتبط با هوش مصنوعی

علوم رایانه زیرساخت‌های لازم را برای پیشرفت ابزارهای هوش مصنوعی در علوم و مهندسی فراهم می‌کند. یکی از این پیشرفت‌ها در سال‌های اخیر، توسعه فناوری هوش مصنوعی مولد است. این فناوری توانایی‌های شگرفی از جمله ایجاد محتوای جدید، مانند متن، کد رایانه‌ای، تصویر، صدا، ویدئو، خلاصه‌سازی و ویرایش متون، پرسش و پاسخ و طبقه‌بندی محتوی دارد. هوش مصنوعی مولد باعث تحول بنیادین در آموزش، پژوهش و فضای کسب‌وکار خواهد شد.

هوش مصنوعی مولد می‌تواند به عنوان یک ابزار کمکی در طراحی، محاسبات اقتصادی، مدل‌سازی، کدنویسی و ترسیم خودکار، به کمک مهندسان شیمی بیاید. شکل ۴ نمای سه‌بعدی یک واحد تقطیر نفت خام را که با هوش مصنوعی مولد رسم شده است، نشان می‌دهد. باید توجه داشت که با وجود شباهت ظاهری به یک فرایند تقطیر، نمی‌توان دقت شکل ترسیم شده را از نظر فنی به طور کامل تأیید کرد. در هر صورت، استفاده از ربات‌های ترسیم‌کننده می‌تواند نقطه شروع خوبی برای رسم شکل‌های پیچیده برای استفاده در کلاس یا ارائه‌های شفاهی باشد.



شکل ۴. نمای سه‌بعدی فرایند تقطیر نفت خام رسم شده با StableDiffusionXL

هوش مصنوعی مولد می‌تواند در مطالعات امکان‌سنجی و تهیه طرح اقتصادی فرایندی نیز مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۵ طرح توجیه فنی و اقتصادی برای یک مینی‌پالایشگاه به ظرفیت ۲۰۰ بشکه در روز را که توسط ربات^۲ AIBusinessPlan تولید شده است، نشان می‌دهد. خروجی ارائه شده می‌تواند حدس اولیه خوبی جهت بررسی دقیق فنی و اقتصادی فرایند مورد نظر باشد. اما با توجه به تأثیر عواملی چون موقعیت جغرافیایی-سیاسی کشور مورد نظر و هزینه‌های تمام‌شده در آن، در استفاده مستقیم از نتایج تولیدشده توسط این‌گونه ربات‌ها باید احتیاط کرد. لازم به توضیح است که نسخه

1- <https://poe.com/StableDiffusionXL?chat=21s1djohn53gznt99og&botId=1579852#imageViewer>

2- <https://poe.com/AiBusinessPlan>

رایگان این ابزار هوش مصنوعی، محدودیت دفعات استفاده دارد و کاربران برای استفاده کامل باید اشتراک رسمی را دریافت کنند.

Please prepare a business plan for a minirefinery with the capacity of 200 BPD crude oil in 200 Words.

AiBusinessPlan Poe

I wish to establish a mini-refinery with a capacity of 200 barrels per day (BPD) for the efficient processing of crude oil, meeting the local demand for refined products and reducing dependence on imports.

Component	Description
Idea Name	Petrolite Refinery
One Liner	Providing a local, sustainable solution for refining crude oil with a 200 BPD mini-refinery, meeting the demand for quality refined products in the region.
Target User Persona	Local oil producers, small-scale refiners, and distributors in need of reliable and efficient refining services.
User's pain Points	Dependence on imports for refined products, lack of local refining options, high transportation costs, limited access to quality refined products.
Key Activities	Refining operations, logistics management, quality control, customer relationship management.
Key Resources	Mini-refinery unit, skilled workforce, crude oil supply agreements, product storage facilities.
Key Partners	Local oil producers for crude oil supply, distributors for product sales, chemical suppliers, industry associations for networking and collaboration.
Idea Validation Steps	Analyze local market demand and competition, conduct feasibility studies on technical and economic aspects, gather feedback from potential users.
1st Year Cost of Operation	Estimated \$5 million, including equipment setup, operational expenses, crude oil procurement and marketing costs.
Potential Business Challenges	Obtaining necessary regulatory approvals and permits, securing reliable crude oil supply, maintaining competitive pricing, ensuring efficient operations and adherence to environmental and safety standards, managing market fluctuations in crude oil prices and demand for refined products.

شکل ۵. طرح توجیه فنی و اقتصادی ارائه شده توسط AiBusinessPlan

تولید ابزارهای مبتنی بر هوش مصنوعی مولد برای ارتقای آموزش و پژوهش، اخیراً مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به عنوان مثال، یک ابزار برای رسم و تکمیل خودکار نمودار جریان فرایند توسط (Vogel et al., 2023) توسعه داده شد. در تلاشی دیگر، ابزاری برای تولید و پیشنهاد خودکار ساختار کنترلی که یکی از مراحل مهم طراحی فرایند است، در (Hirtreiter et al., 2024) معرفی شد. البته این ابزارها جهت ارائه خروجی مطلوب، نیازمند یادگیری، تعریف دقیق مسئله و تحلیل خروجی، با تعداد بسیار زیادی داده مرتبط، مانند نمودارهای جریان فرایند و ساختارهای کنترلی موجود هستند. جدول ۲ فهرست Chatbot های کاربردی برای مهندسی شیمی را نشان می دهد. با یک جستجو در

اینترنت هم می‌توان ابزارهای متنوعی را شناسایی و برای کاربردهای مختلف از آنها استفاده کرد^۱.

جدول ۲. Chatbot یا بسترهای منتخب قابل استفاده در مهندسی شیمی^۲

نام بات/بستر	مزایا	معایب
Microsoft Copilot	رایگان، به‌روز، دسترسی به اینترنت، استفاده از مدل زبانی بزرگ OpenAI ^۳	پایه‌گذاری در Bing، استفاده به صورت پرسش و پاسخ متنی
ChatGPT	مهارت‌های نوشتاری، دانش علوم و مهندسی، گفتگومحور	عدم دسترسی به اینترنت، عدم دسترسی دائمی، نیاز به اشتراک پولی به GPT-4
Claude	رایگان، پشتیبانی از بارگذاری فایل‌ها، کنترل‌های گفتگو، حالت روشن و تاریک	عدم پیوستگی دانشی، سقف استفاده مبهم
Perplexity	دسترسی به اینترنت، پیوند به منابع، دارای رابط کاربری ساده، پیشنهاد سؤال ^۴	نیاز به اشتراک پولی به GPT-4 خروجی‌های اغلب غیرمرتبط
Jasper	دارای قالب نوشتاری، قابلیت ویرایش، چک کردن سرعت ادبی و گرامر، مناسب برای کارهای تجاری و بازرگانی	نیاز به اشتراک برای استفاده، هزینه بالا، نیاز به اشتراک پولی به GPT-4
YouChat	دسترسی رایگان و راحت، پیوند به منابع، دسترسی به گوگل	عدم پایداری در خروجی
Chatsonic	رایگان، مناسب برای مقاله‌نویسی، موارد استفاده متنوع، به‌روز	نیاز به ثبت نام، تأخیر در دادن جواب
Gemini	نسخه جدید Bard شرکت گوگل، مجانی، دسترسی به گوگل، مهارت خوب در ویرایش متون	عدم پیوند به منابع، ضعف در کدنویسی
HuggingChat	رایگان، تولید بات‌های جدید، رابطه گرافیکی کاربر خوب، قابل شخصی‌سازی	نیاز به مهارت متوسط و پیشرفته برای تولید بات، نیاز به ایجاد حساب کاربری
POE ^۵	رایگان برای تعداد استفاده محدود، حاوی بات‌های متنوع مثل (ChatGPT, Assistant, UniversityGPT, ChemistryAI, , ChemicalGPT, AIBusiness Plan, (DALL-E, etc برای ویرایش متون، جستجو در اینترنت، محاسبات ریاضی، کدنویسی، تولید تصویر، محاسبات امکان‌سنجی طرح، تولید فایل‌های PowerPoint از Word، تولید متن و هشتگ برای LinkedIn	نیاز به خرید اشتراک برای استفاده نامحدود

با وجود نکات مثبتی که هوش مصنوعی مولد دارد، نگرانی‌هایی نیز بین پژوهشگران ایجاد کرده است. در یک نظرسنجی جهانی توسط موسسه Nature با شرکت حدود ۱۶۰۰ نفر، پاسخ‌دهندگان نظر خود را در مورد عمده نکات مثبت و منفی هوش مصنوعی مولد بیان داشتند. داده‌های خروجی این

1- https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_chatbots, accessed on Feb. 2024

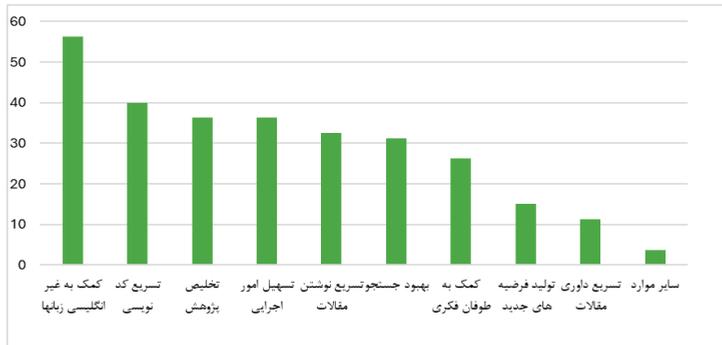
2- <https://www.zdnet.com/article/best-ai-chatbot>, accessed on Feb. 2024

3- <https://openai.com>

4- Prompt

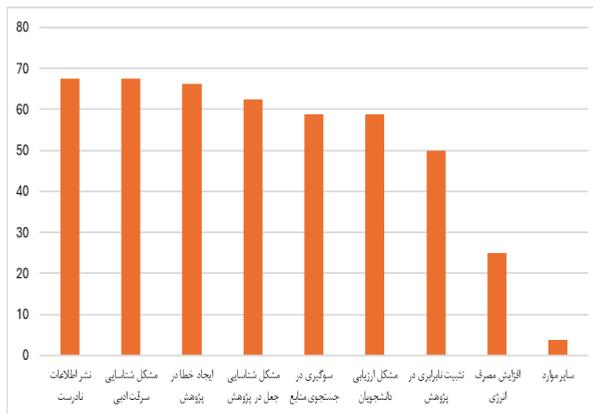
5- <https://poe.com/explore?category=Of->

نظرسنجی در شکل ۶ و شکل ۷ ارائه شده است (Van Noorden & Perkel, 2023).



شکل ۶. نظرسنجی در خصوص نکات مثبت هوش مصنوعی مولد (Van Noorden & Perkel, 2023)

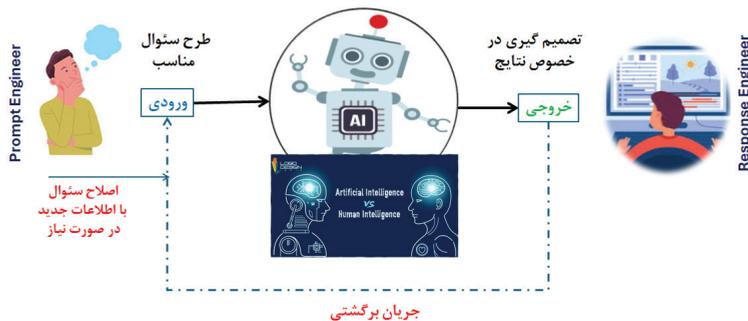
نتایج این نظرسنجی نشان می‌دهد که بیش از ۳۰ درصد پاسخ‌دهندگان معتقدند، این ابزار جهت خلاصه کردن سریع پژوهش و نیز افزایش سرعت کدنویسی مفید است. با این وجود، بیش از ۶۰ درصد پاسخ‌دهندگان، نگران نکات منفی آن در انتشار اطلاعات نادرست، تسهیل سرقت ادبی، و ایجاد خطا در کدنویسی و متون پژوهشی هستند. با توجه به سرعت پیشرفت هوش مصنوعی مولد، مراکز دانشگاهی باید این نگرانی‌ها را مورد توجه ویژه قرار دهند و برای کاهش اثرات منفی هوش مصنوعی مولد، راه‌کارهایی در نظر بگیرند.



شکل ۷. نظرسنجی در خصوص نکات منفی هوش مصنوعی مولد (Van Noorden & Perkel, 2023)

استفاده از ابزارهای دیجیتال مبتنی بر هوش مصنوعی مولد، به طور فزاینده‌ای رو به رشد است. بر اساس آمار موجود در وبگاه Statista، تعداد کاربران برنامه ChatGPT تنها در طول ۵ روز پس از معرفی

اولیه به یک میلیون نفر رسیده است.^۱ این در حالی است که برنامه‌های محبوبی چون نتفلیکس^۲ (۱۹۹۹)، فوراسکوئر^۳ (۲۰۰۹)، دراپ‌باکس^۴ (۲۰۰۸) و اینستاگرام^۵ (۲۰۱۰) برای جذب همین تعداد کاربر، به ترتیب حدوداً به ۱۳۰۰، ۴۰۰، ۲۱۰ و ۷۵ روز زمان در زمان ایجاد این شبکه‌ها نیاز داشتند. یک عامل اصلی در کندی نسبی رشد این شبکه‌های اجتماعی را باید سرعت و دسترسی به اینترنت و عدم رواج گوشی‌های هوشمند در آن زمان دانست. اما به نظر می‌رسد عامل اصلی در سرعت خیره‌کننده رشد برنامه ChatGPT، رشد سریع فناوری و آمادگی فرهنگی جوامع برای جذب سریع این برنامه که علتش قابلیت‌های منحصر به فرد آن است و در جدول ۲ به آنها اشاره شده است، می‌باشد. در حالی که تعداد کاربران فعال ماهانه ChatGPT در ژانویه ۲۰۲۳ به ۱۰۰ میلیون رسید، برابر گزارش یونسکو، تنها کشور چین مقررات مربوط به هوش مصنوعی مولد را در جولای ۲۰۲۳ منتشر کرده است (Miao et al., 2023). لذا سازمان‌های تنظیم‌گر باید اقدامات جدی درخصوص وضع ضوابط برای استفاده حرفه‌ای از ابزارهای هوش مصنوعی مولد به عمل آورند تا آثار منفی کاربرد این ابزارها (شکل ۷) به حداقل برسد. لازم به توضیح است که مسئولیت کامل تعریف اطلاعات ورودی و تحلیل نتایج خروجی از ابزارهای هوش مصنوعی، به عهده کاربر است. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، لازم است سؤال مناسب به عنوان ورودی طراحی و پس از وارد نمودن به موتور ابزار هوش مصنوعی، داده‌های خروجی با دقت و فهم مهندسی به طور دقیق تجزیه و تحلیل شود و در صورت نیاز با استفاده از نتایج خروجی، سوالات ورودی اصلاح گردد و این روند تا حصول نتیجه مطلوب ادامه یابد. در واقع این روش کار برای مهندسان شیمی که با شبیه‌سازی فرایند سروکار دارند، مفهومی آشنا است چون نتایج خروجی از یک شبیه‌ساز، کاملاً به صحت داده‌های ورودی ارتباط دارد. در صورت استفاده از داده‌های نامناسب مانند یک ابزار هوش مصنوعی، نتایج خروجی فاقد ارزش خواهد بود.



شکل ۸. تشابه فرایند استفاده از Chatbot با شبیه‌سازی فرایند

1- miro.medium.com/v2/resize:fit:828/format:webp/1*itkm5QObY_roanSASrHilw.jpeg, accessed in Feb. 2024.

2- Netflix

3- Foursquare

4- Dropbox

5- Instagram

۲-۴. فواید استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی

۲-۴-۱. تثبیت مفاهیم درسی در ذهن دانشجو

در روش‌های معمول تدریس، دانشجویان مفاهیم علمی را به صورت صرفاً تئوری در کلاس فرا می‌گیرند. چنانچه درس مورد نظر دارای جنبه‌های محاسباتی باشد، دانشجویان فرصت پیدا می‌کنند در انجام تکالیف یا پروژه درسی از ابزارهای دیجیتال مربوط، مانند نرم‌افزارهای محاسبات مهندسی یا شبیه‌سازی فرایند استفاده کنند. در این روش، تدریس تئوری به دانشجو و استفاده از ابزار دیجیتال توسط او به صورت ترتیبی و با فاصله زمانی بعضاً قابل توجه صورت می‌گیرد. این در حالی است که استفاده از فناوری‌های دیجیتال در کلاس و هم‌زمان با تدریس می‌تواند کمک شایانی به ارتقای آموزش و ملموس شدن مفاهیم برای دانشجویان کند. به عنوان مثال، در تدریس کنترل فرایند که اغلب دانشجویان به آن به عنوان درسی مشکل و ریاضیاتی می‌نگرند، با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند سیمولینک و شبیه‌سازهای دینامیکی فرایند در کلاس می‌توان مفاهیم کنترلی را به صورت عملی به دانشجویان نشان داد و آنها را به این درس علاقه‌مندتر کرد. از طرفی در برخی دروس دیگر مانند نقشه‌کشی و نقشه‌خوانی فرایندی، ایمنی فرایند و عملیات واحد، دانشجویان برای درک بهتر مفاهیم نیاز به مشاهده و لمس تجهیز فیزیکی دارند که معمولاً تا زمانی که آزمایشگاه درس مربوط را در نیمسال‌های آینده اخذ نکنند، میسر نمی‌شود. لذا لازم است برای انتقال بهتر مفاهیم از ابزارهای تجسم سه بعدی و تعاملی در کلاس استفاده کرد. در این راستا، استفاده از فناوری‌هایی مانند واقعیت مجازی و افزوده می‌تواند بسیار مفید باشد.

۲-۴-۲. ارتقای آموزش و بهره‌وری در آزمایشگاه‌ها

در تدریس سنتی که صرفاً مطالب تئوری در کلاس آموزش داده می‌شود، دروس آزمایشگاهی بهترین فرصت را جهت مشاهده و لمس پدیده‌ها و تجهیزات مهندسی و تطبیق آنها با مفاهیم تئوری فراهم می‌کند. با رشد سریع فناوری‌های دیجیتال، استفاده از آنها به عنوان ابزار مکمل در آزمایشگاه‌ها ضروری به نظر می‌رسد.

فناوری‌های دیجیتال از جهات زیر می‌توانند به افزایش کیفیت و بهره‌وری دروس آزمایشگاهی کمک کنند:

- در دروس آزمایشگاهی، دانشجویان معمولاً آزمایش‌ها را به صورت گروهی انجام می‌دهند. تجربه نشان داده است که غالباً همه اعضای گروه، در انجام آزمایش و گزارش نویسی مشارکت فعال ندارند و در نتیجه، بهره کافی را از دروس آزمایشگاهی نمی‌برند. به دلیل تک‌واحدی بودن و زمان محدود این دروس در کل نیمسال، زمان بر بودن آزمایش‌ها و هزینه بالای مواد و حلال‌های آزمایشگاهی، اغلب فرصت درگیر کردن همه دانشجویان توسط استاد درس وجود ندارد. اینجاست که با ابزارهای دیجیتال، مانند شبیه‌سازها

- و واقعیت مجازی یا افزوده می‌توان فرصت‌های جدیدی خلق کرد تا همه دانشجویان بتوانند حتی در خارج از ساعات آزمایشگاه، کار با تجهیزات را به صورت شبه‌عملی تجربه کنند.
- چنانچه به دلیل خرابی تجهیز یا عدم وجود مواد مورد نیاز، امکان انجام آزمایشی وجود نداشته باشد، با استفاده از فناوری‌هایی مانند شبیه‌سازی، واقعیت مجازی یا افزوده و دوقلوی دیجیتال، دانشجویان می‌توانند تجربه مشابهی را کسب کنند. از دیگر مزایای مهم این ابزارها، به ویژه واقعیت مجازی یا افزوده، امکان مشاهده نقشه و جزئیات داخلی تجهیزات و شبیه‌سازی اتفاقات درون آن است که معمولاً به دلیل استفاده از بدنه‌های فلزی در تجهیز واقعی قابل رؤیت نیست.
 - فناوری‌هایی که در بالا به آنها اشاره شد می‌توانند جایگزین آزمایش‌هایی باشند که به دلایلی مانند هزینه، پیچیدگی، زمان بر بودن، لزوم کار با مواد خطرناک یا شرایط عملیاتی نایمن در طرح درس آزمایشگاه قرار نمی‌گیرند. در مرجع (Solmaz et al., 2021)، یک آزمایش مجازی با استفاده از شبیه‌سازی و واقعیت افزوده برای تولید صابون مایع معرفی شده است. با استفاده از این فناوری‌ها حتی می‌توان دروس آزمایشگاهی جدیدی مانند ایمنی مواد یا ایمنی فرایند ایجاد کرد.
 - در برخی شاخه‌های مرتبط با مهندسی شیمی، مانند زیست‌فناوری یا مهندسی داروسازی، ممکن است لازم باشد ایمنی و اثربخشی یک محصول روی حیوانات مورد آزمایش قرار گیرد. در بسیاری از کشورها این کار نیازمند دریافت مجوز است و قوانین سخت‌گیرانه‌ای برای اعطای آن وجود دارد. از جمله در ایران نیز اخیراً دستورالعملی در خصوص محدود کردن آزمایش روی حیوانات، مگر در موارد ضروری، از سوی وزارت بهداشت، درمان، و آموزش پزشکی صادر شده است.^۱ نکته جالب در این دستورالعمل، توصیه به جایگزینی حیوانات با نرم‌افزارهای مناسب است. در این راستا، خلق شبیه‌سازهای مناسب می‌تواند نقش مهمی در این مهم و رعایت اصول اخلاقی ایفا نماید.
 - استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آزمایشگاه موجب کاهش هدررفت مواد، افزایش ایمنی و بهره‌وری می‌شود. این به کارشناسان آزمایشگاه اجازه می‌دهد، وقت بیشتری را صرف آموزش دانشجویان کنند و حتی بتوانند به مشتریان خارج از دانشگاه نیز خدمات ارائه دهند.

۳. ملزومات استفاده از فناوری‌های دیجیتال در آموزش

استفاده از فناوری‌های دیجیتال ملزوماتی دارد که به برخی از آنها فهرست‌وار اشاره می‌شود:

- ۳-۱. روزآمدسازی کتاب‌های درسی با فناوری‌های دیجیتال
- در جدول ۳، برخی ابزارهای دیجیتال تجاری و غیرتجاری قابل استفاده در دروس مهندسی شیمی

معرفی شده است. برخی از کتاب‌های شاخص مهندسی شیمی، همگام با پیشرفت در حوزه نرم‌افزارهای رایانه‌ای، در ویرایش‌های بعدی خود از معدودی از این ابزارها برای ارتقای آموزش استفاده کرده‌اند. اما با توجه به تنوع نرم‌افزارهای موجود و گستردگی دروس، به نظر می‌رسد که رشته مهندسی شیمی، همچنان با کمبود کتاب‌های علمی که از فناوری‌های دیجیتال به‌روز استفاده کنند، مواجه است. سرعت رشد فناوری‌های دیجیتال در صنعت ایجاب می‌کند که هر چه سریع‌تر در جهت رفع این کمبود که در مورد فناوری‌های دیجیتال پیشرفته و مبتنی بر هوش مصنوعی مشهودتر است، گام‌هایی برداشته شود.

جدول ۳. ابزارهای دیجیتال تجاری و غیرتجاری منتخب قابل استفاده برای برخی دروس اصلی مهندسی شیمی

دروس	ابزار دیجیتال تجاری	ابزار دیجیتال رایگان
موازنه جرم و انرژی	Excel, Aspen HYSYS, Aspen Plus	OpenOffice (Calc), LibreOffice, COCO DWSIM
محاسبات عددی	Excel, MATLAB, Polymath, Mathematica, Maple, O-Matrix	OpenOffice (Calc), LibreOffice, Python, Scilab, Octave
شبیه‌سازی فرایند	Aspen HYSYS, Unisim design, Aspen Plus, gPROMS	COCO, DWSIM, OpenModelica ¹
ایمنی فرایند	Phast	Chemical Reactivity Worksheet (CRW)
آمار و احتمالات	Minitab, Statistics	
کنترل فرایند	MATLAB, Simulink, LabVIEW, HYSYS, Unisim, Aspen, Control Station	Scilab/Xcos, DWSIM
نقشه‌خوانی و P&ID	AutoCAD, MS Visio, EdrawMax	EdrawMax (trial)
ترمودینامیک	HYSYS, Aspen Plus, HSPiP ²	
طراحی فرایند	Aspen HYSYS, ASPEN	COCO, DWSIM
طراحی رآکتور	Excel, MATLAB, Polymath, Mathematica, Maple, HYSYS, Unisim, ASPEN	
بهینه‌سازی	MATLAB, GAMS, Excel	Octave, Scilab, NEOS Server, GAMS (demo)
پدیده‌های انتقال	Ansys Fluent, COMSOL	OpenFOAM, SimWorks
طرح و اقتصاد مهندسی	Aspen Process Economic Analyzer, CHEMCAD, SuperPro Designer, CostOS,	Cost estimator, Matches, Costing Spreadsheet, DWSIM

۲-۳. تدوین دروس جدید حاوی مبانی علمی فناوری‌های دیجیتال
ایجاد دروس جدید که مبانی تئوری فناوری‌های روز دیجیتال را تبیین می‌کند می‌تواند به درک بهتر دانشجویان از این فناوری‌ها و استفاده آگاهانه از آنها کمک شایانی کند. در سال‌های اخیر استفاده

1- <https://openmodelica.org>

2- Hansen solubility parameters in practice

دانشجویان از ابزارهای هوش مصنوعی، به دلیل محبوبیت و سهولت استفاده از آن در بسترهایی مانند متلب و پایتون، رشد قابل توجهی داشته است. اما به دلیل عدم آموزش مبانی علمی این ابزارها در برنامه مهندسی شیمی، در بسیاری موارد دیده می‌شود که این ابزارها، در جای درست خود مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و نتایج به دست آمده نیز به نحو علمی تحلیل نمی‌شود و یا اصولاً فاقد اعتبار علمی است. این مشکل، ضرورت گنجاندن دروس جدیدی مانند آمار و احتمالات، علوم داده (Lavasani et al., 2021)، بهینه‌سازی و هوش مصنوعی را در برنامه تحصیلات تکمیلی مهندسی شیمی دوچندان می‌کند.

۳-۳. روزآمدسازی اساتید و کارشناسان

استفاده مؤثر از ابزارهای دیجیتال در تدریس، نیازمند آشنایی کافی اساتید و کارکنان مراکز آموزشی با مبانی و چگونگی استفاده از آنها است. برای تسهیل این امر می‌توان از دانشجویان یا دانش‌آموختگان مسلط به این ابزارها، به عنوان تدریس‌یار استفاده کرد. همچنین می‌توان دوره‌های فشرده حضوری، ضبط شده یا غیرحضوری برای مدرسان برگزار کرد.

۳-۴. طراحی فضاهای آموزشی و کلاس، مطابق با نیازهای آموزش دیجیتال

استفاده از فناوری‌های دیجیتال، نیازمند زیرساخت‌های مناسب سخت‌افزاری در فضاهای آموزشی است. تجهیز کلاس‌ها به اینترنت، نیمکت‌هایی که بتوان روی آنها لپ‌تاپ قرار داد و دارای کابل‌کشی برق باشند و تخته‌های هوشمند تعاملی، از جمله حداقل‌های مورد نیاز است.

۴. چالش‌های توسعه و استفاده از فناوری‌های دیجیتال آموزشی

کاربرد فناوری‌های دیجیتال، با وجود مزایای ذکر شده با چالش‌هایی همراه است. از منظر توسعه، هزینه بالای ساخت و روزآمدسازی و نیز نیاز به تخصص‌های متنوع سخت‌افزاری و نرم‌افزاری که خارج از حیطه مهندس شیمی است را می‌توان برشمرد. لذا برای توسعه ابزارهای دیجیتال لازم است گروه‌هایی متشکل از مهندسان شیمی و متخصصان رایانه، برق و برخی زمینه‌های بین‌رشته‌ای ایجاد شوند. از منظر استفاده نیز، چالش‌های برای دانشجویان و اساتید وجود دارد که در زیر فهرست‌وار به آن پرداخته می‌شود:

- عدم توجه کافی به تئوری‌های پایه: تدریس از طریق فناوری‌های دیجیتال، اگر به صورت نابه‌جا صورت گیرد می‌تواند به تدریس اصولی مفاهیم پایه مهندسی لطمه بزند و دانشجویان را از فهم عقبه تئوری موضوع باز دارد. بنابراین تدریس مناسب اصول و مفاهیم اصلی، همچنان باید مورد توجه مدرسان قرار گیرد (Feise & Schaer, 2021).

- عدم یادگیری روش های حل و ناتوانی در تفسیر نتایج: استفاده نابه جا از برخی ابزارهای نرم افزاری می تواند فرصت یادگیری روش حل را از دانشجو بگیرد و موجب اعتماد بیش از حد او به نتایج نرم افزار، بدون تحلیل مناسب ورودی و خروجی آن شود.
- عدم دسترسی آسان به برخی ابزارهای دیجیتال: فناوری های پیشرفته دیجیتال مانند واقعیت مجازی و افزوده، هنوز در آموزش مهندسی شیمی در دسترس همگانی قرار نگرفته اند یا اصولاً توسعه داده نشده اند. حتی در استفاده از ابزارهای متداول نیز می توان چالش هایی مانند نیاز به خرید مجوز، حجم بالای نرم افزار و نیاز به رایانه هایی با توان محاسباتی و ذخیره سازی بالا را برشمرد.
- بار اضافی کاری برای دانشجویان و اساتید: نیاز به گذراندن دوره های آموزشی برای اساتید و دانشجویان و نیز صرف بخش قابل توجهی از زمان کلاس، از چالش های استفاده از فناوری های دیجیتال است. بازنگری و تعدیل محتوای دروس می تواند در رفع این چالش مؤثر باشد.
- کپی کاری و استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی مولد در حل تمرین ها: قابلیت هوش مصنوعی مولد در پاسخ به سوالات علمی و کدنویسی می تواند در جهت منفی برای حل تکالیف دانشجویی مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده نابه جا از هوش مصنوعی مولد می تواند سرقت ادبی تلقی شود و ضمن زیر سؤال بردن یادگیری دانشجو، نمره دهی عادلانه را مشکل کند. در شکل ۹ یک نمونه کد نرم افزار OpenModelica برای شبیه سازی دینامیکی یک رآکتور هم زده آورده شده است که خروجی سؤال کاربر از نرم افزار ChatGPT ۳.۵ است. صحت کد مذکور در OpenModelica آزمایش و تأیید شد.

```
You
write Openmodelica code for a CSTR with first order reaction, volume of 2 m3, and
initial concentration of 3 mol/m3

ChatGPT
Here's an OpenModelica code for simulating a Continuous Stirred-Tank Reactor
(CSTR) with a first-order reaction, a volume of 2 m^3, and an initial concentration of 3
mol/m^3:

model CSTR_FirstOrderReaction
// Parameters
parameter Real V = 2.0 "Volume (m^3)";
parameter Real k = 0.1 "Rate constant (1/min)";
parameter Real Ci = 3.0 "Initial concentration (mol/m^3)";

// Variables
Real C "Concentration (mol/m^3)";
Real Q "Flow rate (m^3/min)";

equation
// Reaction rate equation
der(C) = Q/V * (Ci - C) - k * C;

// Flow rate equation (input)
Q = 1.0;

initial equation
C = Ci;

end CSTR_FirstOrderReaction;
```

شکل ۹. کد نرم افزار OpenModelica تولید شده با ChatGPT 3.5.

نکاتی که در بالا به آنها اشاره شد، عمدتاً به آموزش مهندسی مرتبط است. در حوزه‌های پژوهشی و صنعتی، از آنجا که ابزارهای هوش مصنوعی نمی‌توانند در کتاب‌ها، مقالات، گزارش‌های علمی، یا طراحی‌های مهندسی به عنوان نویسنده یا طراح قلمداد شوند، معمولاً توصیه می‌شود در مواردی که چنین ابزارهایی به عنوان بخشی از طراحی یا روش‌شناسی یک مطالعه تحقیقاتی یا طراحی فرایند استفاده می‌شود، استفاده از آنها به طور شفاف در بخش‌های قدردانی مدارک علمی توضیح داده شود.

۵. نتیجه‌گیری

مطالعات انجام‌شده در این مقاله نشان می‌دهد که تأثیر فناوری‌های دیجیتال بر آموزش مهندسی شیمی بسیار مهم است و می‌تواند به بهبود و توسعه مهارت‌های حرفه‌ای دانشجویان کمک کند. استفاده از فناوری‌های دیجیتال، از جمله صفحه‌های گسترده، نرم‌افزارهای ریاضی، شبیه‌سازهای صنعتی، واقعیت مجازی و افزوده و ابزارهای هوش مصنوعی، آموزش مهندسی شیمی را به محیط‌های تعاملی و مدرن تبدیل کرده است. این ابزارها باعث بهبود انتقال مفاهیم، تسهیل در تجزیه و تحلیل مسائل، ایجاد تجربه‌های عملی مجازی و افزایش تعامل دانشجویان با مفاهیم شده است. در واقع، استفاده بهینه از فناوری‌های دیجیتال در آموزش مهندسی شیمی می‌تواند به دانشجویان امکان پیشرفت و بهبود مهارت‌های فنی و حرفه‌ای را بدهد و همچنین به اساتید و محققان در این حوزه کمک کند تا ابزارهای پیشرفته‌تری را ایجاد کنند و تجربه آموزشی را بهبود بخشند. با این حال، استفاده از فناوری‌های دیجیتال، چالش‌هایی را نیز به همراه دارد. از جمله آنها می‌توان به نیاز به زیرساخت‌های مناسب، آموزش اساتید و روش مناسب ارزیابی عملکرد دانشجویان اشاره کرد. با توجه به اهمیت و سرعت فراگیری فناوری‌های دیجیتال، لازم است دانشگاه‌های کشور در جهت یافتن راهکار رفع این چالش‌ها و استفاده رویه‌مند از فناوری‌های دیجیتال در آموزش گام بردارند.

تقدیر و تشکر

از جناب آقای دکتر سلطانی، ریاست محترم شاخه مهندسی شیمی فرهنگستان علوم و اعضای محترم شاخه که فرصت ارائه این مقاله را برای نویسندگان فراهم کردند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

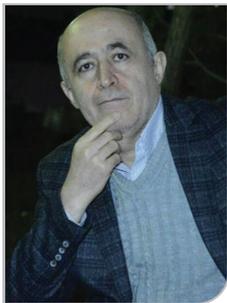
- Adams II, T. A. (2022). *Learn aspen plus in 24 hours* (2nd ed.). McGraw Hill.
- Bell, J. T., & Fogler, H. S. (1996). The status and prospects of virtual reality in chemical engineering. *AICHE National Meeting, November*, 1-10.
- Cazzaniga, M., Jaumotte, F., Li, L., Melina, G., Panton, A. J., Pizzinelli, C., Rockall, E., & Tavares, M. M. (2024). Gen-AI: artificial intelligence and the future of work. International Monetary Fund.

- Coker, A. K. (2007). Ludwig's applied process design for chemical and petrochemical plants, Volumes I-III (4th ed.). Gulf Professional Publishing Co.
- Downs, J. J., & Vogel, E. F. (1993). A plant-wide industrial process control problem. *Computers and Chemical Engineering*, 17(3), 245-255. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(93\)80018](https://doi.org/10.1016/0098-1354(93)80018).
- Feise, H. J., & Schaer, E. (2021). Mastering digitized chemical engineering. *Education for Chemical Engineers*, 34, 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2020.11.011>.
- Fogler, H. S. (2021). *Elements of chemical reaction engineering*. Pearson.
- Gunawan, P., Kwan, J., Cai, Y., & Yang, R. (2021). Augmented reality application for chemical engineering unit operations. In Y. Cai, W. van Joolingen, & K. Veermans (Eds.), *Virtual and Augmented Reality, Simulation and Serious Games for Education* (pp. 29-43). Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-1361-6-4>.
- Guo, Y., Klink, A., Bartolo, P., & Guo, W. G. (2023). Digital twins for electro-physical, chemical, and photonic processes. *CIRP Annals*, 72(2), 593-619. <https://doi.org/10.1016/J.CIRP.2023.05.007>.
- Hirtreiter, E., Schulze Balhorn, L., & Schweidtmann, A. M. (2024). Toward automatic generation of control structures for process flow diagrams with large language models. *AIChE Journal*, 70(1), 1-15. <https://doi.org/10.1002/aic.18259>.
- Coker, A., & Sotudeh-Gharebagh, R. (2022). Chemical process engineering, Volume 2: Design, Analysis, Simulation, Integration, and Problem Solving with Microsoft Excel-UniSim Software for Chemical Engineers, Heat Transfer and Integration, Process Safety, and Chemical Kinetics (1st ed., Vol. 2). WILEY.
- Kumar, V. V., Carberry, D., Beenfeldt, C., Andersson, M. P., Mansouri, S. S., & Gallucci, F. (2021). Virtual reality in chemical and biochemical engineering education and training. *Education for Chemical Engineers*, 36, 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.05.002>.
- Lavasani, M., Ziaei-Halimejani, H., Sotudeh gharebagh, R., Zarghami, R., & Mostoufi, N. (2021). Application of data science in chemical engineering education [in Persian]. *Iranian Journal of Engineering Education*, 1-25. <https://doi.org/10.22047/IJEE.2021.239468.1759>.
- Little, A. D. (2023). Digital technologies for sustainability in the european chemical industry. https://cefic.org/app/uploads/2023/04/ADL_CEFIC_Digital_technologies_for_sustainability_2023.pdf.
- Low, D. Y. S., Poh, P. E., & Tang, S. Y. (2022). Assessing the impact of augmented reality application on students' learning motivation in chemical engineering. *Education for Chemical Engineers*, 39, 31-43. <https://doi.org/10.1016/J.ECE.2022.02.004>.
- Ludwig, E. E. (2001). *Applied process design for chemical and petrochemical plant*, Volumes I-III. Gulf Professional Publishing.
- Norton, C., Cameron, I., Crosthwaite, C., Balliu, N., Tade, M., Shallcross, D., Hoadley, A., Barton, G., & Kavanagh, J. (2008). Development and deployment of an immersive learning environment for enhancing process systems engineering concepts. *Education for Chemical Engineers*, 3(2), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2008.04.001>.
- Pirola, C., Peretti, C., & Galli, F. (2020). Immersive virtual crude distillation unit learning experience: The EYE4EDU project. *Computers and Chemical Engineering*, 140, 106973. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106973>.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle III, F. J. (2017). *Process dynamics and control* (4th ed.). Wiley.
- Solmaz, S., Dominguez Alfaro, J. L., Santos, P., Van Puyvelde, P., & Van Gerven, T. (2021). A practical development of engineering simulation-assisted educational AR environments. *Education for Chemical Engineers*, 35, 81-93. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.007>.
- Sotudeh-Gharebagh R. and E. Jabbari. (2021). *Computer-Aided Process Simulation in Chemical Engineering*. University of Tehran Press [in Persian].
- Sotudeh-Gharebagh, R., & Zia-Zarifi, M. (2005). Computer aides process simulation for chemical engineers and necessity of its inclusion in b. s. program [in Persian]. *Iranian Journal of Engineering Education*, 5(25), 27-44.

- Teles dos Santos, M., Vianna, A. S., & Le Roux, G. A. C. (2018). Programming skills in the industry 4.0: are chemical engineering students able to face new problems? *Education for Chemical Engineers*, 22, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2018.01.002>.
- Udugama, I. A., Atkins, M., Bayer, C., Carson, J., Dikicioglu, D., Gernaey, K. V., Glassey, J., Taylor, M., & Young, B. R. (2023). Digital tools in chemical engineering education: the needs and the desires. *Education for Chemical Engineers*, 44, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.05.002>.
- Udugama, I. A., Bayer, C., Baroutian, S., Gernaey, K. V., Yu, W., & Young, B. R. (2022). Digitalisation in chemical engineering: industrial needs, academic best practice, and curriculum limitations. *Education for Chemical Engineers*, 39, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.03.003>.
- Miao, F., & Holmes, W. (2023). Guidance for generative AI in education and research. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386693>.
- Van Noorden, R., & Perkel, J. M. (2023). AI and science: what 1,600 researchers think. *News Nature*, 621, 672–675. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/d41586-023-02980-0>.
- Vogel, G., Schulze Balhorn, L., & Schweidtmann, A. M. (2023). Learning from flowsheets: A generative transformer model for autocompletion of flowsheets. *Computers and Chemical Engineering*, 171, 108162. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108162>.



◀ **علی محمد سهل‌الدین:** استادیار دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر است. او کارشناسی مهندسی شیمی را در سال ۱۳۸۴ از دانشگاه تهران، کارشناسی ارشد این رشته (شبیه‌سازی و کنترل فرایند) را در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه صنعتی شریف و دکتری مهندسی شیمی (بهینه‌سازی فرایند) را در سال ۱۳۹۱ از دانشگاه مک‌مستر کانادا دریافت کرد. زمینه‌های پژوهشی دکتر سهل‌الدین، شبیه‌سازی، بهینه‌سازی، کنترل فرایند، انتگراسیون فرایند و کاربرد آن در کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهینه‌سازی آب و انرژی است.



◀ **رحمت ستوده قره‌باغ:** مدرک دکتری خود در مهندسی شیمی را از دانشگاه پلی‌تکنیک مونترال کانادا اخذ کرده‌اند. ایشان از سال ۱۳۷۸ فعالیت خود را به عنوان عضو هیئت علمی در دانشگاه تهران آغاز کرده‌اند و هم‌اکنون نیز به عنوان استاد در دانشکده فنی مشغول فعالیت هستند، ایشان در زمینه مهندسی فرایند، کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی شیمی و آموزش مهندسی مشغول به کار آموزشی و پژوهشی هستند.

فناوری نانو در مهندسی شیمی

امیرحسین مشتاقی^۱، ریحانه باباخانلو^۲، مهدیه یآوری^۳،

علی مؤذنی^۴ و مجتبی شریعتی نیاسر^{۵*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۷

DOI: 10.22047/ijee.2024.449986.2070

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.4.3

چکیده: نانومواد با خواص منحصر به فرد خود، انقلابی در زمینه‌های مختلف علم و فناوری ایجاد کرده‌اند زیرا استفاده از این مواد، عملکرد بسیاری از فرایندها را بهبود بخشیده است. این مقاله مروری در ابتدا به بررسی روش‌های ساخت و مشخصه‌یابی برای شناخت و استفاده از نانومواد می‌پردازد. برای ساخت نانومواد، روش‌های بالا به پایین و پایین به بالا، دو رویکرد اصلی مورد استفاده هستند. هر رویکرد، روش‌های متنوعی را با ملاحظات برای مقیاس‌پذیری ارائه می‌دهد. همچنین روش‌های مختلف میکروسکوپی و طیف‌سنجی را که برای تشخیص و شناسایی نانومواد، مشخص کردن اندازه، ریخت‌شناسی و ترکیب شیمیایی استفاده می‌شوند، در اینجا مورد بحث قرار می‌گیرند. در ادامه، تمرکز این مقاله بر اثر فناوری نانو در مهندسی شیمی است. به عنوان مثال می‌توان به توسعه کاتالیزورها و جاذب‌های بسیار کارآمد برای صنعت نفت و گاز، ایجاد سامانه‌های پیشرفته داروسازی و پیشرفت‌های تصفیه آب اشاره کرد. در ادامه مسیر این فناوری باید توجه داشت که آینده نانومواد در نانومعماری نهفته است و بر پایه فناوری نانو برای ایجاد سامانه‌های مواد پیچیده و کاربردی با ادغام با سایر رشته‌ها بنا شده است.

واژگان کلیدی: نانوفناوری، مهندسی شیمی، ساخت نانوذرات، کاربرد نانومواد

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. amir.moshtaghi@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. babakhanlo.reyha@ut.ac.ir

۳- دکتری مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. mhyavari@ut.ac.ir

۴- کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. moazzeni.ali@ut.ac.ir

۵- استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول). mshariat@ut.ac.ir

۱. مقدمه

فناوری نانو به سرعت در حال پیشرفت است و منجر به تغییرات چشمگیری در علم و ایجاد کالاهای مصرفی شده است و ظرفیت قابل توجهی برای طیف گسترده‌ای از محصولات نوآورانه در حوزه‌هایی مانند انرژی، الکترونیک، زیست‌مواد و پزشکی فراهم آورده است. هدف اصلی نانوفناوری، تولید مواد جدید در مقیاس نانو است که این هدف، با دستکاری اتم‌ها و مولکول‌ها برای ایجاد خواص و عملکردهای منحصر به فرد تأمین می‌شود. به بیان دیگر این فناوری امکان تغییر ماده در سطح اتمی را بررسی می‌کند که شامل مطالعه و دستکاری اتم‌ها و مولکول‌ها برای درک رفتار و کاربردهای بالقوه آنها می‌شود.

کلمه «نانو» برگرفته از واژه‌ای یونانی و به معنای «بسیار کوچک» است. علم نانو مربوط به مطالعه سامانه‌هایی با ابعاد کوچک است و علوم شیمی، مواد و زیست‌شناسی را ترکیب می‌کند. این علم را می‌توان این‌گونه تعریف کرد:

۱. مطالعه مواد با حداقل یک بعد، با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر

۲. نحوه طراحی، ساخت و کنترل سامانه‌های تولیدشده با موادی در مقیاس نانومتر.

تاریخچه دقیق فناوری نانو مشخص نیست، اگر چه ریچارد فاینمن به عنوان دانشمند پیشگام در این زمینه در نظر گرفته می‌شود، مطالعات نشان می‌دهند که قبل از فاینمن، نانومواد برای کاربردهای مختلفی مانند پزشکی استفاده می‌شده است. جان اوتینام در سال ۱۴۴۹، اختراع شیشه‌ای مبتنی بر نانوذرات طلا را به ثبت رساند. در قرن شانزدهم، تئوفاستوس فون هوهنهایم، پزشک سوئسی، از نانوذرات طلا برای درمان بیماران مبتلا به بیماری‌های مختلف استفاده کرد. اگر چه فاینمن مفهوم نانوفناوری را برای اولین بار مطرح نکرده است اما در سال ۱۹۵۹، از طریق سخنرانی خود در یک کنفرانس بین‌المللی به تفصیل آن را بیان کرد (Hosseinpour, 2001).

