مقاله مروری

فصلنامه علمی
سال نهم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۴، تابستان ۱۴۰۲
Vol. 9, No. 2, Issue No. 34
Summer 2024, Quarterly
صفحه ۱۷-۵

Iran Polymer Technology: Research and Development

کاربرد ایروژل‌ها در زخم‌پوش‌ها

محمدحسین کرمی*، علی زمانیان
پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

چکیده ...

ایروژل‌ها مواد جامد سبک‌وزنی هستند که از مواد آلی یا معدنی یا به صورت کامپوزیت تهیه می‌شوند و به‌عنوان مواد پیشرفته برای کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. ایروژل‌ها، طیف متنوعی از خواص را با عملکرد عالی نشان داده‌اند. استفاده از ایروژل‌ها در کاربردهای روزانه به‌دلیل هزینه بالا و روش پیچیده تهیه آن‌ها محدود است. روش خشک‌کردن ایروژل‌ها به خودی خود کاری خسته‌کننده است که نیاز به انرژی و منابع بالایی دارد. ایروژل‌ها هنگامی که به‌عنوان کامپوزیت تهیه می‌شوند می‌توانند خواص مکانیکی را به‌طور هم‌افزایی افزایش دهند. علاوه بر این، ایروژل‌ها را می‌توان به‌راحتی برای آزادسازی مولکول‌های فعال زیستی، مانند فاکتورهای رشد یا آنتی‌بیوتیک‌ها، برای تسریع روند بهبودی طراحی کرد. با این حال، چالش‌های مرتبط با کاربردهای ایروژل در ترمیم زخم نیز وجود دارد. به‌عنوان مثال، تولید ایروژل‌ها در مقیاس بزرگ ممکن است گران باشد و پذیرش گسترده آن‌ها را در محیط‌های بالینی محدود کند. علاوه بر این، خواص مکانیکی ایروژل‌ها ممکن است برای همه انواع زخم‌ها مناسب نباشد، زیرا ممکن است پشتیبانی کافی برای انواع خاصی از زخم‌ها ارایه نکنند. به‌طورکلی، در حالی که ایروژل‌ها برای کاربردهای ترمیم زخم اهمیت زیادی دارند، تحقیقات بیشتری برای غلبه بر این چالش‌ها و بهینه‌سازی استفاده از آن‌ها در محیط‌های بالینی مورد نیاز است. در این پژوهش، به بررسی معرفی انواع زخم‌پوش‌ها، زخم‌پوش‌های تجاری، ایروژل‌های پایه کیتوسان، خواص و کاربرد ایروژل‌ها در زخم‌پوش‌ها پرداخته می‌شود..

واژه‌های کلیدی:

ایروژل،
زخم‌پوش،
ضد باکتری،
کیتوسان،
کامپوزیت

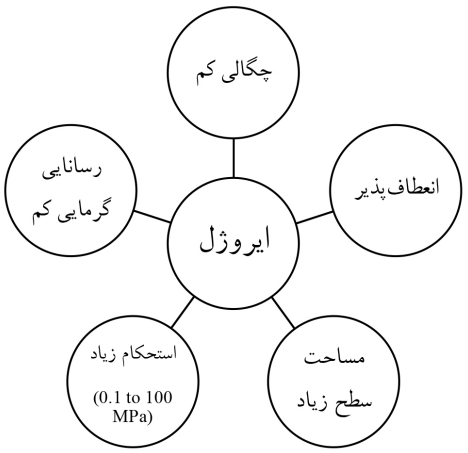
*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
karami.polymerohd@gmail.com

۱ مقدمه

در سال‌های اخیر فناوری نانو تحولات چشمگیری را در صنایع مختلف ایجاد کرده است. ساختارهای مختلفی از نانومواد به‌صورت تجاری یا تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۱]. ایروژلها دسته‌ای از نانومواد متخلخلند که امروزه مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته‌اند. زیرا این مواد طیف گسترده‌ای ازخواص استثنایی از جمله مساحت سطح بزرگ، تخلخل بالا، چگالی بسیار کم، هدایت حرارتی بسیار پایین، ضریب شکست کم، ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین را دارند. منافذ ایروژل‌ها می‌توانند به‌طور منظم آرایش یابند یا به‌طور نامنظم با کلوخه‌های ذرات کوچک‌تر یا ایجاد اتصال عرضی در زنجیرهای پلیمری ایجاد شوند. نوع، شکل و اندازه منافذ بر ویژگی‌های فیزیکی مواد متخلخل اثرگذار هستند. این ویژگی‌ها به آیروژل‌ها اجازه می‌دهد تا مقادیر زیادی از ترشحات زخم را جذب و حفظ کنند، با ایجاد محیط مرطوب زخم، بهبودی را تسریع کنند و با عمل به‌عنوان مانعی در برابر آلاینده‌های خارجی، خطر عفونت را کاهش دهند[۲]. علاوه بر این، ایروژل‌ها زیست‌سازگار هستند و پاسخ ایمنی (Immune Response)، ایجاد نمی‌کنند که آن‌ها را برای استفاده در انواع زخم‌های حساس مانند سوختگی و زخم‌های مزمن مناسب می‌کند. علاوه بر این، ایروژل‌ها را می‌توان به راحتی برای آزادسازی مولکول‌های فعال زیستی، مانند فاکتورهای رشد یا آنتی‌بیوتیک‌ها، برای تسریع روند بهبودی طراحی کرد. با این حال، چالش‌های مرتبط در رابطه با استفاده از ایروژل در کاربردهای ترمیم زخم نیز وجود دارد. به‌عنوان مثال، تولید ایروژل‌ها در مقیاس بزرگ ممکن است گران باشد و پذیرش گسترده آن‌ها را در محیط‌های بالینی محدود کند[۳]. علاوه بر این، خواص مکانیکی ایروژل‌ها ممکن است برای همه انواع زخم‌ها مناسب نباشد، زیرا شکننده هستند و ممکن است پشتیبانی کافی برای انواع خاصی از زخم‌ها ارائه نکنند. زخم‌پوش ایده‌آل باید دارای ویژگی‌هایی مانند غیرسمی و غیرمحرک‌بودن، زیست‌تخریب‌پذیری در بدن، خواص ضدباکتری برای جلوگیری از عفونت زخم، رطوبت و نفوذپذیری خوب هوا برای جلوگیری از تغییرات مکرر و استحکام مکانیکی کافی برای جلوگیری از چروکیدگی باشد[۴]. به‌طورکلی، در حالی که ایروژل‌ها برای کاربردهای ترمیم زخم اهمیت زیادی دارند، تحقیقات بیشتری برای غلبه بر این چالش‌ها و بهینه‌سازی استفاده از آن‌ها در محیط‌های بالینی مورد نیاز است [۵]. ایروژل‌ها دارای تعدادی خواص مکانیکی منحصربه‌فرد هستند که آن‌ها را به ماده‌ای مطلوب برای کاربردهای مختلف تبدیل می‌کند. برخی از خواص مکانیکی کلیدی ایروژل‌ها در شکل۱، نشان داده شده است. در این پژوهش، به بررسی معرفی انواع زخم‌پوش‌ها، زخم‌پوش‌های تجاری، ایروژل‌های پایه کیتوسان، خواص و کاربرد ایروژل‌ها در زخم‌پوش‌ها پرداخته می‌شود.

۲ طبقه‌بندی زخم‌پوش‌های ایروژلی

ایروژل‌ها مواد بسیار متخلخل با چگالی کم و سطح بالا هستند که آن‌ها را برای کاربردهای مختلف از جمله پانسمان زخم ایده‌آل می‌کند. در میان انواع مختلف، ایروژل‌های سیلیکا به‌دلیل حفظ رطوبت عالی و خواص عایق حرارتی خود شناخته می‌شوند که به حفظ محیط مرطوب زخم برای بهبود کمک می‌کند[۶]. ایروژل‌های مبتنی بر پلیمر، مانند آن‌هایی که از پلی‌اتیلن‌گلیکول یا ژلاتین ساخته شده‌اند، انعطاف‌پذیری و سازگاری زیستی را افزایش می‌دهند و امکان ادغام بهتر با بافت را فراهم می‌کنند و در عین حال تکثیر سلولی را تقویت می‌کنند. ایروژل‌های کامپوزیتی که اجزای آلی و معدنی را با هم ترکیب می‌کنند، خواص مناسبی مانند استحکام مکانیکی بهبودیافته و فعالیت ضدمیکروبی ارائه می‌دهند و نیاز به پیشگیری از عفونت در مراقبت از زخم را برطرف می‌کنند[۷]. ایروژل‌های کربوکسی‌متیل‌سلولز به‌ویژه در جذب اگزودا موثر هستند و در عین حال مانع محافظتی در برابر آلاینده‌های خارجی می‌شوند. علاوه بر این، ایروژل‌های مبتنی بر کیتوسان دارای خواص ضدباکتریایی و زیست‌تخریب‌پذیری هستند و با تقاضای روبه‌رشد برای محصولات پزشکی سازگار با محیط زیست هماهنگ هستند[۸]. برخی از مطالعات اخیر بر ترکیب نانوذرات، مانند اکسید نقره یا روی، در ایروژل‌ها تمرکز کرده‌اند تا



