

## نقش مهندسی شیمی در توسعه مهندسی (زیست) پزشکی

ابراهیم واشقانی فراهانی<sup>۱</sup> و سعید رفیعیان<sup>۲</sup>

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

DOI: 10.22047/ijee.2024.447692.2064

DOR: 20.1001.1.16072316.1403.26.103.6.5

**چکیده:** در این مقاله کوتاه، نخست به نقش مهندسی شیمی در کاربردهای سلامت انسان، با تمرکز ویژه بر مهندسی (زیست) پزشکی<sup>۲</sup> اشاره می‌شود. سپس سابقه تاریخی این نقش در آغاز فعالیت مهندسان شیمی در این زمینه با تأکید بر موارد مهم، بررسی خواهد شد. در ادامه افق‌های پیش روی مهندسی شیمی در چند زمینه مهم کاربرد مهندسی شیمی در پزشکی مانند زیست‌مواد، سامانه‌های دارورسانی و مهندسی بافت، به صورت فشرده توضیح داده می‌شوند. سپس چگونگی کاربرد اصول مهندسی شیمی، در پیوند مهندسی شیمی و مهندسی بافت پزشکی بالینی<sup>۴</sup> به صورت فشرده بیان می‌شود. آنگاه به چگونگی پدیدار شدن درس‌های مربوط به گرایش مهندسی (زیست) پزشکی در برنامه آموزشی مهندسی شیمی و توسعه آن تا امروز، از جمله برنامه آموزشی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - زیست پزشکی در ایران پرداخته و در پایان نتیجه‌گیری کوتاه ارائه خواهد شد.

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

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

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

3- Biomedical Engineering

4- Translational Medicine

## ۱. مقدمه

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

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

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

۱- کاراندام‌شناسی برابر نهاد فرهنگستان برای واژه فیزیولوژی است.

۲- بسپار برابر نهاد فرهنگستان برای واژه پلیمر است.

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

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

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

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

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

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

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

1- Point-care  
4- Microfluidics

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

3- Swab

۱-۱. تاریخچه توسعه مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی

آدولف یوگن فیک، پزشک و کاراندام‌شناس آلمانی‌الاصل، یکی از اولین مهندسان زیست پزشکی بود. او علاوه بر توسعه رابطه سازنده برای شار نفوذ یا انتشار (۱۸۵۵)، پویایی عضلات و تولید گرما را مطالعه کرد. او همچنین چندین ابزار برای اندازه‌گیری‌های کاراندام‌شناختی توسعه داد، از جمله اولین دستگاه برای اندازه‌گیری فشار داخل چشم و یک فشارسنج برای اندازه‌گیری گرادیان فشار شریانی.

ویلهلم کولف، یک پزشک شاغل، اولین واحد کلیه مصنوعی ابتدایی را برای تصفیه خون در بیمارستانی در آمستردام در تابستان ۱۹۴۱ طراحی کرد. پیشرفت کولف از طریق بهبود در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ ادامه یافت و به حوزه تصفیه خون تبدیل شد.

مهندسی (زیست پزشکی) در مهندسی شیمی ظاهر شد زیرا برخی از پزشکان مبتکر در بوستون و نیویورک، مشکلات مهمی مانند جداسازی و تصفیه خون، جریان خون، اندازه‌گیری ویسکوزیته یا تنش برشی داشتند که باید با مهندسان شیمی مورد بحث قرار گیرد.

خاستگاه فعالیت‌های مهندسی (زیست پزشکی) در مهندسی شیمی ارتباط نزدیکی با توسعه پدیده‌های انتقال در مهندسی شیمی دارد. اد لئونارد دو مقاله مهم مهندسی شیمی را در زمینه زیست پزشکی، در مورد تجزیه و تحلیل انتقال نمک‌ها در دستگاه‌های تصفیه خون منتشر کرد (۱۹۵۹، ۱۹۶۰). لئونارد در سال ۱۹۶۹ برای کمک‌های اساسی در مهندسی و طراحی اندام‌های مصنوعی، برنده جایزه Allan P Colburn از AIChE شد.

ادوارد دبلیو مریل، استاد MIT، یکی از اولین پژوهشگران رفتار غیریوتنی خون تحت تنش برشی کم و متوسط بود (Mann et al., 2023). همچنین در جدول ۱ نمونه‌هایی از برخی تحقیقات مهم در زیست پزشکی که توسط مهندسان شیمی صورت گرفته است، به همراه سال و نام پژوهشگر آورده شده است.