نوریو تانیگوچی در سال ۱۹۷۴ اصطلاح «نانوفناوری» را برای توصیف سازوکارهای مختلف پردازش مواد با اندازه نانو و دقت مواد فوق نازک تا مقیاس نانو به کار برد. پس از آن دو دستاورد بشر، منجر به توسعه علمی نانوفناوری شده است. اول، اختراع میکروسکوپ تونل زنی روبشی^۱ (STM) در سال ۱۹۸۱ بود که به وسیله آن، اتم‌های منفرد برای اولین بار به راحتی شناسایی شدند و دیگری، نانولوله‌های کربنی بود که چند سال بعد کشف شد.

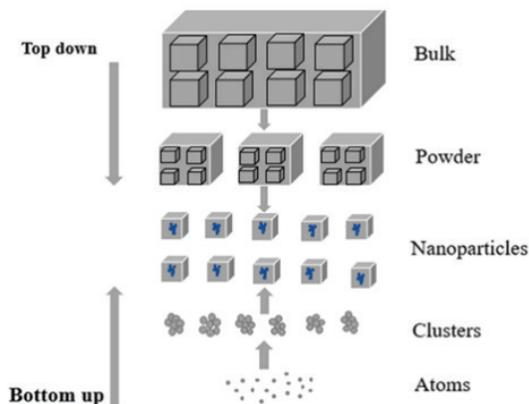
دستکاری مواد در ابعاد نانو، امکان توسعه مواد نوآورانه با خواص منحصر به فرد را فراهم می‌کند و در نتیجه، عملکرد را در کاربردهای مختلف، از جمله نانوزیست‌فناوری برای اهداف درمانی و تشخیصی، کاربردهای کاتالیستی و نانومواد جاذب انرژی، کاربردهای نانوانرژی مانند سلول‌های خورشیدی

هیدروژن و فتولتائیک و کاربرد در صنایع غذایی و کشاورزی را بهبود می‌بخشد. اگر چه نانوفناوری این ظرفیت را دارد که صنایع مختلف را متحول کند اما پیامدهای سلامتی احتمالی نانومواد بر روی انسان، یک نگرانی قابل توجه است زیرا، اطلاعات سمیت قابل اعتماد و کافی در مورد این مواد در دسترس نیست. به عنوان مثال، برخی از پزشکان نگران هستند که نانوذرات با ابعاد بسیار کوچک خود از سد خونی مغزی عبور (غشایی که از مغز محافظت) عبور کنند. بنابراین اگر چه فناوری نانو مزایای مختلفی در زمینه‌های مختلف دارد، اما رسیدگی به خطرات بالقوه و تضمین مقررات مناسب برای اجرای اخلاقی و ایمن آن، بسیار مهم است. از این رو لازم است برای مصرف این مواد، معیارهایی مشخص و دستورالعمل‌های خاصی در نظر گرفته شوند تا از استفاده ایمن و مسئولانه آنها اطمینان حاصل شود.

مطالعه پیش رو دیدگاه جامعی را در زمینه تاریخچه نانوفناوری، رویکردها و کاربردهای اساسی آن در زمینه‌های مختلف ارائه می‌کند. علاوه بر این، نانومواد، مزایا، معایب و کاربردهای ممکن آنها را در صنایع مختلف را بررسی می‌کند.

۲. روش‌های ساخت

نانومواد به دلیل کاربردهای متعدد، در زندگی روزمره اهمیت فزاینده‌ای پیدا کرده است و روش‌های مختلف ساخت آنها بر اساس کاربرد خاص هر کدام، توسعه یافته است. هنگام انتخاب روش ساخت نانومواد، باید دو موضوع اصلی، خواص مورد نظر و قابلیت کاربرد آنها در مقیاس‌های بزرگ در نظر گرفته شود. اگر چه بسیاری از روش‌های ساخت ممکن است در محیط‌های آزمایشگاهی کارآمد باشند، استفاده از آنها در مقیاس‌های بزرگ‌تر ممکن است با موانع متعددی روبه‌رو شود.



شکل ۱. رویکردهای پایین به بالا و از بالا به پایین (Abid et al., 2022)

به طور کلی، تمام روش‌های ساخت نانومواد را می‌توان به دو دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: رویکردهای پایین به بالا و رویکردهای بالا به پایین^۲ (شکل ۱). هر رویکرد شامل چندین روش است. در رویکرد از بالا به پایین، ساخت با مواد حجیم شروع می‌شود و از طریق آسیاب گام‌به‌گام مواد به نانوذرات ریز ختم می‌شود. برخی از روش‌های متداول از بالا به پایین مورد استفاده، شامل آسیاب مکانیکی، فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی پرتو الکترونی، آنودیزاسیون و اچ پلاسما است. در مقابل، روش پایین به بالا شامل مونتاژ نانومواد از پایین است، یعنی اتم به اتم، مولکول به مولکول و خوشه به خوشه. بسیاری از روش‌های ساخت نانومواد، از جمله روش‌های شیمیایی مختلف مانند رسوب شیمیایی، روش‌های سل‌ژل، رسوب شیمیایی بخار و همچنین روش‌های ساخت زیستی، در این دسته قرار می‌گیرند (جدول ۱).

جدول ۱. تقسیم‌بندی روش‌های ساخت

پایین به بالا	بالا به پایین
تهیه نانومواد با روش سل ژل	فرسایش لیزری
رسوب بخار فیزیکی	اچ ^۳ کردن (زدایش)
تخریب حرارتی	تبخیر حرارتی
سولوترمال	فرز مکانیکی
ساخت گرمایی	کندوپاش کردن
رسوب بخار شیمیایی	لیتوگرافی
ریزامولسیون و مایسل معکوس	الکترورسی

۲-۱. روش‌های بالا به پایین

روش‌های بالا به پایین شامل تجزیه مواد حجیم برای ایجاد مواد نانو ساختار است. آسیاب مکانیکی، فرسایش لیزری، فروشویی، کندوپاش و انفجار الکتریکی برخی از رویکردهای بالا به پایین هستند. تبدیل مواد حجیم به ذرات کوچک در ابعاد نانو از طریق این رویکرد به دست می‌آید. اگرچه روش‌های بالا به پایین ساده هستند اما می‌توانند در تولید ذرات با شکل نامنظم و ریز، مؤثرتر باشند. نقطه ضعف اصلی این روش، دشواری در دستیابی به اندازه و شکل ذرات مورد نظر است.

۲-۱-۱. تبخیر حرارتی^۴

تبخیر حرارتی یک فرایند گرماگیر است که در آن گرما باعث تجزیه شیمیایی می‌شود. این گرما

1- Bottom-up approach

3- Etching

2- Top-down approach

4- Thermal evaporation

یک پیوند شیمیایی را در مولکول می شکند. تبخیر حرارتی یکی از محبوب ترین روش ها برای تولید سوسپانسیون های تک پراکنده پایدار با قابلیت خودآرایی، در میان روش های متعدد برای تولید نانوذرات معدنی است لایه های نازک بر روی انواع زیرلایه ها با استفاده از تبخیر حرارتی ساخته می شوند.

۲-۱-۲. آسیاب مکانیکی^۱

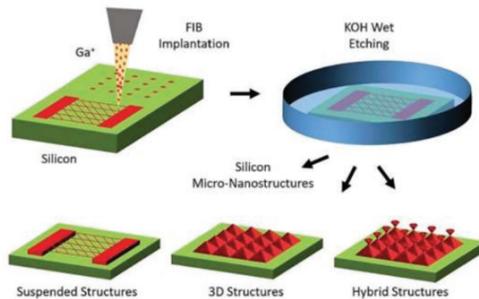
آسیاب مکانیکی روشی مقرون به صرفه برای تولید مواد در سطح نانو از مواد حجیم است. آسیاب مکانیکی روشی مؤثر برای تولید مخلوط های فازهای مختلف است و در تولید نانوکامپوزیت ها مفید است. ساده ترین و کارآمدترین فرایند مکانیکی روش بالا به پایین، آسیاب گلوله ای است. این فرایند انتقال انرژی جنبشی از محیط آسیاب به مواد در حال کاهش است. نمونه های پودر آسیاب تأثیر برجسته ای بر اندازه کریستالیت، کاهش ذرات، اصلاح سطح و توسعه احتمالی فازهای فراپایدار دارند. همچنین امکان تولید انواع واکنش هایی وجود دارد که در دمای محیط رخ نمی دهند.

فرایند آسیاب برای اهداف بسیاری استفاده می شود که عناوین آنها در زیر آورده شده است:

- فشرده سازی در اندازه ذرات
- رشد اندازه ذرات
- تغییر در ساختار ذرات
- تراکم مناسب
- آلیاژسازی مکانیکی (آلیاژسازی حالت جامد)

۲-۱-۳. لیتوگرافی

لیتوگرافی فرایندی است که از یک پرتوی متمرکز نور یا الکترون برای توسعه نانومعماری استفاده می کند. دو نوع اصلی لیتوگرافی وجود دارد: لیتوگرافی ماسک دار و لیتوگرافی بدون ماسک. در نانولیتوگرافی ماسک دار، از یک ماسک یا قالب خاص برای انتقال نانوالگوها در سطح وسیعی استفاده می شود. فتولیتوگرافی، لیتوگرافی نانوایمپرننت و لیتوگرافی نرم همه اشکال لیتوگرافی ماسک دار هستند (شکل ۲). در مقابل، لیتوگرافی بدون ماسک از کاوشگر، پرتویون متمرکز و لیتوگرافی پرتو الکترونی برای انجام نوشتن نانوالگوی دلخواه بدون استفاده از ماسک استفاده می کند. در نهایت، ساخت ریزنانو فرم آزاد سه بعدی را می توان از طریق کاشت یون با یک پرتو یون متمرکز، در ترکیب با فرایندهای مرطوب به دست آورد.



شکل ۲. نمودار شماتیک از ساخت ریز نانو ساختارهای سه بعدی با یک پرتو یونی از طریق ساختار Si. این شامل کاشت در Si از طریق لیتوگرافی Ga FIB و حکاکی ماسک با وضوح نانومتر، حکاکی مرطوب ناهمسانگرد بعدی در محلول KOH و ساخت ریز نانو ساختارهای Si از طریق حذف انتخابی ناحیه کاشته نشده است

در سال های اخیر، تحقیقات قابل توجهی در لیتوگرافی نانوچاپ انجام شده است و به دلیل ویژگی های متعدد آن، از جمله وضوح بالا، فناوری توان عملیاتی بالا و مقرون به صرفه بودن، در بخش های مختلفی مانند الکترونیک مولکولی، حسگرهای زیستی، الگوبرداری ماسک اچ و فوتونیک مورد استفاده قرار گرفته است. ساخت نانوذرات مرتب شده، برای کاربردهای علمی و فناوری اساسی مهم است. در بین تمام فرایندها، لیتوگرافی اصلی ترین مورد استفاده است. ایجاد آرایه های تحقق این معماری ها عمدتاً به توسعه روش های نانولیتوگرافی، از جمله فوتولیتوگرافی، لیتوگرافی پرتو الکترونی، چاپ جوهرافشان، لیتوگرافی نرم و چاپ نانو بستگی دارد. متأسفانه، این روش های لیتوگرافی، به ویژه هنگام تولید نمونه ها در مقیاس بزرگ، می توانند گران، پیچیده و زمان بر باشند. علاوه بر این، توان عملیاتی و کنترل پذیری این فرایندهای رسوبی می تواند بهتر باشد.

۲-۱-۴. الکتروریسی^۱

الکتروریسی یکی از ساده ترین روش های از بالا به پایین برای تولید مواد نانو ساختار است. به طور کلی برای تولید نانوالیاف از مواد مختلف استفاده می شود. یکی از پیشرفت های حیاتی در الکتروریسی، الکتروریسی هم مرکز است. الکتروریسی هم مرکز، ریسنده از دو مویرگ هم محور تشکیل شده است. در این مویرگ ها، دو مایع چسبناک، یکی به عنوان پوسته و دیگری به عنوان هسته، می توانند نانومعماری هسته-پوسته را در یک میدان الکتریکی تشکیل دهند. الکتروریسی هم مرکز روشی عملی و ساده و از بالا به پایین برای دستیابی به الیاف فوق نازک هسته-پوسته در مقیاس بزرگ است. طول این نانومواد فوق نازک را می توان تا چندین سانتی متر افزایش داد. این روش مواد هسته-پوسته، بسیار توخالی، غیرآلی، آلی و ترکیبی را توسعه داده است.

۲-۲. روش‌های پایین به بالا

روش سازنده اصطلاحی است که برای توصیف رویکرد پایین به بالا استفاده می‌شود. روش پایین به بالا، برعکس قطبی روش بالا به پایین است که در آن شکل، اندازه و ترکیب شیمیایی کاملاً مشخص از طریق رشد و خودآرایی تشکیل می‌شوند.

۲-۲-۱. سل‌ژل^۱

سل‌ژل یک روش نسبتاً جدید است که به ویژه برای ساخت نانوذرات اکسید فلزی استفاده می‌شود. حلال‌های آلی مانند الکل‌ها، کتون‌ها، آلدئیدها و غیره از نظر سطح واجد شرایط بیشتری هستند. روش سل‌ژل یک روش مرطوب شیمیایی است که به طور گسترده، برای توسعه نانومواد استفاده می‌شود. این روش برای توسعه انواع نانومواد با کیفیت بالا بر پایه اکسید فلزی استفاده می‌شود. این روش را روش سل‌ژل می‌نامند زیرا در طول ساخت نانوذرات اکسید فلز، پیش‌ماده مایع به یک سل تبدیل می‌شود و در نهایت، سل به یک ماده تبدیل می‌شود.

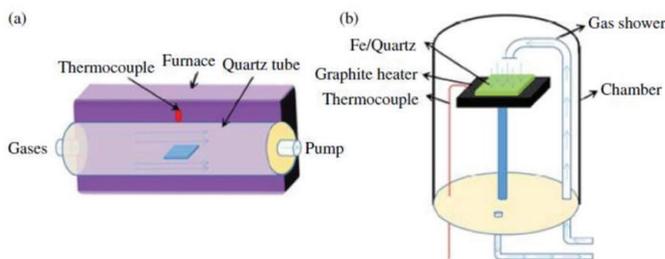
ساختار شبکه‌ای که ژل نامیده می‌شود، پیش‌سازهای معمولی برای تولید نانومواد با استفاده از روش سل-ژل آلوکسیدهای فلزی هستند. فرایند این روش را می‌توان در سه مرحله، شامل فرایندهای آبکافت، تراکم و خشک‌کردن تکمیل کرد:

- مرحله ۱: نمک پیش‌ساز تحت فرایند آبکافت قرار می‌گیرد که منجر به تشکیل ماده مورد نظر می‌شود.
- مرحله ۲: محلول هیدروکسید به راحتی متراکم می‌شود، به طوری که ساختار ژل سه‌بعدی شکل گرفته شود.
- مرحله ۳: ژل آماده‌شده تحت فرایند خشک شدن قرار می‌گیرد و در نتیجه تشکیل می‌شود.

۲-۲-۲. رسوب شیمیایی بخار^۲

رسوب شیمیایی بخار یک روش مهم و پرکاربرد برای تولید نانومواد، مبتنی بر کربن است. این فرایند شامل واکنش شیمیایی پیش‌سازهای فاز بخار برای تشکیل یک لایه نازک بر روی سطح بستر است. برای رسوب شیمیایی بخاری که مناسب باشد، یک پیش‌ماده باید فراریت کافی، خلوص شیمیایی بالا، پایداری خوب در طول تبخیر، هزینه کم، ماهیت غیرخطرناک و ماندگاری طولانی داشته باشد. علاوه بر این، تجزیه آن نباید منجر به ناخالصی‌های باقی‌مانده شود. تولید پوشش‌های لایه نازک جامد بر

روی سطوح و همچنین مواد حجیم، پودرها و مواد کامپوزیتی با خلوص بالا هدف اصلی استفاده از این روش است. کیفیت مواد ته‌نشین شده تحت تأثیر چندین عامل، مانند نوع رآکتور (دیوار داغ یا دیوار سرد)، دمای واکنش (از ۲۰۰ تا ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار واکنش (از زیر ۱ torr تا فشار بالای اتمسفر) است. در یک فرایند رسوب شیمیایی بخار معمولی، یک گاز پیش‌ساز به محفظه‌ای حاوی یک یا چند ماده برای پوشش دهی وارد می‌شود. این مواد تا دمای بالا گرم می‌شوند و باعث واکنش‌های شیمیایی روی سطوح آنها می‌شود و در نتیجه لایه‌های نازکی تشکیل می‌شود. فرآورده‌های فزّار و گازهای پیش‌ساز واکنش نمی‌دهند و همراه جریان گاز از محفظه واکنش خارج می‌شوند. فرایندهای پیشرفته رسوب شیمیایی بخار از روش‌هایی مانند پلاسما، یون‌ها، فوتون‌ها، لیزرها، رشته‌های داغ و واکنش‌های احتراق برای افزایش نرخ رسوب لایه‌های نازک و کاهش دمای واکنش استفاده می‌کنند. در تولید نانولوله‌های کربنی از طریق رسوب شیمیایی بخار، یک بستر در یک اجاق قرار می‌گیرد و تا دمای بالا گرم می‌شود. سپس، یک گاز حاوی کربن، مانند هیدروکربن‌ها، به آرامی به عنوان یک پیش‌ساز به سامانه معرفی می‌شود. در دماهای بالا، تجزیه گاز اتم‌های کربن آزاد می‌کند که دوباره با هم ترکیب می‌شوند و نانولوله‌های کربنی روی زیرلایه تشکیل می‌دهند. با این حال، انتخاب کاتالیزور نقش مهمی در ریخت‌شناسی نوع نانومواد به دست آمده دارد. در تهیه گرافن مبتنی بر رسوب شیمیایی بخار، کاتالیزورهای Ni، Co و گرافن چند لایه را تولید می‌کنند، در حالی که کاتالیزور مس گرافن تک‌لایه را فراهم می‌کند. به طور کلی، رسوب شیمیایی بخار یک روش عالی برای تولید نانومواد با کیفیت بالا است و برای تولید نانومواد دوبعدی، به خوبی شناخته شده است (Abid et al., 2022).



شکل ۳. تصویر شماتیک روش سنتز گرمایی (Abid et al., 2022)

۳-۲-۲. رسوب بخار فیزیکی^۱

رسوب بخار فیزیکی یک روش رسوب در خلأ است. معمولاً در نیمه‌هادی‌ها برای ایجاد لایه‌ها و پوشش‌های نازک استفاده می‌شود. این فرایند شامل تبخیر یک ماده منبع جامد یا مایع از یک کاتد

است که به عنوان منبع تبخیر عمل می‌کند. سپس این ماده با استفاده از یک پرتو الکترونی گرم می‌شود که باعث می‌شود ذرات به اندازه اتمی تبخیر شوند. این ذرات با مولکول‌های گاز وارد شده به محفظه برخورد می‌کنند و پلاسما ایجاد می‌کنند که از محفظه رسوب و سپس یک پمپ خلأ عبور می‌کند. این پلاسما در نهایت بر روی سطح متراکم می‌شود و یک لایه نازک تشکیل می‌دهد. رسوب بخار فیزیکی می‌تواند هم لایه‌های نازک و هم پوشش‌های چندلایه تولید کند که ضخامت این لایه‌ها می‌تواند در محدوده چند تا هزاران نانومتر باشد.

رسوب فیزیکی بخار روشی برای ایجاد یک پوشش تبخیراست که شامل انتقال مواد در سطح اتمی است. این فرایند مشابه رسوب شیمیایی بخار است با این تفاوت اصلی که در رسوب بخار فیزیکی، مواد اولیه یا پیش‌سازهایی که رسوب خواهند کرد به صورت جامد شروع می‌شوند. در مقابل، رسوب شیمیایی بخار شامل معرفی پیش‌سازها به محفظه واکنش در حالت گازی است. روش‌های رسوب بخار فیزیکی مانند کندوپاش و رسوب لیزریالسی^۱ (PLD) معمولاً استفاده می‌شود (Srivastava et al., 2020).

۲-۲-۴. تخریب حرارتی^۲

روش تجزیه حرارتی یک فرایند تجزیه شیمیایی است که نانوذرات باکیفیت با توزیع اندازه باریک تولید می‌کند. این در اثر گرما ایجاد می‌شود و شامل تجزیه ترکیبات آلی فلزی در دماهای بالا در حلال‌هایی با نقطه جوش بالا، به کمک مواد فعال سطحی‌های تثبیت‌کننده می‌شود. این روش به طور گسترده برای ساخت نانومواد اکسید فلزی، از جمله ZnO استفاده می‌شود.

روش تجزیه شیمیایی معمولاً برای ساخت نانومواد استفاده می‌شود و نیاز به یک تنظیم آزمایشی خاص دارد. این مجموعه شامل یک فلاسک ته‌گرد سه‌گردنی است که روی یک همزن حرارتی قرار می‌گیرد و مجهز به کندانسور آب شیشه‌ای است. یک دماسنج در یک فنجان حاوی روغن سیلیکون که بر روی صفحه همزن حرارتی نصب شده است، غوطه‌ور می‌شود و برای نظارت بر دما در طول واکنش استفاده می‌شود. برای حفظ یک اتمسفر بی‌اثر، گازهای آرگون یا نیتروژن به طور مداوم در داخل سامانه در طول واکنش جریان دارند (Srivastava et al., 2020).

۲-۲-۵. سولوترمال^۳

از روش حل گرمایی برای ایجاد نانومواد مختلف با خواص شیمیایی و فیزیکی خاص استفاده می‌شود که می‌تواند در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی، این روش در دماهای بالای ۳۰۰

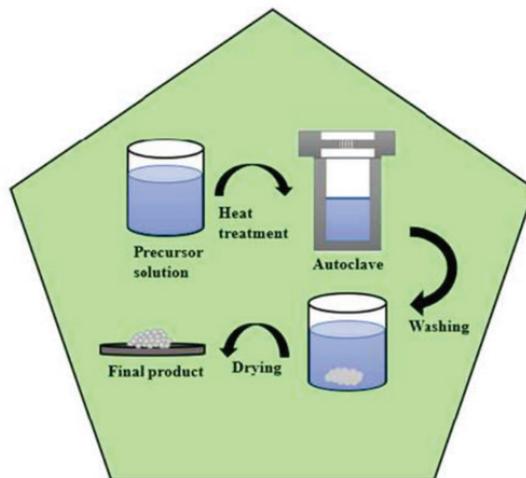
درجه سانتی‌گراد در رژیم فوق بحرانی انجام می‌شود. با این حال، برخی از مطالعات اخیر نشان داده‌اند که با استفاده از این روش می‌توان نانوکریستال‌ها را در دماهای پایین‌تر، یعنی زیر ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تولید کرد. روش حل گرمایی با موفقیت نانومواد مختلفی مانند فلزات، اکسیدهای فلزی و نیمه‌هادی‌ها را تولید کرده است. انواع مختلفی از نانومیله‌ها از طریق روش حل گرمایی ساخت شده‌اند. در این روش از حلال‌های آلی مختلف و آب به عنوان محیط واکنش استفاده می‌شود. امکان ساخت مواد جدید با استفاده از این روش نسبتاً زیاد است. انتخاب یک حلال مناسب بسیار مهم است زیرا حلال‌های آلی، نقش دوگانه‌ای در تأمین محیط واکنش و تشکیل مجتمع حلال-واکنش‌دهنده دارند. هنگام انتخاب حلال برای این روش، عامل‌های مختلفی از جمله وزن مولکولی، چگالی، نقطه ذوب، نقطه جوش، گرمای تبخیر، ممان دوقطبی، قطبیت و ثابت دی‌الکتریک باید در نظر گرفته شود. حلالیت حلال بیشتر به قطبیت حلال بستگی دارد که به عنوان مجموع نیروهای برهمکنش، بین حلال و املاح تعریف می‌شود. حلال‌های آلی رایج مورد استفاده در روش سولوتورمال عبارتند از متیل الکل، اتیل الکل، پروپانول، بوتانول، هپتانول، بنزین الکل و اتیلن گلیکول (Srivastava et al., 2020).

۲-۶. روش‌های سنتز گرمایی^۱

فرایند سنتز گرمایی یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین روش‌هایی است که برای تولید مواد نانوساختار استفاده می‌شود. در روش گرمایی، از طریق یک واکنش ناهمگن که در یک محیط آبی در فشار و دمای بالا در اطراف نقطه بحرانی در یک ظرف مهروموم شده انجام می‌شود، مواد نانوساختار به دست می‌آیند. روش حل گرمایی مانند روش سنتز گرمایی است. تنها تفاوت این است که در یک محیط غیرآبی انجام می‌شود. روش‌های سنتز گرمایی و حلال گرمایی عموماً در سامانه‌های بسته انجام می‌شود. در روش سنتز گرمایی به کمک مایکروویو، اخیراً به نانومواد مهندسی‌شده توجه شایانی گردیده است که مزایای هر دو روش سنتز گرمایی و مایکروویو را با هم ترکیب می‌کند. روش‌های سنتز گرمایی و حل گرمایی روش‌های مفیدی برای تولید نانو هندسه‌های مختلف مواد، مانند نانوسیم‌ها، نانومیله‌ها، نانوصفحات و نانوکره‌ها هستند. روش سنتز گرمایی به دلیل هزینه کم، محیط مناسب، مقیاس پذیری آسان و محصول نهایی خالص، سهم زیادی در علم و فناوری مدرن دارد. این روش برای ساخت دی‌اکسید تیتانیوم نانوساختار، گرافن، کربن و سایر نانومواد برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای فناورانه مانند الکترونیک، الکترونیک نوری، ذخیره داده‌های مغناطیسی، زیست‌پزشکی و زیست‌فوتونیک استفاده شده است.

رشد کریستال از طریق روش ساخت گرمایی شامل مراحل زیر است: مرحله ۱: در این فرایند، یک

پیش ماده با یک حلال در یک محلول مخلوط می شود، جایی که هیدروکسید فلز به عنوان کانی ساز عمل می کند و آلکوکسیدهای فلز به عنوان منبع یون های فلزی عمل می کنند. مرحله ۲: عملیات سنتز گرمایی در یک رآکتور مهروموم شده به نام اتوکلاو انجام می شود، جایی که ماده مغذی همراه با آب تأمین می شود. اختلاف دما بین قسمت های بالایی و پایینی محفظه باید حفظ شود. یون ها به سمت منطقه با دمای پایین منتقل می شوند و کریستال های دانه در انتها برای جمع آوری کریستال مورد نظر رسوب می کنند. مرحله ۳: پس از گریزانه، نمونه شسته و در دماهای مختلف خشک می شود تا محصول نهایی به دست آید (شکل ۴). ریخت شناسی کریستال در شرایط ساخت گرمایی ارتباط نزدیکی با شرایط رشد دارد. سازوکار رشد کریستال را می توان با مطالعه ریخت شناسی پیش بینی کرد. برای واپایش ریخت شناسی مواد آماده شده، بسته به فشار بخار ترکیب اصلی واکنش، می توان از حالت کم فشار یا فشار بالا استفاده کرد. ساخت گرمایی، جامدات قابل وجهی، مانند فسفرهای شب تاب، هادی های فوق یونی و کریستال های ریزمتخلخل را تهیه می کند (Abid et al., 2022).



شکل ۴. نمودار شماتیک روش سنتز گرمایی (Abid et al., 2022)

۲-۲-۷. روش های ریزامولسیون و مایسل معکوس^۱

روش مایسل معکوس برای تولید نانومواد با اشکال و اندازه های دلخواه ارزشمند است. در یک مایسل معمولی، امولسیون روغن در آب باعث می شود که دم های آب گریز به سمت هسته ای با قطرات روغن به دام افتاده باشد. با این حال، مایسل های معکوس در مورد امولسیون آب در روغن

تشکیل می‌شوند که در آن سرهای آبدوست به سمت هسته‌ای حاوی آب قرار می‌گیرند. هسته مایسل‌های معکوس به عنوان یک نانورآکتور برای ساخت نانوذرات با عمل به‌عنوان حوضچه آب برای توسعه نانومواد عمل می‌کند. اندازه این نانورآکتورها را می‌توان با تغییر نسبت آب به مواد فعال سطحی واپایش کرد که در نهایت بر اندازه نانوذرات ساخته شده از طریق این روش تأثیر می‌گذارد. کاهش غلظت آب منجر به قطرات کوچک‌تر آب می‌شود که به نوبه خود منجر به تشکیل نانوذرات کوچک‌تر می‌شود. بنابراین روش مایسل معکوس، یک مسیر آسان را برای ساخت نانوذرات یکنواخت با اندازه‌های دقیق واپایش شده فراهم می‌کند. نانوذرات توسعه یافته از طریق روش مایسل معکوس بسیار مناسب هستند.

۳. تشخیص و شناسایی

همان‌طور که اکتشاف نانومواد افزایش می‌یابد، نیاز به روش‌های پیشرفته مشخصه‌یابی حیاتی‌تر می‌شود. روش‌های مختلفی برای تجزیه و تحلیل خواص فیزیکی و شیمیایی نانومواد، از جمله اندازه، ریخت‌شناسی، ساختار بلوری و ترکیب عنصری توسعه یافته است. انتخاب مناسب‌ترین روش برای به دست آوردن نتایج دقیق، ضروری است. روش‌های مبتنی بر میکروسکوپ، مانند میکروسکوپ الکترون عبوری، میکروسکوپ الکترون روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی، اطلاعات ارزشمندی در مورد اندازه و ریخت‌شناسی نانومواد ارائه می‌دهند. اشعه ایکس، طیف‌سنجی، پراکندگی و روش‌های مشابه برای تعیین ترکیب شیمیایی و عنصری، خواص نوری و سایر ویژگی‌های رایج نانومواد استفاده می‌شوند. برای اندازه‌گیری خواص مغناطیسی نانومواد از روش‌های خاصی مانند مغناطیس سنج ارتعاشی، میکروسکوپ نیروی مغناطیسی استفاده می‌شود. در بخش‌های بعدی، روش‌های تحلیلی استاندارد مختلفی که هنوز برای توصیف نانومواد مورد استفاده قرار نگرفته‌اند، به تفصیل شرح داده می‌شوند (Srivastava et al., 2020).

۳-۱. روش‌های میکروسکوپی

میکروسکوپ الکترونی یک روش قدرتمند برای مطالعه ساختار و خواص مواد در مقیاس نانو است. از یک پرتو الکترون برای روشن کردن یک نمونه و تولید تصویری با وضوح بسیار بالاتر از آن چیزی که با میکروسکوپ نوری سنتی می‌توان به دست آورد، استفاده می‌کند. از پرتوی الکترون‌های شتاب‌دار برای ایجاد تصاویری از نمونه مورد مطالعه استفاده می‌کند و محققان را قادر می‌سازد تا اجسامی را در مقیاس‌هایی ببینند که با میکروسکوپ نوری سنتی امکان‌پذیر نیست (Sapsford et al., 2011).

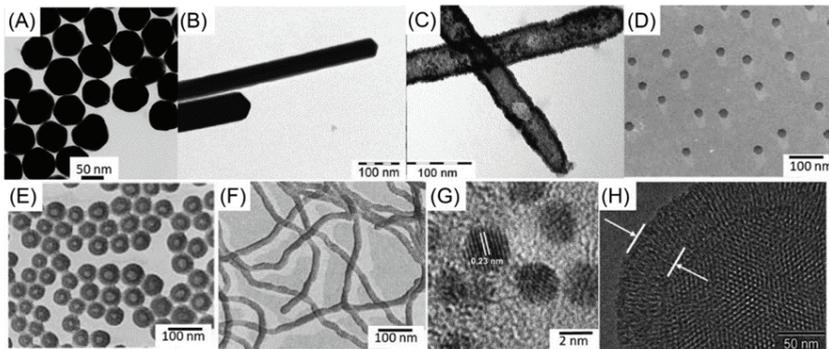
میکروسکوپ‌های الکترونی به ما امکان می‌دهند که جزئیات ساختاری نانومواد را که با

چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند، بررسی و تجسم کنیم. این روش‌ها، بسته به ویژگی‌ها و روش نمونه، امکان تجسم نانوذرات و ساختارها را در داخل یا روی سطح آنها فراهم می‌کنند. بر خلاف میکروسکوپ‌های نوری که از منابع نور مرئی و عدسی‌ها برای تولید تصاویر بزرگ‌نمایی شده در مقیاس میکرومتر استفاده می‌کنند، میکروسکوپ‌های الکترونی (EM)^۱ از پرتوهای الکترون‌های شتاب‌دار و عدسی‌های الکترواستاتیک یا الکترومغناطیسی برای تولید تصاویری با وضوح بسیار بالاتر بر اساس طول‌موج‌های بسیار کوتاه‌تر الکترون‌ها در مقایسه با فوتون‌های نور استفاده می‌کنند (Kaliva & Vamvakaki, 2020).

۳-۱-۱. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM)^۲

میکروسکوپ الکترونی عبوری شامل انتقال الکترون‌های تولیدشده از یک تفنگ الکترونی از طریق نمونه است که سپس برای تشکیل تصاویر با استفاده از عدسی‌های نوری الکترونی متمرکز می‌شوند. آماده‌سازی نمونه مرحله مهمی برای تحلیل میکروسکوپ الکترونی عبوری است و از روش‌های مانند پرداخت شیمیایی، پولیش الکتریکی و پرداخت مکانیکی برای نازک کردن نمونه تا ۴۰-۱۵۰ نانومتر استفاده می‌شود (Khalid et al., 2014). میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) به طور گسترده برای مشخص کردن نانومواد در وضوحی برابر با ابعاد اتمی استفاده می‌شود. میکروسکوپ الکترونی عبوری اطلاعات شیمیایی و تصاویری از نانومواد ارائه می‌دهد و اندازه ذرات دقیق و جزئیات مربوط به نانوذرات را ارائه می‌دهد. در مقایسه با میکروسکوپ الکترونی روبشی، میکروسکوپ الکترونی عبوری وضوح مکانی و اندازه‌گیری‌های تحلیلی با کیفیت بالا و عملکردهای مبتنی بر اصل میکروسکوپ نوری را ارائه می‌کند. از مزایای میکروسکوپ الکترونی عبوری می‌توان به بزرگ‌نمایی قدرتمند و ارائه اطلاعات در مورد ساختارهای ترکیبی و عناصر اشاره کرد. با این حال، تعمیر و نگهداری ویژه مورد نیاز است و خروجی تصاویر سیاه و سفید گران‌قیمت است (Kumar et al., 2019).

روش‌های میکروسکوپ پیشرفته مانند اسکن کردن و میکروسکوپ الکترونی عبوری جزئیات ساختاری نانومواد را که با چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیستند، نشان می‌دهند. میکروسکوپ الکترونی عبوری تصاویر مستقیم و اطلاعات شیمیایی نانومواد را با وضوح سطح اتمی ارائه می‌دهد. با این حال، معایب میکروسکوپ الکترونی عبوری، شامل نیاز به خلأ بالا و بخش نمونه نازک برای نفوذ پرتو الکترون، تخریب نمونه و اندازه‌گیری در شرایط غیرطبیعی است. برخی از نمونه تصاویر گرفته‌شده به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری را در (شکل ۵) مشاهده می‌شود (Lin et al., 2014).



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از الف) نانوذرات طلا، ب) نانومیله‌های مسی، پ) مایسل‌های پسهاری، ت) وزیکول‌ها، ث) مایسل کرم مانند، ج) تصویر-میکروسکوپ الکترونی عبوری با قدرت تفکیک بالا از تیول پوشیده با نانوذرات طلا و چ) یک نانومواد مزوپور می‌شود (D.R. Baer, May 2010)

۳-۱-۲. میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

میکروسکوپ الکترونی یک روش قدرتمند است که از پرتوهای الکترون‌های شتاب‌دار و عدسی‌های الکترواستاتیک یا الکترومغناطیسی برای تولید تصاویر با وضوح بالا از نمونه‌ها استفاده می‌کند. میکروسکوپ الکترونی روبشی یک روش تصویربرداری سطحی است که سیگنال‌هایی را تولید می‌کند که ترکیب اتمی و جزئیات توپوگرافی سطح نمونه را منعکس می‌کند. این می‌تواند وضوح کمتر از ۱ نانومتر را به دست آورد و امکان دستیابی مستقیم به اندازه، توزیع اندازه و شکل نانومواد را فراهم می‌کند. با این حال، فرایند آماده‌سازی نمونه برای میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌تواند باعث انقباض نمونه و تغییر ویژگی‌های نانومواد شود. پوشاندن زیست‌مولکول‌ها با یک لایه فوق نازک از مواد رسانای الکتریکی اغلب برای نمونه‌های نارسانا مورد نیاز است (Lin et al., 2014).

میکروسکوپ الکترونی روبشی یک روش همه‌کاره برای تجزیه و تحلیل ریز و نانوساختارها است که اطلاعاتی در مورد ترکیب و توپوگرافی سطوح ارائه می‌دهد و دستیابی به ویژگی‌هایی مانند توپوگرافی، ریخت‌شناسی، ترکیب و اطلاعات کریستالوگرافی را امکان‌پذیر می‌کند و دارای بزرگ‌نمایی قابل تنظیم است که امکان تجسم ساختارها در مقیاس میکرو و نانو را فراهم می‌کند. میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح نمونه را در با پرتوهای الکترونی اسکن می‌کند و سیگنال‌هایی را تولید می‌کند که جزئیات توپوگرافی و ترکیب اتمی را منعکس می‌کند. وضوح به دست آمده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی حدود ۱ نانومتر است و عمدتاً به عامل‌های عملیاتی و خواص نمونه مشخص شده بستگی دارد. این روش بر اساس الکترون‌های تولید شده، شتاب‌گرفته و متمرکز شده به سمت نمونه کار می‌کند و جزئیات و دقت بالایی را ارائه می‌دهد (Kumar et al., 2019).

۳-۱-۳. میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM)

میکروسکوپ نیروی اتمی بر اساس اصل قانون هوک کار می‌کند که در آن کاوشگر نزدیک سطح نمونه حرکت می‌کند. میکروسکوپ نیروی اتمی بر تعامل بین سوزن و سطح نمونه برای تشکیل یک تصویر متکی است. میکروسکوپ سطح نمونه را با استفاده از یک سوزن تیز با قطر در حدود نانومتر اسکن می‌کند. انتهای دیگر سوزن به یک بازوی پیزوالکتریک متصل است. همان طور که سوزن روی سطح نمونه حرکت می‌کند، تغییرات ارتفاع سطح باعث ایجاد نیرویی روی سوزن می‌شود که باعث خم شدن یا انحراف سوزن می‌گردد. این انحرافات با نیروی وارد شده به سوزن، نسبت مستقیم دارند. با اندازه‌گیری این انحرافات در حین اسکن سطح توسط آشکارساز، نقشه‌ای از ارتفاعات سطح ایجاد می‌شود که رایانه از آن برای تولید تصویر استفاده می‌کند (Kumar et al., 2019).

بر خلاف روش‌های دیگر مانند میکروسکوپ تونلی روبشی، میکروسکوپ نیروی اتمی برای اندازه‌گیری به سطوح بدون اکسید و رسانای الکتریکی نیاز ندارد. برای تشخیص انحراف نوک کنسول ناشی از دافعه الکترواستاتیکی و واندروالسی و همچنین جاذبه بین اتم‌ها در نوک و روی سطح اندازه‌گیری شده، از یک سوزن میکرو با نوک تیز استفاده می‌کند. این امکان تصویربرداری با وضوح بالا از سطوح با وضوح عمودی حدود ۰٫۵ نانومتر را فراهم می‌کند. از میکروسکوپ نیروی اتمی می‌توان برای بررسی اندازه، شکل، ساختار، جذب، پراکندگی و تجمع نانومواد استفاده کرد و برای این منظور می‌توان از حالت‌های مختلف اسکن استفاده کرد. یکی از مزایای اصلی میکروسکوپ نیروی اتمی توانایی آن در تصویربرداری از انواع زیست‌مواد در مقیاس زیر نانومتری در مایعات آبی بدون ایجاد آسیب قابل ملاحظه به بسیاری از انواع سطوح بومی است. با این حال، یک اشکال مهم این است که اندازه نوک سوزن به طور کلی مهم‌تر از ابعاد نانومواد مورد بررسی است که منجر به تخمین بیش از حد نامطلوب ابعاد جانبی نمونه‌ها می‌شود (Lin et al., 2014).

۳-۱-۴. میکروسکوپ تونلی روبشی (STM)

میکروسکوپ تونلی روبشی یک روش تصویربرداری قدرتمند است که محققان را قادر می‌سازد تا تصاویری با وضوح فوق‌العاده بالا در مقیاس اتمی بدون استفاده از نور یا پرتوهای الکترونی به دست آورند. این اجازه می‌دهد تا مشخصه‌های تفکیک اتمی مواد مانند گرافن و گرافن چند لایه، روی هر دو لایه فلزی و عایق، مشخصه زبری سطح، عیوب و اندازه و ترکیب مولکول‌ها روی سطح را مشخص کند. همچنین برای اسکن طیف‌سنجی تونل‌زنی (STS) استفاده می‌شود که اطلاعاتی را در مورد ساختار الکترونیکی در یک مکان مشخص در نمونه ارائه می‌دهد (Kumar et al., 2019). در میکروسکوپ‌های

تونلی روبشی ولتاژ مورد نظر بین یک سوزن تیز و بسیار نازک که برای روبش استفاده می‌شود و سطح مورد بررسی ایجاد می‌شود و وقتی که فاصله سوزن و سطح بسیار کم شد و به حدود صد نانومتر برسد پدیده‌ای به نام تونل‌زنی رخ می‌دهد که در اثر این پدیده، بدون هیچ تماسی، جریانی بین سطح و سوزن برقرار می‌شود و پس از تغییر جریان عملیات روبش توسط سوزن بر روی سطح انجام می‌شود. میکروسکوپ تونلی روبشی، تنها می‌تواند جهت مطالعه سطوحی که از لحاظ الکتریکی رسانایی قابل قبولی دارند، مورد استفاده واقع شود (Lin et al., 2014).

۲-۳. روش‌های طیف‌سنجی

روش‌های طیف‌سنجی از برهمکنش تابش الکترومغناطیسی با یک ماده نمونه استفاده می‌کنند که منجر به جذب وابسته به طول‌موج یا انتشار فلورسانس می‌شود و اطلاعاتی در مورد ساختار و ترکیب مواد ارائه می‌دهند. روش‌های طیف‌سنجی به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مانند شیمی، فیزیک و زیست‌شناسی برای مطالعه خواص مواد از جمله خواص الکترونیکی، مغناطیسی و شیمیایی آنها استفاده می‌شود. برخی از انواع رایج روش‌های طیف‌سنجی عبارتند از طیف‌سنجی مادون‌قرمز، طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش و طیف‌سنجی تشدید مغناطیسی هسته‌ای (Sapsford et al., 2011).

۱-۲-۳. طیف‌سنجی فوتوالکترونی اشعه ایکس (XPS)

طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس یک روش طیف‌سنجی کمی حساس به سطح است که برای تعیین ترکیب عنصری، حالت شیمیایی و ساختار الکترونیکی سطح یک ماده استفاده می‌شود. طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس یک روش اندازه‌گیری قدرتمند است زیرا نه تنها نشان می‌دهد که چه عناصری وجود دارند، بلکه همچنین نشان می‌دهد که آنها به چه عناصر دیگری متصل هستند. طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس برای تجزیه و تحلیل خارجی‌ترین سطح یک ماده استفاده می‌شود و آن را به ابزاری ارزشمند برای علوم سطح تبدیل می‌کند. طیف فوتوالکترون اشعه ایکس با تابش یک سطح جامد با پرتوهای اشعه ایکس و اندازه‌گیری انرژی جنبشی و شدت الکترون‌های پرتاب‌شده به دست می‌آید. انرژی‌ها و شدت پیک‌های فوتوالکترونی امکان شناسایی و تعیین کمیت عناصر موجود در سطح را فراهم می‌کند. طیف‌سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس در طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله مشخصه‌یابی سطح، علم مواد و تجزیه و تحلیل بسیار استفاده می‌شود (D.R. Baer, May 2010).

۳-۲-۲. طیف‌سنجی رامان (RS)

پراکندگی رامان روشی است که برای توصیف ساختاری نانومواد استفاده می‌شود. این پراکندگی غیرالاستیک فوتون‌ها با فرکانس‌های متفاوت از نور فرودی پس از برهمکنش با دوقطبی‌های الکتریکی مولکول را اندازه‌گیری می‌کند. پراکندگی رامان مکمل طیف‌سنجی فرورسرخ (IR)^۲ است و مزایایی مانند تجزیه و تحلیل اندازه متوسط و توزیع اندازه دارد. با این حال، دارای معایبی مانند تأخیر در تفکیک مکانی در ترسیم کاربردها در فناوری نانو، مقاطع عرضی کوچک‌تر و نیاز به تحریک شدید لیزر و مقادیر زیاد نمونه برای ارائه سیگنال‌های پراکندگی رامان کافی است. علاوه بر پراکندگی رامان، از پراکندگی رامان ارتقایافته سطحی (SERS)^۳ و طیف‌سنجی رامان با نوک افزایش یافته (TERS)^۴ نیز استفاده می‌شود. پراکندگی رامان اطلاعاتی در مورد داده‌های توپولوژیکی، ساختار نانومواد و خواص شیمیایی و الکترونیکی مورد نظر ارائه می‌دهد (Kumar et al., 2019).