شکل۱ برخی از خواص مکانیکی کلیدی ایروژل‌ها

قابلیت‌های ضدمیکروبی آن‌ها را بدون به خطر انداختن خواص ذاتی آن‌ها افزایش دهند. علاوه بر این، ایروژل‌هایی با ویژگی‌های رهاسازی کنترل‌شده در حال توسعه هستند تا عوامل درمانی مانند فاکتورهای رشد و آنتی‌بیوتیک‌ها را مستقیماً در محل زخم ارائه دهند و باعث بهبود کارآمدتر شوند[۹]. به‌طورکلی، تطبیق‌پذیری ایروژل‌ها امکان ایجاد پانسمان‌های چندمنظوره زخم را فراهم می‌کند که می‌توانند با انواع زخم‌ها از جمله زخم‌های مزمن، حاد و جراحی سازگار شوند و در عین حال به نیازهای درمانی خاص نیز پاسخ دهند. این پیشرفت‌ها قابلیت ایروژل‌ها را در متحول‌کردن مدیریت مراقبت از زخم از طریق راه‌حل‌های نوآورانه و مؤثر برجسته می‌کند. در جدول ۱، انواع ایروژل و خصوصیات آن‌ها در زخم‌پوش‌ها درج شده است[۱۰]. ویژگی‌های قابل‌توجهی در طیف وسیعی از انواع ایروژل‌ها ظاهر شد. مانند ایروژل‌های سیلیکا، پلیمری و شکل ترکیبی که بر تجزیه‌پذیری زیستی، زیست‌سازگاری، نفوذپذیری و ظرفیت تقلید ساختارهای زیستی تأکید می‌کند. ایروژل‌ها در کاربردهای مختلف زیست‌پزشکی، از جمله دستگاه‌های قابل کاشت، حس زیستی، ترمیم زخم، پزشکی احیاکننده، دارورسانی و تشخیص استفاده می‌شوند [۱۱]. کاربرد ایروژل در درمان ضدمیکروبی حوزه جدید و امیدوارکننده از تحقیقات پزشکی است. ایروژل‌ها مزایای زیادی برای کاربردهای ضدمیکروبی دارند. آن‌ها به‌دلیل ویژگی‌های متمایز خود که شامل سطح بزرگ، تخلخل و ویژگی‌های قابل‌تنظیم است، به خوبی شناخته شده‌اند. این ویژگی‌ها به ایروژل‌ها اجازه می‌دهد تا به‌عنوان حامل عوامل ضدمیکروبی کارآمد استفاده شوند که امکان تحویل هدفمند و رهاسازی کنترل‌شده در محل‌های عفونت را فراهم می‌کند[۱۲]. علاوه بر این، به‌دلیل زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری و توان عملکردی، گزینه‌های عالی برای درمان عفونت‌های میکروبی با حداقل اثرات منفی هستند. ایروژل‌ها توانایی بهبود نتایج درمان، کاهش مقاومت دارویی و رسیدگی به مسائل تکرارشونده در درمان ضدمیکروبی را دارند، زیرا توانایی آن‌ها در محصورکردن و محافظت از ترکیبات ضدمیکروبی است[۱۳].

۳ سازوکارهای بهبود زخم ایروژل‌ها

یکی از سازوکارهای فعالیت ضدمیکروبی ایروژل، ظرفیت آن برای متورم شدن است. ایروژل‌ها باعث حفظ محیط مرطوب زخم می‌شوند که برای تسهیل مهاجرت و تکثیر انواع مختلف سلول‌های دخیل در روند بهبود ضروری است. ظرفیت ایروژل برای جذب رطوبت اضافی از محل زخم به جلوگیری از تأثیر مایعات بر بافت سالم اطراف کمک می‌کند که با ایجاد زیستگاه نامناسب برای تکثیر میکروبی، احتمال عفونت‌های مکرر را کاهش دهد و باعث تسریع در روند بهبودی شود[۱۴]. علاوه بر این، ایروژل‌ها گزینه‌ای امیدوارکننده برای کنترل خونریزی هستند. آن‌ها می‌توانند به‌سرعت خون را از زخم خونریزی جذب کنند که به تشکیل لخته و کاهش از دست دادن خون کمک می‌کند و سد هموستاتیک ایجاد می‌کند. مطالعات زیادی

جدول۱ انواع ایروژل و خصوصیات در زخم‌پوش‌ها[۱۰-۱].

انواع ایروژل	خصوصیات در زخم‌پوش‌ها
سیلیس	ایروژل‌های سیلیکا به‌دلیل ساختار متخلخل خود می‌توانند مایعات را به‌طور موثر جذب کنند. به‌طورکلی به‌عنوان بی‌خطر و زیست‌سازگار شناخته می‌شود: در صورت نیاز در مراقبت از زخم برای کنترل دما استفاده می‌شوند.
پلیمری	می‌تواند با خطوط بدن مطابقت داشته باشد و راحتی و تناسب بهتری را بر روی اشکال مختلف زخم فراهم کند. می‌تواند زخم را مرطوب نگه دارد و باعث بهبود سریع‌تر شود. سازگارتر با محیط‌زیست، به ویژه هنگام استفاده از پلیمرهای طبیعی. مهندسی آسان با عوامل ضدباکتری یا سایر ترکیبات شفابخش.
کربنی	قابلیت جذب عالی که ممکن است به کنترل ترشحات در زخم کمک کند. شیمی سطح را می‌توان برای اثرات ضد میکروبی اضافی اصلاح کرد. مدیریت و اعمال آسان بدون افزودن حجم قابل‌توجه.
کامپوزیتی	ترکیب مواد مختلف می تواند استحکام مکانیکی، جذب یا اثرات ضدمیکروبی را افزایش دهد. می‌تواند برای رساندن داروهایی مانند آنتی‌بیوتیک‌ها به‌طور مستقیم به محل زخم طراحی شود. می‌تواند داروهای مایع را در حالی که زخم را مرطوب نگه می‌دارد، حفظ کند.
زیست‌فعال	ممکن است شامل مولکول‌های فعال زیستی یا سلول‌هایی باشد که باعث بهبودی می‌شوند. باعث بازسازی و ترمیم بافت می‌شود. یکپارچگی با محل زخم را افزایش می‌دهد.

اثر ضدمیکروبی ایروژل‌ها را ثابت کرده‌اند [۱۵]. ایروژل هیبریدی سیلیکا /کیتوسان، اثرات ضدباکتریایی بر علیه استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli نشان داد، جایی که حدود نیمی از باکتری‌ها را کاهش داد. در مطالعه‌ای که توسط خان و همکارانش انجام شد، از نانوذرات نقره (AgNPs) و آنزیم‌ها به‌عنوان مواد ضدباکتری استفاده شد و به سلولز متصل شد. ایروژل‌های نانوالیاف کربنی(CNF) یافته‌های این مطالعه ویژگی‌های غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر ایروژل‌ها را نشان می‌دهد و ایمنی و کاربرد آن‌ها را در رهایش دارو ثابت می‌کند. در محافظت از خواص آنزیمی و ضدباکتریایی عوامل بارگذاری شده در زمانی که نانوالیاف سلولزی به‌عنوان ماتریس پشتیبانی برای ترکیبات زیست‌فعال استفاده شد[۱۶]. این نشان می‌دهد که ایروژل‌های CNF ممکن است ابزار مفیدی برای تحویل مواد فعال زیستی باشند. علاوه بر این، ویژگی‌های زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر نانوالیاف سلولزی باعث برتری ایروژل می‌شود. مشخصات ایمنی کلی کامپوزیت‌ها همه موارد در نظر گرفته شده، این را می‌توان با اثر ترکیبی ضدباکتری AgNPs و CNF کاتیونی توضیح داد [۱۷]. اثر ضدباکتریایی نقره به‌دلیل توانایی آن در اتصال به دیواره سلولی باکتری با بار منفی است و در نتیجه منجر به قطع تنفس سلولی و نفوذپذیری دیواره سلولی که باعث متلاشی شدن و مرگ باکتری می‌شود [۱۸]. در مطالعه دیگری، آمپی‌سیلین در ایروژل‌های کیتوسان بارگذاری شد و اثر ضدمیکروبی قوی از خود نشان داد. آمپی‌سیلین و کیتوسان زمانی که با هم استفاده می‌شوند، اثربخشی را در برابر باکتری‌های مختلف افزایش می‌دهند. حتی در دوزهای پایین آمپی‌سیلین منجر به هم‌افزایی در فعالیت ضدباکتریایی قوی شد. علاوه بر این، آزمایش سمیت سلولی آزمایشگاهی بر روی سلول‌های انسانی زیست‌سازگاری کامپوزیت‌های ایروژل را ثابت کرد[۱۹]. علاوه بر این، ایروژل‌های کیتوسان به‌طور موثری بهبود زخم را در مدل زخم موش صحرایی در داخل بدن تسریع می‌بخشند و قابلیت خود را برای درمان‌های ضدمیکروبی نشان می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند که وقتی نانوذرات فلزی، مانند نقره یا مس، در ایروژل‌ها ترکیب می‌شوند، سازوکار دفاعی ضدمیکروبی قوی از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) ارائه می‌کنند [۲۰]. این اثر ضدباکتریایی طولانی‌مدت، آزادسازی پایدار نانوذرات فلزی را تضمین می‌کند. سطح بزرگ ایروژل‌ها همچنین این امکان را برای نانوذرات فراهم می‌کند که به‌طور موثر در معرض نور یا شرایط محیطی قرار بگیرند که باعث تولید ROS می‌شود[۲۱]. این ترکیبات زیستی حیاتی مانند DNA، پروتئین‌ها و لیپیدها را هدف قرار می‌دهند و به سلول‌های میکروبی آسیب می‌رسانند. ROS باعث آسیب اکسندگی می‌شود که منجر به مرگ سلول‌های میکروبی با اختلال در عملکردهای ضروری سلولی و تضعیف ساختارهای میکروبی می‌شود [۲۲]. ایروژل‌های نورکاتالیزوری با ترکیب ایروژل‌ها و مواد نورکاتالیزوری مانند TiO_2، رویکرد جدیدی را به فناوری ضدمیکروبی نشان می‌دهند. سازوکار عمل آن‌ها شامل استفاده از نور به‌عنوان کاتالیزور برای ایجاد فرایندهای شیمیایی است که ROS را تولید می‌کند. TiO_2 موجود در ساختار متخلخل ایروژل‌ها، هنگامی که در معرض نور UV قرار می‌گیرد، نورکاتالیز را آغاز می‌کند و در نتیجه ROS مانند یون‌های سوپراکسید و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌شود. ترکیب سطح بالای ایروژل و فعالیت نورکاتالیزوری اثر ضدمیکروبی آن را تقویت می‌کند[۲۳].