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

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

## ۲-۱. زیست مواد

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

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

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

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

## ۳-۱. سامانه های دارورسانی

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

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

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

#### ۱-۴. مهندسی بافت

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

1- Depots

۲- ایمنی‌شناسی برابرانهاده فرهنگستان برای واژه ایمونولوژی است.

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

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

## ۱-۲. زیست‌مواد

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

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

## ۲-۲. مواد برای مهندسی بازسازی

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

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

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

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

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

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

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

## ۲-۳. مواد برای دارورسانی

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

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

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

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

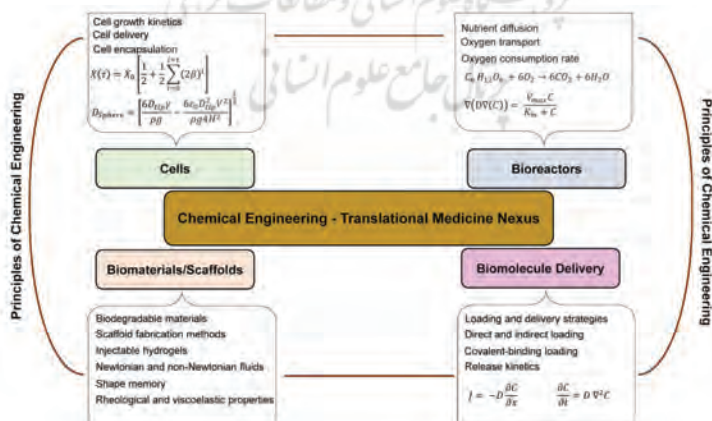
## ۲-۴. مهندسی بافت

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

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

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

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



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

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

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

هیدروژل‌های تزریقی و درج‌اتشکیل دهنده اخیراً برای توسعه داربست مهندسی بافت، که سلول‌های بنیادی مزانشیمی را در بر می‌گیرند، مورد توجه بسیار قرار گرفته‌اند. (Kazemi-Aghdam et al., 2021; Ghorbani et al., 2023) هیدروژل‌های تزریقی، به دلیل آسانی تجویز، کپسوله سازی سلولی ساده، درمان کم‌تهاجمی، افزایش همکاری بیمار و این که شکل پیچیده‌ای به خود می‌گیرند و به بافت‌های اطراف می‌چسبند، نسبت به بافت‌های ازپیش ساخته شده برون تنی برتری دارند.

حجم بازار صنعت مهندسی بافت جهانی در سال ۲۰۲۲، به ۳۴۳۴٫۵۰ میلیون دلار رسید. پیش بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۱ به ۱۱۵۲۶٫۵۱ میلیون دلار برسد که در دوره پیش بینی ۲۰۲۳-۲۰۳۱ با CAGR ۱۴٫۴۰ درصد رشد می‌کند (www.straitsresearch.com, 2023).

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

### ۳. آموزش مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی

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



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

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

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

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

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

1- Cooney

2- Lightfoot

3- David O. Cooney



ریه بود (Cooney, 1972).

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

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

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

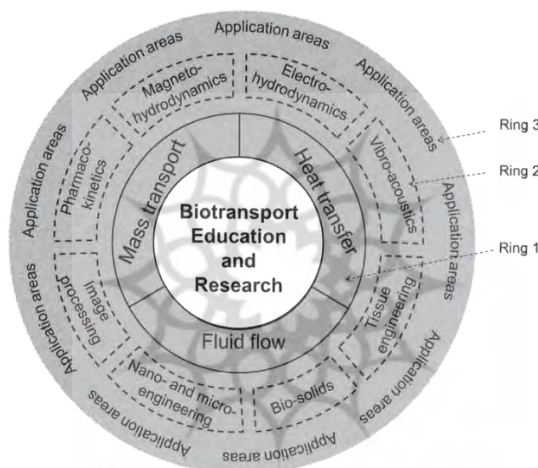
برای دانشجویان علاقه‌مند به کاربردهای پزشکی مهندسی شیمی، مدول آزمایشگاهی نفوذ مولکول‌ها در پوست، در آزمایشگاه عملیات واحد انستیتو فناوری جورجیا طراحی و اجرا شد (Norman et al., 2011). این مدول آزمایشگاهی برای آشنایی دانشجویان با نفوذ تراپوستی با ارزیابی تراوایی و زمان تأخیر عبور ترکیبات فلوروسنتی از پوست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