۳-۲-۳. طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FT-IR)^۵

روش طیف‌سنجی (FT-IR) معمولاً برای نشان دادن اتصال نانومواد به مولکول‌های زیستی استفاده می‌شود. با اندازه‌گیری فرکانس‌های ارتعاشی ناشی از حالت‌های کشش و خمش ارتعاشی مولکول، به شناسایی گروه‌های عاملی روی سطح نمونه کمک می‌کند. این روش برای مطالعه اتصال مولکول‌های زیستی مختلف به نانومواد مانند لیزوزیم به نانوذرات الماس، آلبومین و پپتیدها به نانوذره طلا و هموپروتئین‌های جذب‌شده روی نانوذرات طلا و نقره و غیره استفاده شده است. علاوه بر این، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه می‌تواند اطلاعات ساختاری ثانویه پروتئین متصل شده، به ویژه در مناطق آمیدی را فراهم کند. این روش می‌تواند وضعیت ساختاری پروتئین متصل را تعیین کند که می‌تواند در درک سازوکار اتصال مفید باشد (Sapsford et al., 2011).

۳-۲-۴. طیف‌سنجی فلورسانس

یک اسپکتروفلورومتر برای اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل انتشارات فلورسانس استفاده می‌شود که شامل یک منبع نور (لامپ ژئون یا جیوه)، یک مونوکروماتور و فیلتر برای انتخاب طول موج‌های تحریک، یک نگهدارنده نمونه، یک مونوکروماتور و فیلتر برای انتخاب طول موج‌های انتشار، یک فتودتکتور که نور انتشاری را به یک سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند و یک واحد برای جمع‌آوری داده و تحلیل است. طیف‌سنجی فلورسانس روش ارزشمندی برای مشخص کردن نانوذرات فلورسانت، نقاط کوانتومی و نانوکریستال‌های نیمه‌رسانا که اثر محدودیت کوانتومی را نشان می‌دهند، جذب نور و لومینسانس را

1- Raman spectroscopy

2- Infrared spectroscopy

3- Surface-enhanced raman spectroscopy

4- Tip-enhanced raman spectroscopy

5- Fourier-transform infrared spectroscopy

افزایش می‌دهد. تغییر در طول موج فلورسانس می‌تواند برای بررسی گاف باند و خلوص نانومواد استفاده شود که اجازه تعیین اندازه نقاط کوانتومی را با اندازه‌گیری رنگی که از نانوذرات همان بلوک ساختاری اما اندازه‌های مختلف منتشر می‌شود، بدهد. علاوه بر این، طیف‌سنجی فلورسانس می‌تواند برای مطالعه تعاملات بین مولکول‌ها، مانند پروتئین‌ها و نانوذرات فلزی که درکی از تشکیل پیچیده‌های پروتئینی نانوذرات و خاموش شدن فلورسانس را فراهم می‌کند، استفاده شود (Kaliva & Vamvakaki, 2020).

۳-۲-۵. طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش

طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش (UV-visible) یک روش تجزیه و تحلیل قدرتمند است که به طور معمول در زمینه علوم مواد برای شناسایی، توصیف و مطالعه گسترده‌ای از مواد آلی، غیرآلی و زیستی استفاده می‌شود. اصل اساسی این روش اندازه‌گیری مقدار نوری است که از طریق یک نمونه عبور می‌کند و اطلاعات ارزشمندی در مورد ترکیب، ساختار و ویژگی‌های آن ارائه می‌دهد. یکی از کاربردهای اصلی طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش در زمینه تحقیقات نانومواد است. با تحلیل رابطه بین طیف جذب و توزیع اندازه ذرات نانوکریستال‌های کوانتومی، پژوهشگران می‌توانند درکی از رفتار این مواد در مقیاس نانو به دست آورند. این در مطالعه نانوذرات فلزی بسیار مفید است، جایی که طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش برای تحلیل اندازه، شکل و ویژگی‌های سطحی آنها به صورت سامانه‌های پراکندگی کولوئیدال استفاده می‌شود. علاوه بر این، طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش می‌تواند مقدار یون‌های فلزی پیش‌ماده مورد استفاده در فرایند تشکیل این نانوذرات را تشخیص دهد.

مزایای طیف‌سنجی مرئی-فرابنفش شامل آسانی استفاده و تجزیه و تحلیل سریع مواد است. اسپکترومترهای مرئی-فرابنفش به طور گسترده در انواع زمینه‌ها از جمله پزشکی، تحقیقات، تجزیه و تحلیل جنایی و غیره استفاده می‌شوند. با این حال، لازم به ذکر است که عملکرد یک اسپکترومتر مرئی-فرابنفش دو پرتویی می‌تواند تحت تأثیر منفی گردوخاک روی آینه‌های آن قرار گیرد. نگهداری و تمیزکاری منظم این وسایل بسیار حیاتی است تا نتایج دقیق و قابل اعتماد تضمین شود (Kumar et al., 2019).

۳-۲-۶. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC)^۱

کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا روشی است که در شیمی تجزیه برای جداسازی، شناسایی و تعیین کمیت اجزای خاص در مخلوط‌ها استفاده می‌شود. بر اساس اصل کروماتوگرافی مایع، از یک سامانه تزریق فشار بالا برای پمپاژ یک حلال یا بافر به عنوان فاز متحرک از طریق یک ستون کروماتوگرافی با

یک فاز ثابت با بازده بالا استفاده می‌کند. کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا معمولاً برای تجزیه و تحلیل ترکیبات محلول در یک نمونه مایع استفاده می‌شود که امکان تجزیه و تحلیل کیفی و کمی اجزا و غلظت آنها را فراهم می‌کند. مزایایی مانند حساسیت بالا، اندازه نمونه کوچک، سرعت تجزیه و تحلیل سریع و بازده جداسازی بالا را ارائه می‌دهد.

در صنعت داروسازی، کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا نقش مهمی در تضمین ایمنی، اثربخشی و ثبات دارو ایفا می‌کند. کاربردهای حیاتی آن عبارت‌اند از:

- ارزیابی کیفی و تحلیل کمی
- توسعه فرمولاسیون
- کنترل کیفیت مواد اولیه و محصولات نهایی
- تعیین مدت ماندگاری
- تشخیص پزشکی
- تشخیص مواد مخدر
- تجزیه و تحلیل بقایای آفت‌کش‌ها و شیمیایی

کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا یک روشی همه‌کاره است که می‌تواند به محققان و تولیدکنندگان دارویی کمک کند تا خلوص و کیفیت مواد خام را ارزیابی کنند، پایداری دارو را تحت شرایط مختلف بررسی کنند و آثار دارو را در مایعات زیستی تشخیص دهند. با پیشرفت فناوری، قابلیت‌ها و کاربردهای کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا احتمالاً گسترش یافته و تکامل می‌یابد و نقش آن را در صنعت داروسازی بیشتر می‌کند (Nikolin et al., 2004).

۲-۲-۷. طیف‌سنجی جرمی (MS)^۱

طیف‌سنجی جرمی (MS) یک روش تحلیلی است که برای تعیین جرم، ترکیب عنصری و ساختار شیمیایی مولکول‌ها استفاده می‌شود. اصل طیف‌سنجی جرمی متکی بر تمایز ذرات باردار با جرم‌های مختلف با استفاده از نسبت جرم به بار آنها است که دقت و حساسیت بالایی در تشخیص ارائه می‌دهد. روش‌های مختلف طیف‌سنجی جرمی را می‌توان برای تعیین چندین ویژگی فیزیکی و شیمیایی نانومواد، مانند جرم، ترکیب و ساختار استفاده کرد. طیف‌سنجی جرمی در حال حاضر در مطالعات نانوفناوری، زیست‌محیطی و سم‌شناسی برای تعیین خصوصیات و کمیت استفاده می‌شود. پلاسمای جفت‌شده القایی^۲ (ICP) طیف‌سنجی جرمی عناصر را تبخیر، اتمیزه و یونیزه می‌کند و تجزیه

و تحلیل شیمیایی عنصری را ارائه می‌دهد. این ترکیب، کمیت و ترکیب عنصری قابل اعتماد نانوذرات فلزی و ناخالصی‌های موجود در نانوذرات غیرفلزی را با دقت و دقت اندازه‌گیری بالا ارائه می‌کند. با این حال، برخی از چالش‌ها، مانند هزینه تجهیزات و نیاز به پایگاه‌های اطلاعاتی برای شناسایی گونه‌ها، شناسایی شده‌اند (Kumar et al., 2019).

۳-۳. بررسی خواص شیمیایی ماده

بررسی خواص شیمیایی یک ماده شامل تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی، ساختار و رفتار آن در شرایط مختلف است که به درک چگونگی تعامل آن با سایر مواد و نحوه رفتار آن در محیط‌های مختلف کمک می‌کند. بررسی خواص شیمیایی یک ماده در زمینه‌های مختلف مانند علم مواد، شیمی و زیست‌شناسی ضروری است و می‌تواند به توسعه مواد جدید با خواص مطلوب، درک رفتار مواد در محیط‌های مختلف و طراحی داروهای جدید کمک کند.

۳-۳-۱. پراکندگی نور دینامیکی (DLS)^۱

نانومواد دارای چندین ویژگی فیزیکی و شیمیایی هستند که با استفاده از روش‌های پراکندگی تشعشع قابل بررسی هستند. پراکندگی نور دینامیکی روشی است که می‌تواند توزیع اندازه ذرات کوچک، مولکول‌ها یا بسپارها را در یک محلول یا سوسپانسیون با استفاده از لیزر به عنوان منبع نور بررسی کند. اصل پراکندگی نور دینامیکی نظارت بر نوسانات زمانی شدت پراکندگی الاستیک نور ناشی از حرکت براونی ذرات/مولکول‌ها است. برای توصیف فیزیکی و شیمیایی نانومواد، نقاط قوت اصلی پراکندگی نور دینامیکی شامل روش غیرتهاجمی، مدت آزمایش کوتاه و دقت در تعیین اندازه هیدرودینامیکی نمونه‌های تک پراکنده است. علاوه بر این، پراکندگی نور دینامیکی کاربرد محدودی برای تجزیه و تحلیل نمونه‌هایی با توزیع اندازه ناهمگن و حل و فصل ابعاد یک جمعیت نمونه مختلط با اندازه کمتر از سه عامل دارد. در نهایت، پراکندگی نور دینامیکی برای اندازه‌گیری دقیق اندازه‌های نانومواد غیر کرووی مناسب نیست زیرا ماهیت کرووی ذرات قبلاً در تحلیل فرض شده است (Lin et al., 2014).

۳-۳-۲. رزونانس مغناطیسی هسته‌ای^۲ (NMR)

رزونانس مغناطیسی هسته‌ای برای مطالعه هسته‌های اتمی دارای گشتاورهای مغناطیسی و تکانه زاویه‌ای در هنگام قرار گرفتن در معرض یک میدان مغناطیسی خارجی استفاده می‌شود. این جزئیات استثنایی در مورد محیط‌های شیمیایی هسته‌های تشکیل‌دهنده اتم، از جمله ساختار شیمیایی،

واکنش‌ها و دینامیک ارائه می‌دهد. رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به محیط مغناطیسی هسته‌ها بسیار حساس است و خطوط طیفی منفرد هسته‌ها را در محیط‌های مختلف مشاهده می‌کند و آن را به ابزاری ارزشمند برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند ساختار، خلوص و عملکرد در دندیرمها و مشتقات فولرن تبدیل می‌کند. رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به صورت مغناطیسی مواد را مرتب می‌کند و با هسته‌های اتمی دارای گشتاورهای مغناطیسی و تکانه زاویه‌ای که تحت یک میدان مغناطیسی قرار دارند، سروکار دارد. پدیده رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به هسته اتم‌هایی بستگی دارد که دارای خواص مغناطیسی هستند و می‌توان از آنها برای به دست آوردن اطلاعات شیمیایی استفاده کرد. در مطالعات اخیر، رزونانس مغناطیسی هسته‌ای گرادیان میدان پالسی برای ارزیابی نفوذپذیری نانومواد اجرا شده است که امکان بررسی در اندازه و تعامل گونه‌ها را فراهم می‌کند. با این حال، مقادیر کمتری از آماده‌سازی نمونه، حساسیت تشخیص کم و مصرف زمان برخی از اشکالات این روش را نشان می‌دهد (Kumar et al., 2019; Lin et al., 2014).

۳-۳-۳. پراش اشعه ایکس (XRD)^۱

پراش اشعه ایکس یک روش بسیار مؤثر و خوب است که تصاویر با وضوح بالا در مقیاس اتمی ارائه می‌دهد. این روش به طور گسترده برای تعیین اندازه متوسط ذرات و ساختارها استفاده می‌شود و اطلاعاتی در مورد تغییرات در ساختار بلور، تعیین فاز و شناسایی، شکل و اندازه بلورها، انحراف تگرگ، اندازه و جهت به ما می‌دهد. از پراش اشعه ایکس برای مشخص کردن مواد حاوی مؤلفه‌های نانوسایز درون یک ماتریس زیستی گسترده مانند آنهایی که در چارچوب بافت و استخوان یافت می‌شوند، استفاده می‌شود، جایی که تجزیه و تحلیل تغییرات فاصله بین لایه‌های نانومواد می‌تواند برای ارزیابی کامل واکنش یا بررسی جهت زیست‌مولکولی مورد استفاده قرار گیرد. پراش اشعه ایکس ابزار ضروری برای پژوهشگرانی است که با مواد لایه‌ای نانوبیوکنژوگیت، مانند نانوبیوهیبریدها و نانوذرات چربی جامد، کار می‌کنند.

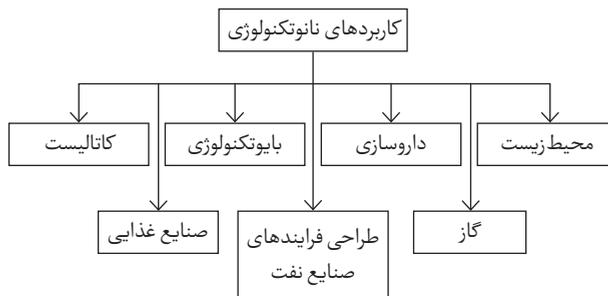
طبق قانون براگ، امواج به طور سازنده در جهات خاصی اضافه می‌شوند.

$$n\lambda = 2d\sin(\theta)$$

که در آن فاصله بین زوایای پراش، زاویه برخورد، یک عدد صحیح و طول موج پرتو است. پراش اشعه ایکس یک روش به خوبی تثبیت شده است که تصاویری با وضوح بالا در مقیاس اتمی ارائه می‌دهد. با این حال، محدودیت‌هایی مانند تنها یک حالت تأیید قابل دسترسی در نمونه و شدت کم در مقایسه با پراش الکترونی دارد (Lin et al., 2014).

۴. کاربرد‌ها

قبل از پیشرفت علم نانو، مهندسين شيمي در حوزه‌های مختلف با چالش‌ها و کاستی‌هایی روبه‌رو بودند، برای مثال در طراحی فرایندهای صنایع نفتی با چالش‌هایی نظیر کاهش کارایی فرایندها، افزایش هزینه‌ها و کاهش بهره‌وری دست و پنجه نرم می‌کردند. مثلاً در فرایند جذب، مواد جاذبی استفاده می‌شد که کارایی پایین و هزینه بالایی داشت. همچنین مواد استفاده شده در فرایندهای کاتالیستی دارای بازدهی پایین و طول عمر کوتاه بودند. با پیشرفت علم نانو، مهندسين شيمي توانستند، جاذب‌ها و کاتالیست‌هایی با خصوصیات و کارایی بالا طراحی کنند. به طوری که مواد کاتالیستی با خصوصیات و کاربردهای مختلف در صنایع نفت و گاز تولید می‌شود که می‌توانند در فرایندهای هیدروژناسیون، اکسیداسیون و هیدروکربناسیون استفاده شوند. با استفاده از نانوذرات، فرایندهای تصفیه آب با کارایی بالاتر و هزینه کمتر طراحی می‌شود؛ بنابراین، با پیشرفت علم نانو، مهندسين شيمي قادر به حل چالش‌های موجود در طراحی فرایندهای صنایع نفت شده‌اند و سطح کارایی و کاربرد این فرایندها را ارتقاء بخشیده‌اند. همچنین مهندسين شيمي با به‌کارگیری فناوری نانو توانستند علم دارورسانی را متحول کنند و با ساخت حامل‌های دارویی و تغییرات در روش‌های دارورسانی، به ویژه در درمان سرطان‌های مختلف کمک شایانی به علم پزشکی بکنند. به طور کلی مطالعات امروز نشان می‌دهد که فناوری نانو می‌تواند به هر پدیده‌ای در سطح نانو و به هر رشته‌ای از شاخه‌های علوم مربوط شود، اعم از علوم پایه (فیزیک، شیمی، ریاضی، زیست‌شناسی و...)، علوم انسانی (حقوق، ارتباطات و...) و علوم مهندسی (مهندسی برق، مهندسی مواد، مهندسی عمران، مهندسی مکانیک و...) و بالاخره مهندسی شیمی که موضوع این نوشتار است. در ادامه به بررسی دقیق‌تر کاربرد فناوری نانو در گرایش‌های مختلف مهندسی شیمی می‌پردازیم. (شکل ۶)



شکل ۶. کاربرد نانوفناوری در گرایش‌های مختلف مهندسی شیمی

۴-۱. کاتالیست

کاتالیز یک فناوری حیاتی است که امکان عملکرد و استفاده از تعداد بی‌شماری از مواد خام را فراهم می‌کند که می‌توانند برای تشکیل محصولات با ارزش بالا مورد استفاده قرار گیرند. کاتالیز در یک

فصل مشترک را، کاتالیز ناهمگن می‌نامند که در آن واکنش دهنده‌ها و کاتالیزور در فازهای مختلف قرار دارند. در بیشتر موارد، کاتالیزورهای مورد استفاده در کاتالیز ناهمگن جامد یا پودر و واکنش دهنده‌ها گاز یا مایع هستند (Tahir et al., 2022). کاتالیز یکی از پیشگامان استفاده از نانوذرات است. اجزا و مواد مختلف مانند آلومینیوم، آهن، دی‌اکسید تیتانیوم و سیلیس، همگی به‌عنوان کاتالیزور در مقیاس نانو در دهه‌های گذشته مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Somwanshi et al., 2020).

با کاهش اندازه یک ماده در محدوده نانو، درصد اتم‌ها در سطح آن قابل توجه می‌شود. بنابراین، نسبت سطح به حجم بعدی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد که بر خواص مربوط به سطح ماده تأثیر می‌گذارد. به‌طور کلی، ویژگی‌های جالب و سودمند نانوذرات عبارتند از:

- نسبت‌های سطح به حجم بالا که تعداد زیادی مکان فعال در واحد سطح را در مقایسه با همتایان حجیم خود فراهم می‌کند.
- پتانسیل رتا بالاتر، از تجمع نانو خوسه‌ها در محلول جلوگیری می‌کند.
- جداسازی و بازیافت احتمالی، کاهش احتمال آلودگی کاتالیزور به محصول و مقرون به‌صرفه ساختن آنها.

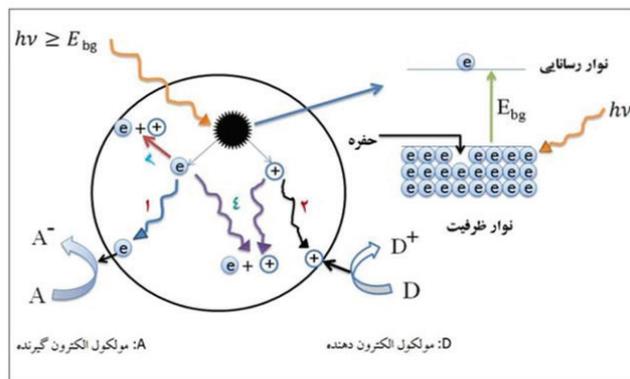
نانوذرات فلزی انتقالی دارای ویژگی‌های مختلف یک کاتالیزور کارآمد هستند. نانوذرات فلزی کلوئیدی به‌عنوان کاتالیزور در سامانه‌های همگن استفاده می‌شوند یا می‌توانند با استفاده از تکیه‌گاه‌هایی، مانند آلومینا، سیلیس، تیتانیا، مواد کربنی یا ژئولیت ناهمگن شوند. تکیه‌گاه می‌تواند یک پودر یا یک جامد ارزان‌قیمت از پیش شکل با سطح بالایی باشد که معمولاً به خودی خود، فعالیت کاتالیزوری نشان نمی‌دهد.

نانوذرات فلزی انتقالی دارای نقشی اساسی در کاتالیز هستند زیرا فعال‌سازی سطح فلز و کاتالیز را در مقیاس نانو سکویی تقلید می‌کنند و بنابراین کارایی و گزینش‌پذیری را برای کاتالیز ناهمگن به ارمغان می‌آورند (Tahir et al., 2022). نانوذرات به‌عنوان مهم‌ترین کاتالیزور مدرن تلقی می‌شوند و کاربرد گسترده‌تری دارند که از تولید شیمیایی تا کاربردهای تبدیل انرژی و ذخیره‌سازی را شامل می‌شود (Somwanshi et al., 2020).

نسبت سطح به حجم نانوذرات فلزی، به‌ویژه به‌عنوان یک کاتالیزور، باعث افزایش صددرصدی بازده در مقایسه با مواد حجیم می‌شود. نانومواد دارای خواص قابل توجهی مانند خاصیت فوتوکاتالیزوری، مساحت سطح بالا، نسبت ابعاد بالا، خواص الکترواستاتیکی، تراکم‌پذیری بدون تغییر در سطح، حجم منافذ قابل تنظیم، خاصیت مغناطیسی، آب‌گریزی و آب‌دوستی و غیره هستند. ویژگی نسبت سطح به حجم نانومواد، برهمکنش با باکتری‌ها و آلاینده‌ها را کنترل می‌کند.

نمونه‌هایی از نانوکاتالیست‌ها، نانوذرات TiO_2 و Zn هستند که به دلیل فعالیت فوتوکاتالیستی

قوی، در زمره نانومواد نیمه هادی قرار می‌گیرند. آنها برای تجزیه آلاینده‌های آلی در آب و هوا و همچنین به عنوان عوامل ضد میکربی استفاده می‌شوند. به طور خلاصه، کاتالیزور نوری در اثر تابش نور از طریق کاهش انرژی فعال سازی واکنش، منجر به بروز یا سرعت بخشیدن به واکنش‌های شیمیایی می‌شوند در حالی که خود، بدون تغییر باقی می‌مانند. در شکل ۷ فرایند رخ داده در یک کاتالیزور نوری نشان داده شده است (Tahir et al., 2022).



شکل ۷. تصویر عملکرد یک کاتالیزور نوری در اثر جذب نور فرابنفش، الکترون‌های لایه ظرفیت (Abid et al., 2022)

برخی از امیدوارکننده‌ترین نانومواد برای کاربردهای کاتالیزور شامل نانومواد فلزی مانند نقره، طلا، پلاتین و پالادیوم و همچنین نانومواد مبتنی بر کربن است. این مواد ظرفیت عظیمی را به عنوان مواد فعال برای کاربردهای کاتالیز و سنجش نشان داده‌اند و برای توسعه کاتالیزورها و حسگرهای کارآمد برای تشخیص زودهنگام و دقیق مولکول‌های زیستی، داروها و آلاینده‌ها در حال بررسی هستند. علاوه بر این، نانومواد کاربردی، مانند نانوذرات مغناطیسی، به دلیل خواص کاتالیزوری در کاربردهای مختلف زیستی، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نانومواد کمک قابل توجهی به توسعه کاتالیزورها و حسگرهای پیشرفته برای طیف گسترده‌ای از کاربردها، از جمله تشخیص بالینی، داروسازی، نظارت بر محیط زیست و صنایع فراوری مواد غذایی دارند. خواص منحصر به فرد نانومواد، آنها را برای کاربردهای مختلف کاتالیزور و حسی ایده‌آل می‌کند و تحقیقات در حال انجام در این زمینه بر افزایش بیشتر قابلیت‌های کاتالیزوری و حسی آنها متمرکز است (Leonte et al., 2017).

۲-۴. بسپار و نانوکامپوزیت‌ها

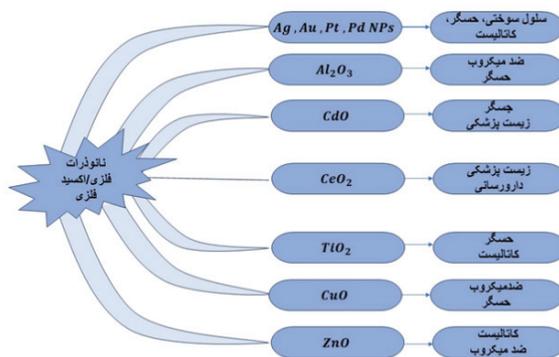
نانوکامپوزیت‌ها موادی هستند که حداقل یک بعد دارند که نانومتر است. عملکرد سطح بالایی را نشان می‌دهد و ترکیبی از کامپوزیت‌ها دارای ویژگی‌های غیرمعمول و منحصر به فرد در امکانات طراحی

هستند. آنها از دو یا چند کامپوزیت مختلف با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوت تشکیل شده‌اند و عمدتاً دارای فازهای مختلفی هستند که به وسیله فصل مشترک از هم جدا شده‌اند. با توجه به این، منحصربه‌فرد بودن در خواص توسط هیچ یک از اجزای تشکیل دهنده به دست نمی‌آید. مقدار بیشتر اجزای تشکیل دهنده، ماتریس نامیده می‌شود. تقویت فرایند، بهبود خواص نانوکامپوزیت‌ها با افزودن مواد تشکیل دهنده به مواد ماتریس است. نانوکامپوزیت‌ها به دلیل ترکیبات خود از نظر خواص تقویتی و ناهمسانگردی، از خود ناهمگنی نشان می‌دهند. مواد نانوکامپوزیت جایگزین‌هایی برای غلبه بر محدودیت‌ها در استوکیومتری و واپایش ترکیب عنصری کامپوزیت‌های ریز و یکپارچه هستند. نانوکامپوزیت‌ها بر اساس ساختارشان طبقه‌بندی می‌شوند. برای تشکیل نانوکامپوزیت از انواع نانو ذرات و مواد ماتریسی استفاده می‌شود. سه دسته از نانوکامپوزیت‌ها بر اساس ماتریس یا ماده میزبان استفاده شده وجود دارد. آنها نانوکامپوزیت‌های زمینه سرامیکی (CMC)، نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی (MMC)^۲ و نانوکامپوزیت‌های زمینه بسپاری^۳ (PMC) هستند (Shameem et al., 2021).

یکی از جذاب‌ترین جنبه‌های نانوبسپارها، رفتار وابسته به اندازه آنها است. این مواد در مقایسه با همتایان ماکروسکوپی خود، دارای سطح بسیار بزرگ‌تر در مقیاس نانو هستند. این افزایش نسبت سطح به حجم، نانوبسپارها را با خواص کاتالیزوری، نوری و الکتریکی تقویت می‌کند. به عنوان مثال، نانوذرات مواد بسپاری می‌توانند به دلیل افزایش تحرک حامل بار، رسانایی افزایش یافته‌ای از خود نشان دهند که آن‌ها را برای توسعه دستگاه‌های الکترونیکی پیشرفته ارزشمند می‌کند.

علاوه بر این، فراوانی مکان‌های سطحی روی نانوبسپارها امکان اتصال گروه‌های عاملی را فراهم می‌کند و آنها را برای سامانه‌های دارورسانی، حسگرها و سایر کاربردها مناسب می‌سازد. ساخت و خصوصیات نانوبسپارها به دلیل اندازه و نیاز به واپایش دقیق بر ساختار آن‌ها چالش‌های جذابی را ایجاد می‌کند. روش‌های استاندارد تولید نانوبسپار شامل بسپارسازی امولسیون، نانوسوب‌گذاری و ساخت به کمک الگو است. این روش‌ها تولید نانوبسپارهایی با اندازه‌ها، ترکیبات و شکل‌های واپایش شده را امکان‌پذیر می‌سازد. شکل ۸ برخی از کاربردهای نانوکامپوزیت‌های فلزی و اکسید فلزی را نشان می‌دهد.

درک کیفیت منحصربه‌فرد نانوبسپارها بسیار مهم است زیرا ظرفیت کاربرد گسترده آنها از سامانه‌های دارورسانی و دستگاه‌های الکترونیک نوری گرفته تا اصلاح محیطی و ذخیره انرژی و پزشکی را شامل می‌شود. ساخت و شناسایی نانوبسپارها نیازمند واپایش دقیق و روش‌های پیشرفته است. کاوش بیشتر در رفتار نانوبسپار و توسعه مستمر روش‌های ساخت جدید قفل برنامه‌های جدید را باز می‌کند و پیشرفت‌ها را در بخش‌های مختلف فناوری ممکن می‌سازد (Iqbal et al., 2022).



شکل ۸. کاربردهای نانومواد اکسید فلزی

۳-۴. محیط زیست

متأسفانه آلودگی محیط زیست به یک معضل شدید جهانی تبدیل شده است و هر روز خسارات جبران ناپذیری به آن وارد می‌شود. سرعت سریع شهرنشینی و صنعتی شدن، تعادل محیط زیست ما را از بین برده و منجر به انتشار مواد خطرناک، گازهای مضر و دود شده است. اینها باعث ایجاد اثرات سمی بر موجودات زنده و آلوده کردن خاک، آب و هوا، به خطر انداختن بوم‌سازگان‌ها و ایجاد مشکلات سلامتی مانند آلزایمر، زوال عقل و ناشنوایی می‌شوند. با این حال، با توسعه فناوری‌های جدید برای اصلاح و پاک‌سازی محیط، امید وجود دارد. نانوفناوری، به ویژه در توسعه روش‌های جدید و مقرون به صرفه برای شناسایی و پایش آلاینده‌ها، تخریب کاتالیزوری، حذف جذبی و پاک‌سازی آلاینده‌های محیطی، نوید بزرگی را نشان می‌دهد. محصولات نانوفناوری به دلیل اندازه کوچک‌تر، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی منحصر به فردی در مقایسه با مواد حجیم دارند. با توسعه مداوم نانوفناوری، ممکن است بتوانیم به طور مؤثر با موضوع رو به رشد آلودگی محیط زیست مبارزه کنیم (Javed et al., 2020).

با توجه به نگرانی فزاینده برای اقتصاد دوستدار محیط زیست، بسیاری از سازمان‌های تحقیقاتی زیست محیطی فعالانه به دنبال عوامل اصلاحی سازگار با محیط زیست برای احیای خاک و آب آلوده هستند. مطالعات اخیر بر روی فناوری‌های الکتروممبران، برای حذف اجزای باردار از محلول‌ها، مانند تولید آب شیرین از آب شور متمرکز شده‌اند. نانومواد همچنین در تصفیه فاضلاب و فناوری نانو فوتوکاتالیستی برای اکسید کردن ترکیبات آلی در آب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، مواد نانوساختار مختلف در دی‌یونیزاسیون خازنی (CDI)^۱، یک فناوری نوظهور برای تصفیه آب استفاده شده

است. شایان ذکر است که نانومواد رفتارهای متفاوتی را در محیط‌های آبی از خود نشان می‌دهند که برخی قابلیت بهتری برای اصلاح آلودگی آب نشان می‌دهند. نانومواد نقش مهمی در تصفیه فاضلاب ایفا کرده‌اند. فناوری غشای نانوفیلتراسیون برای جداسازی مواد در فاضلاب استفاده شده است، در حالی که نانومواد خاص اثر جذب بر روی مواد آلی یا یون‌های فلزی دارند. به عنوان مثال، نانوذرات کربن در شرایط اسیدی یا قلیایی پایداری برتری از خود نشان می‌دهند و عملکرد اصلاحی عالی را نشان می‌دهند. نانومواد دیگری، مانند گرافن، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات نقره، نانوذرات ZnO، نانوذرات TiO₂، مواد نانوالیافی نیز در اصلاح آلودگی آب مفید هستند (Saleem & Zaidi, 2020).

۴-۴. نانورآکتورها

یک راهبرد نوظهور برای ساخت نانوخوشه‌ها و نانوذرات شامل محصورکردن پیش‌سازهای ذرات در حجم‌های کوچک و کاهش و تجمع بعدی آن پیش‌سازها به ذرات مجزا است. این حجم‌های جدا شده از نظر فضایی، نانورآکتور نامیده می‌شوند و موانعی را ایجاد می‌کنند که حرکت اتم‌های فلز و سایر واکنش‌دهنده‌ها را محدود می‌کند و شرایط واکنش متمایز از شرایط محیط اطراف را فراهم می‌کند. نانورآکتورها را می‌توان با راهبردهای مختلفی تهیه کرد که به طور کلی در دسته‌های مبتنی بر محلول و بستر محدود قرار می‌گیرند. نانورآکتورهای مبتنی بر محلول به طور کلی به عنوان کپسول‌های سه بعدی که می‌توانند در محلول دست‌کاری شوند، تعریف می‌شوند در حالی که نانورآکتورهای محصور در بستر، حجم‌های ایزوله شده روی یک بستر یا سطح ماکروسکوپی هستند (Swisher et al., 2022).

دو نوع نانورآکتور وجود دارد، طبیعی و مصنوعی. گروه اول عملکرد انتخابی‌تر و ساختار پیچیده‌تری دارد در حالی که گروه دوم، دارای تنوع بیشتر و ساختار ساده‌تری است. فضای داخل نانورآکتورها محیطی مناسب برای تولید نانوساختارهای مختلف و طیف وسیعی از واکنش‌های شیمیایی است. تغییر سینتیک و کل مسیر فرایند زمانی امکان‌پذیر است که واکنش‌های شیمیایی در فضاهای محدود با ابعاد نانومتری و حجم میکرومتر انجام شود (Syah et al., 2021).

نانورآکتورها در نانوفناوری و نانوزیست‌فناوری استفاده می‌شوند و می‌توانند از کاتالیزورها در برابر اثرات خارجی محافظت کنند، بنابراین نرخ واکنش و سازوکارها را بهبود می‌بخشند. نانورآکتورها می‌توانند طبیعی یا مصنوعی باشند که نانورآکتورهای مصنوعی با انواع مختلف و گسترده مولکول‌ها ساخته می‌شوند. آنها کاربردهای بالقوه‌ای در هیدروژناسیون زیست‌توده، ذرات ویروس مانند برای کاتالیز و کاربردهای زیستی و فناوری‌های ذخیره‌سازی گاز دارند. نانورآکتورها را می‌توان با استفاده از مواد مختلفی، مانند سیلیس، بسپار و نانوذرات کربن تشکیل داد و از کاربرد بالقوه آنها در تحویل دارو/ژن و کاتالیز استفاده کرد (Syah et al., 2021).

۴-۵. زیست فناوری و داروسازی

زیست فناوری، استفاده از زیست شناسی برای توسعه محصولات، روش ها و اندامگان های جدید است که برای بهبود سلامت انسان و جامعه در نظر گرفته شده است. کاربردهای اولیه زیست فناوری منجر به توسعه محصولاتی مانند نان و واکسن گردید. این رشته در حد قابل توجهی در طول قرن گذشته به روش هایی که ساختارهای ژنتیکی و فرایندهای زیست مولکولی موجودات زنده را دست کاری می کند، تکامل یافته است. کاربردهای مدرن زیست فناوری اغلب از طریق مهندسی ژنتیک که به عنوان فناوری DNA نو ترکیب نیز شناخته می شود، مطرح شده است. مهندسی ژنتیک با تغییر یا تعامل با ساختارهای سلولی ژنتیکی کار می کند.

نانوزیست فناوری ترکیبی از رشته های نانوفناوری و زیست فناوری است که برای بهبود روش های سنتی زیست فناوری و غلبه بر محدودیت آنها، مانند عوارض جانبی ناشی از درمان های مرسوم، توسعه یافته اند. این حوزه دانشی شامل ادغام فناوری نانو و زیست فناوری برای ایجاد دستگاه ها، مواد و سامانه هایی در مقیاس نانو برای تشخیص، درمان و پیشگیری از بیماری ها است. نانوزیست فناوری از خواص منحصربه فرد مواد (در مقیاس نانو) مانند سطح بالا، واکنش پذیری بالا و اندازه کوچک برای ایجاد ابزارهای جدید در تحقیقات زیستی و کاربردهای پزشکی، بهره می برد. برخی از نمونه های کاربردهای نانوزیست فناوری شامل سامانه های دارورسانی در مقیاس نانو، عوامل تصویربرداری در مقیاس نانو برای تشخیص سرطان و نانوحسگرهای زیستی برای تشخیص بیماری ها می شود.

استفاده از نانوزیست فناوری در رساندن داروهای شیمیایی یا عوامل اصلاح کننده ژن به سلول های هدف، کارایی درمان ها را افزایش داده و عوارض جانبی را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. انتظار می رود که این رویکردها در درمان و پیشگیری از بیماری های مختلف، مانند سرطان ها، اختلالات ژنتیکی، دیابت، بیماری های التهابی و بیماری های عصبی مؤثر باشند (Gong et al., 2018).

دارورسانی، استفاده از اصول شیمیایی و زیستی برای واپایش مکان-زمانی و مکان-مولکولی دارو در داخل بدن است که برای منافع بالینی مورد توجه است. درمان های مرسوم سرطان مانند جراحی، شیمی درمانی و پرتودرمانی ممکن است برای بیمار عوارض جانبی شدیدی به همراه داشته باشد. بازگذاری داروهای ضدسرطان بر نانومواد، در یک سامانه دارورسانی مبتنی بر نانو، می تواند اثرات و عوارض منفی را کاهش دهد. دانشمندان به دنبال به حداکثر رساندن فعالیت دارو و به حداقل رساندن عوارض جانبی آن هستند که می توان با استفاده از نانوسامانه ها، توزیع داروها را واپایش و هدفمند نمود. یک مثال رایج از این رویکرد استفاده از لیپوزوم ها است که می توانند توزیع زیستی شیمی درمانی های ضد سرطان را هدایت کنند، به طوری که در هر مقطع زمانی، نسبت بیشتری از دارو

در داخل تومور و نسبت کمتری از دارو در بافت سالم قرار می‌گیرد. حتی کپسوله‌کردن داروهای پلتین در لیپوزوم‌ها، یک سامانه دارورسانی مبتنی بر نانو را برای درمان سرطان می‌سازد. نانوذرات طلاگزینه‌های سودمندی برای درمان و تشخیص سرطان هستند چون قابلیت زیستی بالایی دارند و الگوهای کنترل‌شده‌ای از انتشار دارو را در فرایند دارورسانی نشان می‌دهند. نانوذرات طلا از الکترون‌های رسانایی، روی سطوح خود تشکیل شده‌اند که توسط طول موج‌های خاصی از نور برانگیخته می‌شوند. این ویژگی، نانوذرات طلا را قادر می‌سازد تا نور را جذب کرده و گرمایی تولید کنند که برای سلول‌های سرطانی کشنده است. از بین بردن این سلول‌ها به وسیله گرمای آزاد شده تحت تابش، درمان فتوترمال^۱ یا درمان فتودینامیک^۲ نامیده می‌شود (Fernandes et al., 2020).

۴-۶. صنایع غذایی

از آن جایی که نانومواد دارای خواص متفاوتی هستند، می‌توانند خطرات سمی برای بدن انسان داشته باشند، یکی دیگر از نگرانی‌های قابل توجه، توانایی نانوذرات، به دلیل مقیاس بسیار کوچک، برای نفوذ به سلول‌هاست اما با وجود همه نگرانی‌های فزاینده در مورد اثرات نامطلوب بالقوه بر سلامت انسان، کاربردهای نانوفناوری در صنایع غذایی گسترده است. به عنوان مثال، نانوذرات مورد استفاده در بسته‌بندی مواد غذایی برای سلامت انسان مضر نیستند، اما ممکن است زمانی که در خود محصولات غذایی قرار می‌گیرد، خطراتی را به همراه داشته باشند. ابعاد دیگری از موضوع کاربرد نانوفناوری در صنایع غذایی درخور تأمل است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود (Angelopoulou et al., 2022).

۴-۶-۱. تشخیص آلاینده‌ها

سامانه‌های بسته‌بندی هوشمند عمدتاً از نانوحسگرهایی برای شناسایی آلاینده‌های مواد غذایی تشکیل شده‌اند. نانوحسگرهای مبتنی بر نانوذرات، قابلیت ردیابی تغییرات شیمیایی، فیزیکی و زیستی در طول پردازش و نگهداری مواد غذایی دارند. استفاده از این حسگرها در صنایع بسته‌بندی به شناسایی مواد شیمیایی، سموم و عوامل بیماری‌زا کمک می‌کند. یکی از دلایل خراب شدن احتمالی مواد غذایی، اکسیژن است. اکسیژن داخل بسته‌بندی مواد غذایی باعث اکسیداسیون چربی‌ها و روغن‌ها می‌شود. همچنین مسئول تغییر رنگ، تغییر در بافت، ترشیدگی، بوی بد و مشکلات مربوط به طعم است. نانوذرات تعبیه شده در بطری‌های پلاستیکی و نایلونی، بسته‌بندی را متراکم می‌کند و نفوذپذیری گاز را کاهش می‌دهد. سد تقویت‌شده با نانومواد، مواد غذایی حساس به اکسیژن را تازه‌تر نگه می‌دارد و می‌تواند هزینه‌های بسته‌بندی را برای تولیدکنندگان کاهش دهد (Angelopoulou et al., 2022).

۴-۶-۲. بررسی کیفی محصولات

بسته‌بندی هوشمند با نانوحسگرها و نشانگرها به ردیابی آسان اطلاعات مربوط به کیفیت محصولات غذایی در حین حمل و نقل، نگهداری و توزیع کمک می‌کند زیرا حسگرهای متصل در بسته‌بندی، تمام واکنش‌های مربوط به تغییرات مرتبط با محیط داخلی یا خارجی را ثبت می‌کند. مصرف‌کنندگان می‌توانند با کمک نانوحسگرهای تعبیه شده در بسته‌بندی، از وضعیت مواد غذایی داخل آن مطلع شوند (شکل ۹). نشانگرهای مذکور اطلاعات بصری و کیفی فوری مربوط به غذای بسته‌بندی شده را از طریق تغییر رنگ یا شدت آن ارائه می‌دهند. اجزای فعال این مواد در بسته‌بندی‌های هوشمند، عملکردهای مهمی مانند خواص ضد میکروبی، آنتی‌اکسیدانی یا دفع‌کننده حشرات یا جوندگان دارند. مهم‌ترین تأثیر مثبت استفاده از نانوذرات در حفظ کیفیت مواد غذایی و پایداری ذخیره‌سازی، کاهش میزان استفاده از افزودنی‌ها و مواد نگهدارنده است (Singh et al., 2017).



شکل ۹. با فاسد شدن محصولات درون این نوع از بسته‌بندی، بر روی سنسور تشخیص سلامت محصول یک خط به نشانه فاسد بودن محصول ظاهر می‌شود (Singh et al., 2017)

۴-۶-۳. نانو پوشش‌های خوراکی

نانوپوشش‌های خوراکی (پوشش‌های نازک ۵ نانومتری) در صنایع فراوری گوشت، میوه، سبزی‌ها، لبنیات و نان کاربرد دارد. مواد جاذب مختلفی مانند پلی‌الکترولیت‌های طبیعی (پروتئین‌ها و پلی‌ساکاریدها)، لیپیدهای باردار (فسفولیپیدها و مواد فعال سطحی‌ها) و ذرات کلونیدی (مایسل‌ها و وزیکول‌ها) را می‌توان برای تهیه نانوپوشش‌ها در بسته‌بندی مواد غذایی استفاده نمود. بسیاری از زیستی در تهیه لایه‌های پوششی زیست‌تخریب‌پذیر برای بسته‌بندی مواد غذایی کاربرد دارند. برای نمونه می‌توان از پلی‌ساکاریدهایی مانند سلولز، کیتوزان، نشاسته، پکتین، آلژینات، کاراگینان، پولولان و

کفیران نام برد که بیشتر مورد مطالعه قرار می‌گیرند. اینها می‌توانند لایه‌های پوششی مناسبی با خاصیت بازدارندگی خوب در برابر انتقال اکسیژن و دی‌اکسیدکربن تشکیل دهند (Primožič et al., 2021).

۴-۷. فرایندهای انرژی

امروزه اهمیت انرژی و نقش اساس آن به عنوان حرکت دهنده بخش‌های اقتصادی یک کشور بر کسی پوشیده نیست. محدود بودن منابع سوخت‌های فسیلی که عمده‌ترین منبع تولید انرژی در جهان به شمار می‌رود از یک سو و آثار مخرب زیست‌محیطی ناشی از مصرف بی‌رویه انرژی، آن را به یکی از مهم‌ترین چالش‌های حال حاضر دنیا تبدیل کرده است (Panjee Shahi, 2001). نانوفناوری در حال تقویت منابع انرژی جایگزین و استفاده از منابع انرژی موجود برای کمک به تقاضای رو به رشد انرژی در جهان است. افزایش بازده تولید سوخت از مواد خام مبتنی بر نفت به لطف کاتالیزور، بهبود یافته است و از طریق بهبود احتراق و اصطکاک کمتر، شاهد کاهش مصرف سوخت در خودروها و نیروگاه‌ها هستیم. همچنین از دیگر کاربردهای نانو در جهان امروزی می‌توان به استفاده ارزان‌تر برای تولید و نصب ساده‌تر سلول‌های خورشیدی نانو ساختار برای تبدیل نور خورشید به الکتریسیته، استفاده از نانولوله‌های کربنی برای ایجاد تیغه‌های آسیاب بادی بلندتر و در عین حال قوی‌تر و سبک‌تر و نیز، صفحات نازک خورشیدی که می‌توانند روی جعبه‌های رایانه نصب شوند، اشاره کرد.

نانوذرات و روش‌های تولید نانو امکان ایجاد تحول در توسعه و استفاده از سامانه‌های انتقال انرژی را فراهم آورده‌اند. به عنوان مثال، فناوری نانو می‌تواند کارایی سوخت‌های حمل و نقل را افزایش داده و در نتیجه تقاضا برای سوخت‌های مایع مورد استفاده برای سفرهای طولانی را کاهش دهد. علاوه بر این، استفاده از نانوذرات در مصالح ساختمانی می‌تواند منجر به قوی‌تر و کوچک‌تر شدن خطوط لوله و خطوط انتقال الکتریکی شود و ابعاد مورد نیاز برای نصب و نگهداری آنها کاهش یابد.