۴ خواص ضدباکتریایی ایروژل‌ها

در تحقیقات اخیر، مشخص شده است که بسیاری از مواد با خواص ضدباکتریایی در سامانه‌های ماتریس نانوسلولزی در طول ساخت ایروژل‌ها گنجانده شده‌اند [۲۴]. این سامانه‌های ماتریسی شامل عصاره‌های گیاهی، اسانس‌ها، نانوذرات نقره و آنزیم‌ها هستند و فعالیت ضدباکتریایی خود را پس از بی‌حرکت شدن در ایروژل حفظ می‌کنند [۲۵]. یحیی و همکاران دریافتند که فعالیت ضدباکتریایی عصاره پوست (Punica Granatum) نسبت به آنتی‌بیوتیک‌های رایج، اثر قوی‌تری از فعالیت ضدباکتریایی نشان می‌دهد[۲۶].

در مطالعه‌ای توسط خان و همکاران، نانوذرات نقره و آنزیم‌ها در داخل ایروژل‌های نانوالیاف کربن قرار داده شده، برای کاربردهای بالقوه کارآزمایی بالینی مورد ارزیابی قرار گرفتند. آن‌ها ثابت کردند که ایروژل‌های ساخته‌شده غیرسمی و زیست‌تخریب‌پذیر هستند. جدول ۲ خلاصه‌ای از کاربردهای مختلف ایروژل‌های هیبریدی و تک‌جزئی انعطاف‌پذیر را نشان می‌دهد [۲۷].

۵ پیشرفت اخیر در ساخت زخم‌پوش‌های ایروژلی در ترمیم زخم‌ها و کاربردهای زیست‌فناوری

ژنگ و همکاران (Zheng Etal)، زخم‌پوش ایروژلی آلژینات با نانوذرات کورکومین را برای بهبود زخم‌های دیابتی طراحی کردند. نتایج نشان داد که رویکردهای نوآورانه این قابلیت را دارند که با غلبه بر محدودیت‌های درمان‌های مرسوم و درمان‌های مبتنی بر بیولوژیک، درمان زخم‌های دیابتی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند [۲۸]. همچنین حضور نانوذرات

جدول ۲ کاربردهای مختلف ایروژل‌های هیبریدی و تک‌جزئی انعطاف‌پذیر[۳۰-۲۵].

نام مواد	کاربرد	نتایج مهم
سلولز باکتریایی	ترمیم بافت پوست	استفاده از ایروژل اثر درمانی سریع‌تر و موثرتری داشت و پاسخ التهابی را کاهش داد.
ایروژل نانوسلولز		این اختراع جدید فرایند امیدوارکننده‌ای را برای ساخت ایروژل دولایه برای ترمیم پوست ارائه می‌دهد
ایروژل‌های آموکسی‌سیلین/ سلولز		آموکسی‌سیلین را روی سلولز پیوند زد و افزایش فعالیت ضدمیکروبی را در برابر باکتری‌های قارچ مشاهده کرد.
ایروژل CNF/PEGDA	داربست‌های بافتی	دارای سازگاری مکانیکی و زیستی عالی، سلول‌های آزمایش‌شده محکم چسبیده و پخش‌شده روی ایروژل، نشان‌دهنده تمایز و زنده ماندن عالی است.
ایروژل سلولز/ژلاتین		داربست تغییر یافته سطحی برای بازسازی پوست، چسبندگی و تکثیر خوبی کراتینوسیت‌ها را در طول دوره انکوباسیون ۷ روزه نشان داد.
ایروژل CNC خالص		ساختارهای مختلف داربست با موفقیت از طریق روش نوشتن جوهر مستقیم چاپ شدند.

کورکومین باعث کاهش التهاب و حذف ROS و ارتقای بهبود در فیبروبلاست‌ها و ماکروفاژها می‌شود. این زخم‌پوش خواص زیست‌سازگاری عالی و جذب آب را از خود نشان داد. علاوه بر این با استفاده از مدل موش دیابتی، اثربخشی زخم‌پوش در تسهیل بهبود زخم دیابتی تأیید شد [۳۰].

حمید و همکاران (Hamid Etal)، زخم‌پوش ایروژلی نانوذرات پالادیم و سدیم‌آلژینات را طراحی کردند. نتایج نشان داد که ایروژل به‌طور موثری باعث بهبود زخم و جلوگیری از عفونت‌های باکتریایی می‌شود. به‌طورکلی، این یافته‌ها توانایی قابل‌توجهی در پیشبرد راهبردهای بهبود زخم و مبارزه با عفونت‌های باکتریایی پوست دارند. ایروژل ظرفیت تورم تا ۲۰۰ درصد را دارد و خواص زیست‌سازگاری خوبی از خود نشان داد. همچنین آزمایش‌ها تأیید کرد که این زخم پوش فعالیت ضدباکتریایی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد [۳۱].

چنگ و همکاران (Cheng Etal)، با استفاده از نانوسلولز باکتری و محلول‌های $CaCl_2$ و K_2HPO_4، توانستند ساختارهای طبیعی استخوان را طراحی کنند [۹۲]. نانوالیاف سلولزی ترازشده، الگویی برای گنجاندن یکنواخت هیدروکسی‌آپاتایت (HAP) با محتوای مواد معدنی بالا فراهم می‌کند. کامپوزیت سلولز باکتریایی هم‌راستا و کانی شده دارای سختی ۰/۳۷ گیگاپاسکال و مدول الاستیک ۱۰/۹۱ گیگاپاسکال است که استحکام مکانیکی قابل‌توجهی را نشان می‌دهد [۳۲].

ژی و همکاران (Xie Etal)، زخم‌پوش ایروژلی نانوالیاف پلی‌کاپرولاکتون حاوی سیستین و مس را طراحی کردند. نتایج نشان داد که این ایروژل‌های متخلخل از طریق آزادسازی تنظیم‌شده مس و تولید نیتریک‌اکسید، نه‌تنها حمایت ضدباکتریایی را ارائه می‌کنند، بلکه رگ‌زایی را نیز ارتقا می‌دهند. در مجموع، گنجاندن سیستین و مس در داربست‌ها می‌تواند نویدبخش انقلابی در بازسازی بافت و بهبود زخم باشد [۳۳].

در پژوهشی دیگر، زخم پوش آلژینات و کیتوسان ساخته شد. زیست فعالی الیاف با توجه به توانایی بسته‌شدن زخم در مقیاس آزمایشگاهی و فعالیت ضدباکتریایی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. الیاف ایروژل ناحیه خراش بازیابی‌شده را حدود ۷۵ درصد نشان می‌دهند و همچنین فعالیت ضدباکتریایی واضح در برابر استافیلوکوکوس اورئوس و کلبسیلاپنومونیه از خود نشان داد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که الیاف ایروژل حاوی آلژینات-کیتوسان می‌توانند انتخاب مناسبی برای کاربردهای بهبود زخم باشند [۳۴].

پژوهشگران زخم‌پوش حاوی پلی‌لاکتیک‌اسید و ژلاتین به همراه نانوذرات اکسیدروی طراحی کردند. به‌طور خلاصه، داربست ساخته‌شده از ترکیب فناوری الکتروریسی و خشک‌کردن انجمادی تهیه شدند. آزمایش‌های مختلف نشان داده‌اند که داربست‌ها سه مزیت اصلی دارند. در مرحله اول، داربست‌های ایروژلی دارای خواص ضدباکتریایی خوبی هستند. هنگامی که غلظت ZnO در حدود ۱/۵ درصد باشد، استفاده از نانوذرات اکسیدروی منجر به بهترین اثر ضدباکتریایی می‌شود. بنابراین داربست‌ها می‌توانند مانع فیزیکی در برابر عفونت ایجاد کنند. ثانیاً آن‌ها در جذب ترشحات زخم خوب هستند و همچنین به‌دلیل ساختار نانوالیافی سه‌بعدی خود اجازه تبادلات گازی را می‌دهند [۳۵].