#### ۴. مروری بر آموزش پدیده‌های انتقال زیستی

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

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

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



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

با توجه به محدودیت، در این جا به حوزه‌های کاربردی اشاره نمی‌شود. یکی از مشکلات ذاتی در آموزش پدیده‌های انتقال در سامانه‌های زیستی، حجم وسیعی از مطالبی است که دانشجویان باید در برنامه درسی مهندسی (زیست) پزشکی بر آنها تسلط یابند. یک رویکرد مؤثرتر و کامل‌تر برای آموزش این موضوع درسی، استفاده از روش‌های گسترده آموزشی است که به عنوان یادگیری فعال شناخته می‌شود.

به دلیل تنوع گسترده‌ای از مطالب پوشش داده شده در پدیده‌های انتقال در سامانه‌های زیستی، نیازهای ویژه هر دوره‌ای ممکن است توسط متون موجود برآورده نشود. از این رو بر یادداشت‌های کلاسی متناسب با شرایط درس‌های مربوط تکیه می‌شود که هم در محتوا و هم در سطح دانشجویان تحت آموزش، تنوع زیادی دارند. افزون بر کتاب‌های درسی گوناگون مندرج در جدول‌های ۴ و ۵، استفاده از این یادداشت‌ها اغلب با بررسی و نقد مقالات تکمیل می‌شوند.

جدول ۴. کتاب‌های درسی مرجع برای آموزش پدیده‌های انتقال زیستی

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

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

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

مهندسی (زیست) پزشکی یک زمینه تخصصی هیجان‌انگیز و روبه‌رشد در بخش مهندسی شیمی دانشگاه نیو برانزویک<sup>۱</sup> کانادا است (Brunswick, 2021).  
گزینه مهندسی (زیست) پزشکی در مهندسی شیمی، یک مسیر تحصیلی برای دانشجویانی است که

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

سلامت انسان را بهبود می بخشد، درهم آمیخته است. با این حال، اکثر برنامه های درسی مهندسی (زیست) پزشکی موجود، مفهوم یکپارچه سازی ترارشته ای<sup>۱</sup> را منعکس نمی کنند. این مفاهیم معمولاً در موضوعات جداگانه با حداقل یا بدون مراجع بین برنامه ای<sup>۲</sup> به دانشجویان آموزش داده می شوند (Lam et al., 2021).

رشته مهندسی پزشکی در ایران، در مقطع کارشناسی دارای ۳ گرایش اصلی زیست الکتریک، زیست مکانیک و زیست مواد است که برنامه بازنگری شده آن، در تاریخ های ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ و ۱۴۰۰/۷/۲۵ با تاریخ اجرا از نیمسال اول ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به تصویب شورای گسترش و برنامه ریزی آموزش عالی رسید. دانشگاه ها برای اجرای هر یک از این برنامه ها با مجوز وزارت علوم، تحقیقات و فناوری اختیار دارند. رشته مهندسی پزشکی برای دوره های کارشناسی ارشد و دکتری، با ۷ گرایش زیست الکتریک، زیست مکانیک، زیست مواد، مهندسی بافت، مهندسی توان بخشی، مهندسی ورزش و مهندسی اطلاعات پزشکی در برخی از دانشگاه های ایران دایر است و آخرین برنامه بازنگری شده، در سال تاریخ ۱۳۹۹/۱۲/۲۴ با تاریخ اجرا از نیمسال اول ۱۴۰۱-۱۴۰۰ به تصویب شورای گسترش و برنامه ریزی آموزش عالی وزارت علوم، تحقیقات و فناوری (عتف) رسید. سابقه تأسیس این گرایش ها متفاوت است. برای نمونه، نخستین گرایش زیست الکتریک است که در ۱۳۷۳/۱۱/۹ به تصویب رسید و مهندسی اطلاعات پزشکی به عنوان جدیدترین گرایش در ۱۳۹۱/۱۱/۱۵ به تصویب رسید. البته، جدیدترین گرایش مهندسی پزشکی برای دوره های کارشناسی ارشد و دکتری تخصصی مهندسی عصب شناختی است که در تاریخ ۱۴۰۰/۴/۶ با تاریخ اجرای از سال ۱۴۰۱-۱۴۰۲ به تصویب رسید. با توجه به برنامه آموزشی مصوب، درس های گرایش های مختلف دارای تنوع بسیار گسترده ای در مقایسه با برنامه های آموزشی سایر کشور، از جمله برنامه های دانشگاه های مختلف سایر کشورها، که در بالا به تعدادی از آنها اشاره شد، است. از این رو، به جزئیات این برنامه ها اشاره نمی شود.