منابع انرژی تجدیدپذیر که به راه‌حل اصلی بسیاری از مسائل زیست‌محیطی تبدیل شده‌اند. این امر صنعت انرژی‌های تجدیدپذیر را به بخشی ضروری از صنعت زیست‌محیطی تبدیل کرده است. برای دستیابی به نتایج بهتر، فناوری نانو باید در امور انرژی جهان مورد توجه قرار گیرد. فناوری نانو به طور فزاینده‌ای در تولید انرژی خورشیدی، هیدروژن، زیست‌توده، زمین‌گرمایی و انرژی امواج جزرومدی استفاده می‌شود. با این حال، دانشمندان بر این باورند که هنوز تا تحقق کامل مزایای استفاده از فناوری نانو و انرژی‌های تجدیدپذیر، راه درازی در پیش است.

نانوفناوری انواع مختلفی از صفحات خورشیدی مانند صفحات خورشیدی تخت، صفحات جذب مستقیم، فرورفتگی‌های سهموی، صفحات موج‌دار و لوله‌های حرارتی وجود دارد. این پنل‌های خورشیدی را می‌توان با استفاده از نانوسیال‌ها بهبود بخشید که می‌تواند بازده کاری آنها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. با این حال، در مورد کاربرد عملی نانومواد در تولید پنل‌های خورشیدی

تحقیقات کافی وجود ندارد. همچنین لازم است تحلیل‌های مقرون به صرفه و کارایی دستگاه‌های خورشیدی سنتی و مبتنی بر فناوری نانو انجام شود تا بهترین رویکرد برای توسعه کلکتورهای نانو خورشیدی در آینده تعیین شود.

۴-۸. کاربردهای حوزه نفت و گاز

در صنعت نفت و گاز، از فناوری نانو برای بهبود فرایندهای مختلف و افزایش کارایی عملیات استفاده شده است. یکی از حوزه‌های حیاتی که در آن فناوری نانو به کار گرفته شده است، اکتشاف و تولید ذخایر نفت و گاز است. نانوحسگرها و نانومواد برای شناسایی و نظارت بر وجود هیدروکربن‌ها در مخازن توسعه یافته‌اند که امکان استخراج دقیق و کارآمدتر را فراهم می‌کند. نانوذرات همچنین می‌توانند با تغییر خواص سنگ مخزن و بهبود جریان نفت، بازیافت نفت را افزایش دهند. نانوکاتالیست‌ها در عملیات پالایش و فراوری برای بهبود کارایی واکنش‌های شیمیایی و کاهش مصرف انرژی توسعه یافته‌اند. همچنین می‌توان از نانومواد برای حذف ناخالصی‌ها و آلاینده‌ها از نفت خام استفاده کرد و کیفیت محصولات نهایی را بهبود بخشید. نانوپوشش‌ها را می‌توان در حمل و نقل خط لوله برای جلوگیری از خوردگی و کاهش اصطکاک، بهبود ایمنی و کارایی استفاده کرد. نانوفناوری همچنین برای توسعه مواد پیشرفته برای ذخیره و انتقال هیدروژن که یک منبع سوخت جایگزین امیدوارکننده است، مورد بررسی قرار گرفته است. به طور کلی، استفاده از فناوری نانو در صنعت نفت و گاز قابلیت بهبود کارایی، کاهش اثرات زیست محیطی و افزایش پایداری صنعت را دارد.

۵. آینده در نانو

نانومعماری اصطلاحی است که برای توصیف ایجاد سامانه‌های مواد کاربردی با استفاده از واحدهای مقیاس نانو استفاده می‌شود. این مفهومی است که بعد از فناوری نانو آمده است و شامل ترکیب فناوری نانو با سایر رشته‌های تحقیقاتی برای توسعه مواد نوآورانه است. در حالی که نانوفناوری بر دست‌کاری و واپایش ماده در مقیاس نانو تمرکز دارد، نانومعماری با استفاده از این واحدهای مقیاس نانو برای ایجاد سامانه‌های مواد کاربردی، قدمی فراتر می‌گذارد. این ادغام فناوری نانو با سایر رشته‌های علمی، امکانات نانوفناوری را گسترش می‌دهد و امکان توسعه مواد پیچیده‌تر و پیشرفته‌تر را فراهم می‌کند. نانومعماری فاز بعدی توسعه در حوزه فناوری نانو است، زیرا بر پایه فناوری نانو بنا شده و راه‌های جدیدی را برای ایجاد مواد کاربردی بررسی می‌کند.

نانومعماری و نانوفناوری دو مفهومی هستند که اغلب به جای یکدیگر استفاده می‌شوند اما در واقع، رویکردهای متفاوتی برای مصالح ساختمانی در مقیاس نانو هستند. در حالی که نانوفناوری بر دست‌کاری و واپایش ماده در مقیاس نانو برای ایجاد مواد و دستگاه‌های جدید با ویژگی‌های

منحصربه‌فرد متمرکز است، نانومعماری با استفاده از واحدهای نانومقیاس برای معماری مواد کاربردی، همه چیز را یک‌قدم جلوتر می‌برد. این امکان ترکیبات و انتخاب‌های بی‌حد و حصر در تولید مواد را فراهم می‌کند، حتی با استفاده از فرایندهای غیرتعادلی با مجموعه‌های تعادلی معمولی. از سوی دیگر، نانوفناوری اساساً بر ساخت، مشخصه‌یابی و کاربرد نانومواد و دستگاه‌های نانو متمرکز است و پیشرفت‌های موفقیت‌آمیزی در زمینه‌های مختلف تحقیقات علمی، مانند شیمی مصنوعی، مونتاژ فوق‌مولکولی، پردازش مواد و فناوری‌های مرتبط با زیستی ایجاد می‌کند. هدف نانومعماری ساخت ساختارهای مصالح نامتقارن و سلسله‌مراتبی است که نیازهای تولید مواد برای نیازهای اجتماعی را برآورده می‌کند.

نانومعماری با ایجاد امکان ایجاد سامانه‌های مواد کاربردی با استفاده از واحدهای مقیاس نانو، چندین مزیت را ارائه می‌دهد. این فناوری، نانو را با سایر رشته‌های تحقیقاتی ادغام می‌کند و امکان ایجاد ساختارهای مواد نامتقارن و سلسله‌مراتبی را فراهم می‌کند و نیازهای تولید مواد برای نیازهای اجتماعی را برآورده می‌کند. همچنین این امکان را برای استفاده از فرایندهای غیرتعادلی در ترکیب با مجموعه‌های تعادلی معمولی را فراهم آورده و طیف وسیعی از گزینه‌های تولید مواد را ارائه می‌دهد. نانومعماری همچنین فرصت‌هایی را برای توسعه مواد و دستگاه‌های جدید با ویژگی‌ها و عملکردهای منحصربه‌فرد ایجاد می‌کند. این امکان را برای نانومعماری سطحی گسترش می‌دهد و امکان تبدیل نانومعماری سطح زنجیره‌بند به معماری سلولی در سطح اندام را فراهم می‌کند. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری را برای در نظر گرفتن مایعات غیرآبی مختلف، دماها و اجزای فیلم در ترکیبات مناسب ارائه می‌دهد و بر محدودیت‌های روش‌های سنتی غلبه می‌کند.

حوزه نانومعماری اهداف خود را توسعه سوئیچ‌های اتمی، عملیات سیناپسی مصنوعی و دستگاه‌های شبکه نورومورفیک تعیین کرده است. هدف نهایی تبدیل اشیای فیزیکی و شیمیایی به موجودات زنده است که می‌تواند منجر به پیشرفت قابل توجهی در زیست‌شناسی مصنوعی شود. نانومعماری همه چیز در مورد ایجاد مواد کاربردی با واحدهای مقیاس نانو بر اساس اصول فناوری نانو است. در آینده، محققان در این زمینه ممکن است رویکردها و روش‌های جدیدی را برای تولید مواد، مانند استفاده از فرایندهای غیرتعادلی و مجموعه‌های نامتعارف بررسی کنند. هدف در اینجا ساختن سامانه‌های مواد کاربردی پیشرفته با ساختارهای نامتقارن و سلسله‌مراتبی است که بتواند نیازهای روزافزون جامعه برای تولید مواد را برآورده کند.

۶. نتیجه‌گیری

نانومواد ظرفیت قابل توجهی را برای پیشرفت در زمینه‌های مختلف علمی و مهندسی ارائه می‌دهند. هدف از این مقاله شناخت بهتر این مواد و کاربردهای آنها با تمرکز بر مهندسی شیمی و همچنین

- معرفی آینده این شاخه از علم است. در این راستا به تفصیل به شرح موارد زیر پرداخته شده است:
۱. روش‌های کلیدی ساخت (بالا به پایین و پایین به بالا) برای ساخت نانومواد و اهمیت روش‌های مشخصه‌یابی برای تجزیه و تحلیل خواص آنها معرفی شده‌اند.
 ۲. از نقطه نظر مهندسی شیمی، نشان داده شده که چگونه فناوری نانو به چالش‌های دیرینه در زمینه‌هایی مانند کاتالیز، تحویل دارو و تصفیه آب می‌پردازد.
 ۳. نانومعماری به عنوان آینده در انتظاری معرفی شده که فناوری نانو را با سایر رشته‌ها ادغام می‌کند تا سامانه‌های مواد پیچیده‌تر و کاربردی‌تری را ایجاد نماید. تحقیقات انجام شده مؤید قابلیت غیر قابل انکار نانومواد برای متحول کردن جنبه‌های مختلف فناوری در زندگی بشر است.

References

- Abid, N., Khan, A. M., Shujait, S., Chaudhary, K., Ikram, M., Imran, M., Haider, J., Khan, M., Khan, Q., & Maqbool, M. (2022). Synthesis of nanomaterials using various top-down and bottom-up approaches, Influencing Factors, Advantages, And Disadvantages: a review, *Advances in Colloid and Interface Science*, 300, 102597.
- Angelopoulou, P., Giaouris, E., & Gardikis, K. (2022). Applications and prospects of nanotechnology in food and cosmetics preservation, *Nanomaterials*, 12(7), 1196.
- D.R. Baer, M. H. E. (2010). XPS analysis of nanostructured materials and biological surfaces, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena volumes*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.elspec.2009.09.003>.
- Fernandes, N., Rodrigues, C. F., Moreira, A. F., & Correia, I. J. (2020). Overview of the application of inorganic nanomaterials in cancer photothermal therapy, *Biomaterials Science*, 8(11), 2990–3020.
- Gong, X., Huang, D., Liu, Y., Peng, Z., Zeng, G., Xu, P., Cheng, M., Wang, R., & Wan, J. (2018). Remediation of contaminated soils by biotechnology with nanomaterials: bio-behavior, applications, and perspectives, *Critical Reviews in Biotechnology*, 38(3), 455–468.
- Hosseinpour, P., (2004). A new approach to science and technologies, nano- technology and nano - science , *Iranian Journal of Engineering Education*, 6(22), 11–99 [In Persian].
- Iqbal, A., Raza, M., & Jadoon, H. (2022). Applications of nanomaterials for health and environment protection, *Moj Eco Environ Sci*, 7(3), 84–87.
- Javed, R., Zia, M., Naz, S., Aisida, S. O., Ain, N. u., & Ao, Q. (2020). Role of capping agents in the application of nanoparticles in biomedicine and environmental remediation: recent trends and future prospects, *Journal of Nanobiotechnology*, 18, 1–15.
- Kaliva, M., & Vamvakaki, M. (2020). Nanomaterials characterization, In *Polymer Science and Nanotechnology* (pp. 401–433), Elsevier.
- Khalid, P., Suman, V., Shameema, S., Vinodini, N., SHELA, R., & Chatterjee, P. K. (2014). Analytical methods for nanomaterial characterization, *International Journal of Nano Dimensions*, 5(9), 309–320.
- Kumar, P. S., Pavithra, K. G., & Naushad, M. (2019). Characterization techniques for nanomaterials, In *Nanomaterials for solar cell applications* (pp. 97–124), Elsevier.
- Leonte, O., Soleymani, L., & Sanabria, B. (2017). Application of nanomaterials to catalysis and energy, *231st ECS Meeting* (May 28–June 1, 2017).
- Lin, P.-C., Lin, S., Wang, P. C., & Sridhar, R. (2014). Techniques for physicochemical characterization of nanomaterials, *Biotechnology Advances*, 32(4), 711–726.
- Nikolin, B., Imamović, B., Medanhodžić-Vuk, S., & Sober, M. (2004). High performance liquid chromatography in pharmaceutical analyses, *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 4(2), 5.

- Panjee shahi, M. H., (2001). Chemical engineering and energy, *Iranian Journal of Engineering Education*, 2(8), 55–70 [In Persian].
- Primožič, M., Knez, Ž., & Leitgeb, M. (2021). (Bio) Nanotechnology in food science–food packaging. *Nanomaterials*, 11(2), 292.
- Saleem, H., & Zaidi, S. J. (2020). Developments in the application of nanomaterials for water treatment and their impact on the environment, *Nanomaterials*, 10(9), 1764.
- Sapsford, K. E., Tyner, K. M., Dair, B. J., Deschamps, J. R., & Medintz, I. L. (2011). Analyzing nanomaterial bioconjugates: a review of current and emerging purification and characterization techniques, *Analytical Chemistry*, 83(12), 4453–4488.
- Shameem, M. M., Sasikanth, S., Annamalai, R., & Raman, R. G. (2021). A brief review on polymer nanocomposites and its applications, *Materials Today: Proceedings*, 45, 2536–2539.
- Singh, T., Shukla, S., Kumar, P., Wahla, V., Bajpai, V. K., & Rather, I. A. (2017). Application of nanotechnology in food science: perception and overview, *Frontiers In Microbiology*, 8, 1501.
- Somwanshi, S. B., Somvanshi, S. B., & Kharat, P. B. (2020). Nanocatalyst: A brief review on synthesis to applications, *Journal of Physics: Conference Series*.
- Srivastava, N., Srivastava, M., Mishra, P., & Gupta, V. K. (2020). *Green synthesis of nanomaterials for bioenergy applications*, John Wiley & Sons.
- Swisher, J. H., Jibril, L., Petrosko, S. H., & Mirkin, C. A. (2022). Nanoreactors for particle synthesis. *Nature Reviews Materials*, 7(6), 428–448.
- Syah, R., Zahar, M., & Kianfar, E. (2021). Nanoreactors: properties, applications and characterization, *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 19(10), 981–1007.
- Tahir, M. B., Sohaib, M., Sagir, M., & Rafique, M. (2022). Role of nanotechnology in photocatalysis, *Encyclopedia of Smart Materials*, 578.



◀ **مجتبی شریعتی نیاسر:** عضو هیئت علمی، استاد تمام و رئیس دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران است. ایشان تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در دانشگاه‌های یومیسست و ویلز انگلستان به اتمام رسانده‌اند. علاوه بر فعالیت در حوزه آینده آموزش عالی، ایشان دارای فعالیت‌های پژوهشی در زمینه فرایندهای انتقال، غشا و نانوفناوری و سرپرست آزمایشگاه پدیده‌های انتقال و فناوری نانو هستند.



◀ **مهديه ياورى:** دانش‌آموخته دکتری مهندسی شیمی از دانشگاه تهران است. ایشان دوره تحصیلات خود در دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد در دانشگاه امیرکبیر گذرانده‌اند. حوزه پژوهشی ایشان پدیده‌های انتقال و نانوفناوری است و در این راستا علاوه بر تدریس، مطالعات تجربی و همچنین مدل‌سازی‌های ریاضی و رایانه‌ای از جمله فعالیت‌های انجام شده توسط ایشان است.



◀ **علی مؤذنی:** دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی شیمی از دانشگاه تهران است. ایشان تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در دانشگاه محقق اردبیلی را با کسب رتبه اول به انجام رسانده و در دوره کارشناسی ارشد در حوزه پژوهشی نانوذرات ژانوس و کاربرد آنها در غشاهای بسیاری به فعالیت پرداخته است.



◀ **امیرحسین مشتاقی:** دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی شیمی در دانشگاه تهران است. ایشان در سال ۱۴۰۱ رتبه اول یازدهمین دوره المپiad دانشجویی نانو را کسب کرده و در حال حاضر دبیر نهاد ترویجی نانو در دانشکده مهندسی شیمی و بسپار دانشگاه تهران است



◀ **ریحانه باباخانلو:** دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی شیمی در دانشگاه تهران است. ایشان ضمن عضویت در نهاد نانو دانشکده مهندسی شیمی و بسپار، در انجمن علمی این دانشکده نیز فعال است.

زیست فناوری در مهندسی شیمی

منوچهر وثوقی^۱، محمد جواد ثقفی^۲ و فاطمه فولادی تالاری^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۲/۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱

DOI: 10.22047/ijee.2024.453627.2074

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.5.4

چکیده: زیست فناوری (بیوتکنولوژی) علمی است که از کشفیات جدید درباره نقش مخمر و سایر موجودات زنده در تخمیر مواد مختلف شکل گرفته است. این علم گاهی با تغییرات نظریه‌ای روبه‌رو شد که این تغییرات منجر به پیشرفت‌های علمی و صنعتی شد. زیست فناوری به طور عمومی علم گسترده و رو به رشدی است که آن را می‌توان به عنوان فرایندهای مبتنی بر فناوری‌های زیستی اطلاق کرد. در این مقاله برای شناخت بهتر گذشته و آینده این علم رو به رشد و همچنین پیدا کردن روش مناسب رشد و نمو این زمینه در پهنه علم و فناوری ایران لازم است که ابتدا با این علم و روند تکامل آن آشنا می‌شویم، سپس به بررسی نهادهای مؤثر بین‌المللی شامل نهادهای اقتصادی و پژوهشی پرداخته می‌شود، در نهایت، پس از بررسی وضعیت نهادهای مشابه در ایران و نقش مهندسی شیمی در پیشبرد آن، پیشنهاداتی برای توسعه زیست فناوری در ایران صورت خواهد گرفت. ایران با راهبردها و حمایت‌های صحیح می‌تواند در این زمینه پیشتاز شود و از مزایای این علم مهیج بهره‌مند گردد.

واژگان کلیدی: زیست فناوری، مهندسی شیمی، انقلاب زیستی

۱- استاد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران (نویسنده مسئول). mvossoughish@gmail.com
۲- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. mimjimshaghafi@gmail.com
۳- دکتری، دانشکده بیوتکنولوژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. fooladi95@ut.ac.ir

۱. مقدمه

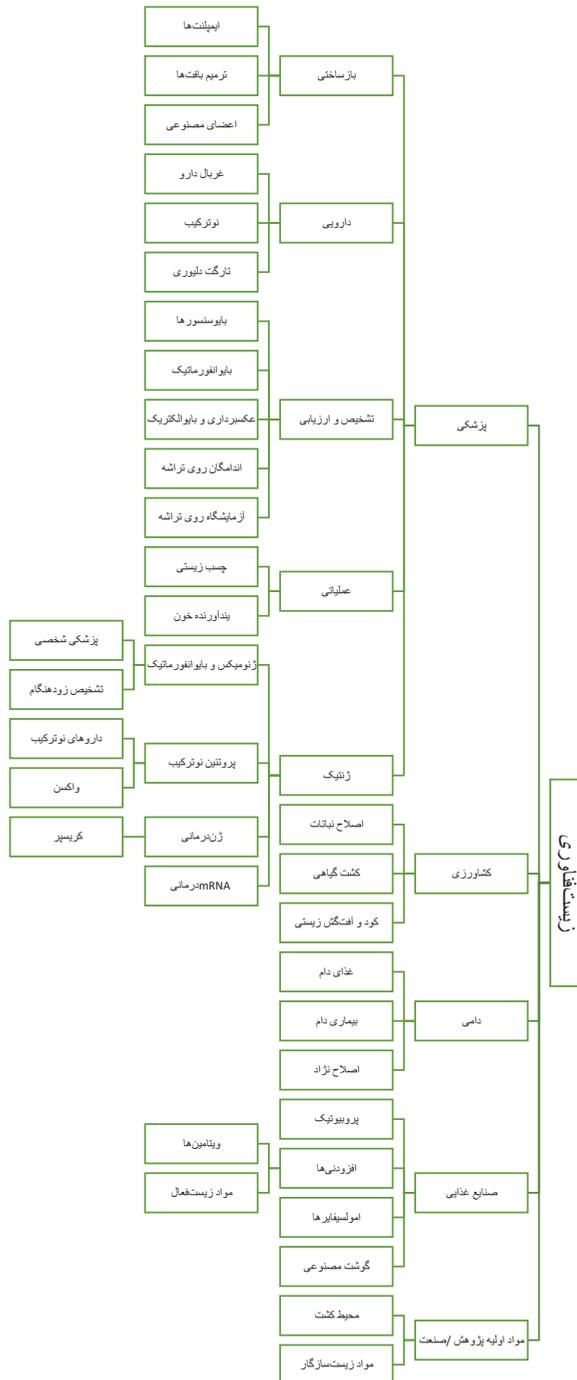
زیست‌فناوری به طور عمومی علم گسترده‌ای است که می‌توان آن را به عنوان فرایندهای مبتنی بر فناوری‌های زیستی اطلاق کرد. اما بنیان‌گذاری زیست‌فناوری مدرن در ایران، تقریباً نه دهه پیش با تولید واکسن در مؤسسات پاستور و رازی در سال‌های ابتدای قرن چهاردهم آغاز شد. امروزه، تولید محصولات زیست‌فناورانه، به عنوان یک سرمایه‌گذاری نوین در بخش داروسازی ایران شناخته می‌شود. موضوعات زیرمجموعه زیست‌فناوری بسیار متنوع‌اند. در واقع با در نظر گرفتن تعاریف مختلف از زیست‌فناوری می‌توان بازه‌های بسیار متفاوتی را به عنوان زیست‌فناوری مشخص کرد. در این میان زیست‌فناوری می‌تواند هم‌پوشانی زیادی با علوم پایه زیستی داشته باشد. بنابراین مرز باریک و شناوری میان این علم و علوم پایه زیست‌شناسی و همچنین با علوم مهندسی وجود دارد. معمولاً زیست‌فناوری را به چهار بخش کشاورزی (سبزی)، محیط زیستی (آبی)، صنعتی (سفید) و پزشکی (قرمز) تقسیم می‌کنند. زیست‌فناوری علمی است که از کشفیات جدید درباره نقش مخمر و سایر موجودات زنده در تخمیر مواد مختلف شکل گرفت. این علم گاهی با تغییرات نظریه‌ای روبه‌رو شد و به پیشرفت‌های علمی و صنعتی منجر گردید. پاستور علم میکروبیولوژی را بنیان نهاد و نقش میکرب‌ها در بیماری‌ها و فرایندهای صنعتی را نشان داد. بوخنر نشان داد که فرایندهای زیستی بر اساس قوانین شیمیایی هستند و آنزیم‌ها عامل زیست‌تبدیل‌ها هستند. تحقیقات روی تخمیر میکربی منجر به تولید محصولات مختلفی مانند اسید سیتریک، پنی‌سیلین، استروئید و غیره شد. در قرن بیستم، زیست‌فناوری به عنوان یک تخصص پذیرفته شد و از جانب دولت‌ها، به عنوان یک حوزه نوآورانه و رشدبخش شناخته شد. تحقیقات پایه در زیست‌شیمی و زیست‌شناسی مولکولی حوزه علوم زیستی را گسترش داد و یکپارچه کرد تا جایی که محصولات و خدمات جدید و متنوعی از این علم بهره‌مند شدند. زیست‌فناوری جدید امروزه به عنوان یکی از علوم پیشرو شناخته می‌شود (Buchholz & Collins, 2013). برای شناخت بهتر گذشته و آینده این علم و پیدا کردن روش مناسب رشد و نمو این علم در پهنه علم و فناوری ایران لازم است که ابتدا با این علم و روند تکامل آن آشنا شویم. جدول ۱ نشان‌دهنده روند پیشرفت این علم و نسل‌های مختلف فناوری زیستی است.

جدول ۱. مراحل تکامل تولید زیستی شامل ۴ انقلاب است (Buchholz & Collins, 2013)

انقلاب زیست‌تولید	زمان شروع	محصولات اصلی	پلتفرم تولید	ابزار
پیش‌مدرن	چند هزار سال پیش	پنیر، سس سویا، شراب، نان، ترشی، سرکه	مخلوط ریزاندامگان‌ها	تخمیر حالت جامد

ابزار	پلتفرم تولید	محصولات اصلی	زمان شروع	انقلاب زیست‌تولید
تخمیر مایع بی‌هوازی تخمیر غوطه‌ور هوازی	باکتری یا قارچ تک سویه	#متابولیت‌ها: استون، نرمال بوتانول، گلیسرول، اسیدهای آمین، اسیدهای آلی، ویتامین C	دهه ۱۹۱۰	زیست‌تولید ۱،۰
تخمیر غوطه‌ور هوازی	قارچ یا باکتری جهش یافته	#متابولیت‌ها: پنی سیلین، تتراسایکلین، استرپتومایسین	دهه ۱۹۴۰	زیست‌تولید ۲،۰
DNA بازسازی شده کشت سلول کاتالیز آنزیمی	سلول‌های (حیوانی) مهندسی ژنتیک ریزاندامگان‌های مهندسی ژنتیک	#داروهای پروتئینی: اریتروپویتین، انسولین، هورمون رشد #آنزیم‌ها: آمیلاز، پروتئاز، سلولاز	دهه ۱۹۸۰	زیست‌تولید ۳،۰
مهندسی بافت و سلول‌های بنیادی مهندسی متابولیک و زیست‌سنتر مهندسی پروتئین پیشرفته	سلول‌های بنیادی جنینی سلول‌های بنیادی چندقابلیتی القاشده (iPSC) ریزاندامگان‌های مهندسی شده سامانه‌های بیوسنتز (آنزیمی) مصنوعی برون‌تنی	#محصولات فرایندهای رونویسی تا ترجمه: سلول‌ها، بافت‌ها، یا اعضای انسانی انرژی تجدیدپذیر: ایزوبوتانول هیدروژن #غذای نوین: نشاسته مصنوعی	دهه ۲۰۰۰	زیست‌تولید ۴،۰

در یک تعریف می‌توان زیست‌فناوری را شامل تمام کاربردهایی دانست که طی آن از علم زیست‌شناسی استفاده می‌شود یا از آن برای یک کاربرد زیستی استفاده می‌شود. بدین ترتیب شکل ۱ یک دسته‌بندی از شاخه‌های زیست‌فناوری است.



شکل ۱.۱ دسته‌بندی شاخه‌های زیست فناوری

۲. روش تحقیق

به منظور بررسی و دستیابی به تحقیقات برتر ایران، از منابع علمی مختلف شامل معاونت علمی ریاست جمهوری ایران، دانشگاه‌های سراسر کشور و پژوهشگاه‌ها و مراکز علمی مرتبط استفاده شده است. همچنین از پایگاه استنادی اسکوپوس^۱ و ابزار جستجوی پیشرفته این سامانه جهت اشتراک گرفتن فصل مشترک زیست‌شناسی و مهندسی مطابق فیلتر زیر استفاده شد:

(SUBJAREA (“BIOC”) OR SUBJAREA (“IMMU”) OR SUBJAREA (MEDI)) AND SUBJAREA (ENG) AND (LIMIT-TO (AFFILCOUNTRY, “Iran”))

۳. زیست‌فناوری در دنیای امروز

برای شناخت بهتر وضعیت زیست‌فناوری و اقتصاد آن، مطابق جدول ۲ با تعدادی از بزرگ‌ترین شرکت‌های حاضر در بورس‌های جهانی مرتبط با زیست‌فناوری آشنا می‌شویم:

جدول ۲. شرکت‌های شناخته‌شده زیست‌فناوری در سطح دنیا

Novavax, Inc. (NVAX)	Incyte Corp. (INCY)	Jazz Pharmaceuticals PLC (JAZZ)	Vertex Pharmaceuticals Inc. (VRTX)	Regeneron Pharmaceuticals Inc. (REGN)	BioNTech SE (BNTX)	Moderna	Novo Nordisk	نام شرکت:
\$1.32 billion	\$876.05 million	\$18.69 million	\$3.27 billion	\$5.37 billion	\$11.35 billion	\$11.76 billion	\$7.68 billion	درآمد خالص:
\$810.16 million	\$17.93 billion	\$9.85 billion	\$74.85 billion	\$78.53 billion	-	\$72.95 billion	\$293.94 billion	ارزش بازار:
تمرکز بر واکسن و بیماری‌های واگیر	کشف ریزینوکل‌های دارویی. به ویژه برای درمان میونسپروزیس	شرکت ایرلندی بر پایه داروهای اعصاب، مدیریت درد، سرطان و ...	شرکت زیست‌دارویی متمرکز بر توسعه دارو برای بیماری فیبروز سیستیک، سرطان، خودایمنی، عصب‌شناسی و ...	شرکت زیست‌دارویی متمرکز بر توسعه دارو برای بیماری سرطان، سرطان، آلرژی و ...	شرکت آلمانی پایه‌گذاری شده توسط دکتر اوتور شاهین، متمرکز بر درمان سرطان	این شرکت که در کمبریج بنا شده است، تمرکز خود را بر درمان‌های بر پایه mRNA بنا کرده است.	شرکت دانمارکی تمرکز در حوزه مراقبت بیمار (دیابت، هموفیلی، هورمون درمانی و ...)	توضیحات:

۴. آینده زیست فناوری

پژوهش‌های بین‌المللی در حوزه زیست فناوری بسیار گسترده و روبه‌رشد است. در ادامه به بررسی تعدادی از پژوهشگران برتر این حوزه و حوزه فعالیت آنها می‌پردازیم (جدول ۳) و سپس انستیتوهای معتبر این حوزه را مورد بررسی قرار می‌دهیم (جدول ۴).

جدول ۳. تعدادی از اساتید برتر بین‌المللی و موضوعات مورد بررسی آنها شامل اولین‌های هر حوزه

نام	حوزه فعالیت	وابستگی
Guido Kroemer	مرگ برنامه‌ریزی شده سلول	Sorbonne university
Jennifer Doudna	کریسپر ^۱	University of California, Berkeley
Emmanuelle Charpentier	کریسپر	Max Planck Institute for Infection Biology
George Church	ژنومیکس، زیست‌شناسی سامانه‌ای	Harvard Medical School
Feng Zhang	کریسپر، اپتوژنتیک ^۲	Massachusetts Institute of Technology (MIT)
David Baker	طراحی و شبیه‌سازی پروتئین	Institute for Protein Design
Eric Lander	ژنومیکس، زیست‌شناسی سامانه‌ای و پزشکی دقیق	MIT
Craig Venter	ژنومیکس مصنوعی	J. Craig Venter Institute
Robert Langer	زیست مواد، مهندسی بافت، نانوفناوری	MIT

جدول ۴. تعدادی از انستیتوهای برتر بین‌المللی و موضوعات مورد بررسی آن‌ها

موضوعات	انستیتو
سرطان‌شناسی دقیق این شرکت با کمک شبکه همکاران بالینی، اطلاعات کاملی از ژنومیکس سرطان جمع می‌کند تا به درمان‌های هدفمند و ایمنی‌شناختی انواع سرطان نزدیک شویم.	Strata Oncology
این مجموعه در حوزه باروری فعالیت می‌کند به ویژه IVF.	TMRW Life Sciences
موسسه‌ای در حوزه زیست‌شناسی سنتزی با هدف پرینت DNA	DNA Script
این آکادمی بزرگ‌ترین مؤسسه علمی چین است و در انواع حوزه‌ها فعالیت می‌کند به ویژه ابزارهای ویرایش ژن.	آکادمی علوم چین یا CAS
یک مرکز پژوهش بابومدیkal و ژنومیک بین دانشگاهی به منظور تحول در پزشکی از طریق همکاری‌های میان‌رشته‌ای است. این مرکز به منظور درک بهتر بیماری و پیاده‌کردن دانش بر روی بیماران به وجود آمده. پیشرو در توالی ژنوم دارویی و...	مؤسسه گسترده MIT و Harvard یا اصطلاحاً Broad Institute
این مجموعه از ۸۶ مؤسسه در آلمان به هدف تحقیقات پایه. از علوم زیستی تا علوم انسانی تشکیل شده است و مؤسسات زیست‌مولکولی سلولی و ژنتیک، مؤسسه شیمی زیست‌فیزیک و مؤسسه علوم تولیدمثل آن در سطح بالایی از فناوری قرار دارد.	جامعه ماکس پلانک

موضوعات	انستیتو
این دو مؤسسه توسط آقای کریگ ونتر اداره می‌شود. ایشان از پیشگامان توالی یابی انسان و ساختن گونه‌های مصنوعی از حیات اند. این مؤسسات بر روی استفاده از این فناوری‌ها برای پاسخ به نیازهای سلامت، انرژی و محیط زیست متمرکز هستند.	انستیتو کریگ ونتر و ژنومیکس ساختگی
این مؤسسه واشنگتن پایه برای مهندسی پروتئین ایجاد شده است و هدف آن ایجاد پروتئین‌های جدید با کاربردهای جدید است	مؤسسه طراحی پروتئین
یکی از مراکز پژوهشی هاروارد است که با الهام از زیست‌شناسی، برای حوزه‌های متنوعی مانند روباتیک، نانوفناوری، مهندسی بافت و تشخیص راه‌حل‌هایی ایجاد می‌کند.	مؤسسه مهندسی زیست تقلیدگر ویس
ابتکار اروپایی به منظور شناخت بهتر سرطان. قرار است این ابتکار جمع‌کننده دیتاهای پراکنده باشد.	UNCAN

۵. زیست‌فناوری در ایران

راه‌اندازی "کمیته ملی زیست‌فناوری" به عنوان نهاد ملی مدیریت توسعه زیست‌فناوری در سال ۱۳۷۹ به صورت کمیته‌ای فراجشی با عضویت دستگاه‌ها و نهادهای ذی‌ربط، در واقع نقطه آغازین ساماندهی نظام ملی مدیریت زیست‌فناوری در کشور است. اولین سند ملی زیست‌فناوری به منظور توسعه جهشی و هدفمند این فناوری در کشور، توسط این کمیته آماده شد و در تاریخ ۱۳۸۳/۲/۱۶ به تصویب هیئت دولت رسید. بر اساس این سند که نخستین برنامه ملی توسعه زیست‌فناوری است، در تاریخ ۱۳۸۴/۲/۱۹ با ایجاد شورای عالی زیست‌فناوری برای سیاست‌گذاری، برنامه‌ریزی و نظارت ملی در حوزه‌های آموزش، پژوهش و تولید در زیست‌فناوری موافقت شد. بعدها ستاد توسعه زیست‌فناوری به عنوان یکی از ستادهای فناوری‌های راهبردی زیر نظر معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری به عنوان مجموعه جایگزین آن ایجاد گردید.

همچنین اولین بار در سال ۱۳۸۵ اولین شبیه‌سازی حیوان در خاورمیانه توسط پژوهشگاه رویان صورت گرفت. همچنین سه سال پیش از آن، برای اولین بار در همان پژوهشکده سلول ESC انسانی از بلاستوسایت‌ها تهیه گردید که ایران را دهمین کشور در این فناوری قرار داد. ("درباره‌ی ما،" ۱۴۰۲)

۶. پژوهش‌های زیست‌فناوری در ایران

برای بررسی موضوع پژوهش‌های انجام‌شده در ایران با استفاده از پایگاه استنادی اسکوپوس با روشی که پیش‌تر ذکر شد، هفت محقق با بیشترین مقالات در این حوزه مورد بررسی قرار گرفت و مطابق کلمات کلیدی آن مقالات و میزان تکرار آنها در مقالات مختلف جدول ۵ تهیه شد.

جدول ۵. بررسی موضوعات و بسامد تکرار آنها در مقالات پراکندترین محققان زیست فناوری ایران

موضوع	تعداد مقالات
اسپری درای و امولسیون	۹۴
بسته بندی های خوراکی و نانوکریستال ها	۸۰
دینامیک دستگاه عصبی	۲۷
کیتوسان و سامانه های دارورسانی	۲۵
آنتی اکسیدان ها و روغن های اساسی	۲۳
نانوذرات نقره و سنتز سبز	۱۶
کورکومین و مشتقات آن	۱۰
شبکه های عصبی	۹
پروتئین کافیرین	۸
سوخت زیستی و جلبک	۶
آسپارژیناس	۵
زنده مانی سلولی	۴
کیک های خوراکی	۴
نانوذرات آهن و تصفیه آب	۴
مهندسی بافت	۴
ایمونونانوماتیکس	۴
معدنی سازی زیستی	۴

۷. اقتصاد زیست فناوری ایران

- زیست فناوری بخش های گسترده ای دارد، اما بیشترین محصولی که در حوزه زیستی از ایران صادر شده، در حوزه دارو است. در سال ۱۴۰۱ دیر ستاد توسعه فناوری با بیان اینکه ۷۰۰ شرکت دانش بنیان در حوزه زیست فناوری در ایران فعالیت می کند، خاطرنشان کرد که به صورت کلی ۶۰ میلیون دلار محصولات زیستی از ایران به ۱۷ کشور دنیا صادر شده است. (ستاد زیست فناوری، اردیبهشت ۹۸)
- پیشرفت در حوزه صنایع غذایی و به طور ویژه کشاورزی و دامپروری، از عوامل مؤثر بر امنیت غذایی و تأمین پایدار و ارزان غذاست. یکی از مصادیق این علم در حوزه دامپروری تهیه نژاد دام با بازدهی مناسب است. سالانه ۷۰ میلیون واحد اسپرم گاو به جهت تلقیح مصنوعی در بازار جهانی مبادله می شود. در سال ۱۳۶۲ طرح ملی احداث مجتمع پرورش و اصلاح نژاد مرغ لاین (آرین) تدوین و مورد تصویب قرار گرفت و مقرر شد که ۱۱۳۵ هکتار از اراضی جنگلی در شمال کشور (منطقه بابلکنار) برای اجرای این طرح تخصیص یابد. عملیات عمرانی این طرح بزرگ بیش از هفت سال به طول انجامید و فعالیت های این مجتمع از سال ۶۹ با ورود گله اجداد نژاد «هایپرو» از کشور هلند، به

صورت آزمایشی آغاز شد. هم‌زمان با آغاز به کار این مجتمع، تعدادی از کارشناسان ایرانی از سوی هلندی‌ها آموزش‌های لازم را دریافت کردند و پس از بازگشت در سال ۱۳۷۱ اولین گله لاین کشور از هلند وارد ایران شد (ستاد زیست‌فناوری، اردیبهشت ۹۸).

بخش مهم دیگر در صنایع غذایی، تأمین مواد و روش‌های نوین برای افزایش بازده کشاورزی است. دبیر ستاد ویژه توسعه زیست‌فناوری معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری در مصاحبه‌ای در سال ۱۳۹۸ وضعیت زیست‌فناوری کشاورزی را بدین صورت شرح داده است: در حوزه کشاورزی زیستی نیز اکنون کود زیستی در کشور تولید و حتی صادر می‌شود. کود زیستی نوعی باکتری است که به خاک داده می‌شود یعنی به جای این که مواد شیمیایی به خاک اضافه کنیم، وظیفه این باکتری است که مواد مغذی را از خاک جذب کند و به ریشه گیاه بدهد. با تحقیقاتی که در ۴۰ نقطه کشور انجام شده است، استفاده از کود زیستی بهره‌وری و سلامت محصول را در بخش کشاورزی افزایش داده و در مقابل، هزینه‌های کشاورزی را کاهش می‌دهد. همچنین در حوزه مهارگرهای زیستی، یعنی ریزاندامگان‌هایی که به جای سم شیمیایی استفاده می‌شوند و در زمینه کشت بافت به دانش ارزشمندی دست یافته‌ایم.

۸. تعدادی از شرکت‌های فعال در حوزه زیست‌فناوری

انستیتو پاستور: از قدیمی‌ترین مؤسسات تحقیقاتی و آموزشی در زمینه تولید واکسن بوده که در سال ۱۳۹۹ با امضای قراردادی بین انستیتو پاستور پاریس در فرانسه و کشور ایران، تاسیس شد و تا به امروز دستاوردهای فراوانی در حوزه زیست‌فناوری پزشکی داشته است. (Nezhad Fard, 2013)

مؤسسه رازی: این مؤسسه به عنوان یک بازیگر کلیدی در تولید محصولات زیست‌فناورانه ۲۱ واکسن انسانی و دامی را در ابعاد تجاری تولید و به فروش می‌رساند. این محصولات به ۱۷ کشور صادر می‌شود. این مؤسسه در مجموع ۵۷ نوع محصول (واکسن، پادژن و سرم) تولید می‌کند و یکی از بزرگترین تولیدکنندگان واکسن در خاورمیانه است.

همچنین شرکت‌های خصوصی در زمینه تولید داروهای زیست‌فناوری و کیت‌های تشخیصی مختلف در حال حاضر مشغول به فعالیت هستند. این شرکت‌ها هم در راستای تأمین نیاز کشور موفق بوده‌اند و هم در زمینه صادرات محصولات خود به موفقیت دست یافته‌اند.

از دیگر تولیدات زیست‌فناوری در ایران می‌توان به انواع کشت بافت گیاهی، تولید کودها و سموم زیستی، فرآورده‌های میکربی و کیت‌های تشخیصی و... نیز اشاره کرد.

۹. مهندسی شیمی و زیست‌فناوری

در سال ۱۳۶۸ برای نخستین بار در کشور پیشنهاد و تأسیس رشته مهندسی شیمی - زیست‌فناوری به

عنوان اولین رشته دانشگاهی زیست‌فناوری کشور مطرح شد. پس از بررسی و تصویب این رشته، برای اولین بار در سال ۱۳۷۰ در مقطع کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس در این رشته دانشجوی پذیرفت و هم‌اکنون این گروه در هر دو مقطع کارشناسی ارشد و دکتری دانشجوی می‌پذیرد. گروه زیست‌فناوری مهندسی شیمی، به عنوان یکی از گروه‌های شاخص و پیش‌تاز در کشور در زمینه زیست‌فناوری صنعتی است ("Chemical engineering, biotechnology," 2024). زمینه‌های پژوهشی ارائه شده برای دانشجویان این گروه، شامل موارد زیر است:

- مهندسی زیست‌فرایند
- زیست‌فناوری محیط زیست
- زیست‌فناوری صنعتی
- پروتئین‌های نو ترکیب
- فروشویی زیستی
- مهندسی متابولیک
- سامانه‌های نوین دارورسانی
- مهندسی بافت

تفصیل برخی فعالیت‌های اساتید مهندسی شیمی گرایش زیست‌فناوری و زیست‌پزشکی در دانشگاه‌های مطرح ایران، در جدول ۶ نشان داده شده است:

جدول ۶. تعدادی از موضوعات زیستی محل تمرکز دانشکده‌های مهندسی شیمی ایران ("Chemical engineering, biotechnology," 2024)

زیست‌فناوری محیط زیست	خالص‌سازی و کنترل کمی و کیفی فرآورده‌های زیستی	تخمیر پلی‌ساکاریدها و اتانول سوختی و بازیابی	زیست‌راکتور و کینتیک زیستی	کشت سلولی و تخمیر به منظور تولید فرآورده‌های زیستی شامل داروهای نو ترکیب پروتئینی
فروشویی زیستی باطله‌های معدنی و سنگ‌های معدنی کم‌عیار	مدیریت پسماندهای جامد خطرناک همچون کاتالیست‌های فرسوده	زیست‌پالایی خاک‌های آلوده زیست‌فناوری غذایی فروشویی زیستی	استفاده از رویکرد سامانه‌ای در مهندسی متابولیک میکرب‌ها	ترمودینامیک سامانه‌های زیستی
مدل‌سازی جوامع میکربی	مدل‌سازی چندمقیاسه	ادغام و تحلیل داده‌های امیکس کاربردهای پزشکی مدل‌سازی متابولیکی	پدیده‌های انتقال در زیست‌راکتورهای چندفازی	بازسازی شبکه‌های متابولیکی
مهندسی بافت با استفاده از سلول‌های بنیادی	نانوزیست‌فناوری و تولید نانوذرات جدید و زیست‌سازگار و به کارگیری آن‌ها در دارورسانی و ریزپوشانی پاداکسپاند‌های ناپایدار	مدل‌سازی ریاضی و شبکه عصبی مصنوعی فرایندهای زیستی	نانوذرات هوشمند در دارورسانی هدفمند به سلول‌های سرطانی	تصفیه زیستی فاضلاب‌ها و هوای آلوده صنعتی

۱۰. نتیجه‌گیری

پیشرفت در زمینه زیست فناوری نیازمند سرمایه‌گذاری و به دست آوردن ابتکار عمل در بخش‌های مختلف این فناوری است. به عنوان مثال در زمینه پزشکی که شاید یکی مهم‌ترین کاربرد این فناوری باشد، بخش‌های مختلف زنجیره از تشخیص و پیشگیری تا درمان و بازیابی مستعد ورود بیشتر و فعالیت علمی و اقتصادی فراوانی است.

آنچه واضح است، این است که حوزه زیست فناوری نیاز به ارتباطات محکمی بین دانشگاه‌های علوم پزشکی و دانشگاه‌های صنعتی و همچنین دانشکده‌های علوم پایه دارد تا پشتیبان این علم اساساً میان‌رشته‌ای باشد. وضعیت میان‌رشته‌ای این علم، به جای این که موجب تقویت این ارتباطات شود، گاهی موجب سردرگمی دانشجویان و محققان شده و آنان را وادار به خارج شدن از تخصص خود کرده است. امتزاج تخصص‌های مرتبط با این حوزه‌ها، به جای فعالیت‌های پراکنده غیرتخصصی پژوهشگران در خارج از حوزه خود، باید به وسیله ایجاد هویت و تخصصی جدید تحقق یابد. پیشبرد این علم و فناوری‌های منتج از آن در ایران نیازمند نیروی انسانی، برنامه هماهنگی و پشتیبانی مالی است که گرچه در مورد دوم و سوم کم‌وبیش همه جا با مشکل روبرو هستیم، این وضعیت در دانشگاه‌های زیرمجموعه وزارت علوم شدیدتر است.