مت‌والی و همکاران(Metwaly)، زخم‌پوش ایروژلی کربوکسی‌متیل‌سلولز و پلی‌وینیل‌الکل و عصاره آنتی‌سیانین را ساختند. سپس کامپوزیت‌های تولیدشده در حالت انجمادی خشک شدند تا پانسمان زخم هوشمند مشابه ایروژل را فراهم کنند تا به‌عنوان توده ضدباکتری و بیوکرومیک عمل کند و حسگر زیستی پانسمان راحت را برای نظارت بر روند بهبود

زخم ارائه دهد. نتایج این زخم‌پوش نشان داد که کاهش pH زخم منجر به تغییر هیپسوکرومیک از ۵۹۲ به ۴۴۶ نانومتر شد. فعالیت هالوکرومیک آنتوسیانین تغییرات رنگ‌سنجی را از بنفش به صورتی نشان داد. این طراحی باعث می‌شود که پانسمان زخم بیوکرومیک حالت جامد برگشت‌پذیر، حساس، سازگار با محیط‌زیست، قابل حمل و مقرون‌به‌صرفه برای نظارت بر بهبود زخم ایجاد کند [۳۶].

محققان زخم‌پوش ایروژلی حاوی پلی‌وینیل‌الکل و هیدروکسی‌آپاتیت را برای بهبود زخم سنتز کردند. نتایج نشان داد که ایروژل با بهره‌مندی از آب‌دوستی عالی و ساختار تخلخل بالا می‌تواند به سرعت آب را از خون جذب کند تا سلول‌های خونی و پلاکت‌های زخم‌پوش را متمرکز کند و هموستاز را تسریع کند. هم‌سازگاری و سازگاری سلولی خوبی را نشان می‌دهد و می‌تواند باعث بهبود زخم پوست شود. از این رو ایروژل ساخته‌شده، قابلیت زیادی در هموستاز سریع و بهبود زخم برای تنظیمات بالینی دارد [۳۴].

در پژوهشی دیگر، به‌کمک مایکروویو ایروژل‌های آنتی‌اکسیدانی کیتوسان را سنتز کردند. نتایج نشان داد که، بیشتر با عصاره Tilia Platyphyllos فعال می‌شوند. همچنین ایروژل‌های کیتوسان به‌طور قابل‌توجهی تکثیر سلولی را تقویت کرده، رشد استافیلوکوکوس اورئوس را مهار می‌کنند. ایروژل‌های پایه کیتوسان حاوی ونکومایسین سنتز شد. نتایج نشان داد که ایروژل‌های کیتوسان با وانکومایسین اثرات ضدباکتریایی قابل‌توجهی داشتند؛ در حالی که هیچ اثر منفی قابل‌توجهی بر فعالیت کلاژناز (کلاژنازها آنزیم‌هایی هستند که پیوندهای پپتیدی در کلاژن را می‌شکنند) و روند طبیعی فیزیولوژیکی بهبود زخم نداشتند [۳۵].

پژوهشگران، ایروژل‌های کامپوزیتی خشک و پایدار را با اکسیدگرافن و پلی‌وینیل‌الکل با روش سل-ژل تهیه کردند و عصاره طبیعی انگور را در ایروژل‌ها ترکیب کردند. کامپوزیت ایروژل با عصاره انگور دارای خواص پایداری، ظرفیت جذب سریع آب، ظرفیت انعقاد عالی و ظرفیت ترکیبات زیست‌فعال است. با توجه به عملکرد قابل‌توجه هموستاتیک، فرایند آماده‌سازی ساده، هزینه کم و غیرسمی بودن، این ایروژل‌های جدید قابلیت زیادی در بهبود زخم دارند [۳۶].

ایروژل‌های بر پایه کلاژن را با کورکومین سنتز کردند. ایروژل‌های ساخته‌شده دارای خواص فیزیکی و مکانیکی عالی با افزایش فعالیت ضدپروتئولیتیک و پیش‌رگ‌زایی بودند. ریزساختار سه‌بعدی ایروژل کلاژن به‌طور کامل با کورکومین پیوند خورده بود و حتی افزودن کورکومین بر ساختار تأثیری نداشت. این ساختارهای متخلخل علاوه بر افزایش نفوذپذیری و حفظ آب، چسبندگی و تکثیر سلولی را نیز افزایش می‌دهند. ایروژل‌های کلاژن حاوی کورکومین به‌دلیل فعالیت ضدرگ‌زایی و فعالیت ضدپروتئولیتیک تنظیم‌شده می‌توانند در طیف متنوعی از مناطق زیست‌پزشکی، از جمله ترمیم بافت‌های آسیب‌دیده استفاده شوند [۳۷].

درپژوهشی دیگر، از ترکیبات زیست‌فعال جوانه گندم اصلاح‌شده ایروژل بر پایه کلاژن برای بهبود در ساخت زخم‌پوش‌های ایروژلی استفاده شد. این ایروژل‌ها به‌عنوان ماتریس خارج سلولی برای گردش کلاژن و رگ‌زایی برای کاربرد در ترمیم زخم کار می‌کردند. معماری متخلخل سه‌بعدی ایروژل‌های کلاژن با اجزای فعال زیست‌فعال علف گندم بیشتر بهبود یافت که به‌نوبه خود خواص فیزیکی، شیمیایی و زیست‌مکانیکی ساختار را افزایش داد. رهایش پایدار ماده شیمیایی، خاصیت زیست‌فعالی، خاصیت ضدباکتریایی و پیش‌رگ‌زایی مبتنی بر ایروژل سه‌بعدی نسبت به ریزمحیط سلولی باعث بهبود زخم می‌شود [۳۸].

محققان، ایروژلی با استفاده از پلی‌اتیلن‌ایمین پیوندشده با نانوالیاف سلولزی با روش خشک‌کردن انجمادی سنتز کردند. نتایج نشان داد که ایروژل‌ها می‌توانند باعث رهایش کنترل‌شده سدیم‌سالیسیلات شود و همچنین به‌عنوان عامل درمانی مورد استفاده در بیماری‌هایی مانند دیابت و ورم مفاصل قرار گیرد [۲۶].

زخم‌های مزمن علت اصلی کاهش کیفیت زندگی هستند و بار میکروبی عاملی مانع از روند طبیعی ترمیم زخم می‌شوند. در پژوهشی، از کیتوسان حاوی ونکومایسین به‌عنوان فرمول بالقوه برای درمان و پیشگیری از عفونت در محل زخم مورد آزمایش قرار گرفتند. فراوری کیتوسان به شکل ایروژل در این پلی‌ساکارید ظرفیت جذب آب و نفوذپذیری هوا را افزایش داده است. محتوای وانکومایسین و پروفایل‌های رهایش دارو از ایروژل، انتشار سریع دارو را نشان می‌دهد. مطالعات سلولی با فیبروبلاست‌ها و آزمایش‌های ضدمیکروبی علیه استافیلوکوکوس اورئوس نشان داد که ذرات ایروژل بارگذاری شده با وانکومایسین سازگار بوده، در جلوگیری از باکتریایی زیاد در محل زخم موثر هستند [۲۷].

سلولز و کیتوسان به‌دلیل زیست‌سازگاری، زیست‌تخریب‌پذیری، آنتی‌ژنی کمتر و تجدیدپذیری برای پانسمان زخم مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های عملکردی و ساختاری چنین پلیمرهای زیستی را می‌توان با تبدیل آن‌ها به زیست‌ایروژل‌های لیفی به‌دلیل ویژگی‌های برجسته آن‌ها مانند چگالی کم، تخلخل بالا و سطح ویژه بزرگ به‌طور چشمگیری بهبود بخشید. تولید ایروژل‌ها به شکل الیاف و منسوجات نه‌تنها می‌تواند خواص

مکانیکی، سفتی و شکل‌پذیری ایروژل‌ها را افزایش دهد، بلکه منجر به زمان خشک شدن کوتاه و فرایندهای تولید مقیاس‌پذیر می‌شود. بدین وسیله، میکروالیاف کیتوسان و سلولز برای کاربرد پانسمان زخم تولید شده‌اند. و داروی ایبوپروفن در این سامانه بارگذاری شد. نتایج نشان داد که الیاف به شبکه‌های بافته‌ای تبدیل شدند که بسیار قابل جذب آب (~۴۰۰ درصد وزنی) و ضدباکتری در برابر E. coli و استافیلوکوکوس اورئوس بودند. علاوه بر این، ساختارهای لیفی با استفاده از سلول‌های فیبروبلاست سمیت سلولی نشان ندادند و همچنین الیاف هیبریدی منجر به رهایش پایدار دارو در مدت ۴۸ ساعت شد [۲۸-۳۰].

مونومر پیش‌ساز N-هالامین، تری‌متیل‌آمونیوم‌کلرید (APTMAC) بر روی سیلیس مزوپور متصل شد. هیدروژل کیتوسان و پیش‌سازهای N-halamine با سیلیس مزوپور (MSSNPs) با γ-کلروپروپیل-تری‌اتوکسی‌سیلان (CPTES) به‌عنوان عامل اتصال متقابل تهیه شد. ریزساختار متخلخل سه‌بعدی از ایروژل‌های سیلوکسان با چگالی کم و تخلخل بالا از طریق لیوفیلیزاسیون به دست آمد. پس از کلرزنی، ایروژل‌ها فعالیت‌های ضدباکتریایی قوی علیه ۱۰۰ درصد استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli در ۳۰ دقیقه نشان دادند. در مقایسه با مواد هموستاتیک سنتی (پالچ و باند)، ایروژل‌های سیلوکسان میزان احتباس مایع و خواص هموستاتیک خوبی از خود نشان دادند. گلبول‌های قرمز و پلاکت‌ها خواص چسبندگی خوبی بر روی سطح ایروژل‌ها نشان دادند. ایروژل‌های مبتنی بر N-هالامین خواص باکتری‌کشی و هموستاتیک خوبی از خود نشان دادند که کاربرد بالقوه‌ای برای پانسمان زخم دارند [۳۱].

