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 بیست‌وپنج 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 ضدمیکروبی، کاربردهای بسته‌بندی فعال برای مواد غذایی، منسوجات بر پایه نانوالیاف الکتروریسی‌شده، 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 هـ. 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 منجرگردید. 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 به‌دست می‌آید، با تبحر علمی به کار می‌رود تا راه‌های اقتصادی استفاده از مواد و انرژی را به نفع بشریت توسعه دهد[1].

از زمانی که مفهوم عملیات واحد را جورج دیویس[2] (۱۹۰۸) و آرتور لیتل[3] (۱۹۱۵)، و پدیده‌های انتقال را بیرد[4]، 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 دانش آموختگان 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 هـ.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 هـ.ش.) و پلی‌تکنیک تهران (دانشگاه صنعتی امیرکبیر۱۳۳۶ هـ.ش) را می‌توان شروع رسمی آموزش مهندسی شیمی در کشور دانست. ساختار آموزشی دوره‌ها در ابتدا مبتنی بر تربیت نیروی انسانی برای صنایع نفت، به‌ویژه 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، بسپاری، 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 طوری‌که 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 هیچ گرایشی 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 خودروی بدون نیاز به سوخت فسیلی و خودران، واقعیتی تجاری است و انتظار احداث پالایشگاه "خودران" یا تمام‌اتوماتیک با کمترین میزان آلایندگی و با اندک کارکنان نیز انتظاری بسیار نزدیک به واقعیت است[1]. 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. به‌علاوه، 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

1- Mardom Salari Daily Newspaper, 1399 [Ref]: https://www.pishkhan.com/news/204683

بالی هستند که علم را به پرواز درمی‌آورند. پاسخ به این سؤال که کدام یک از آموزش یا پژوهش مقدم بوده است، پیچیده و گنگ است. به نظر می‌رسد اولین متون آموزشی، نتیجه یافته‌های 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 می‌توان حد و مرزی برای آن قائل شد. به عبارت دیگر، امروزه مهندسی شیمی در زمینه‌های زیست‌فناوری، نانوفناوری، پزشکی و محیط زیست نیز حضور دارد (Dobbelaere et al., 2021; Dutta, 2012; Ogawa, 2007; Rashtchian & Shayegan, 2001).

در این مقاله پس از مروری بر پژوهش‌های مرتبط با آموزش مهندسی شیمی که طی بیست‌وپنج سال اخیر (۱۳۷۸-۱۴۰۲) در ایران انجام شده و در فصلنامه آموزش مهندسی (از انتشارات فرهنگستان علوم) منتشر شده‌اند، سیر تحولات مهندسی شیمی از ابتدای شکل‌گیری در جهان و ایران تا کنون، زمینه‌ها و رشته‌های جدید در مقاطع مختلف آموزش مهندسی شیمی، جایگاه و نقش مهندسان شیمی در توسعه علم و فناوری... در گذشته و حال، و چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی مهندسان شیمی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

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

در این بخش، پژوهش‌های منتشرشده در فصلنامه آموزش مهندسی ایران طی ۲۵ سال اخیر و پیشنهادهای ارائه‌شده توسط اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها، به منظور بهبود برنامه آموزشی مهندسی شیمی، به‌اختصار ارائه شده است.

گودرزنیا در سال ۱۳۷۸ ضمن تبیین زمینه‌های 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 سوگیری‌های مهندسی شیمی در قرن بیستم، شرایط حال حاضر، گرایش‌های مختلف و کاربردهای آنها در صنعت و پیش‌بینی 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 کرده‌اند و پیشنهادهایی را به منظور بهبود آن با توجه به نیازهای صنعت و پیشرفت‌های علمی دنیا ارائه کردند (Taheri & Rahimi, 2000). رشتچیان و شایگان در سال ۱۳۷۹ به بیان ضرورت منحصر نساختن محتویات برنامه آموزشی مهندسی شیمی دانشگاه‌های مختلف به یک برنامه خاص و لزوم متناسب‌سازی دروس و موضوعات برنامه آموزشی مهندسی شیمی با ظرفیت‌ها و امکانات بومی هر دانشگاه و همچنین نیازهای صنعتی و منابع طبیعی آن منطقه پرداختند (Rashtchian & Shayegan, 2001). نگرش‌های 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 آماری 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 مقدورات 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 واشقانی فراهانی 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 (Sotu-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 رآکتورهای 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 & Haghighi, 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، ازجمله جنبه تقویت استفاده از رایانه در آن پرداختند (Bozorgmehri & Shahrokhi, 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 کمّی 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 بدین‌وسیله، 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، پیردشتی 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، ازجمله 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- ریزسیالش[1]، دانش و فناوری کنترل حجم‌های بسیار کوچک سیالات، در جنبه‌های مختلف مهندسی شیمی مانند جداسازی، سنتز نانوذرات، ریزراکتورها 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 ریزسیالش، 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 (Ganjizade & Ashrafizadeh, 2017).

