کاربرد آیروژل ها در زخم پوش ها

محمدحسین کرمی[1*]، علی زمانیان[2*]

۱- پژوهشگر ، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران
۲- استاد، پژوهشکده فناوری نانو و مواد پیشرفته، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران

چکیده:

آیروژل ها مواد جامد سبک وزنی هستند که از مواد آلی یا معدنی یا به صورت کامپوزیت تهیه می شوند و به عنوان مواد پیشرفته برای کاربردهای مختلف مورد بررسی قرار می گیرند. آیروژل ها، طیف متنوعی از خواص را با عملکرد عالی نشان داده اند. استفاده از آیروژل ها، در کاربردهای روزانه به دلیل هزینه بالا و روش پیچیده تهیه آنها محدود است. روش خشک کردن آیروژل ها به خودی خود یک کار خسته کننده است که نیاز به انرژی و منابع بالایی دارد. آیروژل ها هنگامی که به عنوان کامپوزیت تهیه می شوند می توانند خواص مکانیکی را به طور هم افزایی افزایش دهند. علاوه بر این، آیروژل‌ها 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 با استفاده از آیروژل در کاربردهای ترمیم زخم نیز وجود دارد. به عنوان مثال، تولید آیروژل ها در مقیاس بزرگ ممکن است گران باشد، که ممکن است پذیرش گسترده آنها را در محیط های بالینی محدود کند. علاوه بر این، خواص مکانیکی آیروژل‌ها ممکن است برای همه انواع زخم‌ها مناسب نباشد، زیرا ممکن است پشتیبانی کافی برای انواع خاصی از زخم‌ها ارایه نکنند. به طور کلی، در حالی که آیروژل‌ها برای کاربردهای ترمیم زخم اهمیت زیادی دارند، تحقیقات بیشتری برای غلبه بر این چالش‌ها و بهینه سازی استفاده از آنها در محیط‌های بالینی مورد نیاز است. در این پژوهش، به بررسی معرفی انواع زخم پوش ها، زخم پوش های تجاری، آیروژل های پایه کیتوسان، خواص و کاربرد آیروژل ها در زخم پوش ها پرداخته می شود.

واژگان کلیدی : آیروژل، زخم پوش، ضد باکتری، کیتوسان، کامپوزیت

* **مسئول مکاتبات :karami.polymerohd@gmail.com, a.zamanian@merc.ac.ir**

Application of Aerogels in Wound Dressings

MohammadHossein Karami[1]* , Ali Zamanian[1†]

[1] Department of Nanotechnology and Advanced Materials, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran

Abstract:

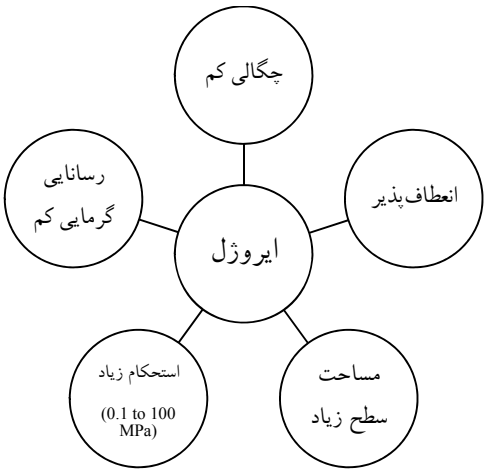
Aerogels are solid materials made from organic or inorganic materials or composites and have been researched as advanced materials for various applications. They possess many properties and are highly effective. However, their use in everyday applications is restricted due to their high cost and complexity of production. The process of drying aerogels is intricate and requires a significant amount of energy and resources. When utilized as composites, aerogels can enhance mechanical properties and can be tailored to release bioactive molecules, such as growth promoters or antibiotics, to accelerate the healing process. However, there are numerous challenges associated with using aerogels in wound healing applications, including issues with large-scale production and mechanical properties that may not be suitable for all types of wounds. Further research is necessary to enhance their clinical utility. This study investigated various types of dressings, including commercial dressings, chitosan-based aerogels, and aerogel products, and their application in wound dressings.