در پژوهشی دیگر، داروی آب‌دوست دگزامتازون سدیم فسفات با آغشته‌کردن هیدروژل کیتوسان بارگیری شد و رهاسازی از کرایوژل یا ایروژل در دو مقدار pH مربوط به بهبود زخم بررسی شد. هدف، مقایسه کارایی بارگذاری دارو و رفتار رهاسازی از ایروژل‌ها و کرایوژل‌ها به‌عنوان تابعی از روش خشک‌کردن، خواص فیزیکوشیمیایی مواد (چگالی، مورفولوژی)، و pH محیط رهاسازی بود. کرایوژل‌ها بازده بارگذاری بالاتر و رهاسازی سریع‌تری را در مقایسه با ایروژل‌ها نشان دادند. چگالی نمونه بالاتر و مقدار pH کمتر محیط رهایش منجر به انتشار پایدارتر در مورد ایروژل‌ها شد. در مقابل، برای کرایوژل‌ها، چگالی و pH محیط رهایش، تأثیر قابل‌توجهی بر سینتیک انتشار نداشت [۳۲]. هموستاز و بهبود سریع زخم برای ترومای اورژانسی، کلید تضمین بقای بیماران مبتلا به خونریزی شدید است. با این حال، توسعه مواد هموستاتیک با فعالیت هموستاتیک عالی و عملکرد ترمیم زخم هنوز یک چالش است. محققان ایروژل هموستاتیک غیرآلی عمدتاً بر پایه نانو هیدروکسی‌آپاتایت فوق‌العاده معدنی زیست‌سازگار (HAP) با پلی‌وینیل‌الکل (PVA) به‌عنوان چسب آلی ساختند. هنگامی که محتوای نانوهیدروکسی‌آپاتایت به ۸۰ درصد وزنی می‌رسد، ایروژل، آب‌دوستی فوق هماتوفیلی و لخته‌شدن خون در شرایط آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که از آب‌دوستی عالی و ساختار تخلخل بالا، می‌تواند به سرعت آب را از خون جذب کند تا سلول‌های خونی و پلاکت‌ها را متمرکز کند و هموستاز را تسریع کند. این ایروژل هم‌سازگاری و سازگاری سلولی خوبی را نشان می‌دهد و قادر به بهبود زخم‌های پوستی است. بنابراین زخم‌پوش قابلیت زیادی در هموستاز سریع و بهبود زخم برای تنظیمات بالینی دارد [۳۳].

زخم‌های مزمن غیرالتیام‌بخش بار اقتصادی قابل‌توجهی را برای سامانه‌های مراقبت‌های بهداشتی نشان می‌دهد و باعث کاهش قابل‌توجه کیفیت زندگی افراد مبتلا می‌شود. پیش‌بینی می‌شود که تقریباً ۰/۵ تا ۲ درصد از جمعیت کشورهای توسعه‌یافته در طول زندگی خود زخم مزمنی را تجربه کنند که نیاز به پیشرفت‌های بیشتر در زمینه مواد مراقبت از زخم دارد. استفاده از ایروژل‌ها برای کاربردهای ترمیم زخم به‌دلیل قابلیت جذب بالای اگزودا و توانایی آن‌ها در ترکیب مواد درمانی، از جمله فلزات کمیاب، برای ارتقای بهبود زخم افزایش یافته است. محققان در پژوهشی ایروژل‌های آلژینات حاوی کلسیم، روی و نقره را سنتز کردند. نتایج نشان داد که ایروژلها جذب مایع عالی از هر یک از فرمول‌ها و ظرفیت‌های بالای نگهداری مایع را نشان میدهند. کلسیم فقط به‌صورت جزئی در حلال‌های متورم‌کننده آزاد می‌شود، بنابراین در آلژینات باقی می‌ماند که به جذب و انتقال سریع مایعات به شبکه ایروژل کمک می‌کند. همچنین حضور نقره، منجر به تعادل بین اثر ضدباکتریایی در مقابل سمیت سلولی می‌شود [۳۴-۳۵].

پژوهشگران ایروژل سیلیکای بارگذاری شده با رسوراترول (RSA) را با استفاده از روش سل-ژل سنتز کردند و از آن به‌عنوان نانوحامل استفاده کردند. نتایج نشان داد که نانوحامل زیست‌سازگار و پایدار است و ممکن است به‌دلیل اثرات ضدالتهابی آن برای درمان آرتروز استفاده شود [۳۵].

در گزارش دیگری، ایروژل هیبریدی سیلیس نانوالیافی با سلول‌های سالم سازگاری زیستی داشت، اما فعالیت ضدتوموری آن‌ها هنگام بارگیری با کمپتوتسین (CPT) به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت [۳۶].

در پژوهشی دیگر میکروذرات ایروژل سیلیکا-ژلاتین نشان‌دار

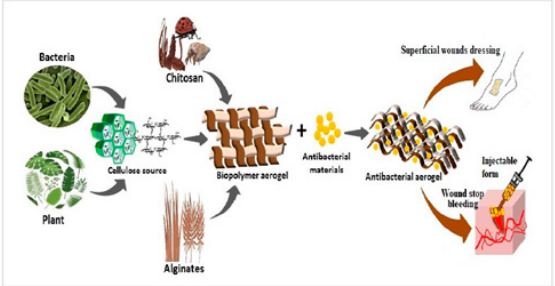
شده با فلورسین (FSGM) را برای ارزیابی سمیت حاد تزریق کردند. آن‌ها گزارش کردند که هیچ ناهنجاری یا اختلال فیزیولوژیکی پس از آزمایش سه‌هفته‌ای کشف نشده است [۳۷]. محققان ایروژل پایه کیتوسان را با خواص افزایش‌یافته برای بهبود زخم‌های سوختگی ایجاد کردند. مطالعات نشان داد ایروژل کیتوسان، حاوی نانوذرات طلا زیست‌سازگار بوده، تکثیر فیبروبلاست را تقویت می‌کند [۳۸].

۶ ایروژل پلی‌ساکارید/کیتوسان برای ساخت زخم‌پوش‌ها

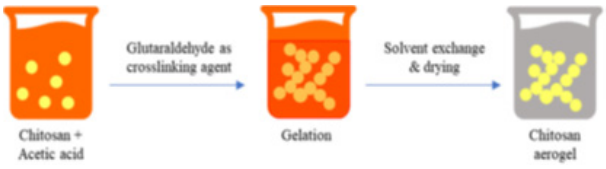
تخلخل ایروژل‌ها آن‌ها را قادر می‌سازد تا حجم بیشتری از ترشحات را در محل زخم جذب کنند. این به نوبه خود التهاب را کاهش می‌دهد و از ایجاد عفونت‌های باکتریایی در زخم‌ها جلوگیری می‌کند [۳۷]. ایروژل‌های پلی‌ساکارید به‌دلیل سمیت کم، پایداری بالا و غیرحساسیت‌زایی با عملکرد زیستی خوب، اغلب در مراقبت از زخم استفاده می‌شوند. ساختار جامد ایروژل پلی‌ساکارید باعث گسترش و مهار محیط رشد سلول‌های زنده می‌شود. آن‌ها همچنین می‌توانند حاوی ماده فعال اولیه مانند داروی ضدمیکروبی برای کمک و تسریع روند بهبود باشند. شکل ۲، ایروژل‌های زیست‌پلیمری را در کاربردهای ترمیم زخم نشان می‌دهد [۳۸].

در جدول ۳ ترمیم زخم و فعالیت ضدمیکروبی ایروژل‌ها به‌صورت خلاصه جمع‌آوری شده است [۲۰].

ایروژل‌های پلی‌ساکارید/کیتوسان نوعی از زیست‌مواد هستند که استفاده از آن‌ها در پانسمان‌های زخم امیدوارکننده است. کیتوسان، پلی‌ساکارید زیست‌سازگار و زیست‌تخریب‌پذیر مشتق‌شده از کیتین، دارای خواص ضدمیکروبی است که می‌تواند به جلوگیری از عفونت در زخم‌ها کمک کند [۲۱]. هنگامی که با پلی‌ساکاریدهای دیگر مانند آلژینات یا سلولز ترکیب می‌شود، می‌تواند ساختاری داربست‌مانند ایجاد کند که باعث بهبود زخم می‌شود. این ایروژل‌ها دارای سطح و تخلخل بالایی هستند که امکان جذب بیشتر ترشحات زخم و حفظ



شکل ۲ ایروژل‌های زیست‌پلیمری برای بهبود زخم در زخم‌پوش‌ها[۱۹].



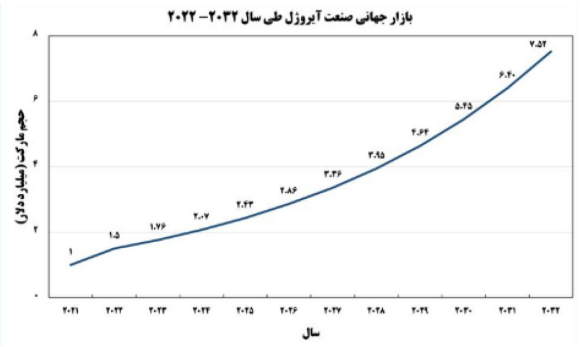
شکل ۳ ایروژل کیتوسان.