در سال‌های اخیر توسعه زیست‌شناسی به پیدایش حوزه‌های میان‌رشته‌ای مانند زیست‌فناوری[2]، مهندسی بافت[3]، مهندسی زیست‌مولکولی[4] 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 (Ganjizade et al., 2017).

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

1- Nano-microfluidics
2- Biotechnology
3- Tissue engineering
4- Bimolecular engineering

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 Gharebagh, 2018).

علی‌رغم این که مهندسی شیمی نقشی اساسی در طراحی محصول شیمیایی یا مهندسی محصولات شیمیایی[1]، که در دهه‌های آغازین قرن بیست‌ویکم 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، به‌روز 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[2] 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).

1- Chemical product engineering
2- Data science

در جمع‌بندی مطالعات انجام‌شده طی بیست‌وپنج 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 به‌موقع 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

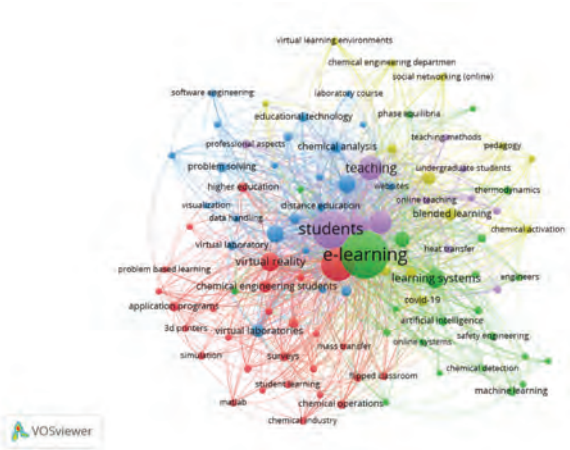
در ادامه این پژوهش، تحولات و چشم‌اندازهای پیش رو مبتنی بر دو رویکرد آموزشی و پژوهشی در دو بخش مجزا، بررسی شده است. در بخش رویکردهای جدید در آموزش مهندسان شیمی، روش‌های گوناگون و جدید مبتنی بر فناوری‌های دیجیتال مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به پیشرفت فناوری و همچنین نیازهای دوران مدرن، همه رشته‌های 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

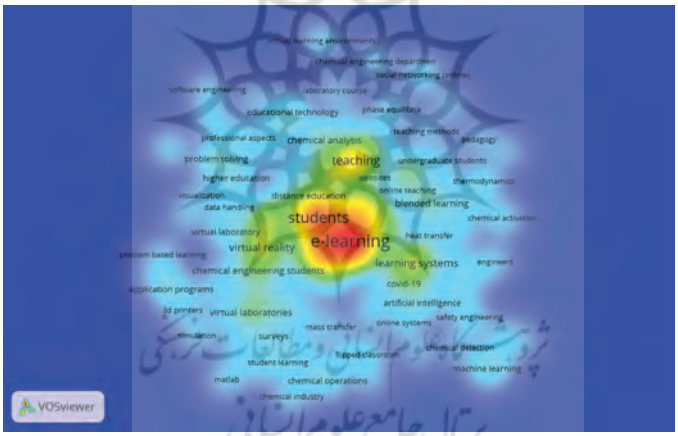
دانشجویان در آموزش مهندسی نقش بسیار مهمی دارند. آموزش به دانشجویان کمک می‌کند تا مهارت‌های لازم برای انجام کارهای مهندسی را کسب کنند. با توجه به پیشرفت فناوری، آموزش به صورت الکترونیکی[1] نیز مورد توجه قرار گرفته است. در آموزش الکترونیکی، از فناوری‌های رایانه‌ای برای ارائه محتوای آموزشی استفاده می‌شود. 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 به‌دست‌آمده از نرم‌افزار وی‌اواس ویوور[2] (شکل ۱)، می‌توان به ارتباط بین آموزش مهندسی، آموزش الکترونیکی و دانشجویان پی برد. 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 دانشجو، آموزش از راه دور[3]، یادگیری تلفیقی[4]، یادگیری برخط و واقعیت مجازی[5] 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)