References:

- <http://www.biocd.isti.ir/about.us>. (1402). Biotechnology development and precision medicine headquarters.
- <http://www.biocd.isti.ir/> (May 1398). Biotechnology Monthly
- Buchholz, K., & Collins, J. (2013). The roots—A short history of industrial microbiology and biotechnology. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(9), 3747–3762. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4768-2>
- Chemical engineering, biotechnology. (2024). *Chemical Eng. Department*. <https://www.modares.ac.ir/chem/departments/biotechnology>
- Nezhad Fard, R. M. (2013). The History of modern biotechnology in Iran: A medical review. *Journal of Biotechnology & Biomaterials*, 03(02). <https://doi.org/10.4172/2155-952X.1000159>



◀ دکتر منوچهر وثوقی شهواری: دکتری مهندسی شیمی (بیوتکنولوژی) از دانشگاه (تولوز) فرانسه اخذ کردند و استاد دانشگاه شریف و عضو وابسته فرهنگستان می‌باشد.



◀ فاطمه فولادی تالاری: دانشجوی دکتری تخصصی بیوتکنولوژی
دانشگاه تهران می‌باشند.



◀ محمدجواد ثقفی: دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی شیمی از
دانشگاه شریف می‌باشند.

نقش مهندسی شیمی در توسعه مهندسی (زیست) پزشکی

ابراهیم واشقانی فراهانی^۱ و سعید رفیعیان^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۰۵

DOI: 10.22047/ijee.2024.447692.2064

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.6.5

چکیده: در این مقاله کوتاه، نخست به نقش مهندسی شیمی در کاربردهای سلامت انسان، با تمرکز ویژه بر مهندسی (زیست) پزشکی^۳ اشاره می‌شود. سپس سابقه تاریخی این نقش در آغاز فعالیت مهندسان شیمی در این زمینه با تأکید بر موارد مهم، بررسی خواهد شد. در ادامه افق‌های پیش روی مهندسی شیمی در چند زمینه مهم کاربرد مهندسی شیمی در پزشکی مانند زیست‌مواد، سامانه‌های دارورسانی و مهندسی بافت، به صورت فشرده توضیح داده می‌شوند. سپس چگونگی کاربرد اصول مهندسی شیمی، در پیوند مهندسی شیمی و مهندسی بافت پزشکی بالینی^۴ به صورت فشرده بیان می‌شود. آنگاه به چگونگی پدیدار شدن درس‌های مربوط به گرایش مهندسی (زیست) پزشکی در برنامه آموزشی مهندسی شیمی و توسعه آن تا امروز، از جمله برنامه آموزشی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - زیست پزشکی در ایران پرداخته و در پایان نتیجه‌گیری کوتاه ارائه خواهد شد.

واژگان کلیدی: مهندسی شیمی، مهندسی زیست پزشکی، زیست‌مواد، دارورسانی، بافت، برنامه درسی

۱- دانشکده مهندسی شیمی - دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. نویسنده مسئول: evf@modares.ac.ir
۲- دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. saeed_rafieyan@modares.ac.ir

3- Biomedical Engineering

4- Translational Medicine

۱. مقدمه

تاریخچه مهندسی پزشکی به سال‌ها پیش برمی‌گردد. رازی (۸۵۰-۹۲۳ م) و بوعلی سینا (۹۸۰-۱۰۳۷ م) با قرار دادن پوششی روی دارو، عملکرد آن را مؤثر کردند. لئوناردو داوینچی (۱۴۵۲-۱۵۱۸) با تأکید خاص بر کالبدشناسی، مبانی حرکت استخوان‌ها و ماهیچه‌ها را بررسی کرد. ویلیام هاروی (۱۵۷۸-۱۶۵۷) سامانه گردش خون در بدن و عملکرد قلب به عنوان یک پمپ را مطالعه کرد. سیلوویوس (۱۶۱۴-۱۶۷۲) بررسی‌های زیادی روی خواص شیمیایی مایعات بدن انجام داد و بر این اعتقاد بود که فعالیت‌های بدن، بر مبانی شیمیایی استوار است. هیلز (۱۶۷۷-۱۷۶۱) با کار روی دینامیک سامانه گردش خون، سرعت و فشارخون در نقاط مختلف را به دست آورد. نخستین دستگاه کلیه مصنوعی، توسط ایبل، رونتر و ترنر (۱۹۱۳) برای سگ ساخته شد و ۳۰ سال بعد برای انسان مورد بهره‌برداری بالینی قرار گرفت. نخستین دستگاه ریه مصنوعی، در سال ۱۹۵۰ ساخته و ارزیابی شد. در سال ۱۹۶۰ دریچه‌های قلب مصنوعی به جهان عرضه شد. هم‌زمان با فعالیت‌های یادشده و به دنبال آنها، هر روزه افق‌های نوینی در دنیای مهندسی پزشکی گشایش یافته است و راه‌حل‌هایی برای شناسایی و درمان مؤثر بسیاری از بیماری‌ها ارائه می‌شوند.

مهندسی (زیست) پزشکی فصل مشترک رشته‌های مهندسی و پزشکی است و در واقع، کاربرد رشته‌های متفاوت مهندسی در پزشکی است. این کاربردها می‌توانند در قالب، مهندسی برق، مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک و مهندسی مواد در پزشکی مطرح شوند. در تمامی گرایش‌های فوق، سعی بر این است تا با نگرشی مهندسی بر فرایندهای بدن، سامانه‌ای را طراحی کرد که بتواند جایگزین اندام خاصی از بدن شود یا اینکه با مدل کردن رفتار طبیعی بدن، بیماری‌هایی را که بر اثر اختلال رفتاری اندام خاصی به وجود می‌آیند، کشف و مداوا کرد. بدیهی است که برای رسیدن به اهداف بالا، افزون بر آشنایی با مسائل کاراندام‌شناسی^۱ و کالبدشناسی، تسلط کامل بر اصول مهندسی در سامانه‌های زنده و بدن انسان لازم است. در این بین، مهندسی شیمی با توجه به آشنایی با مفاهیمی همچون پدیده‌های انتقال جرم، گرما و سیالات، ترمودینامیک و خواص مهندسی بسپار^۲ها، از پیشینه علمی لازم به منظور به کارگیری آنها در راستای اهداف مهندسی پزشکی برخوردار است. از جمله مهم‌ترین کاربردهای مهندسی شیمی در پزشکی می‌توان به سامانه‌های کنترل انتقال دارو در بدن، مدل‌سازی بدن، ساخت اندام‌های مصنوعی و مهندسی بافت اشاره نمود.

نقش مهندسان در توسعه زیست‌پزشکی، توسط مان^۳ و همکارانش در مقاله مروری اخیر (Mann et al., 2023) این‌گونه توصیف شده است: "مهندسان نقش مهمی در پیشرفت علم (زیست) پزشکی و توسعه فناوری‌های تشخیصی و درمانی برای رفاه انسان ایفا می‌کنند. پیچیدگی مشکلات پزشکی

۱- کاراندام‌شناسی برابر نهاد فرهنگستان برای واژه فیزیولوژی است.

۲- بسپار برابر نهاد فرهنگستان برای واژه پلیمر است.

مستلزم ترکیب سامانه‌های دانش گوناگون و تجربه‌های بالینی برای توسعه راه‌حل‌ها است. بنابراین، آنها باید از نزدیک با متخصصان مراقبت‌های بهداشتی در تعامل با رشته‌های مختلف همکاری کرده تا دانش و مهارت‌ها را از طریق یادگیری ترکیبی برای توسعه ابزارهای فنی مجموعه دستگاه‌های بالینی تشخیصی و درمانی جدید یکپارچه کنند. از دیدگاه دانشگاهی، مهندسی معمولاً به رشته‌هایی با ویژگی‌های غالب تقسیم می‌شود. مهندسی (زیست) پزشکی هم به عنوان یک رشته با برنامه درسی مستقل و هم به صورت گرایش ویژه، در برخی از رشته‌های مهندسی ایجاد شده است. در واقع، مهندسانی که در نوآوری‌های پزشکی و مراقبت‌های بهداشتی مشارکت دارند، طیف گسترده‌ای از رشته‌های مهندسی، از جمله مهندسی برق، مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک، و علوم رایانه را پوشش می‌دهند.^۱ شایان ذکر است که گاهی مهندسی (زیست) پزشکی همسان زیست‌مهندسی^۱ شمرده می‌شود اما دامنه فعالیت‌ها در زیست‌مهندسی، گسترده‌تر از زیست‌پزشکی است.

مهندسی (زیست) پزشکی کاربرد اصول مهندسی و مفاهیم طراحی در پزشکی و زیست‌شناسی است. این موضوع بین رشته‌ای مهارت‌های طراحی و حل مسئله مهندسی را با علوم پزشکی و زیست‌شناسی، برای بهبود تشخیص، پایش و درمان بیماری‌ها ترکیب می‌کند. زمینه‌های فعال در مهندسی (زیست) پزشکی، بر اساس ارتباط آنها با سایر رشته‌های مهندسی را می‌توان به شرح زیر طبقه‌بندی کرد:

- مهندسی برق - اغلب با مهندسی زیست‌الکترونیک و عصب، ابزارهای زیستی، تصویربرداری زیست‌پزشکی و تجهیزات پزشکی مرتبط است. این رشته همچنین، موضوعات مربوط به نور و مهندسی نور را در برمی‌گیرد.
- مهندسی شیمی - اغلب با دارورسانی، مهندسی بافت و پزشکی بازساختی، زیست‌مواد، مهندسی داروسازی و پدیده‌های انتقال زیستی مرتبط است.
- مهندسی مکانیک - اغلب با زیست‌مکانیک، پدیده‌های انتقال زیستی، دستگاه‌های پزشکی و مدل‌سازی سامانه‌های زیستی، مانند مکانیک بافت نرم مرتبط است.
- سایر زیرشاخه‌های مهندسی زیست‌پزشکی شامل زیست‌مکانرونیک، اندام‌های مصنوعی^۲، مهندسی بالینی، مهندسی ارتوپدی و کاراندام‌شناسی سامانه‌ها^۳ هستند.

نقش مهندسی شیمی در چند دهه اخیر در توسعه مهندسی (زیست) پزشکی، توسط مان و همکارانش (Mann et al., 2023) به شرح زیر بیان شده است:

"مهندسی شیمی بر پایه اصول بنیادی خود، مانند برهم‌کنش‌های شیمیایی، رفتارهای رئولوژیکی، مکانیک سیالات، انتقال جرم و... کمک زیادی به حوزه سامانه‌های مراقبت‌های بهداشتی کرده است.

دستگاه دیالیز کلیه، یک نمونه کلاسیک از مشارکت مهندسی شیمی در زمینه مراقبت‌های بهداشتی است. به کارگیری اصول جداسازی در "کلیه مصنوعی"، مسئول نجات سالانه جان میلیون‌ها نفر در سراسر جهان است. پدیده‌های فصل مشترک جامد-مایع که منجر به تغییرات ماکرومولکولی ویژه، مانند جذب یا واکنش شیمیایی می‌شوند، مفهومی است که توسط مهندسان شیمی در زمینه‌های دارورسانی، طبقه‌بندی پروتئین و تشخیص نارسایی اندام‌ها در میان سایر موارد استفاده می‌شود. افزون بر این، مهندسان شیمی اکسیژن‌سازهای خون خارج از بدن را که ابزاری حیاتی برای حمایت از زندگی بیماران مبتلا به نارسایی قلبی و تنفسی است، بر اساس اصول برهم‌کنش مایع-گاز توسعه داده‌اند و در حال بهبود آن هستند. مهندسان شیمی برهم‌کنش‌های دارویی را در بدن انسان، در زیر شاخه خاصی به نام فارماکوکینتیک مطالعه می‌کنند و به تولید بهتر مواد دارویی، افزودنی‌های غذایی و ویتامین‌ها کمک می‌کنند. در علم پزشکی مدرن، تأکید زیادی بر توسعه زیست‌مواد جدید برای مهندسی بافت شده است. مهندسان شیمی برهم‌کنش بین مواد و پروتئین سلولی را مطالعه می‌کنند تا بینش‌هایی در مورد توسعه آینده داربست‌های کاربردی، سامانه‌های دارورسانی و دستگاه‌ها ارائه کنند. دستگاه‌های مراقبت نزدیک از بیمار^۱، مانند کیت‌های تست بارداری، اندازه‌گیری قند خون، آزمون‌های تشخیص سریع گلوپی^۲ با سواب^۳ و کیت‌های خانگی آزمون کووید-۱۹ برای نام بردن چند مورد، دستگاه‌های قابل حمل بر پایه واکنش‌های شیمیایی هستند که در زندگی روزمره، برای معاینات پزشکی خانگی استفاده می‌شوند.

مهندسان شیمی در توسعه حسگرهای زیستی الکتروشیمیایی پیشرفته برای کاهش هزینه بازار و افزایش دقت و کارایی چنین کیت‌های آزمایشی مشارکت دارند. مهندسان شیمی با درک خود از واکنش‌های شیمیایی در مقیاس ماکرو و میکرو و سامانه‌های ریزسیال^۴، در حال توسعه دستگاه‌های پیچیده آزمایشگاهی روی یک تراشه برای اندازه‌گیری کلسترول، سلول‌های HIV و گازهای خون هستند. اندام‌ها روی یک تراشه، در حال حاضر زمینه‌ای به سرعت در حال توسعه است که کاراندام‌شناسی و عملکرد یک اندام خاص انسان را تقلید می‌کند. این فناوری در آزمایش مدل‌های بیماری، دارورسانی و غربالگری برای کاربردهای زیست‌پزشکی استفاده می‌شود. مهندسان شیمی با همکاری سایر رشته‌های مهندسی و زیست‌شناسان، برای مدل‌سازی و طراحی دستگاه‌های پیچیده‌تر اندام بر تراشه^۵ کار می‌کنند. مهندسان شیمی همچنین در توسعه نشانگرهای زیستی قابل اندازه‌گیری بر پایه واکنش‌های شیمیایی پیشرفته کار می‌کنند که برای شناسایی فرایندهای کاراندام‌شناختی خاص و تشخیص بیماری در بدن انسان استفاده می‌شود. این امر به ویژه در توسعه فنون جدید برای پیشگیری از بیماری‌های خاص بسیار مهم است.^۶

1- Point-care
4- Microfluidics

2- Strep tests
5- Organ-on-a-Chip

3- Swab

۱-۱. تاریخچه توسعه مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی
 آدولف یوگن فیک، پزشک و کاراندام‌شناس آلمانی‌الاصل، یکی از اولین مهندسان زیست پزشکی بود. او علاوه بر توسعه رابطه سازنده برای شار نفوذ یا انتشار (۱۸۵۵)، پویایی عضلات و تولید گرما را مطالعه کرد. او همچنین چندین ابزار برای اندازه‌گیری‌های کاراندام‌شناختی توسعه داد، از جمله اولین دستگاه برای اندازه‌گیری فشار داخل چشم و یک فشارسنج برای اندازه‌گیری گرادیان فشار شریانی. ویلهلم کولف، یک پزشک شاغل، اولین واحد کلیه مصنوعی ابتدایی را برای تصفیه خون در بیمارستانی در آمستردام در تابستان ۱۹۴۱ طراحی کرد. پیشرفت کولف از طریق بهبود در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ ادامه یافت و به حوزه تصفیه خون تبدیل شد.
 مهندسی (زیست پزشکی) در مهندسی شیمی ظاهر شد زیرا برخی از پزشکان مبتکر در بوستون و نیویورک، مشکلات مهمی مانند جداسازی و تصفیه خون، جریان خون، اندازه‌گیری ویسکوزیته یا تنش برشی داشتند که باید با مهندسان شیمی مورد بحث قرار گیرد.
 خاستگاه فعالیت‌های مهندسی (زیست پزشکی) در مهندسی شیمی ارتباط نزدیکی با توسعه پدیده‌های انتقال در مهندسی شیمی دارد. اد لئونارد دو مقاله مهم مهندسی شیمی را در زمینه زیست پزشکی، در مورد تجزیه و تحلیل انتقال نمک‌ها در دستگاه‌های تصفیه خون منتشر کرد (۱۹۵۹، ۱۹۶۰). لئونارد در سال ۱۹۶۹ برای کمک‌های اساسی در مهندسی و طراحی اندام‌های مصنوعی، برنده جایزه AICHe از Allan P Colburn شد.
 ادوارد دلیو مریل، استاد MIT، یکی از اولین پژوهشگران رفتار غیرنیوتنی خون تحت تنش برشی کم و متوسط بود (Mann et al., 2023). همچنین در جدول ۱ نمونه‌هایی از برخی تحقیقات مهم در زیست پزشکی که توسط مهندسان شیمی صورت گرفته است، به همراه سال و نام پژوهشگر آورده شده است.

جدول ۱. نمونه‌هایی از مشارکت‌های مهم پژوهش‌های زیست پزشکی توسط مهندسان شیمی

Subject	Researcher	Year
Blood rheology	E. W. Merrill, MIT	1959
Artificial kidney design	E. Leonard, Columbia	1959
Analysis of hemodialysis	C. K. Colton, MIT	1966
Biomembranes	A. Michaels, MIT	1966
Heparinized non-thrombogenic biomaterials	E. W. Merrill, MIT	1967
Radiation produced biomaterials	A. Hoffman, MIT, U. Washington	1969
Contact and intraocular lenses	N. A. Peppas, Purdue Univ.	1976
Protein delivery from polymer matrices	R. Langer, MIT	1976
Intelligent hydrogels in drug delivery	N. A. Peppas, Purdue Univ.	1979

۲-۱. زیست مواد

در روزهای اولیه مهندسی زیست پزشکی، مهندسان شیمی در توسعه علم و مهندسی زیست مواد پیشگام شدند. این احتمالاً با مشارکت قابل توجه مهندسان شیمی در زمینه گسترده تر علم بسیار مرتبط است که مهندسان شیمی پیشگامان اولیه آن بودند.

زیست مواد باید غیرسمی، غیرسرطان زا، از نظر شیمیایی بی اثر و پایدار باشند، اما برای برخی کاربردها زیست تخریب پذیر و از نظر مکانیکی قوی باشند تا در برابر نیروهای بی درپی در طول زندگی مقاومت کنند. مشارکت اولیه مهندسان شیمی در توسعه زیست مواد در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ برخی از مشارکت های قابل توجه مهندسان شیمی در علم و مهندسی زیست مواد

Biomaterials	Contributors	Year
Cellulose acetate as hemodialyzer material	C. Colton, MIT	1966
Hydrogels	A. Hoffman, MIT	1966
	E. Merrill, MIT	1966
Poly(vinyl alcohol)	E. Merrill, MIT	1969
	N. Peppas, Purdue	1975
	M. Sefton, U. Toronto	1976
Polyurethanes	S. Cooper, U. Wisconsin	1972
Poly(hydroxyethyl methacrylate)	B. Ratner, U. Washington	1973
Poly(ethylene oxide)	E. Merrill, MIT	1974
Polyanhydrides	R. Langer, MIT	1982

۳-۱. سامانه های دارورسانی

یکی از حوزه های پزشکی که شاید بیشترین اهمیت را از نظر مشارکت های مهندسی شیمی دارد، سامانه های دارورسانی کنترل شده است. این سامانه ها اکنون جان افراد بی شماری را نجات می دهند. از میان چندین مهندس شیمی، آلن مایکلز از MIT و استنفورد شاید اولین کسی بود که مطالعات مهمی را انجام داد که نشان می داد چگونه غشاها می توانند آزادی سازی داروها را کنترل کنند. او همچنین در انتقال مولکول ها از طریق پوست (سامانه تراپوستی) پیشگام بود. مایکلز و همکارانش (از جمله کومار چاندراسکاران، مهندس شیمی از دانشگاه کالیفرنیا در برکلی و شیمی دان بسیاری آموزش دیده در MIT، پاتریک وانگ) اولین روش های پیش بینی نوع دارویی که می تواند از پوست عبور کند را توسعه دادند (مایکلز، ۱۹۷۶، ۱۹۸۵). شرکت ALZA، جایی که مایکلز به عنوان اولین معاون اجرایی آن خدمت می کرد، به توسعه تعدادی سامانه تراپوستی برای داروها، مانند استرادیول، اسکوپولامین و نیتروگلیسیرین ادامه داد. با این حال، تا اوایل دهه ۱۹۷۰، تصور نمی شد که مولکول هایی با وزن مولکولی بیشتر از چند صد را از طریق بسیاری انتقال داد. در اوایل دهه ۱۹۷۰، گروه پژوهشی لانگر شروع به بررسی این موضوع کرد.

آنها کشف کردند که وقتی اسپارهای بسیار آب‌گریز، مانند اتیلن وینیل استات یا کوبسپارهای لاکتیک/ گلیکولیک لاسید با درشت‌مولکول‌هایی، مانند پپتیدها یا پروتئین‌ها در شرایط مناسب مخلوط می‌شوند، ساختارهای بسیار متخلخلی ایجاد می‌شود که از طریق آن مولکول‌ها می‌توانند برای صدها روز آزاد شوند. لانگر و فولکمن (۱۹۷۸) با تکیه بر این کار، توانستند شرکت‌های مختلف سامانه‌های آزادسازی کنترل‌شده را برای انواع پپتیدها، پروتئین‌ها و سایر درشت‌مولکول‌ها توسعه دهند. یکی از مثال‌های مهم توسعه سامانه‌های ره‌ایش کنترل‌شده برای مشابه‌های هورمون آزادکننده هورمون زرد (LHRH) مانند لوپرون دپوت^۱، زولادکس^۲ و دکاپیتیل^۳ بود. ره‌ایش دارو از این سامانه‌ها، ابتدا به مدت یک ماه بود و اکنون سه یا چهار ماه طول می‌کشد.

استنت‌های شستشوی دارو که در آن راپامایسین (MW 10000) یا سایر داروها در بسپارها ترکیب می‌شوند، انقلابی در درمان بیماری عروق کرونر و تنگی مجدد ایجاد کردند (Park et al., 2003). بسپارها و هیدروژل‌های آب‌دوست برای آزادسازی کنترل‌شده داروها، پپتیدها و پروتئین‌ها توسعه یافتند (Langer & Peppas, 1983). مهندسان شیمی همچنین در توسعه مدل‌های ریاضی برای پیش‌بینی پدیده‌های ره‌ایش کنترل‌شده دارو کمک کرده‌اند (Langer & Peppas, 1983).

۴-۱. مهندسی بافت

مهندسی بافت به عنوان یکی از شاخه‌های مهم پزشکی بازساختی دارای ویژگی‌های بین‌رشته‌ای است و در ترمیم، حفظ یا بهبود عملکرد اندام‌ها و بافت‌های آسیب‌دیده نقش دارد که در حوزه زیست‌پزشکی از ارزش بالایی برخوردار است (Vacanti et al., 1988). بنیاد ملی علوم طبیعی چین سال‌ها از تحقیقات پایه در زمینه مهندسی بافت حمایت کرده است و برنامه‌های حمایت‌شده می‌توانند در زمینه‌های مختلف تأمین مالی شوند. مهندسی استخوان و غضروف، عروق خونی و قلب، دهان، اعصاب و مهندسی بافت پوست زیر شاخه‌های اصلی هستند. عروق، ریزمحیط، سلول‌های بنیادی مزانشیمی، هیدروژل‌ها، چاپ سه‌بعدی، تمایز جهت‌دار موضوعات جذاب پژوهش هستند (Folkman & Haudenschild, 1980).

مهندسی بافت یک زمینه بین‌رشته‌ای است که اصول و روش‌های مهندسی را در جهت توسعه جایگزین‌های زیستی برای بهبود عملکرد بافت‌ها و اندام‌های آسیب‌دیده به کار می‌گیرد (Vacanti et al., 1988). مهندسان شیمی همچنین نقش اصلی را در ایجاد رویکردهای جدید برای تشکیل بافت‌های جدید ایفا کرده‌اند. در یک رویکرد، سلول‌ها روی ماتریس‌های بسپاری بسیار متخلخل قرار می‌گیرند. به این مفهوم که وقتی سلول‌های جداشده به طور تصادفی در بدن تزریق می‌شوند، قادر

به تشکیل ساختارهای بافتی نیستند. با این حال، هنگامی که آنها به اندازه کافی نزدیک به یکدیگر قرار می‌گیرند و احتمالاً به دلیل پیام‌هایی که می‌توانند به یکدیگر بدهند، در واقع چنین ساختارهایی را تشکیل می‌دهند. برای مثال، این پدیده با قرار دادن سلول‌های اندوتلیال نزدیک به هم در شرایط آزمایشگاهی، جایی که می‌توانند مویرگ‌ها را تشکیل دهند، (Folkman & Haudenschild, 1980)، و هنگامی که سلول‌های اپیتلیال پستانی نزدیک به هم قرار بگیرند آسین و شیر می‌سازند (Bissell & Barcellos-Hoff, 1987)، نشان داده شده است.

لانگر و واکانتی فرض کردند که با ایجاد ساختارهای بسیاری و محیط کشت بافت مناسب، می‌توان محیطی را ایجاد کرد که در آن سطح بسیار زیادی در واحد حجم وجود داشته باشد، به گونه‌ای که امکان رشد تعداد زیادی از سلول‌ها را که در تماس نزدیک با یکدیگر باشند، فراهم می‌کند. این مفهوم در ابتدا، طراحی بافتی در خارج از بدن بود که می‌توان آن را به بدن پیوند زد تا بتواند عمل کند (Vacanti et al., 1988).

با این حال، هیدروژل‌های تزریقی و تشکیل‌دهنده درجا، اخیراً برای توسعه داربست مهندسی بافت که سلول‌های بنیادی مزانشیمی را در خود جای می‌دهد، مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌اند (Ghorbani et al., 2023; Kazemi-Aghdam et al., 2021). هیدروژل‌های تزریقی به دلیل سهولت تجویز، کپسوله‌سازی سلولی ساده، درمان کم‌تهاجمی، افزایش انطباق بیمار و اینکه شکل پیچیده‌ای به خود می‌گیرند و به بافت‌های اطراف می‌چسبند، نسبت به بافت‌های ازپیش ساخته‌شده خارج از بدن سودمند هستند.

زیست‌واکنش‌ها نیز نقش مهمی در رشد این سلول‌ها دارند. یک نمونه، کار نیکلاسون و همکارانش است (Niklason et al., 1999) که در تلاش برای ایجاد رگ‌های خونی دریافتند که ایجاد چنین عروقی، به سادگی با رویکرد مرسوم رشد سلول‌ها بر روی یک بسیار در شرایط کشت بافت طبیعی، بسیار دشوار است.

رویکرد دیگری که در آن مهندسان شیمی نقش عمده‌ای ایفا کرده‌اند، کپسوله کردن سلول‌ها در سپارها بوده است که به عنوان غشاهای ایزوله‌سازی عمل می‌کنند. در اینجا، مفهوم ایجاد غشاهایی است که به مولکول‌های کوچک مانند گلوکز یا سایر مواد مغذی اجازه انتشار می‌دهند اما می‌توانند از ورود مولکول‌های بزرگ، مانند ایمونوگلوبولین‌ها یا سلول‌های ایمنی از غشا جلوگیری کنند. در کار پیشگام او سالیوان (O'Sullivan, 1991) نشان داده شده است که غشاهای اولترافیلتراسیون فیبر توخالی می‌توانند برای درمان سگ‌های دیابتی استفاده شوند.

گروه‌های دیگری، از میکروکپسول‌ها به عنوان غشاهای ایزوله‌سازی استفاده کرده‌اند. به عنوان مثال، سفتون و همکارانش از پلی‌آکریلات استفاده کرده‌اند و توانستند آنها را در حلال‌های آلی با سمیت کم حل کنند و جزایر لانگرهانس، کبد یا سلول‌های دیگر را محصور کنند (Uludag & Sefton, 1993).

۲. افق‌های پیش رو برای مهندسی شیمی در سلامت و بهداشت

در گزارش اخیر و بسیار مهم فرهنگستان علوم مهندسی آمریکا، به نام "مسیرهای نو برای مهندسی شیمی" نقش مهندسان شیمی در سلامت انسان و بهداشت و افق‌های پیش رو بررسی شده است (Engineering et al., 2022). آن چه در پی می‌آید، برگردان گزیده‌ای از مطالب ارزشمند این گزارش کم‌نظیر است که در مقاله اوی این شماره ویژه بیشتر با آن پرداخته شده است.

مهندسان شیمی حداقل برای یک قرن در طراحی رآکتورها و فرایندهای جداسازی و اخیراً در مهندسی سلول، فرمولاسیون و سایر جنبه‌های تولید دارو درگیر بوده‌اند و این پتانسیل را دارند که سهم بیشتری در سلامت و پزشکی در مقیاس‌های مختلف، از مولکولی تا تأسیسات تولیدی را داشته باشند. مهندسان شیمی همچنین در مهندسی راه‌حل‌های هدفمند و در دسترس برای سلامت انسان پیشرو خواهند بود. دامنه نفوذ آنها، از پزشکی شخصی شده گرفته تا کاربرد مهندسی سامانه‌ها در زیست‌شناسی و سلامت، متغیر است. این کار شامل اصلاح راهبردی مسیرهای مولکولی و شبکه‌های ژنومی درگیر در تنظیم وضعیت کاراندام‌شناسی طبیعی و بیماری است.

نقش مهندسی شیمی در کاربردهای سلامت انسان، با تمرکز ویژه بر مهندسی (زیست) پزشکی به شرح زیر ارائه خواهد شد. مهندسان شیمی نقش مهمی در پیشرفت پزشکی شخصی سازی شده، بهبود درمان، درک زیست‌بوم میکروبی، طراحی مواد، دستگاه‌ها و سامانه‌های دارورسانی و نیز توسعه فناوری‌های بهداشتی ایفا کرده‌اند. حوزه مهمی که در آن مهندسی شیمی می‌تواند به آینده پزشکی کمک کند، پزشکی شخصی شده است که به تنظیم درمان‌ها برای سلامت فردی، از جمله درمان‌های سلولی و ژنی برای اختلالات خاص بیمار و همچنین رژیم‌های مراقبت پیشگیرانه بر اساس ژنتیک- تمایل به بیماری افراد یا وجود نشانگرهای زیستی توجه می‌کند. افزون بر این، توانایی ترکیب چند دارو در یک حامل بر اساس تقاضای بیمار احتمالاً نتایج مراقبت‌های بهداشتی را بهبود می‌بخشد. بهبود و ساده‌سازی سامانه دارورسانی چندگانه، یک فرصت کلیدی برای مهندسان شیمی است.

مهندسان شیمی در توسعه مفاهیم جدید واکسیناسیون و طراحی مولکولی روش‌های نوین دارورسانی برای واکسن‌ها و زیست‌داروها، مانند پادتن‌ها و پروتئین‌های نوترکیب، از جمله توسعه سریع آنها در مقیاس تجاری، مشارکت دارند. یکی از مهم‌ترین نمونه‌های اخیر از همکاری مهندسی و زیست‌شناسی برای رفع نیازهای پزشکی، توسعه سریع واکسن COVID-19 است. مهندسان شیمی می‌توانند پیشرفت‌های علمی، مانند پیوند گروه‌های محافظ موفق که mRNA را در جریان خون تثبیت می‌کنند، به دست آورند و به طور گسترده‌تری در مورد چگونگی تولید یک دارو فکر کنند. تفکر سامانه‌ای به در نظر گرفتن عوامل مورد نیاز برای رسیدن از سطوح مولکولی و سلولی به رساندن و توزیع کارآمد درشت مولکول‌های RNA در بدن کمک می‌کند. مهندسان شیمی می‌توانند به پیشرفت در مرزهای مهندسی ایمنی، مانند RNAهای راهنما که توانایی تغییر هم‌زمان بیان ژن‌های متعدد را

دارند، داروهای تولیدشده در گلوبول‌های قرمز و مهندسی سامانه‌های زیستی کمک کنند. دستگاه‌ها نقش مهمی در چشم‌انداز فناوری‌های زیست‌پزشکی ایفا می‌کنند. دستگاه‌هایی که تجویز دارو را کنترل می‌کنند، مورد توجه خاص مهندسان شیمی هستند، حوزه‌ای که در آن پیشرفت‌های چشمگیری داشته‌اند. چنین دستگاه‌هایی شامل پمپ‌های تزریق بیرونی، پمپ‌های قابل کاشت، دستگاه‌های دارورسانی خودتنظیم و چسب‌های تراپوستی و غیره هستند. بیماران مبتلا به دیابت نوع ۱ تحت درمان مادام‌العمر با انسولین هستند و نیاز به تزریق پی‌درپی انسولین، یک محدودیت قابل توجه در مدیریت دیابت است. پمپ‌های کاشتنی جایگزین بسیار خوبی، به ویژه برای رساندن انسولین پایه هستند.

دستگاه‌های خارجی، از جمله پمپ‌های کاشته‌شده، پاسخ به جسم خارجی را مانند آمدن سلول‌های ایمنی و سرانجام تشکیل کپسول‌های فیبری که خواص آن نقش مهمی در تعیین دوام دستگاه دارد، برمی‌انگیزد. مهندسان شیمی با درک واکنش جسم خارجی و توسعه پوشش‌هایی برای به حداقل رساندن تشکیل کپسول فیبری کمک‌های مهمی به این زمینه کرده‌اند. برای نمونه، هم‌پوشانی جزایر پانکراس و پنتوکسی‌فیلین در ریزکپسول‌ها بر پایه آلژینات با اثرات مهارکننده ایمنی افزایش یافته در آزمایش‌های برون‌تنی توسط آزادی و همکارانش، با هدف درمان دیابت نوع ۱ توسعه یافت (Azadi et al., 2016).

مشارکت اولیه مهندسان شیمی در دارورسانی با مولکول‌های کوچک، بر توسعه راهبردهای کپسوله‌سازی برای کنترل آزادسازی داروها متمرکز بود. انباره‌های^۱ ماکروسکوپی و میکروسکوپی برای کپسوله کردن داروهای کوچک و بزرگ طراحی شده‌اند. متداول‌ترین سامانه‌های دارورسانی بر پایه ریزکره‌ها، شامل سوسپانسیون ریزکره‌های بسیاری هستند که می‌توانند با تزریق زیرجلدی انتقال یابند. انتشار تحریک‌شده داروها از این انباره‌های بسیاری، با استفاده از محرک‌های خارجی، مانند نور، امواج فراآوا و میدان‌های مغناطیسی، امکان کنترل بهتری بر آزادسازی دارو را فراهم کرده است. مهندسان شیمی فرصت‌های زیادی برای پیشبرد انباره‌ها با رهش پایدار دارند، به ویژه با توجه به افزایش مدت زمان انتشار که می‌تواند همراهی بیمار را بیشتر بهبود بخشد.

فرصت‌های به‌کارگیری مهارت‌های کمی مهندسی شیمی در ایمنی‌شناسی^۲ شامل ایمنی درمانی سرطان، طراحی واکسن و درمان‌های دارویی برای بیماری‌های عفونی و اختلالات خودایمنی است. توسعه روش‌های کاملاً غیرتهاجمی برای دارورسانی، مرز هیجان‌انگیزی از راهبردها بر پایه دستگاه و مواد را نشان می‌دهد. مهندسان شیمی همچنین موقعیت خوبی برای پیشبرد کار در زمینه انباره‌های با رهش پایدار و دارورسانی هدفمند دارند.

1 - Depots

۲- ایمنی‌شناسی برابر نهاده فرهنگستان برای واژه ایمونولوژی است.

تشخیص سریع، پی‌درپی و ارزان، اساس مراقبت‌های بهداشتی موفق است. روش‌های تشخیصی بر پایه خون، از جمله روش‌هایی هستند که در معاینات معمول پزشکی و تشخیص متمرکز بیماری، سنگ بنای زیرساخت‌های تشخیصی گذشته و حتی کنونی بوده‌اند.

توسعه دارو معمولاً یک فرایند طولانی و پرهزینه است و معمولاً ۱۰ تا ۱۵ سال و تقریباً ۲٫۶ میلیارد دلار برای توسعه یک داروی جدید مورد نیاز است. بخش بزرگی از این زمان و هزینه با توسعه دیررس پیش‌بالینی و بالینی مرتبط است. پیشرفت‌های متعددی در توسعه سامانه‌های ریزکاراندام‌شناختی کوچک‌شده (به اصطلاح ارگان روی تراشه یا بدن انسان روی تراشه) به دست آمده است و ادامه می‌یابد که برون‌دادی حداقل به همان اندازه آزمون حیوانی پیش‌بینی می‌کند. چنین سامانه‌هایی، نه تنها به ملاحظات زیست‌شناسی، یعنی قرار دادن سلول‌های مختلف (به عنوان مثال، سلول‌های اپیتلیال ریه، آستروسیت‌ها، سلول‌های کبدی) در سامانه، بلکه به جنبه‌های مهندسی جریان و سطح مشترک‌ها نیز نیاز دارند. با حرکت رو به جلو، چنین اندام‌هایی روی یک تراشه، نیاز به ادغام فعال جنبه‌های زیستی و مهندسی در طراحی دارند.

۲-۱. زیست‌مواد

طراحی زیست‌مواد رشد زیادی در مهندسی شیمی داشته است زیرا تعداد زیادی از پیشرفت‌ها، منجر به کاربرد بالینی شده است که از سامانه‌های بسیاری تخریب‌پذیر و مشتق‌شده زیستی استفاده می‌کند. طراحی مواد در زمینه‌هایی از سامانه‌های آزادسازی موضعی کنترل‌شده تا RNA (siRNA) رسانی به کار رفته است و تأثیر قابل توجهی بر پیشرفت پزشکی و بهبود سلامت بیمار داشته است. زمینه‌های کلیدی برای پیشرفت در زمینه زیست‌مواد عبارتند از: مهندسی بازسازی، ترمیم زخم، رساندن سامانه‌ای موضعی اسیدهای نوکلئیک و تشخیص و تصویربرداری از مناطقی از بدن که موانع یا فرصت‌های منحصربه‌فردی را ارائه می‌دهند.

جستجوی موضوع زیست‌مواد با آدرس مهندسی شیمی برای نویسندگان، در پایگاه داده اسکوپوس (۱۵ فوریه ۲۰۲۴) به ۱۱۱۹۲ سند از مجموع ۱۶۳۳۵۹ سند این موضوع (۶٫۸۵ درصد) منجر شد.

۲-۲. مواد برای مهندسی بازسازی

نیاز به روش‌هایی برای تولید یا ترمیم بافت‌ها و اندام‌ها اجتناب‌ناپذیر است. توانایی ایجاد سامانه‌های مواد که می‌توانند برای تقلید از محیط‌های سلولی تنظیم شوند، از جمله ماتریس برون‌سلولی بافت‌ها و اندام‌ها و نشانه‌های زیستی که آنها ارائه می‌کنند، مسیری را برای بازسازی بافت‌ها و اندام‌ها باز می‌کند. التیام زخم، بازسازی استخوان و غضروف، جایگزینی اندام‌های کلیدی مانند پوست یا کبد و ترمیم بافت‌ها، مانند بافت قلب، تنها برخی از کاربردهایی است که با تولید ماتریس‌ها و اجزای مواد که می‌توانند

برای پشتیبانی از انواع سلول‌های زنده مناسب ترکیب شوند، عملیاتی می‌شوند. کلید عملکرد زیست‌مواد برای این کاربردها، توانایی ارائه تنظیمات با نشانه‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مناسب است تا سامانه‌هایی تک یا چندسلولی را قادر سازند تا ترتیب، نظم و ساختار را در بافت‌های سازمان‌یافته بسازند. مواد بسپاری، از جمله تعدادی از سامانه‌های بسپاری که هیدروژل‌ها را تشکیل می‌دهند، نقش مهمی در طراحی و توسعه زیست‌مواد ایفا کرده‌اند. این پیشرفت‌ها با طیف وسیعی از پیکربندی مصنوعی موجود، توانایی "طراحی" تخریب‌پذیری بر اساس حساسیت آب‌کافتی، pH یا وجود پیوندهای حساس به پروتئاز و آسانی عامل‌دار کردن سازه‌های بسپاری، که همه آنها را تبدیل به داربست‌هایی عالی برای ارائه طیف وسیعی از پروتئین‌ها، پپتیدها و سایر نشانه‌های مولکولی بر روی سطوح آنها می‌کند، امکان‌پذیر شده است.

همراه با بسپارها، طیف وسیعی از مواد کامپوزیت معدنی، از جمله هیدروکسی آپاتیت، سیلیکای متخلخل و سایر مواد مهندسی‌شده، مانند نانومواد کربن و سامانه‌های مواد معدنی یا کامپوزیتی، نشانه‌های زیست‌فیزیکی، مانند سختی مکانیکی و منابعی برای زیست‌معدنی کردن بافت‌های سخت، مانند استخوان را فراهم کرده‌اند.

پیشرفت‌های کلیدی شامل توسعه هیدروژل‌های مصنوعی پویا است که شیمی آنها می‌تواند با استفاده از نور یا محرک‌های فیزیکی یا شیمیایی، برای ایجاد تغییرات از حالتی به حالت دیگر به طور برگشت‌پذیر فعال شود. استفاده از پیوندهای شیمیایی پویا و برهم‌کنش‌های ثانویه می‌تواند تغییراتی را در حالت زیستی، مانند کمبود اکسیژن، حالت سلول یا وجود مولکول‌های پیام‌دهنده خاص برای ایجاد تغییرات، به‌گونه‌ای که بازگشت فعالیت را ممکن می‌کند، فعال کند.

تلاش‌های اخیر نیز به سمت مهندسی موادی انجام شده است که می‌توانند سامانه‌های چندسلولی را ترکیب و پشتیبانی کنند که اساساً امکان تولید هم‌کشت‌های سلولی سه‌بعدی با پشتیبانی موادی را فراهم می‌کنند که برهم‌کنش‌های سلول-سلول، مانند آنچه در سامانه‌های زیستی وجود دارد، در آنها پشتیبانی می‌شوند. این امر مستلزم طراحی سامانه‌های موادی است که بتوانند نه تنها پشتیبانی فیزیکی، بلکه ماتریسی را نیز فراهم کند که پیکربندی‌های سلول-سلولی را فعال کند و بهترین عملکرد را ممکن سازد. سازماندهی انواع سلول‌های مختلف نیز برای عملکرد کافی مورد نیاز است. زیست‌موادهایی که می‌توانند برای سازماندهی انتخابی سلول‌ها الگودهی، تراز یا دستکاری شوند، برای این کاربردها بسیار جالب هستند.

تولید افزودنی^۱ یا چاپ سه‌بعدی ابزار مهمی برای سنتز زیست‌مواد است. جوهرهای زیستی که شامل ادغام سلول‌ها در مواد زیستی سازگار با استفاده از محلول‌ها یا سوسپانسیون‌های پایه آبی است، می‌توانند با روش‌های تولید افزودنی برای ایجاد ساختارهای طرح‌دار پیچیده حاوی سلول‌های

خاص در آرایش‌های دقیق، مانند اندام‌ها و بافت‌های فعال استفاده شوند. از آن جایی که بافت‌های مختلف، خواص مکانیکی و شیمیایی کاملاً متفاوتی از خود نشان می‌دهند، طیفی از انواع جوهرهای زیستی برای رفع این نیازهای مختلف لازم است.

۲-۳. مواد برای دارورسانی

دومین زمینه بزرگ و قابل توجه رشد برای مواد زیستی، تولید سامانه‌های موادی است که می‌توانند داروها را با کنترل زمان انتشار به بدن، شامل محل انتشار و هدف قرار دادن بافت‌ها، سلول‌ها یا اندام‌های خاص برسانند. طیف وسیعی از دستاوردها در سامانه‌های مواد سنتی‌تر و جدیدتر، داروها را قادر می‌سازد تا به طور مؤثری کپسوله شوند و اثربخشی خود را حفظ کنند و در عین حال عوارض جانبی نامطلوب و سمیت سلولی یا اندامی را کاهش دهند.

مجموعه بزرگی از بسپارهای عامل دار، لیپیدها، سیلیکا و سامانه‌های هیبریدی معدنی توسعه یافته‌اند که حالت‌های مختلف دارورسانی از پیش‌برنامه‌ریزی یا تقاضاشده را در پاسخ به محرک‌های خاص امکان‌پذیر می‌کنند. پیشرفت‌های اخیر منجر به درمان‌هایی شده است که شامل تجویز مولکول‌های زیستی، از پروتئین‌ها و پپتیدها تا اسیدهای نوکلئیک، مانند siRNA و RNA پیام‌رسان (mRNA) می‌شود. توسعه سامانه‌های نانوذره‌ای، که شامل نانوذرات بسیاری و لیپوزومی است و همچنین نانومواد غیرآلی و هیبریدی، فرصت دیگری را برای مهندسان شیمی برای تأثیرگذاری زیست‌مواد فراهم می‌کند. شاید مهم‌ترین و تأثیرگذارترین پیشرفت اخیر در دارورسانی، توانایی انتقال اسیدهای نوکلئیک، از جمله mRNA، siRNA و DNA باشد. توانایی رمزگذاری مستقیم سلول‌ها برای تولید پروتئین‌های خاص یا خاموش کردن ژن‌ها قوی است زیرا برنامه‌نویسی مستقیم سلول‌ها، از جمله استفاده از CRISPR را امکان‌پذیر می‌کند.

حجم بازار جهانی سامانه‌های دارورسانی در سال ۲۰۲۲ به ۱٫۸۰ تریلیون دلار ارزش‌گذاری شد و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۲ از حدود ۲٫۸۹ تریلیون دلار فراتر رود و با نرخ رشد سالانه مرکب (CAGR) ۴٫۹۰ درصد از سال ۲۰۲۳ تا ۲۰۳۲ رشد کند. بازار داروسازی چین در سال ۲۰۲۲، ۲۵۴٫۵ میلیارد دلار ارزش داشت (www.precedenceresearch.com, 2023).

جستجوی موضوع دارورسانی با آدرس مهندسی شیمی برای نویسندگان، در پایگاه‌داده‌های اطلاعاتی اسکوپوس (۱۵ فوریه ۲۰۲۴) منجر به ۲۱۴۱۳ سند از مجموع ۳۱۷۷۳۵ سند این موضوع (۶٫۷۴ درصد) شد.