Keywords: Aerogel, Wound Dressing, Antibacterial, Chitosan, Composite

† **E-mail addresses**:: karami.polymerphd@gmail.com, a.zamanian@merc.ac.ir

۱-مقدمه:

در سال های اخیر فناوری نانو تحولات چشمگیری را در صنایع مختلف ایجاد کرده است. ساختارهای مختلفی از نانومواد به صورت تجاری یا تحقیقاتی مورد استفاده قرار گرفته اند[۱]. آیروژل ها دسته ای از نانومواد متخلخل اند که امروزه مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته اند. زیرا این مواد طیف گستردهای ازخواص استثنایی از جمله مساحت سطح زیاد، تخلخل بالا، چگالی بسیار کم، هدایت حرارتی بسیار پایین، ضریب شکست کم، ثابت دی الکتریک بسیار پایین را دارا هستند. منافذ آیروژل ها می توانند به طور منظم آرایش یابند یا به طور نامنظم با کلوخه های ذرات کوچکتر یا ایجاد اتصال عرضی در زنجیرهای پلیمری ایجاد شوند. نوع، شکل و اندازه منافذ بر ویژگی های فیزیکی مواد متخلخل اثرگذار می باشند. این ویژگی‌ها به آئروژل‌ها اجازه می‌دهد تا مقادیر زیادی از ترشحات زخم را جذب و حفظ کنند، با ایجاد یک محیط مرطوب زخم، بهبودی را بهبود بخشند و با عمل به عنوان مانعی در برابر آلاینده‌های خارجی، خطر عفونت را کاهش دهند[۲]. علاوه بر این، آئروژل ها زیست سازگار هستند و پاسخ ایمنی (immune response)، ایجاد نمی کنند، و آنها را برای استفاده در انواع زخم های حساس مانند سوختگی و زخم های مزمن مناسب می کند. علاوه بر این، آیروژل‌ها 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 با استفاده از آئروژل در کاربردهای ترمیم زخم نیز وجود دارد. به عنوان مثال، تولید آیروژل ها در مقیاس بزرگ ممکن است گران باشد، که ممکن است پذیرش گسترده آنها را در محیط های بالینی محدود کند[۳]. علاوه بر این، خواص مکانیکی آئروژل‌ها ممکن است برای همه انواع زخم‌ها مناسب نباشد، زیرا شکننده هستند و ممکن است پشتیبانی کافی برای انواع خاصی از زخم‌ها ارائه نکنند. زخم پوش ایده آل باید دارای ویژگی های مانند غیر سمی و غیرمحرک بودن، زیست تخریب پذیری 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]. به طور کلی، در حالی که آیروژل‌ها برای کاربردهای ترمیم زخم اهمیت زیادی دارند، تحقیقات بیشتری برای غلبه بر این چالش‌ها و بهینه سازی استفاده از آنها در محیط‌های بالینی مورد نیاز است [۵]. آیروژل ها دارای تعدادی خواص مکانیکی منحصر به فرد هستند که آنها را به ماده ای مطلوب برای کاربردهای مختلف تبدیل می کند. برخی از خواص مکانیکی کلیدی آیروژل ها در شکل۱، نشان داده شده است. در این پژوهش، به بررسی معرفی انواع زخم پوش ها، زخم پوش های تجاری، آیروژل های پایه کیتوسان، خواص و کاربرد آیروژل ها در زخم پوش ها پرداخته می شود.



شکل۱. برخی از خواص مکانیکی کلیدی آیروژل ها

۲- طبقه بندی زخم پوش های آیروژلی

آیروژل ها مواد بسیار متخلخل با چگالی کم و سطح بالا هستند که آنها را برای کاربردهای مختلف از جمله پانسمان زخم ایده آل می کند. در میان انواع مختلف، آئروژل های سیلیکا به دلیل حفظ رطوبت عالی و خواص عایق حرارتی خود شناخته می شوند که به حفظ یک محیط مرطوب زخم برای بهبود کمک می کند[۶]. آئروژل‌های مبتنی بر پلیمر، مانند آنهایی که از پلی اتیلن گلیکول 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. آئروژل های کامپوزیتی که اجزای آلی و معدنی را با هم ترکیب می کنند، خواص مناسبی مانند استحکام مکانیکی بهبود یافته و فعالیت ضد میکروبی ارائه می دهند و نیاز به پیشگیری از عفونت در مراقبت از زخم را برطرف می کنند[۷]. آئروژل های کربوکسی متیل سلولز به ویژه در جذب اگزودا موثر هستند و در عین حال مانع محافظتی در برابر آلاینده های خارجی می شوند. علاوه بر این، آئروژل‌های مبتنی بر کیتوسان دارای خواص ضد باکتریایی هستند و زیست تخریب‌پذیر هستند و با تقاضای رو به رشد برای محصولات پزشکی سازگار با محیط زیست هماهنگ هستند[۸]. برخی از مطالعات اخیر بر ترکیب نانوذرات، مانند اکسید نقره یا روی، در آیروژل‌ها تمرکز کرده‌اند تا قابلیت‌های ضد میکروبی آن‌ها را بدون به خطر انداختن خواص ذاتی آن‌ها افزایش دهند. علاوه بر این، آیروژل‌هایی 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]. به طور کلی، تطبیق پذیری آیروژل ها امکان ایجاد پانسمان های چند منظوره زخم را فراهم می کند که می توانند با انواع زخم ها از جمله زخم های مزمن، حاد و