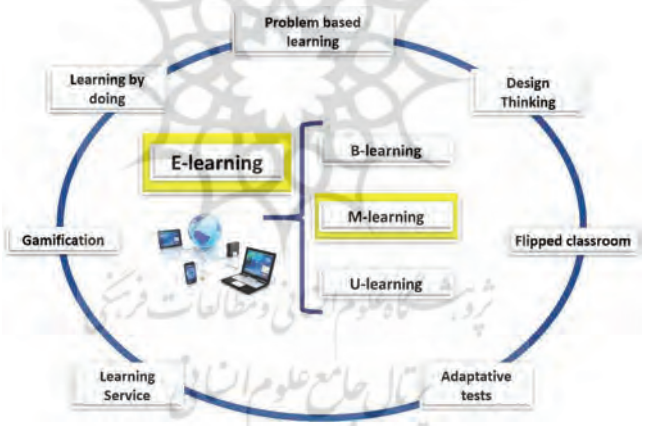
شکل ۱. نقشه پراکندگی کلیدواژه‌ها بر اساس روابط هم‌زمانی تألیفات مرتبط با آموزش کارشناسی مهندسی شیمی (Chemical engineering education) و آموزش الکترونیکی (E-learning)



شکل ۲. نقشه تراکم کلیدواژه‌ها بر اساس روابط هم‌زمانی تألیفات مرتبط با آموزش کارشناسی مهندسی شیمی (Chemical engineering education) و آموزش الکترونیکی (E-learning)

دانشجویان، به‌عنوان عناصر حیاتی در فرایند آموزشی، نقش بسیار حیاتی و اساسی در ایجاد یک محیط یادگیری پویا و مؤثر دارند. اهمیت دادن به اثرگذاری دانشجویان در کلاس درس می‌تواند از طریق اعمال روش‌های نوین مبتنی بر فعالیت‌های گروهی توسعه یابد و در نتیجه، نه تنها نقش دانشجویان در فرایند یادگیری، بلکه تجربه آموزشی و تنوع مواجهات آموزشی نیز افزایش می‌یابد. در این راستا، استفاده از ابزارهای دیجیتال، توانایی یادگیری به صورت خودآموز را در دانشجویان ارتقاء می‌دهد. ابزارهای مزبور قابلیت ارائه بازخوردها و پرسش و پاسخ فوری با قابلیت به اشتراک‌گذاری منابع آموزشی را فراهم می‌کنند.

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[1] مانند یادگیری تلفیقی، یادگیری فراگیر[2] و یادگیری همراه[3] است. یادگیری تلفیقی ترکیبی از یادگیری متداول[4] و یادگیری مبتنی بر اینترنت[5] است که مزایای اصلی هر دو روش را ارائه می‌دهد. یادگیری فراگیر شامل استفاده از رایانه‌ها و ابزارهایی، مانند ویدئوکنفرانس یا واقعیت افزوده[6] 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 دانشجوها 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[7] 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[8] در طول قرنطینه ناشی از ویروس کووید-۱۹ (از مارس ۲۰۲۰ تا دسامبر ۲۰۲۰)، به

1- Methodologies
2- Ubiquitous learning (U-learning)
3- Mobile learning (M-learning)
4- Conventional
5- Internet based learning
6- Augmented reality
7- Face-to-face approach (F.T.F)
8- Department of Chemical and Petroleum Engineering, United Arab Emirates University

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[1] ثبت نام کرده بودند، انجام شد. تمامی دانشجویان به پرسش‌نامه پاسخ دادند. همچنین، ۸۳ نفر از ۱۲۵ دانشجوی سال چهارم که در درس طراحی رآکتور[2] شرکت کرده بودند، در نظرسنجی شرکت کردند. نظرسنجی دوم به موارد مرتبط با پروژه فارغ‌التحصیلی (از جمله منابع علمی کتابخانه و مسائل علمی و...) پرداخت. پاسخ دانشجویان در آن دو درس به پرسش‌نامه مرتبط با محیط خانگی[3]، اکثراً با بازخورد مثبت همراه بود. به‌عبارتی، نزدیک به یا بیشتر از ۵۰٪ با انتخاب گزینه‌های موافق یا کاملا موافق[4] 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[5]، انتظارات دانشجویان بیشتر بر پاسخ‌هایی در دامنه خنثی تا موافق[6] تمرکز داشت. پاسخ‌های دریافتی از هر دو درس تقریبا مشابه بودند. در مقایسه با حالت معیار روش آموزش چهره به چهره، دانشجویان سال آخر که در حال انجام پروژه فارغ‌التحصیلی به‌صورت برخط بودند، با مشکلاتی نظیر مکالمات علمی با مشاوران دانشگاهی و اعضای گروه در انجام وظایف هفتگی پروژه فارغ‌التحصیلی خود روبه‌رو شده بودند (Ghasem & Ghannam, 2021).