رطوبت را فراهم می‌کند [۲۲]. آن‌ها همچنین سد محافظی در برابر آلاینده‌های خارجی ایجاد می‌کنند و در عین حال محیط مرطوبی را حفظ می‌کنند که برای بهبود زخم مفید است. علاوه بر خواص ترمیم زخم، ایروژل‌های پلی‌ساکارید/کیتوسان دارای اثرات ضدالتهابی و آنتی‌اکسیدانی بوده، باعث بازسازی بافت و کاهش زخم می‌شود [۲۳]. آن‌ها را می‌توان به‌راحتی در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف متناسب با انواع زخم‌ها و مکان‌های مختلف قالب‌بندی کرد. به‌طور کلی، ایروژل‌های پلی‌ساکارید/کیتوسان قابلیت زیادی را به‌عنوان ماده‌ای همه کاره و موثر برای پانسمان زخم نشان می‌دهند و ترکیبی از خواص ضدمیکروبی، جاذب و بهبوددهنده را ارائه می‌دهند که می‌تواند درمان انواع مختلف زخم‌ها را بهبود بخشد [۲۷-۲۴].

تاکشیتا و همکاران سنتز کیتوسان بدون آلدهید را با استفاده از اوره نشان دادند. اوره با فرایند آنزیمی یا حرارتی تجزیه می‌شود و NH_3 آزاد می‌کند که به نوبه خود باعث افزایش pH می‌شود. شکل ۳ سامانه‌ای را که منجر به انعقاد (Coagulation) فیزیکی کیتوسان می‌شود، نشان می‌دهد[۱۲].

۷ بازار و چشم‌انداز آتی

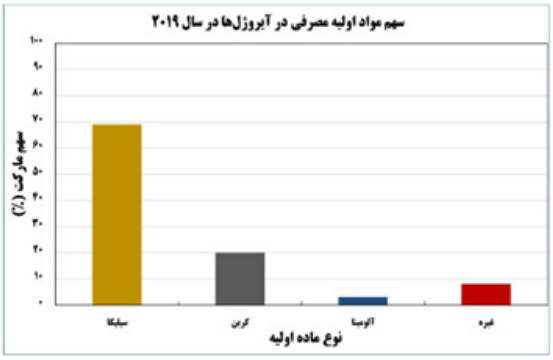
با توجه به گزارش بین المللی Future Market in Sights منتشر شده در سال ۲۰۲۲، حجم بازار جهانی ایروژل‌ها ۱/۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۲ ارزیابی شده است که پیش‌بینی می‌شود با تجربه نرخ رشد مرکب سالیانه ۱۷درصد به ۷/۵میلیارد دلار در سال ۲۰۳۲ برسد. شکل ۴، روند کلی این بازار را طی دوره



شکل ۴ روند جهانی محصولات ایروژل طی سال‌های ۲۰۳۲-۲۰۲۲ [۳۵].

جدول ۳ بررسی بهبود زخم و فعالیت ضدمیکروبی برای انواع مختلف ایروژل‌ها[۲۷-۲۲].

نوع ایروژل	مواد	روش ساخت	نکات مهم
پلیمر	کیتوسان	سل ژل	موثر در کاهش بارهای باکتریایی در محل زخم
پلیمر	کیتوسان	شرایط به کمک مایکروویو با استفاده از عامل اتصال متقابل زیست‌سازگار	دارای خواص ضدباکتریایی برتر در برابر باکتری‌های ذکر شده بود.
غیرآلی	سیلیکا	اصلاح سطح در فاز گاز	ایروژل مملو از کلرهگزیدین قدرت خود را در از بین بردن باکتری E. coli تأیید کرد.
کربن	گرافن	فرایند هیدروترمال و پس از گرماکافت	کارایی بهبود زخم را در عرض ۱۲ ساعت کامل می‌کند.
پلیمر	نشاسته	اتصال عرضی فیزیکی از طریق روش انجماد- ذوب	به نمایش گذاشتن فعالیت ضدمیکروبی عالی در برابر باکتری ذکر شده است.
پلیمر	آلژینات	اشباع فوق بحرانی مزوگلیکان (MSG)	اشباع فوق بحرانی برای به دست آوردن سامانه‌های بارگذاری شده با MSG مناسب است.
پلیمر	آلژینات و کیتوسان	ژل شدن امولسیونی	درصد سطح خراش بازیابی‌شده بالاتر از کنترل درمان نشده است.
کربن	گرافن	کربنیزه سازی	عملکرد عالی برای حذف همزمان استافیلوکوکوس اورئوس به نمایش گذاشته است.
پلیمر	کیتوسان	رسوب الکتروفورتیک در ولتاژ پایین	تسریع در بهبود زخم و کاهش ناحیه زخم
پلیمر	سلولز	خشک کردن انجمادی	فعالیت آنتی بیوتیکی زیاد علیه استافیلوکوکوس اورئوس
پلیمر	آلژینات و کیتوسان	روش سل-ژل به دنبال فرایند خشک کردن انجمادی	فعالیت های ضد باکتریایی قوی تر علیه استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli
پلی‌ساکارید	اسیدهیالورونیک	روش الکترواسپری	ایروژل HA مایکوباکتری‌ها را متصل می‌کند و می‌کشد
پلیمر	متوکسی پلی‌اتیلن‌گلیکول پلی‌کاپرول اکتون	الکتروریسی، پراکندگی همگن، خشک کردن انجمادی و عملیات حرارتی	فعالیت ضدمیکروبی خوب
پلیمر	نانو سلولز	انجماد خشک	فعالیت ضدمیکروبی عالی و طولانی‌مدت علیه استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) و E. coli (گرم منفی)
پلیمر	نانوالیاف کربن و کیتوسان	همگن شدن با فشار بالا و خشک کردن انجمادی	آزمون کاهش باکتری E. coli و S. aureus
پلیمر	آلژینات و کیتوسان	سل-ژل و سیال فوق‌بحرانی	زمان طولانی و ایمنی به سطح زخم
پلیمر	کیتوسان	خشک‌کردن انجمادی	دارای آنتی‌باکتریال عالی برای بهبود زخم
غیرآلی	سیلیکا	تبلور از محلول‌های فوق‌بحرانی	نرخ مهار ۹۵٪ حتی پس از آزادشدن تقریبا ۹۰٪ سینامالدئید (CA) به‌عنوان عامل ضدباکتریایی
پلیمر	کیتوسان	روش قالبگیری	بسیار موثر در مورد E. coli و S. aureus به‌عنوان عوامل ضدباکتری
پلیمر	آلژینات	واکنش میلارد و خشک کردن انجمادی	فعالیت ضدمیکروبی عالی علیه استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli
پلی‌ساکارید	پلی‌وینیل‌الکل	فرایند خشک‌کردن انجمادی/ اتصال متقابل	قابلیت ضدباکتریایی خوبی از خود نشان داد.
پلیمر	کیتوسان	افزودن و لیوفیلیزاسیون	خواص ضدمیکروبی خوب



شکل ۵ روند جهانی محصولات ایروژل طی سال‌های ۲۰۳۲-۲۰۲۲ [۳۶].

۲۰۲۲ تا ۲۰۳۲ نشان می‌دهد [۳۵].

۷-۱ بازار از منظر نوع ماده اولیه

در سال ۲۰۱۹، بخش سیلیکا ایروژل بیشترین سهم را با ۶۹ درصد در بازار جهانی به خود اختصاص داد. این امر به این واقعیت نسبت داده می‌شود که ایروژل‌های سیلیکا دارای خواص منحصربه‌فرد عایق حرارتی و ویژگی‌هایی مانند سبک وزنی، خنثایی شیمیایی و قابلیت استفاده مجدد هستند (شکل۵) [۳۶].

۷-۲ آینده بازار زخم‌پوش‌های پلیمری

ایروژل‌ها می‌توانند به حفظ محیط مرطوب کمک کنند که برای بهبودی بسیار مهم است و همچنین اجازه می‌دهند رطوبت اضافی تبخیر شود و به‌طور بالقوه خطر عفونت را کاهش دهد. برای بهبود زخم‌پوش‌های تجاری ایروژلی باید خواص مطابق با شکل۶ سنتز شود تا طراحی زخم‌پوش‌های ایروژلی با آینده بازار موفقی روبرو شوند [۳۵-۳۰].

همچنین انتظار می‌رود که بازار پانسمان‌های زخم پلیمری ایروژل با پیشرفت‌های علم مواد، افزایش تقاضا برای راه‌حل‌های موثر مراقبت از زخم و تحقیقات مداوم در کاربردهای زیست‌پزشکی، رشد کند. نوآوری در این زمینه می‌تواند منجر به بهبود نتایج درمانی و راحتی بیمار شود. با این حال، چالش‌هایی مانند هزینه‌های تولید، مقیاس‌پذیری و تأییدیه‌های نظارتی باید قبل از پذیرش گسترده مورد توجه قرار گیرند [۳۵-۳۲].