جراحی ســازگار شــوند و در عین حال به نیازهای درمانی خاص نیز پاســخ دهند. این پیشــرفت‌ها پتانســیل آئروژل‌ها را در متحول کردن مدیریت مراقبت از زخم از طریق راه‌حل‌های نوآورانه و مؤثر برجســته می‌کند. در جدول۱، انواع آیروژل و خصوصیات آنها در زخم پوش ها جمع آوری شده است[۱۰].

جدول۱. انواع آیروژل و خصوصیات در زخم پوش ها[۱-۱۰] .

انواع آیروژل	خصوصیات در زخم پوش ها
سیلیس	آیروژل های سیلیکا به دلیل ساختار متخلخل خود می توانند مایعات را به طور موثر جذب کنند. به طور کلی به عنوان بی خطر و زیست سازگار شناخته می شود.: در صورت نیاز در مراقبت از زخم برای کنترل دما استفاده می شوند.
پلیمری	می‌تواند با خطوط بدن مطابقت داشته باشد و راحتی و تناسب بهتری را بر روی اشکال مختلف زخم فراهم کند. می تواند زخم را مرطوب نگه دارد و باعث بهبود سریعتر شود. سازگارتر با محیط زیست، به ویژه هنگام استفاده از پلیمرهای طبیعی. مهندسی آسان با عوامل ضد باکتری یا سایر ترکیبات شفابخش.
کربنی	قابلیت جذب عالی که ممکن است به کنترل تر شحات در زخم کمک کند. شیمی سطح را می توان برای اثرات ضد میکروبی اضافی اصلاح کرد. مدیریت و اعمال آسان بدون افزودن حجم قابل توجهی.
کامپوزیتی	ترکیب مواد مختلف می تواند استحکام مکانیکی، جذب یا اثرات ضد میکروبی را افزایش دهد. می تواند برای رساندن داروهایی مانند آنتی بیوتیک ها به طور مستقیم به محل زخم طراحی شود. می تواند داروهای مایع را در حالی که زخم را مرطوب نگه می دارد، نگه دارد.
زیست فعال	ممکن است شامل مولکول‌های فعال زیستی یا سلول‌هایی باشد که باعث بهبودی می شوند. باعث باز سازی و ترمیم بافت می شود . یکپارچگی با محل زخم را افزایش می دهد.

ویژگی‌های قابل توجهی در طیف وسیعی از انواع آئروژل‌ها ظاهر شد، مانند آیروژل های سیلیکا، پلیمری، و فرم‌های ترکیبی، که بر تجزیه‌پذیری زیستی، زیست‌سازگاری، نفوذپذیری و ظرفیت تقلید ساختارهای بیولوژیکی تأکید می‌کند. آئروژل ها در کاربردهای مختلف زیست پزشکی، از جمله دستگاه های قابل کاشت، حس زیستی، ترمیم زخم، پزشکی احیا کننده، دارورسانی و تشخیص استفاده می شوند [۱۱]. کاربرد Aerogel در درمان ضد میکروبی یک حوزه جدید و امیدوارکننده از تحقیقات پزشکی است. آئروژل ها مزایای زیادی برای کاربردهای ضد میکروبی دارند. آنها به دلیل ویژگی های متمایز خود، که شامل سطح بزرگ، تخلخل، و ویژگی های قابل تنظیم است، به خوبی شناخته شده اند. این ویژگی‌ها به آئروژل‌ها 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، به دلیل زیست سازگاری، زیست تخریب پذیری و پتانسیل عملکردی، آنها گزینه های عالی برای درمان عفونت های میکروبی با حداقل اثرات

منفی ه ستند. آئروژل ها پتان سیل بهبود نتایج درمان، کاهش مقاومت دارویی و ر سیدگی به م سائل تکرار شونده در درمان ضد میکروبی را دارند، زیرا توانایی آنها در محصور کردن و محافظت از ترکیبات ضد میکروبی دارند [۱۳]