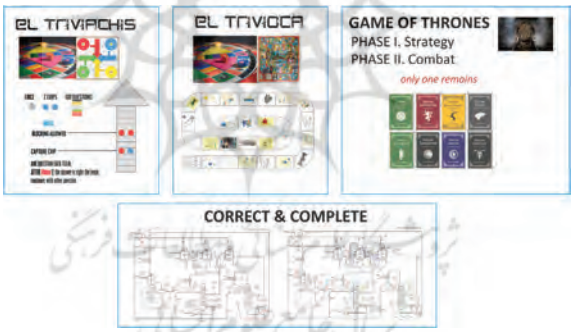
۳-۱-۲. آموزش مبتنی بر بازی[7]

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 سازمان‌یافته تعریف شود که دارای قوانین و اهداف مشخص باشد و با هدف ارائه سرگرمی طراحی شده باشد. اصطلاح "بازی‌سازی[8]" توسط یک طراح بازی به نام نیک پلینگ[9] در سال ۲۰۰۲ ابداع شد. بازی‌سازی بعداً در امر آموزش نیز اعمال شد و با وجود تعاریف متعدد، می‌توان از تعریف ارائه‌شده توسط دترینگ[10] و همکارانش به عنوان مرجع استفاده کرد: "استفاده از عناصر بازی در زمینه‌های غیربازی[11]"، جایی که عناصر بازی

1- Engineering and strength of materials
2- Reactor design
3- Household environment
4- Agree or strongly agree
5- Online assessment tools
6- Neutral to agree
7- Game-based learning
8- Gamification
9- Nick pelling
10- Deterding
11- The use of game elements in non-game contexts

ممکن است شامل پاداش‌ها، نشان‌ها، سطح‌ها، امتیازها، رتبه‌ها، جدول‌های رده‌بندی یا گواهینامه‌ها باشند. درس کنترل فرایند[1] 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[2] 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[3]، آموزش همتایان[4] یا بازی‌های جدی[5]) بسیار مفید باشد. در این راستا، دیاز و همکاران اجرای بازی‌های جدی را در جلب توجه دانشجویان مفید و مثمر ثمر 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

1- Process control
2- Flowsheet
3- Flipped classroom
4- Peer instruction
5- Serious games

محیط‌های آموزشی می‌توانند ویژگی‌ها و اهداف متفاوتی داشته باشند (Whitton, 2012).

داسیلوا جونیور[1] 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[2] و آی‌اواس[3] 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. کاسرتا و همکارانش (Caserta et al., 2021) نتایج استفاده از سامانه پاسخگویی دانشجو 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 سکوهای[4] 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 دانشجوها
- **محتوای تطبیقی و خلاقیت**: ایجاد تطبیق میان وظایف و پیچیدگی‌ها، فراهم کردن چالش‌ها، اجازه دادن به دانشجوها برای گسترش بازی یا ایجاد محتوای جدید
- **کاوش**: اجازه دادن برای انتخاب بین گزینه‌ها، فراهم کردن مسیرهای راهنمایی و اجازه دادن به دانشجوها برای کاوش آزاد

1- da Silva Júnior
2- Android
3- iOS
4- Platforms

جدول ۱. سکوهای مختلف مورد استفاده در مطالعات موردی در رشته مهندسی شیمی (Díaz-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 دیجیتال‌سازی[1]، 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 سه‌بعدی 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. به‌علاوه، کاربران می‌توانند حرکت دوربین مجازی را در داخل محیط یادگیری تعاملی

1- Digitalization

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 عایق‌بندی 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، کنترل‌شده 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[1]" 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) رآکتور غشایی واقعی و (راست) رآکتور 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 اخلال امکان‌پذیر است. فعالیت‌های مشابه چند نفره می‌توانند توانمندی‌های دانشجویان دانشکده را برای پذیرفتن موقعیت‌های صنعتی بعد از

1- What-if

فارغ‌التحصیلی تقویت نمایند.

۵. محتوای آموزشی با استفاده از مشارکت فعال دانشجویان، نه تنها به عنوان کاربران بلکه در برنامه‌ریزی و ایجاد محتوا، بهبود می‌یابد و به‌روز می‌شود. به‌عنوان مثال، توسعه یک کتابخانه از طراحی فرایندهای شیمیایی در محیط مجازی، شامل تلاش‌های موفق و ناموفق، برای دانشجویان و استادان مفید خواهد بود.