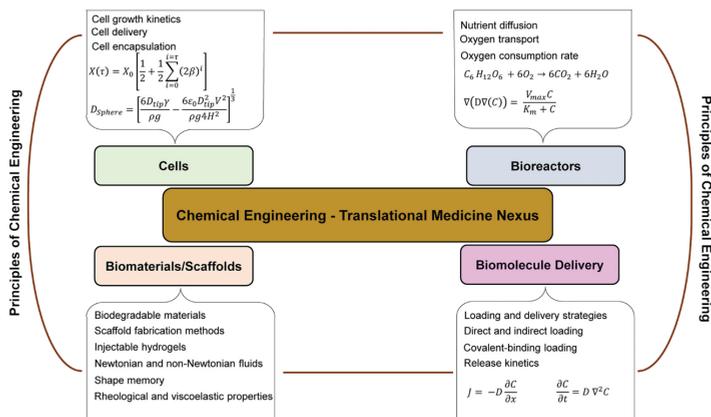
۲-۴. مهندسی بافت

مهندسی بافت به عنوان یکی از شاخه‌های مهم پزشکی بازساختی دارای ویژگی‌های بین‌رشته‌ای است و در ترمیم، حفظ یا بهبود عملکرد اندام‌ها و بافت‌های آسیب‌دیده نقش دارد که در حوزه

زیست پزشکی از ارزش بالایی برخوردار است. بنیاد ملی علوم طبیعی چین سال ها از تحقیقات پایه در زمینه مهندسی بافت حمایت کرده است و برنامه های حمایت شده می توانند در زمینه های مختلف تأمین مالی شوند. مهندسی استخوان و غضروف، عروق خونی و قلب، دهان، اعصاب و مهندسی بافت پوست، زیرشاخه های اصلی هستند. عروق، ریزمحیط، سلول های بنیادی مزانشیمی، هیدروژل ها، چاپ سه بعدی، تمایز جهت دار موضوعات جذاب پژوهش هستند (Yan Shu, 2020).

پیشرفت های زیادی در زمینه های مهندسی بافت و پزشکی بازساختی حاصل شده است. چینش سلول های زنده در بافت ها، شبیه به عملیات افزایش مقیاس یک فرایند شیمیایی یا زیست شیمیایی با چندین ماژول یا واحد است که بر محصول نهایی تأثیر می گذارد. ماژول ها یا واحدهای اصلی در مهندسی بافت و پزشکی بازساختی سلول ها، داربست های زیست تخریب پذیر، زیست واکنشگاه ها و زیست مولکول ها هستند. هر ماژول مشابه عملیات واحد است، جایی که واحدهای جداگانه باید گرد هم آیند تا با موفقیت، بافت های مهندسی شده را برای کاربردهای درمانی و کشف دارو طراحی کنند. اصول اولیه علوم زیستی، مهندسی شیمی، شیمی مواد و فراوری بسیاری اغلب مورد استفاده قرار می گیرد. به طور خاص، دانش در مورد جریان سیال ویسکوز، انتقال جرم و مهندسی واکنش در مهندسی بافت ضروری است (Arambula Maldonado et al., 2021).

اصول بنیادی مهندسی واکنش های شیمیایی، مکانیک سیالات و عملیات واحد را می توان در مهندسی بافت (مانند طراحی داربست و زیست واکنشگاه)، پزشکی بازساختی (مانند سینتیک رشد سلولی و کپسوله کردن سلول) و سامانه های دارورسانی و سلول رسانی کنترل شده اعمال کرد. شکل ۱ به خوبی کاربرد این اصول در پیوند مهندسی شیمی و مهندسی بافت پزشکی بالینی را نشان می دهد (Arambula-Maldonado et al., 2021).



شکل ۱. کاربرد مفاهیم مهندسی شیمی در چهار حوزه کلیدی سلول ها، زیست آکتورها، تحویل زیست مولکول ها، و مواد زیستی/ داربست ها. که پیوند میان رشته ای را در فناوری های پزشکی پیشرفته برجسته می کند (Arambula-Maldonado et al., 2021).

سلول‌ها بلوک‌های ساختمانی حیاتی بافت‌های مهندسی شده هستند و بافت‌ها، واحد اصلی عملکرد در بدن هستند و این واقعیت، بافت‌های مهندسی شده را از پروتز متمایز می‌کند. برای گسترش تعداد محدودی از سلول‌های به دست آمده از اهداکنندگان یا بیوپسی، باید آنها را در محیط کشت تحت شرایط زیست‌فرایند سخت رشد داد. هنگامی که سلول‌ها به تعداد کافی به دست آمد، می‌توان آنها را در داربست‌ها کاشت و در یک زیست‌واکنشگاه رشد داد یا به محل آسیب دیده برای بازگرداندن عملکردی تزریق کرد.

به جای رشد بافت در زیست‌واکنشگاه، سلول‌ها نیز ممکن است برای پیوند و بازگرداندن عملکرد آن به محل آسیب دیده تزریق شوند. این چالش‌ها ممکن است با کپسوله کردن سلول‌ها در هیدروژل‌های زیست‌تخریب پذیر و رساندن تزریقی به مکان‌های خاص برطرف شوند. استفاده از هیدروژل‌ها باعث تثبیت سلول‌ها در فضای مورد نظر و آسان‌سازی یکپارچه کردن آنها با بافت میزبان می‌شود. قابلیت تزریق هیدروژل، همان گونه که با خواص رئولوژیکی و حافظه شکلی آنها مشخص می‌شود، پیوند دیگری بین مهندسی بسپار و پزشکی بالینی است.

هیدروژل‌های تزریقی و درج‌اتشکیل‌دهنده اخیراً برای توسعه داربست مهندسی بافت، که سلول‌های بنیادی مزانشیمی را در بر می‌گیرند، مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. (Kazemi-Aghdam et al., 2021; Ghorbani et al., 2023). هیدروژل‌های تزریقی، به دلیل آسانی تجویز، کپسوله‌سازی سلولی ساده، درمان کم‌تهاجمی، افزایش همکاری بیمار و این که شکل پیچیده‌ای به خود می‌گیرند و به بافت‌های اطراف می‌چسبند، نسبت به بافت‌های ازپیش‌ساخته شده برون تنی برتری دارند. حجم بازار صنعت مهندسی بافت جهانی در سال ۲۰۲۲، به ۳۴۳۴٫۵۰ میلیون دلار رسید. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۱ به ۱۱۵۲۶٫۵۱ میلیون دلار برسد که در دوره پیش‌بینی ۲۰۲۳-۲۰۳۱ با CAGR ۱۴٫۴۰ درصد رشد می‌کند (www.straitsresearch.com, 2023).

جستجوی موضوع مهندسی بافت با آدرس مهندسی شیمی برای نویسندگان، در پایگاه داده‌های اطلاعاتی اسکوپوس (۱۵ فوریه ۲۰۲۴) به ۸۶۳۶ مدرک از مجموع ۱۳۳۰۰۲ مدرک این موضوع (۶٫۴۹ درصد) منجر شد.

۳. آموزش مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی

مریل نخستین درس مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی را، به نام "مهندسی در زیست‌شناسی و پزشکی" در سال ۱۹۶۳ در MIT معرفی کرد (جدول ۳). از نقطه نظر آموزشی، روزهای نخستین مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی با تألیف طیف گسترده‌ای از کتاب‌های درسی، هم در مقطع کارشناسی و هم تحصیلات تکمیلی که توسط رهبران اصلی این رشته انجام گرفت (همچنین به جدول ۲ مراجعه کنید)، مشخص می‌شود (Peppas & Langer, 2004).

جدول ۳. مشارکت مهندسان شیمی در تألیف کتاب‌های درسی اولیه یا مونوگراف‌ها در مهندسی (زیست) پزشکی

Daniel Hershey, ed.	Chemical Engineering in Medicine and Biology, Plenum Press, New York (1967)
Stanley Middleman	Biomedical Applications of Heat and Mass Transfer, Iowa State University Press, Ames (1971)
Richard C. Seagrave	Transport Phenomena in the Cardiovascular System, Wiley, New York (1972)
Kenneth H. Keller	Fluid Mechanics and Mass Transfer in Artificial Organs, ASAIO, Washington, DC (1973)
Edwin N. Lightfoot Jr.	Transport Phenomena and Living Systems, Wiley, New York (1973)
David O. Cooney	Biomedical Engineering Principles, Dekker, New York (1976)

از این میان، کتاب کوونی^۱ در دهه ۱۹۸۰ به پرفروش‌ترین کتاب این حوزه تبدیل شد، در حالی که تک‌نگاری لایت‌فوت^۲، یک کتاب درسی معیار در تحصیلات تکمیلی بود و همچنان هست. پیاس و مالینسون (Peppas & Mallinson, 1980) اولین بررسی درباره مهندسی (زیست) پزشکی را در زمینه مهندسی شیمی انجام دادند و روندهای آن دوره مهندسی (زیست) پزشکی کاراندام‌شناسی پایه و پیش‌زیست‌شناسی را گزارش کردند. در سال ۱۹۸۰، ۷۹ بخش مهندسی شیمی در ایالات متحده و کانادا حداقل یک درس مهندسی (زیست) پزشکی را ارائه می‌کردند.

اگر چه مشارکت قابل توجهی در مسائل انتقال زیست‌پزشکی در آن دوره انجام شد، مهندسان شیمی همچنین به مکانیک سیالات زیست‌پزشکی کمک کردند. لایت‌فوت (Lightfoot, 1973) تعدادی از مسائل جریان راکه از طریق تجزیه و تحلیل مکانیک سیالات نیوتنی در مجراهای الاستیک حل شده بودند، جمع‌بندی کرد.

اولین درس مربوط به پدیده‌های انتقال در سامانه‌های زیستی و مهندسی (زیست‌پزشکی) در دانشگاه کلارکسون توسط دیوید او. کوونی^۳ توسعه یافت و به دانشجویان سال بالای دوره کارشناسی و دانشجویان تحصیلات تکمیلی آموزش داده شد (Cooney, 1972). پیش‌نیازهای این درس شامل آشنایی قبلی با مکانیک سیالات، انتقال گرما و انتقال جرم بود و هیچ پیش‌نیازی در علوم زیستی لازم نبود. بخشی از مطالب پوشش داده‌شده، بدون اشاره به کاربردهای مهندسی، با پدیده‌های انتقال مومنتم، گرما و جرم در سامانه‌های زنده سروکار داشت. بخش عمده دیگری از دوره، همان‌گونه که در نیمه دوم عنوان دوره مشخص است، به مهندسی مرتبط با سامانه‌های زنده (به طور ویژه، مهندسی پزشکی مرتبط با انسان) پرداخته بود. موضوعاتی مانند رئولوژی خون، انتقال گرما در بدن و انتقال جرم از طریق غشای سلولی، از مواردی است که در پدیده‌های انتقال در سامانه‌های زیستی پوشش داده شد. مدل‌سازی بدن، دستگاه‌های کلیه مصنوعی و دریچه‌های مصنوعی قلب، موضوعاتی مربوط به مهندسی پزشکی بودند. افزون بر این دو حوزه کلی، این درس شامل مقدار کمی از کالبدشناسی و محتوای قابل توجهی از کاراندام‌شناسی، به عنوان مثال کاراندام‌شناسی سامانه گردش خون، کلیه و

ریه بود (Cooney, 1972).

کمک‌های مهمی برای درک جریان پیچیده در دریچه‌های قلب در پایان‌نامه دکتری آجیت یوگاناتان در مؤسسه فناوری کالیفرنیا آغاز شد (به عنوان مثال، یوگاناتان (Yoganathan, 1978)) و طی ۲۵ سال بعد، به سهم عمده گروه یوگاناتان به درک ما از رفتار جریان خون در قلب‌های مصنوعی منجر شد.

همان‌گونه که در اوایل دهه ۱۹۸۰ مدل‌سازی ریاضی پدیده‌های زیست‌پزشکی پیشرفته‌تر شد، مهندسان شیمی سهم مهمی در زمینه‌های دیگر، مانند تحقیقات سرطان و تصلب شرایین داشتند. کلارک کولتون و همکارانش (Colton, 1982) در MIT از جمله مهندسانی بودند که با استفاده از مطالعات پدیده انتقال آنورتی با لیپوپروتئین‌های کم چگالی و کلسترول برجسب خورده با رادیواکتیو به درک ما از تشکیل رسوب‌های گرفتگی رگ (Arteriosclerotic plaques) کمک کردند.

بیش از ۲۵۰۰ دانشجوی کارشناسی مهندسی شیمی در ۱۵ دانشگاه در استرالیا، کانادا، نیوزلند، تایلند، انگلستان، ایالات متحده و ویتنام در مورد صنایعی که می‌خواهند پس از دانش‌آموختگی در آنها کار کنند، مورد بررسی قرار گرفتند. به طور کلی، شهرت تک‌تک بخش‌های صنعتی بین کشورها و در موارد متعددی بین مؤسسات در همان کشور متفاوت بود. در ۱۰ مؤسسه از ۱۵ مؤسسه، بخش‌های مهندسی فرایندهای زیستی، از جمله زیست‌فناوری، داروشناسی، مهندسی زیست‌پزشکی و صنایع غذایی و آشامیدنی، بیشترین نسبت اولویت‌های نخست را به خود اختصاص دادند (Shallcross, 2006).

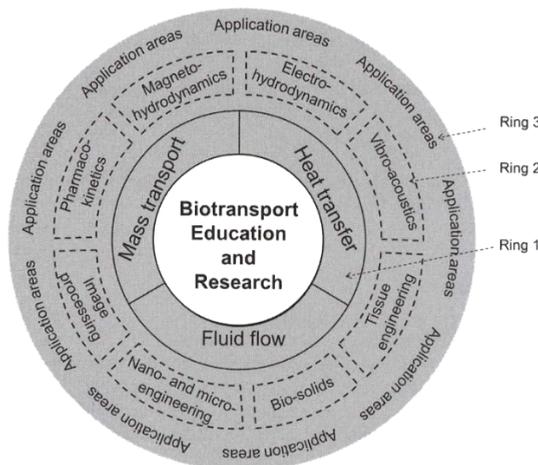
برای دانشجویان علاقه‌مند به کاربردهای پزشکی مهندسی شیمی، مدول آزمایشگاهی نفوذ مولکول‌ها در پوست، در آزمایشگاه عملیات واحد انستیتو فناوری جورجیا طراحی و اجرا شد (Norman et al., 2011). این مدول آزمایشگاهی برای آشنایی دانشجویان با نفوذ تراپوستی با ارزیابی تراوایی و زمان تأخیر عبور ترکیبات فلوروستنی از پوست موش طراحی شد. اهداف این آزمایشگاه عبارت بود از: (I) گسترش دانش دانشجویان درباره نفوذ، ضرایب تراوایی و زمان تأخیر (II) کسب تجربه دانشجویان برای کار با بافت زیستی، (iii) یاددهی فیزیک و کاربردهای فلوروسانس به دانشجویان و (IV) آشنا کردن دانشجویان با اهمیت سد پوستی برای سلامت و ایمنی (Norman et al., 2011).

۴. مروری بر آموزش پدیده‌های انتقال زیستی

از میان بسیاری از زیرشاخه‌های زیست‌مهندسی، پدیده‌های انتقال زیستی موضوعی کلیدی است که کاربرد گسترده‌ای در بسیاری از مسائل مهندسی، زیست‌شناسی، پزشکی، داروشناسی و علوم محیطی و غیره دارد.

افزون بر این، بر اساس تجربیات تدریس فردی و روش‌های به‌اشتراک گذاشته‌شده توسط ارائه‌دهندگان، خاطرنشان شد که روش یادگیری فعال، از جمله یادگیری همکارانه و مشارکتی، می‌تواند

برای تدریس دوره‌های کارشناسی مفید باشد، در حالی که یادگیری مسئله‌محور، می‌تواند روشی سودمند برای دوره‌های تحصیلات تکمیلی باشد. پدیده‌های انتقال زیستی، به عنوان مطالعه فرایندهای پویا که مواد، مومنتم و انرژی را در داخل، اطراف، از طریق و بین سامانه‌های زیستی، از مولکول‌های منفرد به محیط کلی انتقال می‌دهد" تعریف شده است (Davalos, 2012). با توجه به این توصیف گسترده، واضح است که پدیده‌های انتقال زیستی، موضوعی است که چندین رشته مهندسی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و برای درک بسیاری از مسائل پزشکی، کشاورزی، زیستی، زیست‌محیطی و موارد دیگر که در شکل ۲ و جدول ۱ نشان داده شده است، حیاتی است (Banerjee et al., 2014).



شکل ۲- شمای دروس اصلی (حلقه ۱) و هم‌پوشانی (حلقه ۲) و حوزه‌های کاربردی (حلقه ۳) در موضوع پدیده‌های انتقال زیستی

با توجه به محدودیت، در این جا به حوزه‌های کاربردی اشاره نمی‌شود. یکی از مشکلات ذاتی در آموزش پدیده‌های انتقال در سامانه‌های زیستی، حجم وسیعی از مطالبی است که دانشجویان باید در برنامه درسی مهندسی (زیست) پزشکی بر آنها تسلط یابند. یک رویکرد مؤثرتر و کامل‌تر برای آموزش این موضوع درسی، استفاده از روش‌های گسترده آموزشی است که به عنوان یادگیری فعال شناخته می‌شود. به دلیل تنوع گسترده‌ای از مطالب پوشش داده شده در پدیده‌های انتقال در سامانه‌های زیستی، نیازهای ویژه هر دوره‌ای ممکن است توسط متون موجود برآورده نشود. از این رو بر یادداشت‌های کلاسی متناسب با شرایط درس‌های مربوط تکیه می‌شود که هم در محتوا و هم در سطح دانشجویان تحت آموزش، تنوع زیادی دارند. افزون بر کتاب‌های درسی گوناگون مندرج در جدول‌های ۴ و ۵، استفاده از این یادداشت‌ها اغلب با بررسی و نقد مقالات تکمیل می‌شوند.

جدول ۴. کتاب‌های درسی مرجع برای آموزش پدیده‌های انتقال زیستی

Name	Author	Year	Publisher
Problems for biomedical fluid mechanics and transport phenomena	Mark Johnson, Ross Ethier	2014	Cambridge University Press
Biotransport: Principles and applications	R.J. Roselli, K.R. Diller	2011	Springer
An introduction to modeling of transport process: Applications to biomedical systems	A.K. Data, V. Rakesh	2010	Cambridge University Press
Transport phenomena in biological systems	G.A. Truskey, F. Yuan, D.F. Katz	2009	Pearson Prentice Hall
Biological and bioenvironmental heat and mass transfer	Ashim K. Datta	2002	Marcel Dekker
Thermal problems in biotechnology	K. R. Diller	1968	ASME

جدول ۵. کتاب‌های مرجع با پیوند نزدیک برای آموزش پدیده‌های انتقال

Name	Author	Year	Publisher
Introduction to biomedical engineering	J. Enderle	2012	Elsevier/Academic Press
Basic transport phenomena in biomedical engineering	Ronald Fournier	2012	CRC Press
Thermal dosimetry and treatment planning	M. Gautherie (ed.)	1990	Springer Berlin Heidelberg
Biothermal–fluid sciences: Principles and applications	Wen–Jei Yang	1989	Hemisphere Pub. Corp.
Heat transfer in medicine and biology: Analysis and applications	A. Shitzer, R.C. Eberhart	1985	Plenum Press
Biomedical engineering principles: An introduction to fluid, heat, and mass transport processes	David O. Cooney	1976	Marcel Dekker
Transport phenomena and living systems: Biomedical aspects of momentum and mass transport	Edwin N. Lightfoot	1973	Wiley
Biomedical applications of heat and mass transfer	R.C. Seagrave	1971	Iowa State University Press

مهندسی (زیست) پزشکی یک زمینه تخصصی هیجان‌انگیز و روبه‌رشد در بخش مهندسی شیمی دانشگاه نیو برانزویک^۱ کانادا است (Brunswick, 2021).

گزینه مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی، یک مسیر تحصیلی برای دانشجویانی است که

مایل به اشتغال در پزشکی یا صنعت علوم سلامت^۱ هستند. برای تکمیل برنامه این گزینه، دانشجویان باید تأیید بخش را دریافت کنند و ۱۲ واحد از درس‌های ۳ (و بیشتر) واحدی انتخابی فنی از فهرست زیر را تکمیل کنند: مبانی مهندسی (زیست) پزشکی، کالبدشناسی انسان (۴ واحد)، ژنتیک تکاملی، زیست‌شیمی مقدماتی، کاراندام‌شناسی انسانی- سامانه‌ها، زیست‌شناسی سلول، شیمی پزشکی، محاسبات زیستی در طراحی دارو (۵ واحد)، زیست‌مکانیک مقدماتی، زیست‌مکانیک پیشرفته (۴ واحد)، زیست‌مکانیک (۴ واحد) و تصویربرداری رزونانس مغناطیسی.

گزینه گرایش مهندسی (زیست) پزشکی در برنامه دوره کارشناسی مهندسی شیمی دانشگاه اتاوا کانادا، افزون بر ۴ درس ۳ واحدی درباره موضوعات ویژه، شامل چند درس ۳ واحدی انتخابی زیر است: مقدمه‌ای بر تجزیه و تحلیل فارماکوکینتیک سامانه‌های دارورسانی، فنون مهندسی (زیست) پزشکی، مکانیک سیالات زیستی و طراحی اندام‌های مصنوعی. شایان ذکر است که درس ۳ واحدی کالبدشناسی انسان و کاراندام‌شناسی برای همه دانشجویان دوره کارشناسی مهندسی شیمی اجباری است (uOttawa).

گرایش زیست‌مهندسی در دوره کارشناسی مهندسی شیمی دانشگاه McMaster کانادا (پنج سال)، شامل درس‌های زیر است: زیست‌شناسی سلولی و مولکولی، کاراندام‌شناسی و کالبدشناسی انسان I: ارتباطات، کاراندام‌شناسی و کالبدشناسی انسان II: هموستاز مقدمه‌ای بر میکروب‌شناسی و زیست‌فناوری، متابولیسم و شیمی کاراندام‌شناختی، زیست‌شناسی سلول (زیست‌شناسی و علوم سلامت)، مقدمه‌ای بر شیمی تجزیه و تحلیل زیستی، زیست‌مواد کاشته شده، پروژه‌های طراحی راه‌حل‌های بهداشتی II: مقدمه‌ای بر مهندسی ژنتیک، و کاربرد مهندسی شیمی در پزشکی (McMas-ter University)

گرایش زیست‌مهندسی در برنامه کارشناسی مهندسی شیمی دانشگاه لوئیزیانا آمریکا، ترکیبی از درس‌های رشته‌های مهندسی شیمی، مهندسی مکانیک، شیمی و زیست‌شناسی شامل ۶ واحد انتخابی درس‌های زیست‌مواد و مهندسی زیست‌پزشکی و زیست‌مکانیک و ۳ تا ۴ واحد از درس‌های عملیات دارویی، کالبدشناسی و کاراندام‌شناسی کاربردی برای حرکت‌شناسی، آزمایشگاه کالبدشناسی و کاراندام‌شناسی کاربردی برای حرکت‌شناسی، بررسی کالبدشناسی و کاراندام‌شناسی انسان، آزمایشگاه بررسی کالبدشناسی و کاراندام‌شناسی انسان و بیوشیمی I است (گروه مهندسی شیمی دانشگاه لوئیزیانا)^۲.

اخیراً پرداختن به موضوعات بهداشت عمومی در درس بین‌رشته‌ای (زیست‌مهندسی و مهندسی شیمی) سامانه‌های دارورسانی برای دوره کارشناسی و ارزیابی علاقه دانشجویان به آن، مورد بحث

۱- متخصصان گروه تخصصی، علوم سلامت را برای Health Science تصویب کردند.

قرار گرفته است (Jimenez et al., 2021). در طول این درس ۱۴ هفته‌ای، محتوای درس سنتی در مورد طراحی سامانه‌های دارورسانی که بر مسیرهای دارورسانی و راهبردهای غلبه بر موانع کالبدشناختی و کاراندام‌شناختی تأکید دارد، آموزش داده می‌شود. یک ماژول بهداشت عمومی که نابرابری‌های بهداشتی و عوامل اجتماعی تعیین‌کننده سلامت را معرفی می‌کند، با استفاده از مطالعات موردی برای بحث در مورد تأثیرات انتقالی و اجتماعی سامانه‌های دارورسانی بر جمعیت‌های به‌حاشیه‌رانده شده تاریخی، در پایان دوره گنجانده شده است. پروژه اصلی این درس، یک گزارش گروهی نهایی است که توانایی دانشجویان را برای طراحی، توسعه و پیشنهاد سامانه‌های نوین دارورسانی، ارزیابی می‌کند (Jimenez et al., 2021).

موضوع‌های مربوط به مهندسی (زیست) پزشکی اغلب در برنامه درسی دوره کارشناسی تا درس‌های انتخابی سال سوم یا چهارم پوشش داده نمی‌شوند. کایفانلیام و همکاران یادگیری عملی را در یک درس انتخابی سال سوم و چهارم و درس اصلی فرایندهای جداسازی در سال سوم پیشنهاد کردند تا دانشجویان مقطع کارشناسی بتوانند مفاهیم مهندسی شیمی را در برنامه‌های کاربردی زیست‌پزشکی به کار ببرند. این شیوه یادگیری عملی، آشنا کردن دانشجویان با اصول جداسازی خون با دستگاه ته‌نشینی ریزدانه^۱ بود (Kaiphanniam et al., 2023).

طبق نظر سیمپسون (Simpson, 2023) چارچوب‌های فعلی درس‌های مهندسی بافت، شامل مواردی با و بدون بخش آزمایشگاهی ارائه می‌شود و متأسفانه، در بسیاری از این درس‌ها، آزمایش‌های تجربی مستقیماً با مطالب نظری درس مرتبط نیستند. افزون بر این، بسیاری از این آزمایش‌ها بر مهارت‌های بنیادی، مانند سنتز مواد زیستی، زیست‌مکانیک بافت و انتقال زیستی با تمرکز کمی بر خصوصیات سازه‌های مهندسی بافت، که یک گام اساسی برای نمونه‌سازی و تضمین کیفیت بافت مهندسی شده است، تمرکز می‌کنند. بنابراین، ایشان توسعه یک تجربه کاملاً یکپارچه برای دانشجویان را با هدف ارتقای خودکارآمدی در مشخصه‌یابی بافت و با استفاده از یک چارچوب نوین نظری، طراحی و واکاوی (TDA) پیشنهاد کرده‌اند. از این رو، ایشان یک ماژول TDA برای اندازه‌گیری مرگ برنامه‌ریزی شده^۲ در سازه‌های بافتی با استفاده از رونویسی معکوس واکنش زنجیره‌ای بسپاراز در زمان واقعی (RT-PCR) توسعه داده‌اند.

مرزهای بین‌رشته‌های مهندسی سنتی، در حال فروپاشی است. برای دانشجویان مهندسی، مجهز شدن به توانایی یکپارچه‌سازی مفاهیم پیچیده در همه رشته‌ها به منظور رویارویی با مشکلات دنیای واقعی، بسیار مهم است. همان‌گونه که در مقدمه اشاره شد، مهندسی (زیست) پزشکی رشته‌ای است که مفاهیمی از مهندسی مکانیک، برق و شیمی و همچنین علوم رایانه را برای توسعه فناوری‌هایی که

سلامت انسان را بهبود می بخشد، درهم آمیخته است. با این حال، اکثر برنامه‌های درسی مهندسی (زیست) پزشکی موجود، مفهوم یکپارچه‌سازی ترارشته‌ای^۱ را منعکس نمی‌کنند. این مفاهیم معمولاً در موضوعات جداگانه با حداقل یا بدون مراجع بین برنامه‌ای^۲ به دانشجویان آموزش داده می‌شوند (Lam et al., 2021).

رشته مهندسی پزشکی در ایران، در مقطع کارشناسی دارای ۳ گرایش اصلی زیست‌الکترونیک، زیست‌مکانیک و زیست‌مواد است که برنامه‌بازنگری شده آن، در تاریخ‌های ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ و ۱۴۰۰/۷/۲۵ با تاریخ اجرا از نیمسال اول ۱۴۰۰-۱۴۰۱ به تصویب شورای گسترش و برنامه‌ریزی آموزش عالی رسید. دانشگاه‌ها برای اجرای هر یک از این برنامه‌ها با مجوز وزارت علوم، تحقیقات و فناوری اختیار دارند. رشته مهندسی پزشکی برای دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری، با ۷ گرایش زیست‌الکترونیک، زیست‌مکانیک، زیست‌مواد، مهندسی بافت، مهندسی توان‌بخشی، مهندسی ورزش و مهندسی اطلاعات پزشکی در برخی از دانشگاه‌های ایران دایر است و آخرین برنامه‌بازنگری شده، در سال تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ با تاریخ اجرا از نیمسال اول ۱۴۰۰-۱۴۰۱ به تصویب شورای گسترش و برنامه‌ریزی آموزش عالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (عتف) رسید. سابقه تأسیس این گرایش‌ها متفاوت است. برای نمونه، نخستین گرایش زیست‌الکترونیک است که در ۱۳۷۳/۱۱/۹ به تصویب رسید و مهندسی اطلاعات پزشکی به عنوان جدیدترین گرایش در ۱۳۹۱/۱۱/۱۵ به تصویب رسید. البته، جدیدترین گرایش مهندسی پزشکی برای دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی مهندسی عصب‌شناختی است که در تاریخ ۱۴۰۰/۴/۶ با تاریخ اجرای از سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ به تصویب رسید. با توجه به برنامه آموزشی مصوب، درس‌های گرایش‌های مختلف دارای تنوع بسیار گسترده‌ای در مقایسه با برنامه‌های آموزشی سایر کشور، از جمله برنامه‌های دانشگاه‌های مختلف سایر کشورها، که در بالا به تعدادی از آنها اشاره شد، است. از این رو، به جزئیات این برنامه‌ها اشاره نمی‌شود.

گرایش مهندسی پزشکی در سال ۱۳۷۷ برای اولین بار به صورت زیرمجموعه‌ای از مهندسی شیمی در دانشکده مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف، برای مقطع کارشناسی ارشد و از سال ۱۳۷۸، برای مقطع دکتری ارائه شد. با توجه به پیشرفت سریع این رشته در دنیا و نیاز روزافزون جامعه به متخصصان آن، ضرورت تأسیس این رشته در سایر دانشگاه‌ها به شدت احساس شد. از این رو، ایجاد رشته‌ای با عنوان مهندسی شیمی - زیست‌پزشکی در سال ۱۳۸۷ توسط دانشگاه تربیت مدرس پیشنهاد و در سال ۱۳۸۸ تصویب شد. برنامه درسی این رشته در سال ۱۳۹۴ برای نخستین بار بازنگری شد. سپس این برنامه با مسئولیت دانشگاه تربیت مدرس و همکاری دانشگاه‌های تهران و صنعتی شریف، بازنگری شده است و در تاریخ ۱۴۰۰/۸/۱۶ با تاریخ اجرا از سال تحصیلی ۱۴۰۱-۱۴۰۲، به تصویب

شورای گسترش و برنامه‌ریزی آموزش عالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (عتف) رسید. درس‌های کاراندام‌شناسی و ایمنی‌شناسی و زیست‌شناسی سلولی و مولکولی، به عنوان درس‌های جبرانی در برنامه‌بازنگری‌شده، در نظر گرفته شده است. درس‌های زیست‌رآکتورها در مهندسی پزشکی، پدیده‌های انتقال در مهندسی پزشکی، ریاضیات مهندسی پیشرفته و زیست‌مواد، به عنوان درس‌های اصلی ارائه می‌شوند. از ویژگی‌های این برنامه، آزمایشگاه کشت سلول جانوری، به عنوان درس الزامی است.

درس‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی سامانه‌های زیستی، اصول طراحی اعضای مصنوعی بدن، مهندسی ژنتیک، زیست‌مکانیک سلول و بافت، بیوانفورماتیک، روش‌های ارزیابی سلولی مولکولی، اصول تجاری‌سازی و معیارسازی محصولات مهندسی زیست‌پزشکی، نانوفناوری در مهندسی زیست‌پزشکی، سامانه‌های غشایی در زیست‌پزشکی، سامانه‌های میکرو و نانو در مهندسی پزشکی و روش‌های شناسایی مواد به درس‌های اختیاری این برنامه افزوده شد.

شایان ذکر است که برنامه آموزشی دوره دکتری تخصصی مهندسی شیمی - زیست‌پزشکی، توسط همکاران محترم دانشگاه تهران تدوین شد، اما با توجه به سیاست‌های وزارت عتف بر یکپارچه‌سازی برنامه‌های دوره دکتری تخصصی هر رشته، بررسی آن انجام نگرفت. از این رو ضرورت دارد که چند درس از این برنامه و درس‌های اختیاری برنامه کارشناسی ارشد این رشته، انتخاب گردد و در بازنگری برنامه آموزشی دکتری تخصصی مهندسی شیمی یا مهندسی شیمی - زیست‌فناوری‌ها گنجانده شود. افزون بر این، در آزمون ورودی دکتری تخصصی مهندسی شیمی - زیست‌فناوری، درس‌هایی از برنامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - زیست‌پزشکی گنجانده شود تا امکان رقابت بهتر برای دانش‌آموختگان کارشناسی ارشد این رشته فراهم آید.

با مقایسه این برنامه با تعدادی از برنامه‌های دانشگاه‌های بین‌المللی که در بالا به آن‌ها اشاره شد، می‌توان گفت تنوع آن بیشتر و ترکیب آن مناسب‌تر است. اما یکی از کاستی‌های برنامه کارشناسی مهندسی شیمی در ایران در مقایسه با برنامه‌های دانشگاه‌های دیگر کشورها، نبود این گرایش و درس‌های مربوط، به عنوان یک گزینه است.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله به نقش محوری مهندسی شیمی در پیشرفت‌های مهندسی پزشکی پرداختیم و کاربردهای تاریخی و نوآورانه آن در فناوری‌های مراقبت سلامت (Health care technology) بررسی شد. در این مقاله بررسی گردید که چگونه مهندسان شیمی، با استفاده از دانش خود در اصول انتقال جرم و انتقال گرما، گام‌های مهمی در توسعه نظام‌های دارورسانی، مهندسی بافت و توسعه زیست‌مواد برداشته‌اند. همچنین به بررسی این موضوع پرداخته شد که چگونه همکاری بین رشته‌های مهندسی

شیمی و زیست پزشکی در حوزه پزشکی شخصی سازی شده، منجر به بهبود تشخیص و درمان بیماری و در نهایت بهبود سلامت انسان شده است. همین طور با توجه به ماهیت بین رشته‌ای مهندسی زیست پزشکی و ادغام اصول مهندسی شیمی با علوم پزشکی برای نوآوری در نظام‌های دارورسانی، مهندسی بافت و دستگاه‌های پزشکی برجسته شد. در این مقاله بر تأثیر مهندسان شیمی در پیشرفت فناوری‌های مراقبت سلامت، مانند اندام‌های مصنوعی، نظام‌های آزادسازی کنترل شده دارو و پزشکی بازساختی تأکید گردید و سهم آن را در پزشکی شخصی سازی شده و بهبود مراقبت از بیماران را نشان داده شد. همچنین این مقاله با یک چشم‌انداز خوش بینانه در مورد احتمالات آینده برای مهندسی شیمی در رسیدگی به چالش‌های بهداشتی پیچیده، به پایان رسید که نشان دهنده روند مداوم مشارکت‌های پیشگامانه در زمینه زیست پزشکی است.

References

- Arambula-Maldonado, R., Geraili, A., Xing, M., & Mequanint, K. (2021). Tissue engineering and regenerative therapeutics: The nexus of chemical engineering and translational medicine. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(10), 2069–2086. <https://doi.org/10.1002/cjce.24094>.
- Azadi, S. A., Vasheghani-Farahani, E., Hashemi-Najafabadi, S., & Godini, A. (2016). Co-encapsulation of pancreatic islets and pentoxifylline in alginate-based microcapsules with enhanced immunosuppressive effects. *Progress in Biomaterials*, 5(2), 101–109. <https://doi.org/10.1007/s40204-016-0049-3>.
- Banerjee, R. K., D'Souza, G. A., Rylander, C., & Devireddy, R. (2014). A Review of biotransport education in the 21st Century: lessons learned from experts. *Journal of Biomechanical Engineering*, 136(11). <https://doi.org/10.1115/1.4028414>.
- Bissell, M. J., & Barcellos-hoff, M. H. (1987). The influence of extracellular matrix on gene expression: is structure the message? *Journal of Cell Science*, 1987(Supplement_8), 327–343. <https://doi.org/10.1242/jcs.1987.supplement.8.18>.
- Brunswick, U. o. N. (2021). Department of Chemical Engineering University of New Brunswick 2021–22 Undergraduate Student Handbook.
- Cooney, D. O. (1972). Biological transport phenomena and biomedical engineering. *Chemical Engineering Education*, 6(4), 162–186.
- Department of Chemical Engineering University of Louisiana. *Bioengineering concentration 4-year plan*. <https://chemical.louisiana.edu/bioengineering-concentration-4-year-plan/140>
- Feig, L. A., Peppas, N. A., Colton, C. K., Smith, K. A., & Lees, R. S. (1982). The effect of angiotensin II on in vivo albumin transport in normal rabbit aortic tissue. *Atherosclerosis*, 44(3), 307–318. [https://doi.org/10.1016/0021-9150\(82\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0021-9150(82)90005-3).
- Folkman J, Haudenschild 1980 C. Angiogenesis in vitro. *Nature*. 11; 288(5791): 551–6. doi: <https://doi.org/10.1038/288551a0>.
- Ghorbani, M., Vasheghani-Farahani, E., Azarpira, N., Hashemi-Najafabadi, S., & Ghasemi, A. (2023). Dual-crosslinked in-situ forming alginate/silk fibroin hydrogel with potential for bone tissue engineering. *Biomaterials Advances*, 153, 213565. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213565>.
- Jimenez, J., Dukes, A. A., & Fedorchak, M. V. (2021). Integrating public health topics in drug delivery system education. *ASEE Virtual Annual Conference Content Access*
- Jimenez, M. P., DeVille, N. V., Elliott, E. G., Schiff, J. E., Wilt, G. E., Hart, J. E., & James, P. (2021). Associations between nature exposure and health: a review of the evidence. *International Journal of Environmental*

- Research and Public Health*, 18(9), 4790. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18094790>.
- Kaiphanliam, K. M., Adesope, O. O., & Van Wie, B. J. (2023). Assessment of a particle sedimentation hands-on learning tool with application in blood cell separations. *Education for Chemical Engineers*, 45, 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2023.07.001>.
 - Kazemi-Aghdam, F., Jahed, V., Dehghan-Niri, M., Ganji, F., & Vasheghani-Farahani, E. (2021). Injectable chitosan hydrogel embedding modified halloysite nanotubes for bone tissue engineering. *Carbohydrate Polymers*, 269, 118311. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118311>.
 - Lam, L., Cochrane, T., Davey, C., John, S., Shaktivesh, S., Ganesan, S., & Rajagopal, V. (2021). Improving student outcomes through transdisciplinary curriculum design in biomedical engineering. 9th *Research in Engineering Education Symposium and 32nd Australasian Association for Engineering Education Conference*, REES AAEE: Engineering Education Research Capability Development, 2. <https://doi.org/10.52202/066488-0116>.
 - Langer, R., & Peppas, N. (1983). Chemical and physical structure of polymers as carriers for controlled release of bioactive agents: a review. *Journal of Macromolecular Science, Part C*, 23(1), 61–126. <https://doi.org/10.1080/07366578308079439>.
 - Lightfoot, S. L. (1973). Politics and reasoning: through the eyes of teachers and children. *Harvard Educational Review*, 1 July 1973; 43 (2): 197–244. doi: <https://doi.org/10.17763/haer.43.2.h17827606n30w117>.
 - Mann, M., Qavi, I., Zhang, N., & Tan, G. (2023). Engineers in medicine: foster innovation by traversing boundaries. *Crit Rev Biomed Eng*, 51(2), 19–32. <https://doi.org/10.1615/CritRevBiomedEng.2023047838>.
 - McMaster University. *Chemical Engineering and Bioengineering*. <https://www.eng.mcmaster.ca/chemeng/degree-options/chemical-engineering-and-bioengineering/#tab-content-course-sequencing-information>.
 - National Academies of Sciences, E., & Medicine. (2022). *New Directions for Chemical Engineering*. The National Academies Press. <https://doi.org/doi:10.17226/26342>.
 - Niklason, L. E., Gao, J., Abbott, W. M., Hirschi, K. K., Houser, S., Marini, R., & Langer, R. (1999). Functional arteries grown in vitro. *Science (New York, N.Y.)*, 284(5413), 489–493. <https://doi.org/10.1126/science.284.5413.489>.
 - Norman, J. J., Andrews, S. N., & Prausnitz, M. R. (2011). Undergraduate laboratory module on skin diffusion. *Chemical Engineering Education*, 45, 276–282.
 - O'Sullivan J. B. (1991). Diabetes mellitus after GDM. *Diabetes*, 40 Suppl 2, 131–135. <https://doi.org/10.2337/diab.40.2.s131>.
 - Park, J.K., Jung, J.Y. & Park, Y.H. Cellulose production by *Gluconacetobacter hansenii* in a medium containing ethanol. *Biotechnology Letters* 25, 2055–2059 (2003). <https://doi.org/10.1023/B:BILE.0000007065.63682.18>.
 - Peppas, N., & Mallinson, R. (1980). Teaching of biomedical engineering in chemical engineering departments. AIChE Meeting, Chicago (1980).
 - Peppas, N.A. and Langer, R. (2004), Origins and development of biomedical engineering within chemical engineering. *AIChE J.*, 50: 536–546. <https://doi.org/10.1002/aic.10048>.
 - Shallcross, D. C. (2006). Career preferences for undergraduate chemical engineering students: results of an international survey. *Education for Chemical Engineers*, 1(1), 30–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1205/ece.05007>.
 - Simpson, D. L (2023) Experimental methods in tissue engineering: An integrated approach to theory, design, and analysis. *2023 ASEE Annual Conference & Exposition*.
 - Truskey, G. A., Colton, C. K., & Smith, K. A. (1981). Quantitative analysis of protein transport in the arterial wall. In C. J. Schwartz, N. T. Werthessen, & S. Wolf (Eds.), *Structure and Function of the Circulation: Volume 3* (pp. 287–355). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7927-4_5.
 - Uludag, H., & Sefton, M. V. (1993). Microencapsulated human hepatoma (HepG2) cells: in vitro growth and protein release. *Journal of Biomedical Materials Research*, 27: 1213–1224. <https://doi.org/10.1002/jbm.820271002>.

- uOttawa. Basc chemical engineering biomedical engineering option. <http://catalogue.uottawa.ca/en/undergrad/basc-chemical-engineering-biomedical-engineering-option/index.html>.
- Vacanti, J. P., Morse, M. A., Saltzman, W. M., Domb, A. J., Perez-Atayde, A., & Langer, R. (1988). Selective cell transplantation using bioabsorbable artificial polymers as matrices. *Journal of Pediatric Surgery*, 23(1), 3-9. . [https://doi.org/10.1016/S0022-3468\(88\)80529-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3468(88)80529-3).
- www.precedenceresearch.com. (2023). *Pharmaceutical drug delivery market (By route of administration: oral, pulmonary, ocular, nasal, injectable, topical, and others; by application: cardiovascular, diabetes, cancer, infectious diseases, and others; by end users: hospitals, ambulatory services, and home healthcare) – global industry analysis, size, share, growth, trends, regional outlook, and forecast 2023 – 2032*. <https://www.precedenceresearch.com/pharmaceutical-drug-delivery-market>.
- www.straitsresearch.com. (2023). *Tissue engineering market size, share & trends analysis report by product type (synthetic scaffold material, biologically derived scaffold material, others), by applications (orthopedics and musculoskeletal, neurology, cardiovascular, skin and integumentary, dental, others) and by region(North America, Europe, APAC, Middle East and Africa, LATAM) forecasts, 2023-2031*. <https://straitsresearch.com/report/tissue-engineering-market/>.
- Yoganathan, A. P.(1978). I. Cardiovascular fluid mechanics. II. Fluid dynamics of prosthetic aortic valves. III. Use of the fast Fourier transform in the analysis of cardiovascular sounds. Dissertation (Ph.D.), California Institute of Technology. doi:10.7907/TVP6-ZY22. <https://resolver.caltech.edu/CaltechETD:etd-05252004-140334>.
- Yan Shu, Lu Yan, Ouyang Zhaolian. (2020). Analysis of projects funded by the national natural science foundation of china in the field of tissue engineering from 2013 to 2018. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research*, 24(5), 731-735. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.2404>.



◀ **دکتر ابراهیم واشقانی فراهانی:** متولد ۱۳۳۳ و دارای مدرک دکتری تخصصی مهندسی شیمی از دانشگاه مگ گیل کانادا هستند. ایشان از مهرماه ۱۳۶۹ پس از گرفتن مدرک دکتری همکاری خود را با دانشگاه تربیت مدرس آغاز کرده است و افزون بر فعالیت‌های آموزشی و پژوهشی، دارای سمت‌های اجرایی در دانشگاه تربیت مدرس، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری و دانشگاه آزاد اسلامی بوده‌اند. زمینه فعالیت‌های پژوهشی ایشان، شامل تهیه هیدروژل‌ها و کاربرد آنها در سامانه‌های نوین دارورسانی، سلول درمانی و مهندسی بافت است.



◀ **سعید رفیعیان:** دانش‌آموخته مهندسی شیمی - مهندسی زیست‌پزشکی دانشگاه تربیت مدرس هستند. تمرکز تحقیقاتی ایشان بر استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پژوهش‌های مهندسی شیمی و مهندسی پزشکی است.