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

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

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

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

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

## ۵. نتیجه‌گیری

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



شیمی و زیست پزشکی در حوزه پزشکی شخصی سازی شده، منجر به بهبود تشخیص و درمان بیماری و در نهایت بهبود سلامت انسان شده است. همین طور با توجه به ماهیت بین رشته ای مهندسی زیست پزشکی و ادغام اصول مهندسی شیمی با علوم پزشکی برای نوآوری در نظام های دارورسانی، مهندسی بافت و دستگاه های پزشکی برجسته شد. در این مقاله بر تأثیر مهندسان شیمی در پیشرفت فناوری های مراقبت سلامت، مانند اندام های مصنوعی، نظام های آزاد سازی کنترل شده دارو و پزشکی بازساختی تأکید گردید و سهم آن را در پزشکی شخصی سازی شده و بهبود مراقبت از بیماران را نشان داده شد. همچنین این مقاله با یک چشم انداز خوش بینانه در مورد احتمالات آینده برای مهندسی شیمی در رسیدگی به چالش های بهداشتی پیچیده، به پایان رسید که نشان دهنده روند مداوم مشارکت های پیشگامانه در زمینه زیست پزشکی است.

## References

- Arambula-Maldonado, R., Geraili, A., Xing, M., & Mequanint, K. (2021). Tissue engineering and regenerative therapeutics: The nexus of chemical engineering and translational medicine. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(10), 2069–2086. <https://doi.org/10.1002/cjce.24094>.
- Azadi, S. A., Vashghani-Farahani, E., Hashemi-Najafabadi, S., & Godini, A. (2016). Co-encapsulation of pancreatic islets and pentoxifylline in alginate-based microcapsules with enhanced immunosuppressive effects. *Progress in Biomaterials*, 5(2), 101–109. <https://doi.org/10.1007/s40204-016-0049-3>.
- Banerjee, R. K., D'Souza, G. A., Rylander, C., & Devireddy, R. (2014). A Review of biotransport education in the 21st Century: lessons learned from experts. *Journal of Biomechanical Engineering*, 136(11). <https://doi.org/10.1115/1.4028414>.
- Bissell, M. J., & Barcellos-hoff, M. H. (1987). The influence of extracellular matrix on gene expression: is structure the message? *Journal of Cell Science*, 1987(Supplement\_8), 327–343. <https://doi.org/10.1242/jcs.1987.supplement.8.18>.
- Brunswick, U. o. N. (2021). Department of Chemical Engineering University of New Brunswick 2021–22 Undergraduate Student Handbook.
- Cooney, D. O. (1972). Biological transport phenomena and biomedical engineering. *Chemical Engineering Education*, 6(4), 162–186.
- Department of Chemical Engineering University of Louisiana. *Bioengineering concentration 4-year plan*. <https://chemical.louisiana.edu/bioengineering-concentration-4-year-plan/140>
- Feig, L. A., Peppas, N. A., Colton, C. K., Smith, K. A., & Lees, R. S. (1982). The effect of angiotensin II on in vivo albumin transport in normal rabbit aortic tissue. *Atherosclerosis*, 44(3), 307–318. [https://doi.org/10.1016/0021-9150\(82\)90005-3](https://doi.org/10.1016/0021-9150(82)90005-3).
- Folkman J, Haudenschild 1980 C. Angiogenesis in vitro. *Nature*. 11; 288(5791): 551–6. doi: <https://doi.org/10.1038/288551a0>.
- Ghorbani, M., Vashghani-Farahani, E., Azarpira, N., Hashemi-Najafabadi, S., & Ghasemi, A. (2023). Dual-crosslinked in-situ forming alginate/silk fibroin hydrogel with potential for bone tissue engineering. *Biomaterials Advances*, 153, 213565. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2023.213565>.
- Jimenez, J., Dukes, A. A., & Fedorchak, M. V. (2021). Integrating public health topics in drug delivery system education. *ASEE Virtual Annual Conference Content Access*
- Jimenez, M. P., DeVille, N. V., Elliott, E. G., Schiff, J. E., Wilt, G. E., Hart, J. E., & James, P. (2021). Associations between nature exposure and health: a review of the evidence. *International Journal of Environmental*

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

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



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



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