۶. محیط مجازی فرصت‌های عالی را برای استفاده از روش آموزش هم‌تایان فراهم می‌کند زیرا ایجاد واقعیت مجازی برای دانشجویان (برای مثال، یک طراحی فرایند شیمیایی) می‌تواند به طور کاملاً ناشناس انجام شود و توسط هم‌دانشجویان ارزیابی گردد.

۳-۲. جبهه‌های تحقیق و جهت‌گیری‌های جدید پژوهشی در مهندسی شیمی

جبهه‌های تحقیق در مهندسی شیمی اهمیت بسیاری دارند چراکه حوزه صنایع شیمیایی، به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های صنایع تولیدی در جهان شناخته می‌شود و در زمینه‌های 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 درحال‌گسترش که بیشتر مورد توجه محققان بین‌المللی قرار دارند، آورده شده‌اند. همچنین بر اساس جهت‌گیری‌های پژوهش‌های صورت‌گرفته و نتایج منتشرشده در انتشارات معتبر، کلیدواژه‌های قابل توجه‌تر انتخاب شده‌اند و در پایگاه شاخص‌های اساسی علم[1] در بخش جبهه‌های تحقیق مورد جستجو قرار گرفته‌اند. بر این اساس و در مجموع پنج زمینه مختلف که در ادامه آورده شده‌اند، به عنوان جهت‌گیری‌های جدید و روبه‌رشد تحقیقاتی در این حوزه پیش‌بینی می‌شوند.

۳-۲-۱. مایسل‌های بسپاری پاسخگو به محرک[2]، تحویل دارو[3]، درمان سرطان[4]

سرطان، یکی از جدی‌ترین بیماری‌ها و علت اصلی مرگ در سراسر جهان است. شیمی‌درمانی همچنان یکی از راه‌های متداول درمان سرطان است. اگر چه تا کنون چندین نوع از حامل‌های نانوبسپاری برای درمان سرطان مورد تأیید قرار گرفته‌اند اما جستجو برای سامانه‌های بهبودیافته و مواد جایگزین، همچنان ادامه دارد. مایسل‌های بسپاری پاسخگو به محرک، به عنوان یک سکوی نوظهور و جذاب برای انتقال داروهای کم‌حلال برای درمان سرطان، در پاسخ به محرک‌های خارجی (مانند تغییرات دما، نور، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی یا شدت اولتراسونیک) و داخلی (مانند تغییرات pH، غلظت) به کار می‌روند. در مقایسه با سامانه‌های سنتی انتقال دارو، مایسل‌های بسپاری دارای

1- Essential Science Indicators, ESI
2- Stimuli-responsive polymeric micelles
3- Drug delivery
4- Cancer therapy

ویژگی‌هایی نظیر اندازه کوچک، پایداری خوب، نفوذپذیری و دفع بهبودیافته[1]، حلالیت بهبودیافته داروهای کم‌حلال و سمیت کم داروها هستند. مایسل‌های بسپاری همچنین می‌توانند خطرات مرتبط با نورکافت[2] 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).

۳-۲-۲. فیلم‌های بسته‌بندی فعال ضدمیکروبی[3]، فیلم‌های کامپوزیت آنتی‌اکسیدان ژلاتین/کرکمین[4]، بسته‌بندی فعال برای مواد غذایی[5]

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 نتیجهٔ کاهش کیفیت، آلودگی میکربی و آسیب بسته‌بندی، در طول زنجیره تأمین غذا، از تولید محصولات کشاورزی و دامداری تا حمل‌ونقل، فراوری، ذخیره‌سازی، فروش و مصرف ضایعات مواد غذایی رخ می‌دهند. آلودگی به سموم یا ریزاندامگان[6]های 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 ازجمله 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 غذاهای 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 ضدمیکروب‌ها، 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 آلژینات)، پروتئین‌ها و مواد چربی به عنوان مواد بسته‌بندی زیست‌تخریب‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند

1- Enhanced permeability and retention, EPR
2- Photolysis
3- Antimicrobial active packaging films
4- Antioxidant Gelatin/Curcumin composite films
5- Active food packaging
۶- ریزاندامگان برابرنهاده 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 الکتروریسی‌شده پیشرفته[1]، کاربردهای ترمیم زخم[2]

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 زخم پوش‌های 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 الیاف بسپاری است. در دو دهه اخیر، نانوالیاف الکتروریسی‌شده 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 الیاف با قطرهایی تا چند صد نانومتر شناخته می‌شود که حداقل ده‌برابر کوچک‌تر از الیاف ساخته‌شده به روش‌های سنتی الکتروریسی مذاب، خشک و تر هستند .(Kanjwal & Ghaferi, 2022; Rezvani Ghomi et al., 2022; Wu et al., 2022)

۳-۲-۴. 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 فراهم‌کردن 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

1- Advanced electrospun nanofiber yarn-based textiles
2- Wound healing applications

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 (Birniwa 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[1] 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[2] 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 (Sangamnere et al., 2023).