نقش محوری تجربه زیسته مهندسان در نوآوری و ارتقای کیفیت آموزشی

سلوا شاهگلی^۱، آراین پوراابراهیمی علمداری^۲، رضا آل محمود^۳ و رحمت ستوده قره‌باغ^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۳/۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۵/۲۳

DOI: 10.22047/ijee.2024.458840.2083

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.7.6

چکیده: در حال حاضر، نظام آموزشی مهندسی در ایران، عمدتاً بر مهارت‌های سخت و سنتی تمرکز دارد و فاقد برنامه‌ای مدون برای آموزش مهارت‌های نرم به مهندسان است. ارتقای کیفیت دوره‌های کارشناسی مستلزم تلفیق آموزش با دانش تجربی کسب‌شده در بستر جامعه، دستگاه‌های اجرایی و بنگاه‌های اقتصادی است. این امر می‌تواند نوآوری آموزشی و پیشرفت شغلی آینده مهندسان را به طور چشمگیری ارتقا دهد. استفاده از تجارب حرفه‌ای مهندسان در ساختار دروس دانشگاهی یا فعالیت‌های فوق‌برنامه، یکی از اقدامات مؤثر برای ارتقای کیفیت آموزش مهندسی به شمار می‌رود. این تجارب می‌توانند به عنوان پلی ارتباطی بین دانشگاه و صنعت عمل کرده و دانشجویان را با چالش‌ها و فرصت‌های واقعی حرفه‌ای آشنا سازند. در این پژوهش، به بررسی و تحلیل این ایده در چندین ورودی مختلف دوره کارشناسی دانشگاه تهران پرداخته شده است. به منظور ارزیابی تأثیرگذاری تجارب حرفه‌ای مهندسان موفق بر آموزش دانشجویان کارشناسی، یک نظرسنجی تخصصی و اصولی طراحی و با معیارهای روان‌شناسی مورد ارزیابی قرار گرفت. بازخورد دقیق دانشجویان جمع‌آوری و نتایج حاصل از آن تحلیل شد. در نهایت، بر اساس یافته‌های این تحقیق، پیشنهادهایی برای بهبود کیفیت آموزش مهندسی ارائه شده است. اجرای جدی و مستمر این اقدامات می‌تواند نقش مهمی در توسعه و ارتقای نظام آموزشی مهندسی کشور ایفا کند و دانشجویان را به نحو مطلوب برای حضور در محیط حرفه‌ای آماده سازد.

واژگان کلیدی: آموزش مهندسی، مهارت‌های نرم، دانش تجربی، تجارب حرفه‌ای، نوآوری آموزشی

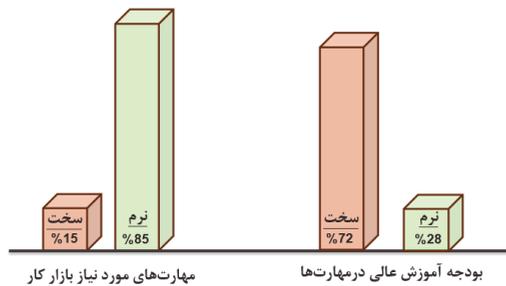
۱- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی شیمی دانشگاه تهران، ایران. selvashahgoli@ut.ac.ir
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه تهران، ایران. arianpouabrahimi@ut.ac.ir
۳- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی شیمی دانشگاه تهران، ایران. rezaallemahmud@gmail.com
۴- استاد دانشکده فنی دانشگاه تهران، ایران. (نویسنده مسئول). sotudeh@ut.ac.ir

۱. مقدمه

آموزش در مقطع کارشناسی رشته‌های مهندسی از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است چرا که در این مقطع طلایی، شاکله فکری، فنی و حرفه‌ای مهندسان آینده شکل می‌گیرد. مصاحبه وزیر علوم، تحقیقات و فناوری با خبرگزاری دانشجویان ایران نشان می‌دهد که در شهریور ۱۳۹۹ حدود ۶۰ درصد از دانشجویان مشغول به کار در کل کشور در حال تحصیل در مقطع کارشناسی بودند (ISNA, 2024). هدف از آموزش در این مقطع، آماده کردن دانشجویان برای استخدام‌های موقت نیست بلکه آنان باید برای موفقیت‌های بلندمدت، در محیط‌های پیچیده کار آماده شوند. در این دوره‌ها، دانشجویان باید بیاموزند که چگونه از آموخته‌های خود در دانشگاه، برای طراحی جهانی زیبا، ایجاد محیط زیستی سالم، توسعه پایدار محیط اطراف خود و خلق ارزش افزوده در جامعه هدف، ایفای نقش کنند. دانش‌آموختگان این مقطع به سرعت در مشاغل کارشناسی و مدیریتی در دستگاه‌های اجرایی، شرکت‌های دولتی و خصوصی و بنگاه‌های اقتصادی مشغول به کار می‌شوند و فرصت کمتری برای آموزش‌های تکمیلی پیدا می‌کنند. لذا، توجه و تمرکز جدی و مستمر بر این مقطع ضروری است. ارتقای مستمر کیفیت آموزش مهارت‌های مهندسی از طریق نوآوری‌های مختلف آموزشی و پژوهشی، سیاست‌گذاری هدفمند، انتقال دانش تجربی جامعه به دانشگاه‌ها و تعریف نقش برای تشکلهای مهندسی، از جمله اقداماتی است که باید به طور مداوم دنبال شود.

با وجود اینکه در برخی سازمان‌ها، شرکت‌ها و بنگاه‌های اقتصادی، دانش‌آموختگان مهندسی قبل از ورود به محیط‌های واقعی کار، آموزش‌های بدو استخدام را سپری می‌کنند ولی این آموزش‌ها در کشور چندان فراگیر نیستند. لذا دانشگاه‌ها به عنوان متولیان اصلی آموزش مهندسی، باید نسبت به آینده دانش‌آموختگان خود بسیار حساس و مسئولیت‌پذیر باشند و مهارت‌های سخت و نرم را توأمان به دانشجویان خود آموزش دهند. در حال حاضر، تمرکز اصلی در آموزش مهندسی کشور بر مهارت‌های سخت و سنتی است و مدل منسجمی برای ارائه مهارت‌های نرم وجود ندارد. مطالعات نشان می‌دهد که مهارت‌های نرم در کنار مهارت‌های سخت می‌تواند فرد را در رسیدن به اهداف حرفه‌ای یاری رساند. این امر در مطالعه محمدزاده و ستوده قره‌باغ تأکید و پیشنهادهایی نیز در این خصوص ارائه شده است (Mohammadzadeh & Sotudeh-Gharebagh, 2019). البته در دنیا همچنان چالش‌های بسیار جدی در آموزش مهارت‌های نرم به مهندسان وجود دارد. شکل ۱، مطالعات دانشگاه هاروارد، بنیاد کارنگی و مرکز تحقیقات استنفورد را در زمینه رابطه بین مهارت‌های نرم و سخت و توزیع اعتبارات مربوط نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، ۸۵٪ از موفقیت‌های شغلی ناشی از مهارت‌های نرم و تنها ۱۵٪ موفقیت شغلی از مهارت‌های سخت ناشی می‌شود. این آمار از گزارش بنیاد کارنگی استخراج شده است (Mann, 1918). بنابراین بیش از صد سال است که اهمیت حیاتی مهارت‌های نرم برای موفقیت سازمان‌ها بیان شده است. مطالعه دیگری که توسط گرین و مک‌گیل در سال ۲۰۱۱ در انجمن

آموزش و توسعه آمریکا انجام شده است (American Society for Training & Development, 2011). نشان می‌دهد کارفرمایان در ایالات متحده در سال ۲۰۱۰، حدود ۱۷۲ میلیارد دلار برای یادگیری و توسعه کارکنان خود هزینه کردند که حدود ۲۸ درصد آن، در مهارت‌های نرم هزینه شده است. پس می‌توان نتیجه گرفت که مهارت‌های نرم حدود شش برابر مهارت‌های سخت برای موفقیت شغلی مهم هستند، در حالی که ۷۵ درصد از منابع مالی صرف مهارت‌های سخت می‌شود. این چالش به خاطر دشواری و پیچیدگی آموزش مهارت‌های نرم است که برای هر شخص به طور کامل متفاوت است.



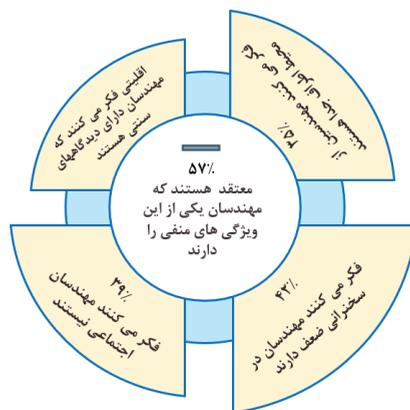
شکل ۱. رابطه بین مهارت‌های سخت و نرم از نگاه کارفرمایان و اعتبارات آموزش مهندسی (National soft skills association, 2024)

در سایر کشورها نیز کمبود آموزش مهارت‌های نرم در مهندسی، به عنوان یک چالش اساسی شناخته شده است. نظرسنجی که در سال ۲۰۱۵ توسط دفتر جایزه مهندسی ملکه انگلستان (QEPrize, 2015) در میان ۱۰ هزار نفر از مهندسان، مدیران ارشد و متخصصان در ۱۰ کشور (چین، هند، کره جنوبی، ترکیه، ایالات متحده، برزیل، آلمان، ژاپن، آفریقای جنوبی و انگلستان) انجام شده است، به وضوح نشان می‌دهد که این کمبودها به طور جدی در این کشورها نیز وجود دارد. همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، مهم‌ترین ویژگی‌های مورد نیاز مهندسان، شامل یک یا چند ویژگی ضریب هوشی بالا، قدرت منطق و استدلال، خلاقیت و ابتکار، و درک قوی از مفاهیم فیزیکی و ریاضی است.



شکل ۲. جنبه‌های مثبت مهندسان از نگاه نظرسنجی دفتر جایزه ملکه انگلیس (QEPrize, 2015)

شکل ۳، انزوای نسبی مهندسان از جامعه پیرامونی و ضعف‌های جدی آنها در ارتباطات اجتماعی و کارهای جمعی را نشان می‌دهد. این انزوا و ضعف‌ها می‌توانند تأثیر منفی قابل توجهی بر موفقیت حرفه‌ای مهندسان بگذارند. مهندسان با ضعف در ارتباطات، در محیط‌های کاری به درستی با دیگران تعامل برقرار نمی‌کنند و نیازها و الزامات آنها را درک نمی‌کنند. این امر می‌تواند منجر به سوءتفاهم، ناهماهنگی و در نهایت، کاهش بهره‌وری و کیفیت کار شود. علاوه بر این، عدم مهارت در کار گروهی می‌تواند مانع جدی بر سر راه موفقیت پروژه‌های بزرگ باشد. امروزه، بسیاری از پروژه‌های بزرگ به صورت گروهی انجام می‌شوند و نیازمند همکاری بین رشته‌های مختلف و افراد با تجارب متفاوت هستند. مهندسانی که در کار گروهی ضعف دارند، در تعامل با همکاران خود، به اشتراک گذاشتن دانش و ایده‌ها و حل مؤثر مشکلات گروهی با مشکل مواجه می‌شوند. این امر می‌تواند منجر به تأخیر در انجام پروژه، افزایش هزینه‌ها و در نهایت، عدم موفقیت پروژه‌ها شود. بنابراین، بهبود مهارت‌های ارتباطی و اجتماعی مهندسان می‌تواند اثر مثبت قابل توجهی بر کارایی و موفقیت آنها در حرفه مهندسی داشته باشد. با ارتقای این مهارت‌ها، مهندسان می‌توانند به طور مؤثر با دیگران تعامل برقرار کنند و به طور سازنده در کارهای گروهی مشارکت نمایند و در نهایت، به موفقیت‌های حرفه‌ای چشمگیری دست یابند. خوشبختانه، این نقاط ضعف با آموزش‌های مکمل قابل بهبود هستند. دوره‌های آموزشی متعددی در زمینه مهارت‌های ارتباطی، کار گروهی و حل مسئله وجود دارد که می‌توانند به مهندسان در ارتقای این مهارت‌ها و افزایش توانمندی‌های حرفه‌ای آنان کمک کنند.



شکل ۳. نقاط ضعف مهندسان از نگاه نظرسنجی دفتر جایزه ملکه انگلیس (QEPrize, 2015)

پس از راه‌اندازی دوره‌های تحصیلات تکمیلی در سال ۱۳۶۷ و شکوفایی تدریجی آنها در دانشگاه‌های کشور، تا حدودی به دوره‌های کارشناسی بی‌توجهی شده است و یا مورد بی‌مهری قرار گرفته‌اند. این امر پیامدهایی منفی به شرح زیر به همراه داشته است:

۱. کم توجهی استادان باتجربه به آموزش در کارشناسی: این اساتید که می‌توانند نقش به‌سزایی در ارتقای کیفیت آموزش در این مقطع داشته باشند. به دلیل تمرکز بیشتر بر روی مقاطع تحصیلات تکمیلی و پژوهش، فرصت و انرژی کافی برای اثربخشی در دوره‌های کارشناسی ندارند.
 ۲. فقدان آموزش پژوهش محور و پژوهش آموزش محور: برای ارتقای کیفی دوره‌های کارشناسی، تلفیق آموزش و پژوهش ضروری است، در حالی که بی‌توجهی به این مقطع مانع از تحقق این امر کلیدی شده است. آموزش توأم با پژوهش، دانشجویان را به تفکر انتقادی، حل مسئله و خلاقیت تشویق می‌کند و در نهایت، منجر به تربیت دانش آموختگان کارآمد و متخصص می‌شود.
 ۳. کاهش کیفیت دانشجویان ورودی به مقاطع بالاتر: بی‌توجهی به دوره‌های کارشناسی، انگیزه دانشجویان را برای ادامه تحصیل در مقاطع بالاتر کاهش می‌دهد و منجر به هدر رفتن استعدادها و تضعیف بنیان‌های علمی کشور می‌گردد.
 ۴. افت کیفیت مهندسان آینده در صنعت: بی‌توجهی به دوره‌های کارشناسی، به معنای عدم سرمایه‌گذاری روی پایه‌های آموزشی است. این امر در نهایت منجر به افزایش پروژه‌های صنعتی و توان مهندسی کشور می‌شود.
- دانشگاه‌های پیشروی دنیا، توجه ویژه‌ای به آموزش و پژوهش در مقطع کارشناسی دارند. نمونه بارز آن، دانشگاه تورنتو در کانادا است که با کسب رتبه اول کشوری و رتبه ۲۶ جهانی، توجه به دوره‌های کارشناسی را به عنوان یکی از سه اولویت محوری برنامه‌های خود قرار داده است. رئیس این دانشگاه برای رسیدگی به امور مربوط به آموزش و پژوهش دانشجویان کارشناسی، معاونت ویژه‌ای را به این امر اختصاص داده است.^۱ با توجه به آسیب‌های متعددی که بی‌توجهی به مقطع کارشناسی در کشور به همراه دارد، ضروری است که در سیاست‌گذاری‌های آموزشی، بازنگری صورت گیرد و توجه ویژه‌ای به این مقطع حیاتی شود.
- الگوبرداری از دانشگاه‌های معتبر دنیا در زمینه توجه به ارتقای کیفیت در دوره‌های کارشناسی، به همراه نوآوری‌های جدید در آموزش مهندسی، می‌تواند راهگشای ارتقای کیفیت آموزش مهندسی در کشور باشد. در این مقاله، نتایج یک طرح پژوهشی نوآورانه با عنوان "استفاده از تجارب زیسته مهندسان در آموزش مهندسی" ارائه می‌شود. این طرح در پنج سال گذشته در حاشیه درس "اقتصاد و طرح مهندسی" در دانشکده فنی دانشگاه تهران اجرا شده است. نتایج این پژوهش، به عنوان سخنرانی کلیدی در هشتمین کنفرانس بین‌المللی آموزش مهندسی در دانشگاه علم و صنعت ارائه شد و با استقبال چشمگیر شرکت‌کنندگان روبه‌رو گردید. علاقه‌مندان می‌توانند ویدیوی این سخنرانی را در کانال آپارات انجمن آموزش مهندسی ایران^۲ مشاهده نمایند. لازم به توضیح است که این تجربه

1- <http://threepriorities.utoronto.ca/home>, accessed on July 2024

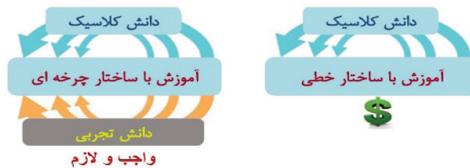
2- <https://www.aparat.com/v/B1LQ4>, accessed on May 2024

می‌تواند در کنار دروس تخصصی همه رشته‌های مهندسی، حسب ضرورت طراحی و اجرا گردد.

۲. روش تحقیق و چهارچوب پژوهش

استفاده از تجربیات ارزشمند مهندسان در برنامه‌های درسی و فعالیت‌های فوق برنامه، گامی اساسی در جهت ارتقای کیفیت آموزش مهندسی به شمار می‌رود. این رویکرد، فرایندی نوآورانه، جذاب، مفید و سودمند را به محیط‌های آموزشی منتقل می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، مدل سنتی آموزش مهندسی ("مدل خطی") در مسیر مستقیم دانشگاه به بازار کار حرکت می‌کند. در این الگو، دانشجویان پس از فارغ‌التحصیلی به طور مستقیم وارد بازار کار می‌شوند و ارتباط خود را با دانشگاه‌ها برای انتقال تجربه به نسل‌های بعدی از دست می‌دهند. اما مدل چرخه‌ای^۲ آموزش مهندسی به عنوان یک مدل نوآورانه، این نقیصه را برطرف می‌کند.

در مدل آموزش چرخه‌ای، فارغ‌التحصیلان مهندسی پس از کسب تجربه عملی، با حضور مجدد در دانشگاه، دانش و تجربیات ارزشمند خود را با دانشجویان نسل بعد به اشتراک می‌گذارند (Tim, 2022). این روش، ضمن بهره‌مند کردن دانشجویان از تجربیات واقعی بازار کار، فرصتی ارزشمند برای به‌روزرسانی محتوای آموزشی و روش‌های تدریس فراهم می‌کند. علاوه بر این، فارغ‌التحصیلان با شبیه‌سازی آینده شغلی خود، درک دقیقی از نیازها و انتظارات واقعی صنعت پیدا می‌کنند. همچنین قرار گرفتن دانشجویان در معرض تجربیات واقعی، درک عمیق‌تری از چالش‌های دنیای واقعی به آنها می‌دهد. این امر به طور پیوسته محتوای آموزشی را با نیازها و انتظارات صنعت تطبیق می‌دهد و منجر به به‌کارگیری روش‌های نوآورانه، خلاقانه، جذاب و پویا در تدریس می‌شود. بنابراین آموزش چرخه‌ای با ایجاد ارتباط منسجم بین دانشگاه و بازار کار، به ارتقای دانش و مهارت‌های دانشجویان کمک می‌کند و باعث می‌شود که آموزش مهندسی، همواره به‌روز و پاسخگوی نیازهای جامعه باشد.



شکل ۴. فرایندهای آموزش خطی و آموزش چرخه‌ای

در این مقاله، به بررسی تأثیرگذاری تجارب زیسته فعالان مهندسی بر آموزش دانشجویان کارشناسی پرداخته می‌شود. این پژوهش در دانشکده فنی دانشگاه تهران و در طی پنج سال گذشته با مشارکت

مهندسان برجسته صنعتی انجام شده است که در آن، از مهندسان خواسته شد تا تجربیات ارزشمند خود را با دانشجویان به اشتراک گذارند و به سؤالات آنها پاسخ دهند. دانشجویان در این جلسه‌ها با مهارت‌های نرم و با رفتارهای حرفه‌ای مهندسی آشنا شدند. در ادامه، فرم نظرسنجی طراحی شد و پس از دریافت نظرات دانشجویان، نتایج آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور، مطالعه حاضر در دو بخش اصلی، شامل بررسی تجارب زیسته افراد خبره و تحلیل نتایج نظرسنجی از نظرات دانشجویان ارائه می‌شود.

۳. مستندسازی تجربه زیسته مهندسان

تجربه زیسته، گنجینه‌ای گران‌بها از آموخته‌ها و درس‌هایی است که هر فرد در طول زندگی و مسیر شغلی خود کسب می‌کند. این تجربیات، زمانی که از دریچه افراد موفق، به خصوص مهندسان، به اشتراک گذاشته می‌شوند می‌توانند نقشی مهمی در هدایت، انگیزش و توانمندسازی دانشجویان ایفا نمایند. از مزایای بهره‌مندی دانشجویان از آشنایی با تجربیات مهندسان موفق می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- **تقویت انگیزه و روحیه:** آشنایی با فراز و نشیب‌های مسیر شغلی مهندسان موفق، مشوقی قوی برای دانشجویان خواهد بود تا با روحیه‌ای پر شور و اشتیاق، در مسیر اهداف خود گام بردارند.
- **شناخت مسیر شغلی:** درک عمیق از چالش‌ها و فرصت‌های مسیرهای شغلی در حوزه‌های مختلف مهندسی، به دانشجویان کمک می‌کند تا با دیدی روشن‌تر، مسیر آینده خود را ترسیم کنند و برای آن برنامه‌ریزی هدفمند انجام دهند.
- **توسعه مهارت‌های نرم:** مهندسان باتجربه، با به اشتراک گذاشتن نکات و توصیه‌های عملی، نقشی کلیدی در تقویت مهارت‌های نرم دانشجویان ایفا می‌کنند. این مهارت‌ها، زمینه لازم برای ورود موفق به بازار کار را فراهم می‌کنند.
- **برقراری ارتباطات حرفه‌ای:** تعامل دانشجویان با متخصصان، فرصتی ارزشمند برای برقراری ارتباطات حرفه‌ای، حضور در شبکه‌های تخصصی و زمینه‌ساز فرصت‌های شغلی مناسب و همکاری‌های ثمربخش در آینده است.

اشتراک‌گذاری تجربیات مهندسان با دانشجویان، گامی ارزشمند در جهت ارتقای آگاهی، انگیزه، هدایت و پیشبرد مسیر شغلی است. در راستای این هدف، طی پنج سال گذشته، با همکاری جمعی از مهندسان و متخصصان برجسته، گنجینه‌ای از تجربیات ارزشمند آنان گردآوری شده و در قالب مصاحبه‌ها و سخنرانی‌های مختلف در دسترس دانشجویان قرار گرفته است. جداول ۱ و ۲ خلاصه‌ای از این مصاحبه‌ها را به همراه مشخصات متخصصان و کلمات کلیدی استخراج شده از توصیه‌های آنها ارائه می‌کند.

جدول ۱. مشخصات متخصصان مصاحبه شده و کلمات کلیدی مستخرج از توصیه‌های آنان^۱- قسمت اول

ردیف	نام و نام خانوادگی	سابقه تحصیلی و شغلی	توصیه‌ها
۱	امیرحسین بحرینی	کارشناسی ارشد مهندسی شیمی مدیرعامل شرکت آریاساسول	فنون مذاکره، مکاتبات اداری، مهارت ارائه، تسلط به زبان‌های خارجی، تسلط به مفاهیم پایه‌ای مهندسی، سواد اقتصادی و مالی، و دانش مدیریتی
۲	مهدی حسین‌زاده	کارشناسی نفت و ارشد مدیریت عضو هیئت‌مدیره شرکت پترو ایران	انگیزه بالا در کار مخصوصاً اوایل، فنون مذاکره، دانش مدیریتی، مهارت ارائه، تسلط بر مفاهیم پایه‌ای مهندسی
۳	احد عظیم‌زاده	مدیرعامل شرکت خانه فرش عظیم	شجاعت، تلاش و پشتکار، خلاقیت و داشتن ایده‌های جدید، چندانبعدی
۴	هاشم صباغان	کارشناسی ارشد مهندسی شیمی مدیرعامل شرکت پتروانینال کیش	یادگیری مؤثر دروس دانشگاهی، پیوستگی و شکیبایی در انجام امور، یادگیری زبان‌های خارجی، کار گروهی، دوره‌های معتبر و بین‌المللی
۵	علی مشایخ	کارشناسی صنایع غذایی MBA, DBA مدیرعامل شوکوبارس	دانش مدیریتی، تسلط به نرم‌افزارها، صداقت و شجاعت، تسلط به زبان‌های خارجی با تکیه بر زبان چینی، خلق فرصت از چالش‌ها
۶	سید مرتضی امامی	کارشناسی مهندسی عمران دکتری مدیریت ساخت مدیرعامل شرکت ستاره خلیج فارس	خلاقیت و خلق ایده‌های جدید، شجاعت و صداقت، ارتباط با افراد باتجربه، پیوستگی و شکیبایی، آموزش‌های تکمیلی در کنار دروس دانشگاهی
۷	مسعود بنابیان	مدیرعامل شرکت چرم خاوران	پرهیز از تک‌بعدی، توجه به تجربه‌های عملی، علاقه جدی به انجام کار و مدیریت چالش‌ها
۸	محمدرضا محمدی	کارشناسی ارشد مهندسی نفت مدیرعامل شرکت پالایش ثامن	یافتن علل شکست‌ها، توجه به مهارت‌های ارتباطی، ارتباط با افراد باتجربه، شناخت قوانین، علاقه جدی به کار، توجه به مهارت‌ها، کفایت تحصیل تا ارشد، آشنایی با اصول مکاتبات، داشتن انگیزه بالا در شروع کار
۹	میرعلی اکبر	کارشناسی مهندسی شیمی معاونت مهندسی شرکت هیبریدان	توجه به مهارت‌های ارتباطی، علاقه به کار، کفایت تحصیل تا ارشد، اهمیت توجه به مهارت
۱۰	سیروس وقایع‌نگار	کارشناسی مهندسی شیمی مدیرعامل سابق شرکت چگالش	ارتباط با افراد باتجربه، اهمیت تفریح در کنار کار، خلاقیت و داشتن ایده‌های جدید، دانش مدیریتی

مصاحبه‌های کامل این افراد به همراه مصاحبه‌های جدید که مرتب به روزرسانی می‌شود، در کانال یوتیوب آقای رحمت ستوده قره‌باغ^۲ قرار داده شده است که برای همگان قابل دسترسی است. این کلمات کلیدی، نقشه راهی برای دانشجویان در جهت کسب مهارت‌های مورد نیاز برای موفقیت در مسیر شغلی مهندسی ارائه می‌دهد.

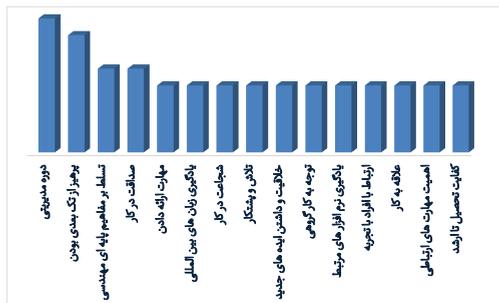
۱- <https://www.youtube.com/playlist?list=PL0IJYNXnprcsAMAcpiDAAXXNEplLus0pR>, accessed on July 2024

۲- <https://www.youtube.com/@RahmatSotudehGharebagh>

جدول ۲. مشخصات متخصصان مصاحبه شده و کلمات کلیدی مستخرج از توصیه‌های آنان - قسمت دوم

ردیف	نام و نام خانوادگی	سابقه تحصیلی و شغلی	توصیه‌ها
۱۲	ایرج اژدری	کارشناسی ارشد مهندسی نفت و بنیان‌گذار شرکت PetroDomeEnergy	مهارت ارتباطی، به‌روز بودن، صداقت، مهارت ارائه، پرهیز از تک‌بعدی، یادگیری مؤثر دروس دانشگاهی، یادگیری زبان‌های خارجی، دانش مدیریتی
۱۲	احمد فردی	کارشناسی برق و دکتری روان‌شناسی کارشناس رسمی دادگستری	گرفتن ایده از شرکت‌های خارجی، به‌روز بودن، استفاده بهینه از زمان، پیوستگی و شکیبایی در انجام امور، ارتباط گرفتن با افراد محلی
۱۳	اسماعیل موسوی	کارشناسی مهندسی شیمی و MBA مدیرعامل پتروشیمی تخت جمشید	توجه به مهارت‌های ارتباطی، صداقت، تلاش و پشتکار، کفایت تحصیل تا ارشد، استفاده عملی از دروس تئوری، مهارت ارائه
۱۴	حامد صدیق	کارشناسی مهندسی شیمی رئیس هیئت مدیره شرکت چگالش	توجه به فرصت‌های کارآفرینی، کفایت تحصیل تا ارشد، خودشناسی، توانایی تصمیم در لحظه، دانش مدیریتی
۱۵	جابر نشاطی	دکتری الکتروشیمی و خوردگی رئیس پردیس انرژی پژوهشگاه نفت	کار گروهی، مهارت‌های ارتباطی، یادگیری نرم‌افزارها، هوش هیجانی، دانش فنی، مدیریتی، روان‌شناسی، تسلط بر مفاهیم پایه‌ای مهندسی، ارتباط با افراد تجربه، کفایت تحصیل تا ارشد، اهمیت دکتری در پژوهش
۱۶	مهرداد هاشمی	دکتری مهندسی مخازن مهندس مخازن نفتی در لندن	پرهیز از تک‌بعدی بودن، یادگیری نرم‌افزارها، توجه به کار گروهی، برنامه‌ریزی برای آینده، دانش مدیریتی، اقتصادی و مالی
۱۷	مهدی یارمند	کارشناسی مهندسی شیمی مدیرعامل زیست‌کیمیا	تفکر کارآفرینی، تجزیه و تحلیل محیطی، تسلط بر مفاهیم پایه‌ای مهندسی، آشنایی با فضای کار، برنامه‌ریزی برای آینده
۱۸	ابراهیم اسکندری	کارشناسی مهندسی شیمی مدیریت احداث پلی پروپن خمین	تلاش و پشتکار، تسلط بر مفاهیم پایه‌ای مهندسی، یادگیری نرم‌افزارها، پرهیز از تک‌بعدی، خلق فرصت از چالش‌ها
۱۹	یعقوب شاهماری	کارشناسی ارشد مهندسی شیمی مدیرعامل شرکت کیمیا صنعت اتامان	به اشتراک گذاشتن تجربیات صنعتی و علمی در شبکه‌های اجتماعی، خلاقیت داشتن ایده‌های جدید، علاقه به کار، صداقت و دانش مدیریتی
۲۰	احمد محمدی	کارشناسی ارشد مخازن هیدروکربوری مدیرعامل مناطق نفت خیز جنوب	تلاش و پشتکار، پرهیز از تک‌بعدی، آشنایی با فضای کار، انگیزه بالا در اوایل کار، تفکر قبل از حرف
۲۱	داوود عابدی آملی	کارشناسی ارشد مهندسی شیمی مدیرعامل شرکت پاکوش	توجه به کار گروهی، شجاعت در کار، دانش مدیریتی، پرهیز از تک‌بعدی

مهارت‌ها و توصیه‌های پرتکرار ارائه شده توسط افراد صنعتی در شکل ۵ آورده شده است. این موارد از طرف این افراد بسیار مورد تأکید بوده است که توجه به آنها می‌تواند در مسیر تسهیل شغلی و حرفه دانش‌آموختگان جدید بسیار مؤثر باشد.



شکل ۵. مهارت‌ها و توصیه‌های پرتکرار توسط متخصصان صنعتی

تحلیل تجربیات و توصیه‌های مهندسان موفق بررسی شده در این مقاله نشان می‌دهد که پنج مهارت کلیدی پرتکرار برای پیشرفت در مسیر شغلی وجود دارد که شامل، شرکت در دوره‌های مدیریتی، پرهیز از تک بعدی بودن، تسلط بر مفاهیم پایه مهندسی، صداقت در کار و یادگیری زبان‌های بین‌المللی است. در ادامه، به شرح مختصری از این مهارت‌ها پرداخته می‌شود:

۱. **شرکت در دوره‌های مدیریتی:** مهندسان در دنیای امروز، فراتر از وظایف فنی خود، نقشی مدیریتی نیز ایفا می‌کنند. تسلط بر مهارت‌های مدیریتی، کلید موفقیت در سطوح مختلف شغلی این افراد است. شرکت در دوره‌های مدیریتی فرصتی برای تقویت مهارت‌های رهبری، توسعه ارتباطات و برنامه‌ریزی، سازماندهی، تصمیم‌گیری و مدیریت پروژه است. علاوه بر این، ارتقای مهارت‌های حل مسائل و ایجاد شبکه‌های حرفه‌ای، از دیگر مزایای شرکت در دوره‌ها است (Manildi, 1942). مطالعات نشان داده است مهندسانی که در این دوره‌ها شرکت می‌کنند، به طور میانگین ۲۰ درصد حقوق بیشتری دریافت می‌کنند.

۲. **پرهیز از تک بعدی بودن:** مهندسی، فراتر از صرف دانش فنی و مهارت‌های تخصصی، نیازمند نگاهی جامع و چندبعدی به مسائل است. پرهیز از تک بعدی بودن در مهندسی به معنای در نظر گرفتن جوانب مختلف و عوامل گوناگون در طراحی و اجرای پروژه‌ها است. این رویکرد، مانع از سوء تفاهم‌ها و نقصان‌های ناشی از دیدگاه‌های یک‌جانبه می‌شود. مهندسان با تسلط بر دیدگاه چندبعدی، می‌توانند تأثیرات مختلف یک پروژه را از ابعاد فنی، اقتصادی، فرهنگی و اجتماعی مورد بررسی قرار دهند. این امر ضمن کاهش خطاهای تصمیم‌گیری، منجر به اتخاذ بهترین تصمیمات و طراحی راه‌حل‌های پایدار و کارآمد می‌گردد و نقش مهندسان را به عنوان عاملان تغییر مثبت در جامعه ارتقا می‌دهد (Takemura, 2021).

۳. **تسلط بر مفاهیم پایه‌ای مهندسی:** مهندسی، رشته‌ای مبتنی بر دانش و درک عمیق از مفاهیم ریاضی و فیزیک است. مهندسان با سرمایه‌گذاری در یادگیری و تسلط بر این مفاهیم، می‌توانند مهارت‌های خود را ارتقا دهند و به عنوان متخصصانی کارآمد و خلاق در این عرصه شناخته شوند.

تسلط بر این مفاهیم، مهندسان را قادر می‌سازد تا مسائل را به طور دقیق تجزیه و تحلیل کنند و راه‌حل‌های نوآورانه و بهینه برای حل سریع مشکلات ارائه نمایند^۱.

۴. **صداقت در کار:** صداقت، ستون اصلی اخلاق حرفه‌ای است و نقشی اساسی در توسعه فردی و حرفه‌ای مهندسان ایفا می‌کند. التزام به صداقت در ارتباطات، موجب رشد فردی و پیشرفت گروهی، ایجاد اعتماد، افزایش مسئولیت‌پذیری مهندسان، بهبود کیفیت پروژه‌ها، ارتقای اعتبار شخصی و جلب فرصت‌های جدید کاری می‌شود. مهندسان با اجرای این سیاست در تمامی ابعاد کار خود، می‌توانند به عنوان الگویی برای دیگران عمل کنند و به ارتقای اخلاق حرفه‌ای در جامعه مهندسی کمک نمایند. (Ogle, 2016)

۵. **اهمیت زبان انگلیسی:** در دنیای امروز که صنعت و فناوری به طور فزاینده‌ای بین‌المللی شده است، مهندسان بیش از هر زمان دیگری به مهارت‌های بین‌المللی نیاز دارند. مهندسان با تسلط بر زبان انگلیسی به عنوان زبان مشترک بین‌المللی می‌توانند ضمن ارتباط با هم‌تایان خود در سراسر جهان، از تجربیات و دانش آنها بهره‌مند شوند و همچنین از آخرین دستاوردهای علمی، مقالات تخصصی و گزارش‌های فنی در حوزه خود استفاده نمایند. همچنین آنها می‌توانند با شرکت در کنفرانس‌ها و رویدادهای بین‌المللی، یافته‌ها و تجربیات خود را با جامعه بین‌المللی مهندسی به اشتراک بگذارند. به طور کلی، تسلط بر زبان انگلیسی و حتی زبان‌های خارجی دیگر مثل زبان چینی، برای رشد حرفه‌ای و پیشرفت دانش مهندسی اهمیت حیاتی دارد و باعث می‌شود آنها در دنیای رقابتی امروز، از کسب فرصت‌های شغلی محلی و بین‌المللی برخوردار شوند^۲ (Shrestha, 2016).

۴. نظرسنجی برای جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز

در این پژوهش، به منظور بررسی دقیق دیدگاه‌های دانشجویان نسبت به مصاحبه‌ها و سخنرانی‌های انجام شده، از روش نظرسنجی بر پایه نظریه داده‌بنیان^۳ استفاده شده است. این نظریه، که رویکردی کیفی در پژوهش است، به محققان امکان می‌دهد تا از داده‌های جمع‌آوری شده، مفاهیم و تئوری‌های جدیدی را استخراج و تحلیل کنند (Noble & Mitchell, 2016). برای جمع‌آوری داده‌ها، از پرسش‌نامه‌ای که بر مبنای نظریه داده‌بنیاد و طیف لیکرت^۴ پنج امتیازی طراحی شده بود، استفاده شد. این پرسش‌نامه شامل ۴۱ سؤال با پنج گزینه پاسخ (موافقت کامل، موافقت، بی‌طرف، مخالفت، مخالفت کامل) بود که به دانشجویان ارائه شد تا نظرات آنها در مورد مصاحبه‌ها و سخنرانی‌های انجام شده دریافت گردد. (Barua, 2013) البته مقیاس لیکرت بسته به سطح عمق مطالعه می‌تواند دارای پنج،

1- <https://coecosmanabad.ac.in/importance-of-studying-basic-science-and-humanities-for-students>, accessed on July 2024.

2- <https://innovationwork.ieee.org/english-proficiency-is-paramount-for-engineering-students-professionals-and-organizations>, accessed on July 2024.

3- Grounded Theory

4- Likert scale

هفت یا نه امتیازی هم باشد. در این پژوهش، برای تعیین حجم نمونه از جدول مورگان^۱ استفاده شد. این جدول، ابزاری رایج در تحقیقات و نظرسنجی‌ها است که تعداد حداقل نمونه‌های لازم را با توجه به سطح و بازه اطمینان مورد نظر مشخص می‌کند. با استفاده از جدول مورگان، ۳۱ نفر از دانشجویان به عنوان نمونه انتخاب شدند. این تعداد به گونه‌ای انتخاب شد که نتایج به دست آمده از نظرسنجی، به واقعیت نزدیک باشد (Bukhari, 2021). علاوه بر این، برای افزایش دقت و قابلیت اعتماد نتایج، جامعه آماری به مقدار کافی بزرگ در نظر گرفته شد. برای نظرسنجی و اطمینان از صحت نتایج، از متخصصان در این زمینه استفاده شد و روش شناسی نظرسنجی، از نظر طراحی و اجرا مورد تأیید قرار گرفت. جدول ۳، سؤالات پرسش‌نامه برای این نظرسنجی را نشان می‌دهد.

جدول ۳. سؤالات پرسش‌نامه طراحی شده برای نظرسنجی

فرم نظرسنجی	
چه میزان از برنامه مصاحبه با افراد با تجربه صنعتی رضایت داشتید؟	افراد با تجربه صنعتی دعوت شده به چه میزان با منابع به روز آشنا بودند؟
چه اندازه مطالب ارائه شده باعث افزایش انگیزه در شما شده است؟	میزان رضایتمندی شما از دسترسی به ویدیوهای ضبط شده چقدر است؟
میزان تأثیر تجربه‌های زیسته در هدایت مسیر شغلی شما مؤثر است؟	چقدر این مصاحبه‌ها منجر به آشنایی شما با چالش‌های صنعت می‌شود؟
چقدر این مصاحبه‌ها منجر به آشنایی شما با چالش‌های ملی می‌شود؟	آیا چالش‌های مطروحه در مصاحبه‌ها باعث ترس شما از آینده می‌شود؟
میزان تأثیر تجربه‌های زیسته در هدایت مسیر شغلی چه قدر است؟	چه میزان تمایل به یادگیری نرم‌افزارها و مهارت‌های اشاره شده دارید؟
در این تجربه‌ها چه اندازه به نرم‌افزارهای مورد نیاز شما اشاره می‌شود؟	آیا شما با انگیزه مصاحبه‌های تجربه زیسته را دنبال می‌کردید؟
چه میزان این مصاحبه‌ها مشوق شما برای پیگیری کار پژوهشی است؟	چه میزان از افراد با تجربه به اهمیت صبر و خویشتن‌داری اشاره کردند؟
چه میزان از افراد مصاحبه شده به اهمیت پشتکار اشاره کردند؟	چه میزان از افراد موفق صنعتی به یادگیری زبان انگلیسی اشاره کردند؟
چه میزان از افراد موفق صنعتی به یادگیری سایر زبان‌ها اشاره کردند؟	میزان نارضایتی شما از دسترسی به جلسات ضبط شده چقدر است؟
آیا بدون انگیزه و از روی رفع تکلیف مصاحبه‌ها را تعقیب می‌کردید؟	آیا این مصاحبه‌ها باعث ترغیب شما به کسب دانش مدیریتی می‌شود؟
این مصاحبه‌ها چقدر در بهبود دیدگاه مهندسی شما اثر گذاشته است؟	آیا تمایل به یادگیری دوره‌های مورد اشاره توسط افراد با تجربه دارید؟
با توجه به مصاحبه‌ها، آیا از ادامه مسیر آینده منصرف یا سست شده‌اید؟	چه میزان از گفت‌وگوی دوطرفه در طول مصاحبه راضی هستید؟

آیا تمایل به ارتباط با افراد باتجربه بعد از این سخنرانی‌ها دارید؟	مصاحبه با افراد چه میزان در افزایش مهارت‌های نرم شما اثر گذاشته است؟
آیا این مصاحبه‌ها باعث تغییر تصمیم شما در مورد مسیر آینده شد؟	آیا تجربه‌های زیسته تأثیر مثبت در ایجاد انگیزه یادگیری شما داشت؟
چه میزان تمایل به یادگیری نرم‌افزارها و مهارت‌های اشاره شده دارید؟	دیدن این ویدیوها چه قدر در آشنایی شما با مفاهیم اقتصاد مؤثر بوده است؟
چه میزان تطابق زمانی بین شروع فعالیت افراد موفق و شما وجود دارد؟	چه میزان این مصاحبه‌ها باعث ترغیب شما به آینده شغلی می‌شود؟
آیا این شیوه تعامل با افراد با تجربه صنعتی را می‌پسندید؟	آیا زمان یک ساعت برای مصاحبه با افراد با تجربه صنعتی، مناسب است؟
آیا این ویدیوها باعث ترغیب شما برای تحصیلات تکمیلی شده است؟	آیا مایل به دیدن ویدیوهای بیشتر از افراد باتجربه در آینده هستید؟
میزان رضایتمندی شما از روند برگزاری مصاحبه چقدر است؟	آیا این ویدیوها باعث افزایش امید شما به بازار کار پیش رو شده است؟
میزان اثرگذاری مصاحبه‌ها به صورت مجازی چقدر است؟	میزان اثرگذاری مصاحبه‌ها به صورت حضوری چقدر است؟
	این سخنرانی‌ها چقدر باعث تغییر دید شما نسبت به آینده شده است؟

این تحقیق نشان می‌دهد که با توجه به اعتبار و انطباق با اصول نظریه داده‌بنیان و استفاده از طیف لیکرت، می‌توان از این نظرسنجی به عنوان ابزاری مؤثر برای جمع‌آوری و ارزیابی دیدگاه‌ها در زمینه‌های مختلف استفاده کرد.

۵. تحلیل نتایج نظرسنجی

در این بخش، به تحلیل جزئیات نتایج نظرسنجی در چهار بخش اصلی با عناوین: ۱- میزان رضایت از جلسات، ۲- آینده‌نگری، ۳- مهارت‌های نرم و سخت و ۴- ایجاد انگیزه و تشویق پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که سؤالات نظرسنجی بر اساس این چهار بخش طراحی و دسته‌بندی شده بودند. **بخش اول - میزان رضایتمندی از جلسات:** بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۶، می‌توان نتیجه گرفت که اکثریت قریب به اتفاق شرکت‌کنندگان از مصاحبه‌ها و سخنرانی‌ها و نحوه برگزاری آنها رضایت داشته‌اند.

- ۹۳٪ از شرکت‌کنندگان، مصاحبه‌ها را مفید یافتند و از نحوه برگزاری آنها رضایت داشتند.

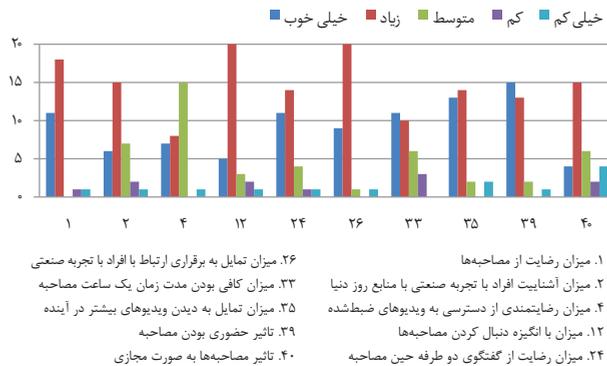
- ۸۰٪ از شرکت‌کنندگان با انگیزه بالا مصاحبه‌ها را پیگیری می‌کردند.

- ۸۷٪ تمایل به مشاهده ویدیوهای بیشتر در آینده هستند.

- ۷۰٪ درصد از شرکت‌کنندگان معتقد هستند که افراد موفق صنعتی، با منابع روز و اطلاعات جدید آشنا بودند.

- ۹۳٫۵٪ علاقه مند به ادامه ارتباط با این افراد بودند تا اطلاعات کاربردی بیشتری را به دست آورند.

در رابطه با مدت زمان جلسات، بیشتر دانشجویان از زمان یک ساعت برای مصاحبه‌ها راضی بودند. البته باید اشاره کرد که دانشجویان، سخنرانی و یا مصاحبه حضوری را به مصاحبه مجازی ترجیح می‌دادند. با این حال، تقریباً ۸۰ درصد آنان، از مصاحبه مجازی نیز رضایت داشتند. پس باید به این نکته توجه کرد که انتخاب میان دو روش مصاحبه حضوری و مجازی حائز اهمیت است و باید به نیازها و اولویت‌های دانشجویان پاسخ داده شود تا آنها از این مصاحبه‌ها بهره خوبی ببرند.