مقدار استفاده از ایروژل‌ها در کاربردهای زیست‌فناوری در بازار جهانی ۸/۴ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ ارزش‌گذاری شد و انتظار می‌رود در دوره پیش‌بینی‌شده با نرخ رشد مرکب سالانه ۱۱/۵ درصد رشد کند [۳۲]. تقاضای فزاینده در این حوزه، محققان را برانگیخته است تا روش‌های جایگزینی برای عملکرد بافت‌ها و اندام‌های مصنوعی بیابند. خواص منحصربه‌فرد فیزیکی و شیمیایی

شکل ۶ خواص مورد انتظار در سنتز موفق برای زخم‌پوش ایروژلی ایده‌آل در بازار

و زیستی زیست‌پلیمرها و ویژگی‌های ساختاری جذاب ایروژل‌ها مانند تخلخل بسیار بالا، چگالی فوق‌العاده کم و مساحت سطح بالا، ترکیب این مواد را در داربست بافتی مورد توجه قرار می‌دهد. آیروژل‌ها می‌توانند باعث ایجاد کاربردهای پزشکی متعددی برای بازسازی پوست، غضروف، استخوان و حتی دریچه‌های قلب و عروق خونی با رشد سلول‌های مورد نظر و همچنین همراه با فاکتور رشد در داربست‌های مهندسی شوند [۳۳].

مهندسی بافت جهانی اندازه بازار را در سال ۲۰۱۹ تقریباً ۹/۹ میلیارد دلار محاسبه کرده است. بنابراین انتظار می‌رود که از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۷ شاهد نرخ رشد ترکیبی سالانه ۱۴/۲ درصدی باشیم و همچنین توانایی روش‌های مهندسی بافت در درمان آسیب‌های برگشت‌ناپذیر بافت، به‌طور قابل‌توجهی رشد بازار را تقویت می‌کند [۳۴].

آینده بازار ایروژل‌ها در پانسمان زخم و زیست‌فناوری امیدوارکننده به‌نظر می‌رسد که توسط چندین روند کلیدی و پیشرفت‌های فناوری هدایت می‌شود. ایروژل‌ها که به‌دلیل ساختار سبک وزن و بسیار متخلخل خود شناخته می‌شوند، ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند جذب بالا، عایق حرارتی و زیست‌سازگاری را ارائه می‌دهند که آن‌ها را برای کاربردهای مختلف پزشکی جذاب می‌کند. از آن‌جایی که تقاضا برای راه‌حل‌های پیشرفته مراقبت از زخم همچنان در حال رشد است، ایروژل‌ها به‌دلیل توانایی در بهبود و در عین حال به حداقل رساندن خطر عفونت احتمالاً کشش پیدا می‌کنند[۳۵]. شیوع روزافزون زخم‌های مزمن و پیری جمعیت، نیاز به مواد نوآورانه‌ای دارد که می‌تواند به‌طور موثر محیط زخم را مدیریت کند، افزایش می‌دهد. توانایی ایروژل‌ها برای حفظ تعادل رطوبت و ایجاد مانع تنفسی به‌خوبی با تقاضا برای بهبود نتایج بیمار هم‌خوانی دارد.

علاوه بر این، تحقیق و توسعه مداوم در زیست‌فناوری احتمالاً کاربردهای ایروژل‌ها را فراتر از پانسمان‌های زخم گسترش

می‌دهد. ادغام بالقوه آن‌ها با عوامل زیست‌فعال، مانند فاکتورهای رشد یا ترکیبات ضدمیکروبی، می‌تواند خواص درمانی آن‌ها را افزایش دهد و به گزینه‌های درمانی موثرتری منجر شود. ترکیب ایروژل‌ها با فناوری‌های هوشمند، مانند حسگرهایی که شرایط زخم را بررسی می‌کنند، می‌تواند با فعال‌کردن بازخورد و تنظیمات در زمان واقعی، مراقبت از بیمار را متحول کند[۳۶]. علاوه بر این، ملاحظات زیست‌محیطی و فشار برای مواد پایدار بر توسعه محصول تأثیر می‌گذارد. ایروژل‌ها را می‌توان از منابع طبیعی یا زیست‌تخریب‌پذیر مهندسی کرد و با تاکید روزافزون بر راه‌حل‌های بهداشتی سازگار با محیط زیست هماهنگ شد [۳۷]. این تغییر می‌تواند همکاری بین دانشمندان مواد و ارائه‌دهندگان مراقبت‌های بهداشتی را برای توسعه محصولات نوآورانه‌ای که نیازهای درمانی و محیطی را برآورده می‌کند، هدایت کند. با افزایش آگاهی از مزایای ایروژل‌ها در جامعه پزشکی، همراه با پیشرفت در فنون تولید که هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و مقیاس‌پذیری را بهبود می‌بخشد، بازار ایروژل‌ها در پانسمان زخم و زیست‌فناوری به‌طور قابل‌توجهی گسترش می‌یابد [۳۸]. این تکامل احتمالاً باعث ایجاد چشم‌انداز رقابتی می‌شود و نوآوری مداوم و معرفی طیف متنوعی از محصولات را تشویق می‌کند. به‌طور خلاصه، آینده ایروژل‌ها در بخش‌های پانسمان زخم و زیست‌فناوری به ویژگی‌های سودمند آن‌ها، افزایش تقاضا برای راه‌حل‌های پزشکی پیشرفته و پتانسیل توسعه پایدار وابسته است. با پیشرفت تحقیقات و بررسی بیشتر کاربردهای مراقبت‌های بهداشتی، ایروژل‌ها می‌توانند به ماده اساسی در تکامل مراقبت از زخم به روش‌های جدید با نوآوری‌های زیست‌فناورانه تبدیل شوند[۴۰-۳۹].

۸ نتیجه‌گیری

ایروژل‌ها به‌دلیل خواص منحصربه‌فرد خود مانند تخلخل بالا، مساحت سطح بزرگ و زیست‌سازگاری عالی به‌عنوان ماده‌ای امیدوارکننده در بهبود زخم ظاهر شده‌اند. این ویژگی‌ها امکان انتقال دارو، حفظ رطوبت و تکثیر سلولی را فراهم می‌کند و در نهایت باعث بهبود سریع‌تر زخم می‌شود. تحقیقات نشان داده است که ایروژل‌ها می‌توانند به‌طور موثر ترشح زخم را مدیریت کنند، از عفونت جلوگیری کنند و بازسازی بافت را تقویت کنند. علاوه بر این، ماهیت همه کاره آن‌ها امکان سفارشی‌سازی برای برآوردن نیازهای خاص ترمیم زخم را فراهم می‌کند. در حالی که مطالعات بیشتری برای بهینه‌سازی خواص ایروژل و فرمول‌بندی برای کاربردهای بالینی مورد نیاز است، مزایای بالقوه ایروژل در بهبود زخم واضح است. به‌طور کلی، ایروژل‌ها آینده امیدوارکننده‌ای را در زمینه مراقبت از زخم ارائه می‌کنند و این توانایی را دارند که روش درمان زخم‌ها را متحول کنند. استفاده از ایروژل‌های بر پایه کیتوسان برای ترمیم زخم، رویکردی نویدبخش و نوآورانه در زمینه مواد زیستی است. خواص منحصربه‌فرد ایروژل‌ها، مانند تخلخل بالا، مساحت سطح بزرگ و زیست‌سازگاری، آن‌ها را به‌عنوان گزینه‌ی ایده‌آل برای افزایش روند بهبود زخم تبدیل می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که ایروژل‌های مبتنی بر کیتوسان می‌توانند چسبندگی، تکثیر و مهاجرت سلولی را تقویت کرده، منجر به بسته‌شدن سریع‌تر و مؤثرتر زخم شوند. علاوه بر این، آزادسازی کنترل‌شده مولکول‌های فعال زیستی از ایروژل‌ها می‌تواند با کاهش التهاب و ترویج بازسازی بافت، روند بهبودی را بیشتر کند. به‌طور کلی، ترکیب ایروژل‌های بر پایه کیتوسان در پانسمان‌ها و داربست‌های زخم، قابلیت ایجاد انقلابی در درمان زخم‌های حاد و مزمن را دارد. ادامه تحقیق و توسعه در این زمینه در بهینه‌سازی طراحی و کارایی این مواد زیستی برای استفاده بالینی بسیار مهم خواهد بود.

مراجع

1. Alipour H., Koosha M., Sarraf Shirazi M.J., and Jebali A., Modern Commercial Wound Dressings and Introducing New Wound Dressings for Wound Healing: *A Review, Basparesh*, 6,65-80, **2017**.

2. Chouhan D., Dey N., Bhardwaj N., and Mandal B.B., Emerging and Innovative Approaches for Wound Healing and Skin Regeneration: Current Status and Advances, *Biomaterials*, 216,119267, **2019**.

3. Yang J.A., Yeom J., Hwang B.W., Hoffman A.S., and Hahn S.K., In-situ Forming Injectable Hydrogels for Regenerative Medicine, *Prog. Polym. Sci*., 39, 1973-1986, **2014**.

4. Hosseini M. and Mobedi H., Injectable In-situ Forming Drug Delivery Systems Based on Biodegradable Polymers, *Basparesh*, 6, 3-12, **2016**.

5. Hosseini M. and Mobedi H., Injectable In-situ Forming Drug Delivery Systems Based on Biodegradable Polymers, *Basparesh*, 6, 3-12, **2016**.

6. Kamoun E.A., Kenawy E.-R.S., and Chen X., A Review on Polymeric Hydrogel Membranes for Wound Dressing Applications: PVA-Based Hydrogel Dressings, *J. Am. Acad. Derm.*, 8, 217-233, **2017**.

7. Zahedi P., Rezaeian I., RanaeiSiadat S.O., Jafari S.H., and Supaphol P., A Review on Wound Dressings with an Emphasis on Electrospun Nanofibrous Polymeric Bandages, *Polym. Adv. Technol*., 21, 77-95, **2010**.

8. Wood R., Williams R., and Hughes L., Foam Elastomer Dressing in the Management of Pen Granulating Wounds: Experience with 250 Patients, J. Brit. Surg., 64, 554-557, **1977**.