فناوری‌های جداسازی غشایی[3] به عنوان روش‌هایی مؤثر برای تولید آب با کیفیت بالا شناخته می‌شوند. اسمز معکوس[4]، نانوفیلتراسیون[5]، اولترافیلتراسیون[6] و میکروفیلتراسیون[7] به عنوان فرایندهای غشایی با گرادیان فشاری، اسمز مستقیم فشاری[8] و اسمز مستقیم[9] به عنوان فرایندهای غشایی با اختلاف فشار اسمزی (غلظت)، تقطیر غشایی[10] به عنوان فرایندهای غشایی با گرادیان دمایی، الکترودیالیز[11] به عنوان فرایندهای غشایی با اختلاف‌پتانسیل الکتریکی، دیالیز[12]، غشای مایع[13] و غشاهای مولکول‌نگاری‌شده[14] به عنوان فرایندهای غشایی با گرادیان غلظت برای تصفیه آب و پساب استفاده می‌شوند (Shabani et al., 2020; Zarghami et al., 2022).

تغلیظ انجمادی[15] 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، هفت‌برابر 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
2- Microbial electrolysis cell technology (MEC)
3- Membrane process technologies
4- Reverse osmosis
5- Nanofiltration
6- Ultrafiltration
7- Microfiltration
8- Pressure retarded osmosis
9- Forward osmosis
10- Membrane distillation
11- Electrodialysis
12- Dialysis
13- Liquid membrane
14- Molecularly imprinted membrane
15- Freeze concentration

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[1] 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[2] (شامل الکترولیز[3]، نورکافت[4]، گرماکافت[5])، تبدیل ترموشیمیایی زیست‌توده[6] (آذرکافت زیست‌توده[7] و گازی‌سازی زیست‌توده[8]) و تبدیل زیستی[9] (شامل نورکافت زیستی[10] و تخمیر[11]) توسعه یافته‌اند (Sarmah et al., 2023; Wang et al., 2024).

۳-۲-۵. کاربردهای یادگیری ماشین و هوش مصنوعی در مهندسی شیمی[12]

در سال‌های گذشته، استفاده از مدل‌سازی ریاضی برای مهندسان شیمی بسیار ارزشمند بوده است تا بتوانند فرایندهای شیمیایی را درک و طراحی کنند. اکتاو لونشپیل[13] 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 انعطاف‌پذیری و دقت و سرعت اجرا نسبت به فنون مدل‌سازی 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 جعبه‌ابزار مدل‌سازی مهندسان شیمی خواهد شد (Dobbelaere et al., 2021).

امروزه هوش مصنوعی به محور تحقیقات تبدیل شده است و به بسیاری از حوزه‌های تحقیقاتی، مانند خودروهای بدون راننده، پردازش زبان طبیعی، رباتیک هوشمند، تشخیص چهره و تشخیص بیماری‌ها انرژی تازه‌ای بخشیده است. روش‌های هوشمند به همراه علوم رایانه‌ای توسعه‌یافته در سال‌های اخیر به‌روزرسانی شده‌اند و فرصت‌های نوآوری در زمینه تصفیه آب را ایجاد کرده‌اند. برای مثال، روش‌های هوش مصنوعی قادر هستند پارامترهای آماده‌سازی مواد (غشا) و فرایند (ساخت غشا) را در تصفیه آب آشامیدنی بهینه‌سازی کنند تا هزینه‌های تولید آب را کاهش دهند. در نهایت، با توجه به ویژگی‌های یادگیری خودکار و خودتشخیصی هوش مصنوعی، امکان ایجاد سازوکارهایی برای دریافت بازخورد کامل و یک سامانه کنترل خودکار بادقت بالا بر مبنای فناوری‌های هوش مصنوعی وجود دارد (Li et al., 2021).

امروزه به‌کارگیری طراحی آزمایش[1]، 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 یکپارچه‌سازی دو فرایند یادگیری ماشین و طراحی آزمایش، یک طراحی آزمایش انعطاف‌پذیرتر و کارآمدتر به دست می‌آید. این مفهوم، به نام یادگیری ماشین فعال[2]، انتخاب مؤثرتر شرایط آزمایشی را ممکن می‌سازد (Ureel et al., 2023).