۱. میزان رضایت از مصاحبه‌ها
 ۲. میزان آشنایی افراد با تجربه صنعتی با منابع روز دنیا
 ۳. میزان کافی بودن مدت زمان یک ساعت مصاحبه
 ۴. میزان رضایتمندی از دسترسی به ویدیوهای ضبط‌شده
 ۱۲. میزان با انگیزه دنبال کردن مصاحبه‌ها
 ۲۴. میزان رضایت از گفتگوی دو طرفه حین مصاحبه
 ۲۶. میزان تمایل به برقراری ارتباط با افراد با تجربه صنعتی
 ۳۳. میزان کافی بودن مدت زمان یک ساعت مصاحبه
 ۳۵. میزان تمایل به دیدن ویدیوهای بیشتر در آینده
 ۳۹. تأثیر حضوری بودن مصاحبه
 ۴۰. تأثیر مصاحبه‌ها به صورت مجازی

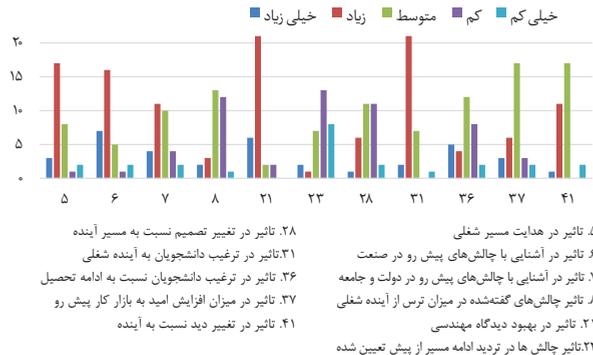
شکل ۶. میزان رضایت‌مندی افراد شرکت‌کننده در نظرسنجی

بخش دوم - آینده نگری: از نتایج ارائه شده در شکل ۷ می‌توان جمع‌بندی زیر را ارائه نمود:

- ۹۰٪ دانشجویان معتقدند که مصاحبه‌ها با افراد باتجربه، ضمن تأثیر در انتخاب مسیر شغلی دانشجویان، جهت‌گیری عمیقی به مسیر حرفه‌ای دانشجویان می‌دهد و آنها را با چالش‌های پیش‌رو در صنعت و جامعه آشنا می‌کند. این امر باعث افزایش اطمینان دانشجویان به آینده و از بین بردن تردید آنها در مورد ادامه مسیر شغلی می‌شود.

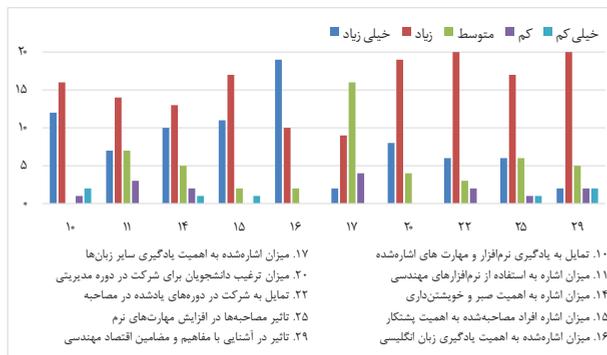
- ۷۴٪ درصد دانشجویان با اطمینان اعلام کرده‌اند که مصاحبه‌ها، آنها را به آینده شغلی خود ترغیب کرده است و تا حدی، در تغییر تصمیم آنها نسبت به مسیر آینده‌شان نقش داشته است. این مصاحبه‌ها، عاملی محوری در تصمیم‌گیری‌های حیاتی مرتبط با آینده شغلی دانشجویان محسوب می‌شوند.

می‌توان ادعا کرد که مصاحبه‌ها با افراد باتجربه صنعتی، دیدگاه مهندسی دانشجویان را تقویت و نگرش آنها را نسبت به آینده حرفه‌ای خودشان تغییر می‌دهد. با این حال، در مورد تأثیر مصاحبه‌ها در افزایش امید دانشجویان نسبت به ورود به بازار کار، نتایج نشان می‌دهد که این تأثیر متوسط است و نیاز به توجه بیشتری دارد.



شکل ۷. میزان تقویت آینده‌نگری افراد شرکت‌کننده در نظرسنجی

بخش سوم- مهارت‌های نرم و سخت: در این بخش، به اهمیت مهارت‌های نرم در کنار مهارت‌های سخت برای مهندسان اشاره می‌شود. نتایج ارائه‌شده در شکل ۸، نشان می‌دهد که مهارت‌های نرم در مصاحبه‌ها، از اهمیت بسیار بالایی برخوردار هستند و هر مهندس باید در کنار مهارت‌های سخت، این مهارت‌ها را نیز تقویت کند.



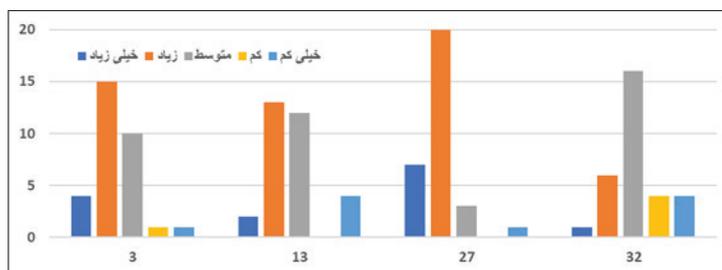
شکل ۸. میزان اهمیت مهارت‌ها از نظر شرکت‌کنندگان در نظرسنجی

نتایج این شکل نشان می‌دهد که تمامی دانشجویان، پس از شرکت در مصاحبه‌ها، تمایل به تقویت هر دو نوع مهارت سخت و نرم داشتند و علاقه زیادی به شرکت در دوره‌های معرفی‌شده در مصاحبه‌ها از خود نشان دادند. همچنین، شرکت در این مصاحبه‌ها، تأثیر به‌سزایی در افزایش مهارت‌های نرم دانشجویان داشته است. لازم به ذکر است که بیش از ۷۰ درصد دانشجویان با شرکت در این جلسات، تا حدودی با مفاهیم اقتصاد مهندسی آشنا شدند که این امر یکی دیگر از ثمرات این مصاحبه‌ها است. در جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که مصاحبه‌ها، تا حد زیادی دانشجویان را ترغیب کرده‌اند تا به دنبال یادگیری و تقویت مهارت‌های مختلف بروند. همچنین، دانشجویان در راستای این

امر، خواستار برگزاری بیشتر دوره‌های یادگیری و تقویت مهارت‌ها بودند که این مهم می‌تواند در برنامه انجمن‌های علمی مهندسی و انجمن آموزش مهندسی ایران قرار گیرد.

طبق نظرسنجی انجام شده از کارفرمایان (Stiwne, 2010)، آنها تأکید بسیاری بر مهارت‌های عمومی دانش‌آموختگان دارند. این مهارت‌ها، شامل خلاقیت، کار گروهی، مهارت ارتباطی، تسلط بر زبان‌های بین‌المللی مثل انگلیسی و توانایی حل مسئله و تحلیل پذیری می‌شوند. کارفرمایان انتظار دارند که دانشگاه‌ها، این مهارت‌ها را به دانشجویان آموزش دهند تا آنها بتوانند از این مهارت‌ها، در محیط کاری بهره ببرند. علاوه بر این، کارفرمایان معتقدند که فرصت‌های کارآموزی در صنعت، به دانشجویان در کسب مهارت‌های مورد نظر کمک می‌نماید. در مجموع می‌توان گفت که کارفرمایان به دنبال استخدام دانش‌آموختگانی هستند که علاوه بر دانش‌های تخصصی، دارای مهارت‌های نرم مورد نیاز در بازار کار باشند. شکل ۱ نیز همین موضوع را تأیید می‌کند.

بخش چهارم - ایجاد انگیزه و تشویق: با توجه به نتایج ارائه شده در شکل ۹، دانشجویان معتقدند که شرکت در این جلسات با حضور افراد باتجربه تأثیر چشمگیری بر روی آنها داشته است.



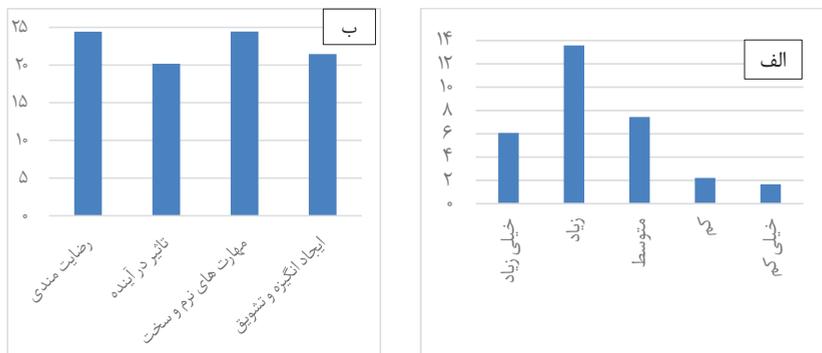
۳. تأثیر در انگیزه ایجاد شده برای پیگیری مطالب ارائه شده ۱۳. تأثیر در تشویق برای پیگیری کار تحقیقاتی و پژوهشی
۲۷. میزان تأثیر مثبت در ایجاد انگیزه برای یادگیری ۳۲. میزان تطابق زمانی بین نقطه شروع خود و افراد با جریه صنعتی

شکل ۹. میزان ایجاد انگیزه و تشویق در افراد شرکت‌کننده در نظرسنجی از بخش چهارم شامل چهار سؤال

مصاحبه‌ها تأثیر قابل توجهی بر انگیزه و تشویق دانشجویان برای یادگیری و انجام پژوهش داشته‌اند، به طوری که بیش از ۹۳ درصد دانشجویان را به ادامهٔ بانگیزه مطالب ارائه شده و یادگیری عمیق‌تر آنها ترغیب کرده است. همچنین، این مصاحبه‌ها باعث ایجاد انگیزه در ۸۷ درصد دانشجویان برای پیگیری کارهای پژوهشی شده است. نکتهٔ قابل توجه این است که دانشجویان، میزان تطابق زمانی نقطه شروع خود و افراد مصاحبه‌شده را در حد متوسطی ارزیابی کرده‌اند. بر اساس این شکل، اکثریت پاسخ‌ها در دو سطح متوسط و زیاد قرار گرفته است که نشان می‌دهد بیشتر دانشجویان، تأثیر مصاحبه‌ها را بر ایجاد انگیزه و تشویق خود، در سطح متوسط تا زیاد ارزیابی کرده‌اند.

تجزیه و تحلیل کلی: شکل ۱۰ نتایج کلی تأثیر مصاحبه‌ها در نظرسنجی‌ها را نشان می‌دهد. در شکل

۱۰ الف، تعداد انتخاب هر گزینه، برای همه سؤالات به طور جداگانه جمع و بر تعداد سؤالات تقسیم شده است تا به یک آمار کلی از میزان انتخاب هر یک از گزینه های ۵ تایی طیف لیکرت به دست آید. در شکل ۱۰ ب، به تعداد داده های آماری گزینه های «خیلی کم»، «کم»، «متوسط»، «زیاد» و «خیلی زیاد» به ترتیب وزن عددی ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ نسبت داده شده است. این وزن ها برای سؤالات هر چهار بخش، به طور جداگانه جمع و بر تعداد سؤالات و عدد ۱۰ تقسیم شده اند.



شکل ۱۰. میزان رضایت مندی کلی افراد در بخش های مختلف

شکل ۱۰ به گونه ای طراحی شده است که محور افقی آن، شامل چهار بخش ذکر شده در قسمت قبلی، شامل امتیازها و یا بخش ها باشد. محور عمودی شکل، میانگین درصد انتخاب گزینه های مختلف با تابع وزنی داده شده برای هر چهار بخش را نشان می دهد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که این مصاحبه ها توانسته اند تأثیر مثبتی بر دانشجویان بگذارند، اگر چه تأثیر برخی بخش ها کمی بیشتر از سایر بخش ها بوده است.

با توجه به نتایج نظرسنجی می توان مواد زیر را برای استفاده مؤثر از تجارب زیسته مهندسی در آموزش پیشنهاد نمود:

تقویت ارتباط با صنعت: دانشگاه ها می توانند به عنوان پلی بین دانشجویان و صنعت عمل کنند. این امر با اجرای فعالیت های مشارکت دانشجویان با صنعت، انعکاس تجربه های واقعی به دانشگاه و یادگیری مهارت های حرفه ای برای دانشجویان ممکن می گردد. این فعالیت ها همچنین فرصت های شغلی دانشجویان را افزایش می دهد و امکان پیشرفت برنامه های درسی و به روزرسانی محتوا را بر اساس نیازهای صنعت تسهیل می نماید. مشارکت با دانشگاه برای صنعت نیز فواید متعددی دارد. این امر جذب نیروهای ماهر را برای صنعت آسان می کند و امکان تأثیرگذاری بر برنامه های تحصیلی را تا حدی فراهم می آورد که این برنامه ها با نیازهای صنعت تطابق بهتری داشته باشند (Caleb, 2017).
داشتن تجربه صنعتی اعضای هیئت علمی: تجربه صنعتی اعضای هیئت علمی می تواند تأثیر قابل

توجهی بر کیفیت آموزش دانشجویان داشته باشد. اساتیدی که سابقه کار عملی در صنعت دارند، می‌توانند از تجربیات واقعی خود بهره بگیرند و مسائل و مشکلات عملی‌ای را که در طول سال‌ها فعالیت صنعتی با آنها مواجه شده‌اند، در محتوای دروس مطرح کنند. این امر باعث می‌شود تا دانشجویان درک بهتری از اهمیت نظریه‌ها و مباحث مطرح شده در دروس پیدا کنند و بتوانند ارتباط بین نظریه و عمل را به درستی متوجه شوند (Richter & Loendorf, 2007). البته می‌توان با حضور مدرسان از صنعت در دانشگاه هم تا حد زیادی تجربیات واقعی را به دانشجویان منتقل نمود.

۶. نتیجه‌گیری

نتایج نظرسنجی‌ها نشان می‌دهد که اکثر شرکت‌کنندگان در مصاحبه‌ها، از نتایج به دست آمده راضی بوده و علاقه‌مند به پیگیری مطالب ارائه شده در آنها بوده‌اند. به عبارت دیگر، مشارکت در مصاحبه‌ها، برای آنها تجربه‌ای مثبت و پربار بوده و تأثیرات قابل توجهی بر مسیر شغلی و تصمیم‌گیری‌هایشان داشته است. تأثیر مصاحبه‌ها بر هدایت مسیر شغلی شرکت‌کنندگان متفاوت بوده و همچنین در تصمیم دانشجویان برای ادامه تحصیلات تکمیلی نیز نقش داشته است. این تأثیرات ممکن است به تغییرات در دیدگاه افراد نسبت به آینده شغلی و تحصیلی آنها منجر شده باشد. به عبارت دیگر، مصاحبه‌ها، به عنوان ابزاری مؤثر در تشویق افراد به تعیین اهداف شغلی و تحصیلی خود عمل کرده‌اند. افراد صنعتی شرکت‌کننده در مصاحبه‌ها، دانشجویان را به شرکت در دوره‌های مدیریتی، فراگیری زبان انگلیسی و آشنایی با نرم‌افزارهای مهندسی ترغیب می‌کردند. مطابق این مطالعه، به نظر می‌رسد که انتقال تجارب صنعتی به دانشگاه برای دانشجویان کارشناسی بسیار مفید بوده و با بازخورد مثبتی همراه بوده است. از این رو، توصیه می‌شود که این مصاحبه‌ها، در دوره کارشناسی به صورت یک درس یا دو درس در قالب مهارت‌های نرم ارائه گردد تا دانشجویان بتوانند دیدگاهی روشن‌تر از شرایط کاری آینده در محیط‌های کاری داشته باشند.

۷. تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از مهندسان محترم آقایان امیرحسین بحرینی، مهدی حسین‌زاده، احد عظیم‌زاده، هاشم صباغان، علی مشایخ، سید مرتضی امامی، مسعود بناییان، محمدرضا محمدی، علی میرعلی اکبر، سیروس وقایع‌نگار، ایرج اژدری، احمد فردی، اسماعیل موسوی، حامد صدیق، مهدی یارمند، ابراهیم اسکندری، یعقوب شاهماری، احمد محمدی، داوود عابدی آملی، جابر نشاطی و مهرداد هاشمی که با رضایت در فرایند پژوهش حاضر شدند و تجربیات ارزشمند خود را در اختیار دانشجویان قرار دادند، اعلام می‌دارند. همچنین از دانشجویان محترمی که در نظرسنجی شرکت کردند، صمیمانه تشکر می‌شود.

References

- American Society for Training & Development. (2011). The 2011 state of the industry: Increased commitment to workplace learning. *T+D Magazine*. <https://www.td.org/magazines/td-magazine/the-2011-state-of-the-industry-increased-commitment-to-workplace-learning>. Accessed on May 2024.
- Barua, A. (2013). Methods for decision-making in survey questionnaires based on Likert scale, *Journal of Asian Scientific Research*, 3, 1.
- Bukhari, S. A. (2021). Sample size determination using Krejcie & Morgan table. 10.13140/RG.2.2.11445.19687.
- ISNA, <https://www.irna.ir/news/83919943>. Accessed on July 2024.
- Manildi, J. F. (1942). Engineers & the MBA degree. *Engineering & Science*, 6 (2).
- Mann, C.R., A study of engineering education (1918). Prepared for the joint committee on engineering education of the National Engineering Societies, *Carnegie Foundation for the Advancement of Teaching*, Issue 11.
- Mohammadzadeh, A. & R. Sotudeh-Gharebagh (2019). Soft skills for engineering students & graduates. *Iranian Journal of Engineering Education* 20(80):1-29 [In Persian].
- *National Soft Skills Association*. (2024). The soft skills disconnect, <https://www.nationalsoftskills.org/the-soft-skills-disconnect>. Accessed on July 2024.
- Noble H. & G. Mitchell (2016). What is grounded theory? evidence-based nursing, 19, 2.
- Ogle, D. (2016). For engineers, honesty is still the best policy. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/engineers-honesty-still-best-policy-dallon-ogle-p-e>-Retrieved May 2024.
- *QEPrize*, (2015). Create the future, <https://qeprize-site.files.svcdcdn.com/production/files/QEPrize-Create-the-Future-Report-2015.pdf>, accessed on May 2024.
- Richter, D. & W. Loendorf (2007). Faculty with industrial experience bring a real-world perspective to engineering education. 12.737.
- Shrestha R. N. & B. A. Jai. (2016). Impact of english on the career of engineering students: A brief overview in g(local) context. *Journal of the Institute of Engineering*, 11. 182. 10.
- Stiwne, E. E. & T. Jungert (2010). Engineering students' experiences of transition from study to work, *Journal of Education & Work*, 23, 5.
- Takemura, K. (2021). Toward good decisions & avoiding bad decisions. In: *Behavioral Decision Theory*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5453-4_18.
- Tim, M. & K. Jan (2022). A circular education system for the AEC, 2022 *European Conference on Computing in Construction*, Greece, July 24-26.



◀ **سلوا شاهگلی:** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی شیمی از دانشکده فنی دانشگاه تهران اخذ کرده است و در حال حاضر، دانشجوی ارشد رشته مهندسی محیط زیست دانشگاه فناوری هامبورگ در آلمان میباشد. تمرکز تحقیقاتی ایشان مدیریت منابع انرژی و مصرف بهینه این منابع و آموزش مهندسی است.



◀ **آرین پورابراهیمی علمداری:** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی شیمی از دانشکده فنی دانشگاه تهران اخذ کرده است و در حال حاضر، دانشجوی ارشد رشته مهندسی شیمی این دانشگاه میباشد. تمرکز تحقیقاتی ایشان، کاربرد یادگیری ماشین و علوم داده در مهندسی شیمی برای تحلیل داده‌های کلان، و آموزش مهندسی است.



◀ **رضاءل محمود:** مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی شیمی از دانشکده فنی دانشگاه تهران اخذ کرده است و در حال حاضر، دانشجوی ارشد رشته مهندسی فرایندهای زیستی دانشگاه فناوری هامبورگ در آلمان میباشد. تمرکز تحقیقاتی ایشان بر کاتالیست‌های ناهمگن و آموزش مهندسی است.



◀ **رحمت ستوده قره‌باغ:** مدرک دکتری خود در مهندسی شیمی را از دانشگاه پلی تکنیک مونترال کانادا اخذ کرده‌اند. ایشان از سال ۱۳۷۸ فعالیت خود را به عنوان عضو هیئت علمی در دانشگاه تهران آغاز کرده‌اند و هم اکنون نیز به عنوان استاد در دانشکده فنی مشغول فعالیت هستند، ایشان در زمینه مهندسی فرایند، کاربرد هوش مصنوعی در مهندسی شیمی و آموزش مهندسی مشغول به کار آموزشی و پژوهشی هستند.

اهداف انتشار فصلنامه

هدف از چاپ و انتشار «فصلنامه آموزش مهندسی ایران» کمک به ارتقا و توسعه کمی و کیفی آموزش مهندسی در کشور است. نقش سازنده و مؤثرتر جامعه مهندسی کشور در توسعه ملی، شکوفایی، نوآوری، خلاقیت، افزایش کارایی و اثربخشی مهندسان، با تحلیل، تغییر و به روز ساختن آموزش مهندسی می‌تواند حاصل شود. برای دستیابی به رشد و توسعه علمی و فناوری در جامعه مهندسی کشور راه‌های گوناگونی وجود دارد که یکی از آنها نشر مقاله‌های پژوهشی، تحقیقی، تحلیلی و ارائه دیدگاه‌های پژوهشگران و صنعتگران درباره گذشته، حال و آینده مهندسی، ارتباط آموزش مهندسی با صنعت و دانشگاه، پژوهش، فناوری و نوآوری در مهندسی، نقد و بررسی آموزش مهندسی در داخل و خارج و ارزیابی، برنامه‌ریزی و توسعه آموزش مهندسی در کشور است. امید است فصلنامه آموزش مهندسی ایران زمینه لازم را برای طرح نظرات و برقراری ارتباط مؤثر میان اعضای هیئت علمی دانشکده‌های فنی و مهندسی و مهندسان شاغل در صنعت کشور به منظور تحقق اهداف یاد شده فراهم سازد. از زمینه‌های مورد توجه در آموزش مهندسی می‌توان موارد زیر را بر شمرد:

الف- توسعه آموزش مهندسی	ب- پژوهش
<ul style="list-style-type: none"> • مرزهای نو در آموزش مهندسی • طراحی دروس و برنامه‌های جدید • آینده آموزش مهندسی در ایران و جهان • استانداردها آموزش و آموزش استاندارد در مهندسی • آموزش بر خط (الکترونیک) مهندسی • آموزش مهندسی در جهت توسعه پایدار • آموزش‌های بین رشته‌ای مهندسی • توسعه علمی و فناوری • تنوع در آموزش مهندسی 	<ul style="list-style-type: none"> • توسعه جایگاه تحقیق و پژوهش در آموزش مهندسی • روش‌های پژوهش در آموزش مهندسی • تاریخ علوم و فناوری در مهندسی • تجربیات بومی مهندسی در آموزش و مستند سازی
ب ارزشیابی، کیفیت و نوآوری	ت- ارتقای فرهنگ علوم انسانی در آموزش مهندسی
<ul style="list-style-type: none"> • شناخت شناسی و تعیین عوامل مؤثر در تفکر و دانش مهندسی • ارزشیابی برنامه‌ها و دروس مهندسی • روش‌های نوین یاددهی و یادگیری در آموزش مهندسی • چگونگی استفاده از روش‌ها، ابزارها و معیارهای ارزشیابی در توسعه مهندسی • کیفیت تدریس اعضا هیأت علمی در ارتقا آموزش مهندسی 	<ul style="list-style-type: none"> • نوآوری، خلاقیت و کارآفرینی در آموزش مهندسی • نقش علوم انسانی در آموزش مهندسی • اخلاق مهندسی • اخلاق آموزش • اخلاق پژوهش
ب ارزشیابی، کیفیت و نوآوری	ث- آموزش در سایر رشته‌های علوم (ریاضی، فیزیک، شیمی و روانشناسی و علوم تربیتی)
	<ul style="list-style-type: none"> • مقالات علمی و پژوهشی مرتبط با آموزش علوم در زمینه‌های فوق

رهنمودهای تهیه مقاله

ارائه مقاله

مؤلفان محترم ضروری است به آدرس تارنما: <http://ijee.ias.ac.ir> مراجعه و ثبت نام نمایند و نام کاربری و رمز عبور را دریافت کنند. سپس، مقاله خود را برای سردبیر فصلنامه با ذکر آن که مقاله برای چاپ به مرجع دیگری ارسال نشده و قبلاً نیز به چاپ نرسیده است و تکمیل فرم‌های تعهد اخلاقی و عدم تعارض منافع از طریق این تارنما ارسال کنند. این نشریه از قوانین CC در اصول انتشار و اخلاق انتشار تبعیت می‌کند.

زبان

فصلنامه آموزش مهندسی ایران به زبان فارسی منتشر می‌شود. همچنین عنوان، مراجع و چکیده، مقاله‌ها به زبان انگلیسی نیز منتشر می‌شود.

نحوه ارائه مطالب در مقاله

ساختار مقاله باید به شرح زیر باشد: عنوان، نویسنده (نویسندگان) و آدرس محل اشتغال، چکیده (حداکثر ۲۰۰ واژه)، کلیدواژه‌ها (۳-۵) کلیدواژه مناسب، پیکره اصلی مقاله، تقدیر و تشکر، مراجع، پیوست‌ها (در صورت لزوم)، عنوان، چکیده و کلید واژه‌های انگلیسی. برای جزئیات بیشتر به <http://ijee.ias.ac.ir/journal/authors.note> مراجعه شود.

مراجع

مراجع منتشر شده که از آنها در تهیه مقاله استفاده شده است باید بر اساس شیوه مرجع نویسی APA تنظیم شود به این شکل که داخل متن مقاله در قسمت ارجاع، داخل پرانتز به نام خانوادگی نویسنده و تاریخ انتشار آن به انگلیسی اشاره شود و در انتهای مقاله مراجع انگلیسی الفبایی شده، قرار گیرد.

عنوان مقالات فارسی باید به انگلیسی ترجمه و به ترتیب با سایر مقالات قرار گیرند. همچنین در انتهای این مقالات عبارت [in Persian] نوشته شود.

CENTRAL ROLE OF ENGINEERS' LIVED EXPERIENCE IN INNOVATION AND IMPROVEMENT OF EDUCATIONAL QUALITY

S, Shahgoli¹, A. Pourebrahimi-Alamdari², R, Ale-Mahmoud³,
and R. Sotudeh-Gharebagh⁴

Received: 22 May 2024 ; Accepted: 13 August 2024

DOI: 10.22047/ijee.2024.458840.2083

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.7.6

Abstract: Currently, the engineering education system in Iran primarily focuses on hard and traditional skills and lacks a well-defined program for teaching soft skills to engineers. Improving the quality of undergraduate programs requires the integration of education with the practical knowledge gained in the society, state agencies, and economic enterprises. This can significantly enhance the educational innovation and future career advancement of engineers. Utilizing the professional experiences of engineers in the structure of university courses or extracurricular activities is one of the effective measures to improve the quality of engineering education. These experiences can serve as a communication bridge between the university and industry and familiarize students with the real-world challenges and opportunities of the profession. In this research, this idea has been explored and analyzed in several different undergraduate programs at the University of Tehran. To evaluate the impact of successful engineers' professional experiences on undergraduate education, a systematic survey was designed and evaluated based on psychological criteria. The detailed feedback from students was collected and the results were analyzed. Finally, based on the findings of this study, recommendations are provided to improve the quality of engineering education. The serious and continuous implementation of these measures can play a significant role in the development and advancement of the country's engineering education system and adequately prepare students for their professional environment.

Keywords: Engineering education, soft skills, practical knowledge, professional experiences, innovation

1- Graduate, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: selvashahgoli@ut.ac.ir

2- Graduate Student, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail, aryanpourebrahimi@ut.ac.ir

3- Graduate, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: rezaallemahmud@gmail.com

4- Professor, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: sotudeh@ut.ac.ir (Corresponding author)

CHEMICAL ENGINEERING ROLE IN DEVELOPING BIOMEDICAL ENGINEERING

E. Vashghani-Farahani¹ and S. Rafiyan²

Received: 9 March 2024; Accepted: 27 August 2024

DOI: 10.22047/ijee.2024.447692.2064

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.6.5

Abstract: In this article, the role of chemical engineering in human health applications is mentioned first, with a particular focus on (bio)medical engineering. Then, the historical background of this role at the beginning of chemical engineers' activities in this field will be examined with emphasis on important issues. In the following, the future horizons of chemical engineering in several important fields of application in medicine, such as biomaterials, drug delivery systems, and tissue engineering, are explained briefly. Then, the importance of applying chemical engineering principles in the link between chemical engineering and tissue engineering/clinical medicine (translational medicine) is intensively expressed. Finally, how the lessons related to (bio)medical engineering emerged in the chemical engineering educational program and its development until today, including the master's program of chemical-biomedical engineering in Iran, and a short conclusion will be presented at the end.

Keywords: Chemical engineering, biomedical, biomaterials, drug delivery, tissue engineering, curriculum

1- Chemical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. (Corresponding author).

E-mail: evf@modares.ac.ir

2- Chemical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: saeed_rafiyan@modares.ac.ir

BIOTECHNOLOGY IN CHEMICAL ENGINEERING

M. Vossoughi¹, M. J. Saghafi² and F. Fooladi Talari³

Received: 23 April 2024; Accepted: 22 September 2024

DOI: 10.22047/ijee.2024.453627.2074

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.5.4

Abstract: Biotechnology is a fascinating field of science that has emerged from the study of yeast and other microorganisms and their role in the fermentation of various substances. This field has undergone significant theoretical changes and has led to remarkable scientific and industrial advancements. Biotechnology can be broadly defined as applying biological technologies to develop new products and processes that benefit humanity. In this article, we aim to better understand the past and future of this growing science and to identify appropriate strategies for its growth and development in Iran's scientific and technological landscape. To achieve this, we will first explore the evolution of this field and then examine the impact of international economic and research institutions. Finally, we will assess the status of similar institutions in Iran and the role of chemical engineering in advancing biotechnology, and make suggestions accordingly. With the right strategies and support, Iran can become a leader in this field and reap the benefits of this exciting science.

Keywords: Biotechnology, chemical engineering, biological revolution

1- Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. (Corresponding author). E-mail: mvossoughish@gmail.com

2- Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran. E-mail: mimjimsaghafi@gmail.com

3- Biotechnology Department, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: f.fooladi95@ut.ac.ir

NANOTECHNOLOGY IN CHEMICAL ENGINEERING

A. H. Moshtaghi¹, R. Babakhanlou², M. Yavari³, A. Moazzeni⁴
and M. Shariaty-Niassar⁵

Received: 26 March 2024; Accepted: 7 September 2024

DOI: 10.22047/ijee.2024.449986.2070

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.4.3

Abstract: Nanomaterials with their unique properties have created a revolution in various fields of science and technology because their application has improved the efficiency of many processes. This review paper first introduces fabrication methods and characterization techniques for nanomaterials. Top-down and bottom-up approaches are two main strategies for the synthesis of nanomaterials. Each approach offers a variety of methods with considerations for scalability. Besides, various microscopic and spectroscopic methods which are used for the characterization of nanomaterials including size analysis, morphology and chemical composition are discussed. In the following, the focus of this article is on the effect of nanotechnology in chemical engineering. Examples include the development of highly efficient catalysts and adsorbents for the oil and gas industry, the creation of advanced drug delivery systems, and innovations in water treatment. It should be considered that the future of nanomaterials lies in nanoarchitecture, which is based on nanotechnology to create complex and functional material systems by integrating with other disciplines.

Keywords: Nanotechnology, chemical engineering, nanoparticle synthesis, nanomaterial application

1- BSc Student in Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: amir.moshtaghi@ut.ac.ir

2- BSc Student in Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: babakhanlou.reyha@ut.ac.ir

3- PhD in Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mhyavari@ut.ac.ir

4- MSc in Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: moazzeni.ali@ut.ac.ir

5- Professor of Chemical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: mshariat@ut.ac.ir

ROLE OF DIGITAL TECHNOLOGIES FOR IMPROVING CHEMICAL ENGINEERING EDUCATION

A. M. Sahlodin¹ and R. Sotudeh-Gharebagh²

Received: 4 March 2024; Accepted: 14 August 2024

DOI:10.22047/ijee.2024.446961.2060

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.3.2

Abstract: This paper discusses the impacts of digital technologies on the effectiveness of chemical engineering education and their potential to enhance students' professional skills. The integration of digital technologies, such as spreadsheets, mathematical softwares, industrial simulators, virtual and augmented reality, and artificial intelligence tools, has revolutionized the field of chemical engineering education by creating interactive and contemporary learning environments. These tools can enhance the comprehension and application of concepts and facilitate problem analysis and solving. They also provide virtual practical experiences and stimulate greater engagement with the subject matter among students. However, the adoption of digital technologies also presents certain challenges that should be addressed carefully. These include the need for adequate infrastructure, training, and appropriate assessment methods for fair evaluation of student performance. Despite these challenges, the effective utilization of digital technologies in chemical engineering education can enable students to cultivate and refine their technical and professional skills. Moreover, it can assist professors and researchers in developing advanced tools and improving the overall educational experience.

Keywords: Digital technologies, engineering education, interactive learning, educational experience, artificial intelligence

1- Department of Chemical Engineering, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran. (Corresponding author). E-mail: sahlodin@aut.ac.ir

2- College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. (Corresponding author). E-mail: sotudeh@ut.ac.ir

GREEN CHEMICAL ENGINEERING

E. Vashghani-Farahani¹ and S. Rafiyan^{1,2}

Received: 2 March 2024 ; Accepted: 24 August 2024

DOI: 10.22047/ijee.2024.447623.2063

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.2.1

Abstract: This article introduces the concept of green chemical engineering as the intersection of “green chemistry” and “green engineering”, emphasizing its importance in the chemical engineering curriculum. This article first describes the twelve goals and principles of “Green Chemistry” and “Green Engineering”. It highlights their role in promoting environmental sustainability and reducing the ecological footprint of chemical processes. After this introduction, green chemical engineering is explored in more detail, focusing on its sustainability criteria and how these principles can be applied to create more environmentally friendly and sustainable chemical processes. The discussion then turns to how the concept of green chemical engineering can be seamlessly integrated into the chemical engineering curriculum and suggests changes and additions to existing courses to include sustainable engineering topics. Finally, the article ends with a short summary and calls for the inclusion of green principles in the educational framework for preparing future engineers for the challenges of sustainable development and emphasizing the importance of equipping them with the knowledge and skills necessary for innovation and responsibility in preserving the environment for sustainable development.

Keywords: Chemical engineering, green chemical engineering, chemical processes, environment, curriculum

1- Chemical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

(Corresponding author). E-mail: evf@modares.ac.ir

2- Chemical Engineering Faculty, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: saeed_rafieyan@modares.ac.ir

ABSTRACTS

A REVIEW OF CHEMICAL ENGINEERING EDUCATION: PAST, PRESENT AND FUTURE DIRECTIONS IN IRAN AND THE WORLD

M. Soltanieh¹, R. Rahimi², T. Mohammadi³, S. N. Ashrafizadeh⁴ and S. Zarghami⁵

Received: 19 April 2024 ; Accepted: 13 August 2024

DOI: 10.22047/ijee.2024.453157.2073

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.1.0

Abstract: In this paper, after a brief investigation of the history of chemical engineering in Iran and the world, the published papers related to chemical engineering education in the Iranian Journal of Engineering Education, on the occasion of its 25th anniversary of publication, were reviewed. In educational part of the present work, the novel educational methods such as remote education, e-learning, game-based education, virtual reality education and the outcomes of these methods are discussed. In addition, from the research perspective, the latest directions of chemical engineering such as stimuli-responsive polymeric micelles, drug delivery, cancer therapy, antimicrobial active packaging films, active food packaging, advanced electro spun nanofiber yarn-based textiles, wound healing applications, advanced technologies for water and wastewater treatment, application of nanomaterials and ionic metals, green and renewable energies, and the applications of artificial intelligence in chemical engineering were reviewed. From the foresight vision and considering the global changes such as environmental challenges, limited world resources, the novel areas of chemical engineering and its future, with emphasis on chemical engineering education, have been investigated. With progresses in many interdisciplinary areas such as energy and decarbonization, water, food, air, human health and medicine, it is being expected that great changes occur in the education of chemical engineering.

Keywords: Chemical engineering education, Perspective, Green, Biotechnology, Biomedical, Nanotechnology, Microfluidics, Sustainable development

1- Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology, 14588-89694, Tehran, Iran. (Corresponding author). E-mail: msoltanieh@sharif.edu

2- Department of Chemical Engineering, Sistan and Balouchestan University, 98167-45587, Zahedan, Iran. E-mail: rahbarrahimi@gmail.com

3- Department of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, 16846-13114, Tehran, Iran. E-mail: torajmohammadi@iust.ac.ir

4- Department of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, 16846-13114, Tehran, Iran. E-mail: ashrafi@iust.ac.ir

5- Department of Chemical Engineering, Isfahan University of Technology, 86156-83111, Isfahan, Iran. E-mail: zarghami@iut.ac.ir

(All Authors: Member of the Chemical Engineering Branch of the Academy of Sciences)

Contents

Iranian Journal of Engineering Education

Volume 26, No. 103, Autumn 2024

- *A review of chemical engineering education: Past, present and future directions in Iran and the world* / M. Soltanieh, R. Rahimi, T. Mohammadi, S. N. Ashrafizadeh and S. Zarghami
- *Green chemical engineering* / E. Vashghani-Farahani and S. Rafiyan
- *Role of digital technologies for improving chemical engineering education* / A. M. Sahlodin and R. Sotudeh-Gharebagh
- *Nanotechnology in chemical engineering* / A. H. Moshtaghi, R. Babakhanlou, M. Yavari, A. Moazzeni and M. Shariaty-Niassar
- *Biotechnology in chemical engineering* / M. Vossoughi, M.J. Saghafi and F. Fuladi Talari
- *Chemical engineering role in developing biomedical engineering* / E. Vashghani-Farahani and S. Rafiyan
- *Central role of engineers' lived experience in innovation and improvement of educational quality* / S. Shahgoli, A. Pourebrahimi-Alamdari, R. Ale-Mahmoud and R. Sotudeh-Gharebagh
- *English Abstracts of the Articles*

Editorial Board:

Prof. Khodayar Abili / University of Tehran
Prof. Godarz Ahmadi/Professor of Robert Hill University, USA
Prof. Mehdi Bahadori Nezhad / Fellow, Academy of Sciences
Prof. Parviz Davami / Fellow, Academy of Sciences
Prof. Mohammad Reza Eslami/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Javad Faiz / Fellow, Academy of Sciences
Prof. Mohammad Hossein Halimi / Fellow, Academy of Sciences
Prof. Rezvan Hakimzadeh / University of Tehran
Prof. Jalal Hejazi / Associate member, Academy of Sciences
Prof. Parviz Jabbehdar Maralani/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Gholamali Mansouri / Professor, University of Illinois, Chicago, USA
Prof. Mohammad Modares Yazdi/ Associate member, Academy of Sciences
Prof. Ezatolah Naderi/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Rahbar Rahimi/ University of Sistan and Balochestan
Prof. Mohammad Shahidepour / Professor and Head of Electrical and Computer Engineering Department at Illinois Institute of Technology-USA
Prof. Ebrahim Shirani/ Associate member, Academy of Sciences
Prof. Mehdi Sohrabi/ Associate member, Academy of Sciences
Prof. Saeed Sohrabpour/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Jafar Towfighi/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Hassan Zohoor/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Mahmood Yaghoubi/ Fellow, Academy of Sciences

Editorial Advisory Board:

Prof. Abbas Afshar/ Iran University of Science and Technology
Prof. Faramarz Afshar Taremi/ Amirkabir University of Technology
Prof. Ali Ashrafzadeh/ K. N. Toosi University of Technology
Prof. Ali Haerian Ardakani/ Ferdowsi University of Mashhad
Prof. Mohammad Reza Aref/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Tahereh Kaghazchi/ Amirkabir University of Technology
Prof. Naser Kanani/ Technische Universität Berlin
Prof. Ali Kaveh/ Fellow, Academy of Sciences
Prof. Ali Khaki Sediq/ K. N. Toosi University of Technology
Prof. Mojtaba Mahzon/ Shiraz University
Prof. Ali Meghdari/ Sharif University of Technology
Prof. Hossein Memarian/ Associate member, Academy of Sciences
Prof. Ali Movaghar Rahim Abadi/ Sharif University of Technology
Prof. Masomeh Nasrin Kenari/ Sharif University of Technology
Prof. Mohammad Hassan Panjeshahi/ University of Tehran
Prof. Jalali Agha Rashed Mohassel/ University of Tehran
Prof. Mahmoud Shakeri/ Amirkabir University of Technology
Prof. Abbas Shoja Sadati/ Tarbiat Modares University
Prof. Mohammad M. Shokrieh/ Iran University of Science and Technology
Prof. Naser Taleb Bidokhti/ Shiraz University
Prof. Naser Towhidi/ University of Tehran
Prof. Manochehr Vosoghi/ Sharif University of Technology

This Journal Appreciate the Collaboration of Iranian Society of Engineering Education

Index by:

DOAJ
Islamic World Science Citation Center (ISC)
ProQuest
Civilica
Creative Commons (CC)
Eurasian Scientific Journal Index (ESJI)
Google Scholar
Magiran
EBESCO
Pearson
World Book
BRITANNICA
VIRA SCIENCE
Scientific Indexing Services (SIS)
J-Gate
Science Explore
Research bib (Academic Resource Index)
Advanced Sciences Index (ASI)
GANJINE-YE ASNAD
SID (Scientific Information Database)
ROAD

IN THE NAME OF GOD



Department of Engineering Sciences

Iranian Journal of Engineering Education

Vol. 26 No. 103 Autumn 2024

Proprietor: The Academy of Sciences of IR Iran

Managing Director: Prof. Mahmood Yaghoubi

Editor-in-Chief: Prof. Mahmood Yaghoubi

Guest Editor: Prof. Jafar Towfighi

Office Manager: Dr. Mitra Molaei Parvareh

Persian Editor: Miss. Atefeh Ghanbari

Page Layout: Mr. Majid Mirabzadeh

Research and artistic design: Dr. Mohammad Hossein Halimi

Computer design of geometric patterns: Miss. Maryam Dehnadi

Cover design and layout: Mr. Khairullah Asghari

This Journal is Open Access

Mailing Address: Academies & National Library Exit,
Shahid Haghani Exp., Tehran, 1537633111, IR Iran

P. O. Box: 19395-5318

Tel: +98 21 88190433

Fax: +98 21 88656216

E-Mail: ijee78@ias.ac.ir

Website: <http://ijee.ias.ac.ir>

ISSN: 1607-2316

E-ISSN: 2676-4881

DOI: 10.22047/ijee

DOR: 20.1001.1.16072316

IRANIAN JOURNAL OF ENGINEERING EDUCATION

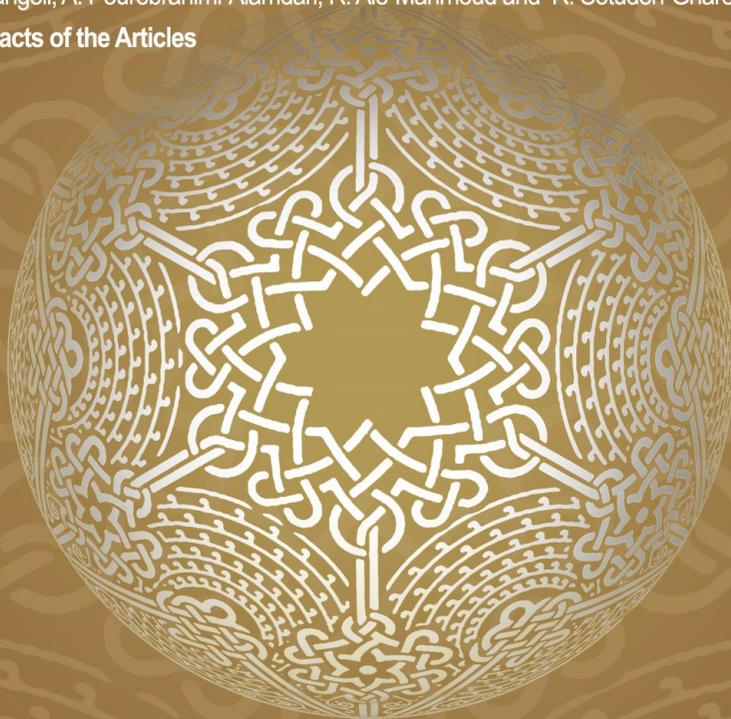
The Academy of Sciences
I. R. Iran

Department of Engineering Sciences

Special Issue for Chemical Engineering

■ Number 103 ■ Volume 26 ■ Autumn 2024

- ◆ **A review of chemical engineering education: Past, present and future directions in Iran and the world/** M. Soltanieh, R. Rahimi, T. Mohammadi, S. N. Ashrafzadeh and S. Zarghani
- ◆ **Green chemical engineering/** E. Vashghani-Farahani and S. Rafiyan
- ◆ **Role of digital technologies for improving chemical engineering education /** A. M. Sahlodin and R. Sotudeh-Gharebagh
- ◆ **Nanotechnology in chemical engineering/** A. H. Moshtaghi, R. Babakhanlou, M. Yavari, A. Moazzeni and M. Shariaty-Niassar
- ◆ **Biotechnology in chemical engineering /** M. Vossoughi, M. Javad Saghafi and F. Fuladi Talari
- ◆ **Chemical engineering role in developing biomedical engineering /** E. Vashghani-Farahani and S. Rafiyan
- ◆ **Central role of engineers' lived experience in innovation and improvement of educational quality/** S. Shahgoli, A. Pourebrahimi-Alamdari, R. Ale-Mahmoud and R. Sotudeh-Gharebagh
- ◆ **English Abstracts of the Articles**



E-ISSN: 2676-4881

ISSN: 1607-2316

DOI: 10.22047/ijee

DOR: 20.1001.1.16072316