9. Ruel-Gariepy E. and Leroux J.-C., In-situ Forming Hydrogels- A Review of Temperature Sensitive Systems, Europ. *J. Pharm. Biopharm*., 58, 409-426, **2004**.

10. Dimatteo R., Darling N.J., and Segura T., In-situ Forming Injectable Hydrogels for DrugDelivery and Wound Repair, *Adv. Drug. Deliv. Rev*., 127, 167-184, **2018**.

11. Sharma S., Madhyastha H., Laxmi Swetha K., Maravajjala K.S., Singh A., Madhyastha R.,Nakajima Y., and Roy A., Development of an In-situ Forming, Self-healing Scaffold for Dermal Wound Healing: In-vitro and In-vivo Studies, *Mater. Sci. Eng -C*, 128, 112263, **2021**.

12. Castillo L., Castro-Alpízar J.A., Lopretti M., and Vega Baudrit J., Exploration of Bioengineered Scaffolds Composed of Thermo-responsive Polymers for Drug Delivery in Wound Healing, Int. *J. Mol. Sci*., 22, 1408, **2021**.

13. Zakerikhoob M., Abbasi S., Yousefi G., Mokhtari M., and Noorbakhsh M.S., Curcumin Incorporated Crosslinked Sodium Alginate-g-Poly(N-Isopropyl Acrylamide) Thermo-responsive Hydrogel as an In-situ Forming Injectable Dressing for Wound Healing: In-vitro Characterization and In-vivo Evaluation, *Carbohydr. Polym*., 271, 118434, **2021**.

14. Karami M.H., Aghabarari B., The Advancement of Molybdenum Disulfide Quantum Dots Nanoparticles as Nanocarrier for Drug Delivery Systems: Cutting-edge in Dual Therapeutic roles, *J. Mol. Struct*. 1318(1) , 139149, **2024**.

15. Karami M.H., Abdouss, M ., Kalaee M.R., Moradi O., Investigating the Antibacterial Properties of Chitosan Nanocomposites Containing Metal Nanoparticles for Using in Wound Healings: *A Review Study*, *Basparesh*, **2024**.

16. Moradian A., Zandi M., Behzadnasab M., and Pezeshki-Modaress M., Synthesis Methods of In-situ Forming Injectable Hydrogels and Their Applications in Tissue Engineering: A Review, Iran. *J. Polym. Sci. Technol*., 33, 95-113, **2020**.

17. Pratt A.B., Weber F.E., Schmoekel H.G., Müller R., and Hubbell J.A., Synthetic Extracellular Matrices for In-situ Tissue Engineering, Biotechnol. *Bioeng*., 86, 27-36, **2004**.

18. Peng J., Zhao H., Tu C., Xu Z., Ye L., Zhao L., Gu Z., Zhao D., Zhang J., and Feng Z., In-situ Hydrogel Dressing Loaded with Heparin and Basic Fibroblast Growth Factor for Accelerating Wound Healing in Rat , Mater. *Sci. Eng-C*., 116, 111169, **2020**.

19. Guo J., Sun W., Kim J.P., Lu X., Li Q., Lin M., Mrowczynski O., Rizk E.B., Cheng J., Qian G., and Yang J., Development of Tannin-inspired Antimicrobial Bioadhesives, *Acta Biomater*., 72, 35-44, **2018**.

20. Maia J., Ferreira L., Carvalho R., Ramos M.A., and Gil M.H., Synthesis and Characterization of New Injectable and Degradable Dextran-based Hydrogels, *Polymer*, 46, 9604-9614, **2005**.

21. Qu J., Zhao X., Liang Y., Zhang T., Ma P.X., and Guo B., Antibacterial Adhesive Injectable Hydrogels with Rapid Self-healing, Extensibility and Compressibility as Wound Dressing for Joints Skin Wound Healing, *Biomaterials*, 183, 185-199, **2018**.

22. Xuan H., Wu S., Fei S., Li B., Yang Y., and Yuan H., Injectable Nanofiber-Polysaccharide Self-healing Hydrogels for Wound Healing, Mater. *Sci. Eng-C*., 128, 112264, **2021**.

23. Karami M. H., Abdouss M.,Cutting-edge Tumor Nanoth-

erapy: Advancements in 5-fluorouracil Drug-loaded Chitosan Nanoparticles, Inorg. *Chem, Commun.,* 164, 112430, **2024**.

24. Karami M.H., KalaeeM.R., Mazinani S., Shakiba M., Shafiei Navid, S., Abdouss, M., Beig Mohammadi A., Zhao A., Koosha M., Song Z .,Li T., Curing Kinetics Modeling of Epoxy Modified by Fully Vulcanized Elastomer Nanoparticles Using Rheometry Method, *Molecules* ., 27, 2870, **2022**.

25. Karami M. H., Abdouss M., Recent Advances of Carbon quantum dots in Tumor Imaging, *Nanomed J*.11(1) , 13-35, **2024**.

26. Le Thi P., Lee Y., Tran D.L., Thi T.T.H., Kang J.I., Park K.M., and Park K.D., In-situ Forming and Reactive Oxygen Species-Scavenging Gelatin Hydrogels for Enhancing Wound Healing Efficacy, *Acta biomater.*, 103, 142-152, **2020**.

27. Lih E., Lee J.S., Park K., and Park K., Rapidly Curable Chitosan-PEG Hydrogels as Tissue Adhesives for Hemostasis and Wound Healing, *Acta biomater.*, 8, 3261-3269, **2012**.

28. Sakai S. and Nakahata M., Horseradish Peroxidase Catalyzed Hydrogelation for Biomedical, Biopharmaceutical, and Biofabrication Applications, *Chem*, *Asian. J.*, 12, 3098-3109, **2017**.

29. Jeon E.Y., Hwang B.H., Yang Y.J., Kim B.J., Choi B.-H., Jung G.Y., and Cha H.J., Rapidly Light-activated Surgical Protein Glue Inspired by Mussel Adhesion and Insect Structural Crosslinking, *Biomaterials*, 67, 11-19, **2015**.

30. Karami M. H., Abdouss M., Maleki B., The State of the Art metal Nanoparticles in Drug Delivery Systems: A Comprehensive Review. *Nanomed J*, 11(3) , 222-249, **2024**.

31. Yu J., Huang T.R., Lim Z.H., Luo R., Pasula R.R., Liao L.D., Lim S., and Chen C.H., Production of Hollow Bacterial Cellulose Microspheres Using Microfluidics to Form an Injectable Porous Scaffold for Wound Healing, Adv. Healthc. *Mater*., 5, 2983-2992, **2016**.

32. Joseph S.M., Krishnamoorthy, S Paranthaman., R Moses, J. A Anandharamakrishnan, C. A., Review on Source-specific Chemistry, Functionality, and Applications of Chitin and Chitosan. *Carbohydr*. *Polym. Technol*. Appl, 2, 100036, **2021**.

33. Issera W.M.J.C.,Rathnayake S.I., Abeyrathne E.D.N.S., Nam K. C., An Improved Extraction and Purification Method for Obtaining High-quality Chitin and Chitosan from Blue Swimmer (Portunus Pelagicus) Crab Shell Waste. *Food Sci. Biotechnol*, 30, 1645–1655, **2021**.

34. Machałowski T., Wysokowski M., Tsurkan M.V., Galli R.; Schimpf C., Rafaja D., Brendler E., Viehweger C., Żółtowska-Aksamitowska S., Petrenko I.,et al. Spider Chitin: An Ultrafast Microwave-assisted Method for Chitin Isolation from Caribena Versicolor Spider Molt Cuticle. *Molecules*, 24, 3736, **2019**.

35. Ahmad S.I., Ahmad R., Shoeb Khan, M Kant., R Shahid., S Gautam., L Hasan., G. M Hassan., M.I. Chitin and Its Derivatives: Structural Properties and Biomedical Applications. Int. *J. Biol. Macromol*, 164, 526–539, **2020**.

36. Dave U., Somanader E., Baharlouei P., Pham L., Rahman, M.A. Applications of Chitin in Medical, Environmental, and Agricultural Industries. *J. Mar. Sci. Eng*, 9, 1173, **2021**.

37. Parale V. G., Lee K., Jungn H., Nah H., Choi H., Kim T., Phadtare V. D., Park H., Facile Synthesis of Hydrophobic, Thermally Stable, and Insulative Organically Modified Silica Aerogels Using Coprecursor Method, *Ceramics International*, 44, 3966-3972, **2018**.

38. Ma H.S., Roberts A.P., Prevost J.H., Jullien R., Scher er W.G., Mechanical Structure, Property Relationship of Aero gels, *Non-crystalline Solids*, 141, 127-277, **2000**.

39. Yuan B., Ding S., Wang D., Wang G., Li H., Heat Insulation Properties of Silicaero-gel/glass Fiber Composites Fabricated by Press Forming, *Materials Letters* 75, 204-206, **2012**.

40. Karout A., Buisson P., Perrard A., Pierre A.C., "Shaping and Mechanical Reinforcement of Silica Aerogel Biocatalysts with Ceramic Fiber Felts, Sol-Gel, *Science and Technology*, 36, 61-63, **2005**.

41. Markevicius G., Ladj R., Niemeyer P., Budtova T., Ri gac ci A., Ambient-dried Thermal Super Insulating Monolithic Sili ca-based Aerogels with Short Cellulosic Fiber, *Materials Science*, 52, 2210-2221, **2016**.