پیشرفت‌هایی که تاکنون در یادگیری ماشین حاصل شده است، راهکارهای جدیدی را برای حل مشکلات چالش‌برانگیز مهندسی واکنش، از جمله طراحی کاتالیست، شناسایی سازوکار و پیش‌بینی شرایط و محصولات واکنش، فراهم کرده است. امروزه مشخص شده است که فناوری یادگیری ماشین بسیار مفید است و می‌تواند از تجربه گذشته بیاموزد و الگوهای پیچیده را از داده‌های موجود به دست آورد. فناوری مزبور قادر است برای جایگزینی برخی از آزمایش‌ها یا محاسبات زمان‌بر و کارآمد مورد استفاده قرار گیرد (Gao, 2024).

۴. آینده و چشم‌انداز مهندسی شیمی در ایران و جهان

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

1- Design of experiments, DoE
2- Active machine learning

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 سی‌سال 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[1]. 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[2] 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[1] 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[2] و نیز عوامل اقتصادی و اجتماعی که بر این رشته تأثیرگذار بوده‌اند
- بررسی آینده مهندسی شیمی در ده تا سی‌سال 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

1- Amundson
2- R&D

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: راه حل‌های پایدار مهندسی برای سامانه‌های محیط زیستی

فصل پنجم: مهندسی پزشکی هدفمند و قابل دسترسی

فصل ششم: تولید انعطاف‌پذیر و اقتصاد چرخه‌ای[1]

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[1] شیمیایی، فیزیکی و زیستی را برای طراحی فرایندها و تولید مواد و محصولات، به منظور رفاه و بهره‌برداری جامعه با هم ترکیب[2] 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 بسپارهای 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 به‌کار 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[3] 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، هنگامی‌که 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

1- Elements 2- Integrate 3- Genomes

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 و 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، تجمیع 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[1]، از منبع تا مصارف پایین‌دستی، 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 تصوری 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

1- Energy value chain

مهمی برای ادامه به‌کارگیری این تبحر در منابع و حامل‌های انرژی غیرفسیلی در اختیار دارند.

در درازمدت، حصول به انتشار کربن صفر خالص[1]، 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 سبد 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 ذخیره سازی 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 نقطه‌نظر 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

1- Net zero carbon emission

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[1]، 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[2]، 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[3] 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 آئروسل‌ها، نقش داشته‌اند و در آینده هم فرصت کمک به بهبود کیفیت هوا با پیشبرد شناخت بیشتر از ماهیت و فیزیک آئروسل‌ها 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 زیست شناسی و زیست شیمی با هدف درمان‌ها و معالجه بیماری‌های انسان بوده است و این روند ادامه دارد. مشارکت‌های ویژه مهندسان شیمی، شامل طراحی رآکتور و جداسازی و اخیراً مهندسی سلول، فرمولاسیون، و دیگر جنبه‌های تولید دارو است. از زمان نخستین تلاش‌ها برای جداسازی مولکول‌های کوچک از اندامگان[1]های زیستی و کنترل و بازمهندسی رفتار سلول، توسعه محصولات مشتق‌شده زیستی، با پیشرفت‌های عمده ناشی از فناوری نوترکیب 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[2] 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[3] در ایمنی‌شناسی، مانند ایمنی‌درمانی سرطان، طراحی واکسن و دارودرمانی بیماری‌های عفونی و اختلالات خودایمنی می‌شود. توسعه روش‌های کاملاً غیرتهاجمی برای دارورسانی، یک مرز هیجان‌انگیز راهبردهای دستگاه‌محور و موادپایه را نشان می‌دهد.

مهندسان شیمی همچنین موقعیت خوبی برای پیشبرد کار با مخازن دارویی[4] با رهش پایدار و دارورسانی هدفمند، دارند. افزون بر این، تقاضا برای پادتن‌های تک‌دودمانی[5]، پروتئین‌های درمانی و داروهای پیام‌رسان ریبونوکلئیک اسید[6]، 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 برابرنهاده فرهنگستان برای واژه ارگانیسم است.

2- Systems-level
3- Quantitative chemical engineering
4- Depots
5- Monoclonal
6- mRNA

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 شیمی‌دان‌ها فراهم می‌کند.

تمام این چالش‌ها، فرصت‌هایی را برای مهندسان شیمی فراهم می‌کنند تا از رویکردهای نظام‌مند در مقیاس‌هایی از مولکول‌ها تا تولید انبوه صنعتی بهره گیرند و هماهنگی و همکاری بین رشته‌ها را اجرا کنند. فرصت‌ها برای استفاده از مهارت‌های مهندسی شیمی در ایمنی‌شناسی[1]، 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 دستگاهی 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[2] 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 مصرف کننده، 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 شیمی‌دان‌ها، 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[3] 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[4]

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

1- Immunology 2- mRNA 3- Personalized medicine
4- Circular economy

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 پیش‌بینی‌نشده 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[1] 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 مقرون‌به‌صرفه 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 اکسیژن‌دار، مانند زیست‌توده لیگنوسلولزی را فراهم می‌کنند، ارائه می‌دهد. مهندسان شیمی همچنین فرصت‌های قابل توجهی برای توسعه سامانه‌های تولیدی کوچک‌مقیاس و توزیع‌شده و فرایندهای نوآورانه در مقیاس بزرگ دارند که می‌توانند با تبدیل منابع فسیلی رقابت کنند.

چالش‌های موجود در طراحی فرایند، شامل لزوم بهبود تولید توزیع‌شده 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 توزیع‌شده 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 مقیاس‌یافته و یا با تولید کمتر، تشدید فرایند و گذر از خوراک‌های آلی با مبنای 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[1]، برای تولید مواد شیمیایی است.

۴-۷. مواد جدید و اصلاح‌شده برای قرن بیست‌ویکم

مهندسان شیمی نقشی کلیدی در توسعه مواد و فرایندهای جدید، از مقیاس مولکولی تا مقیاس بزرگ دارند. ترکیبی از تئوری، مدل‌سازی، شبیه‌سازی، 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 بسپار 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[2] است. علم کاربرد نانوذرات، هم در صنعت و هم در پزشکی، به سرعت توسط مهندسان شیمی در حال شتاب گیری است و این فرصتی برای پیشرفت‌های بزرگ و مهم فراهم می‌آورد. مهندسان شیمی نقشی اساسی در پیشبرد توسعه مواد زیستی[3]، هم برای مهندسی بازسازی[4] و هم برای فناوری اندام روی تراشه[5]، دارند و اصول مهندسی شیمی، در قلب درک و اصلاح تحویل هدفمند دارو[6]، 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:

سرمایه‌گذاری دولت و صنعت باید به سمت علم و مهندسی بسپار، با تمرکز روی ملاحظات چرخه عمر[7]، شبیه‌سازی چندمقیاسه[8]، هوش مصنوعی، و راه‌های ساختار/ خاصیت/ فرایندی[9]، 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 خالص‌سازی، 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 ابزاری استفاده کنند که داده‌ها را به اطلاعات مفید، دانش و فهم تبدیل نمایند. برخی از ابزارهای درحال‌ظهور، 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[1] 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 می‌کنند، 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[2] 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.

1- Real time
2- Open source codes

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 به‌خوبی می‌توان در یک درس جداگانه، درون دوره مهندسی جا داد. به‌علاوه، آموزش توأم با آزمایش و کار[1] یا آموزش میدانی، حائز اهمیت است و اکثر مهندسان شیمی که مورد نظرسنجی 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، تنوع‌بخشی 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 مدت‌زمان 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 تجدیدنظر 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 سازمان‌دهی‌شده 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 اقشار کنارگذاشته‌شده 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 نگه‌داشتن 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. به‌عنوان مثال، می‌توان به دانشجویانی که در دانشگاه‌هایی با وجاهت 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 سه 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 معرفی‌شده 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/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., Nikbakhsh, 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.ece.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.ece.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.ece.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.ece.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 curriculm. *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., & Ashrafizadeh, 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., & Ashrafizadeh, 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., & Ashrafizadeh, 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., Bělohlav, V., Jirout, T., & Bělohlav, 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.cej.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.cej.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., Haghighi, 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., Shojaossadati, 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). Chemcal 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 engineerrs 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., Misic, 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

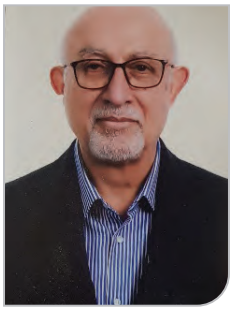
antimicrobial food packaging PLA nanocomposite foams loaded with eugenol cocrystals with prolonged release. *Chemical Engineering Journal*, *481*, 148407. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148407

- Moghaddas (Soltan Mohammadzadeh), J., & Haghighi, M. (2004). Kincetics 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.
- Sangamnere, 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.
- Whitton, 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.

دکترمحمد سلطانیه: 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 فرآیندهای 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 سلطانیه 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 رهبرِ 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 حبابی 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 فرآیندهای 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 دکترای خود را از دانشگاه مکگیل 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 ضرغامی: 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.