۳- مکانیسم های بهبود زخم آیروژل ها

یکی از مکانیسم‌های فعالیت ضد میکروبی آیروژل، ظرفیت آن برای متورم شدن است. آئروژل ها باعث حفظ محیط مرطوب زخم می شوند، که برای تسهیل مهاجرت و تکثیر انواع مختلف سلول های دخیل در روند بهبود ضروری است. ظرفیت آئروژل برای جذب رطوبت ا ضافی از محل زخم به جلوگیری از تأثیر مایعات بر بافت سالم اطراف کمک می کند، که با ایجاد یک زیستگاه نامناسب برای تکثیر میکروبی، احتمال عفونت های مکرر را کاهش می دهد و باعث تسریع در روند بهبودی می‌شود[۱۴]. علاوه بر این، آیروژل ها یک گزینه امیدوارکننده برای کنترل خونریزی ه ستند. آنها می توانند به سرعت خون را از یک زخم خونریزی جذب کنند، که به تشکیل لخته و کاهش از دست دادن خون کمک می کند و یک سد هموستاتیک ایجاد می کند. مطالعات زیادی اثر ضد میکروبی آئروژل ها را ثابت کرده اند[۱۵]. آیروژل هیبرید سیلیکا /کیتو سان، اثرات ضد باکتریایی بر علیه استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli نشان داد، جایی که حدود نیمی از باکتری ها 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. آئروژل های نانوالیافی (CNF) یافته‌های این مطالعه ویژگی‌های غیرسمی و زیست تخریب‌پذیر آئروژل‌ها را نشان می‌دهد و ایمنی و کاربرد آن‌ها را در رهایش دارو ثابت می‌کند. در محافظت از خواص آنزیمی و ضد باکتریایی عوامل بارگذاری شده در زمانی که نانوالیاف سلولزی به عنوان ماتریس پشتیبانی برای ترکیبات زیست فعال استفاده شد[۱۶]. این نشان می دهد که آئروژل های CNF ممکن است ابزار مفیدی برای تحویل مواد فعال زیستی باشند. علاوه بر این، ویژگی های زیست سازگار و زیست تخریب پذیر نانوالیاف سلولزی باعث بهبود آئروژل می شود. م شخ صات ایمنی کلی کامپوزیت ها همه موارد در نظر گرفته شده، این را می توان با اثر ترکیبی ضد باکتری AgNPs و CNF کاتیونی تو ضیح داد[۱۷]. اثر ضد باکتریایی نقره به دلیل توانایی آن در اتصال به دیواره سلولی باکتری با بار منفی است و در نتیجه منجر به در قطع تنفس سلولی و نفوذپذیری دیواره سلولی که باعث متلاشی شدن و مرگ باکتری می شود [۱۸]. در مطالعه دیگری، آمپی سیلین در آئروژل های کیتوسان بارگذاری شد، جایی که اثر ضد میکروبی قوی از خود نشان داد. آمپی سیلین و کیتوسان زمانیکه با هم استفاده میشوند، اثربخشی را در برابر باکتری های مختلف افزایش می دهند. حتی در دوزهای

پایین آمپی سیلین منجر به هم افزایی در فعالیت ضد باکتریایی قوی شد. علاوه بر این، آزمایش سمیت سلولی آزمایشگاهی بر روی سلول های انسانی زیست سازگاری کامپوزیت های آئروژل را ثابت کرد[۱۹]. علاوه بر این، آئروژل‌های کیتوزان به طور موثری بهبود زخم را در مدل زخم موش صحرایی در داخل بدن تسریع می بخشند و پتانسیل خود را برای درمان‌های ضد میکروبی و نشان می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند که وقتی نانوذرات فلزی، مانند نقره یا مس، در آئروژل‌ها ترکیب می شوند، یک مکانیسم دفاعی ضد میکروبی قوی از طریق تولید گونه‌های اکسیژن فعال (ROS) ارائه می‌کنند[۲۰]. این اثر ضد باکتریایی طولانی مدت و آزادسازی پایدار نانوذرات فلزی را تضمین می کند. سطح بزرگ آئروژل ها همچنین این امکان را برای نانوذرات فراهم می کند که به طور موثر در معرض نور یا شرایط محیطی قرار بگیرند که باعث تولید ROS می شود[۲۱]. این ترکیبات بیولوژیکی حیاتی مانند DNA، پروتئین ها و لیپیدها را هدف قرار می دهند و به سلول های میکروبی آ سیب می ر سانند. ROS باعث آ سیب اک سیداتیو می شود که منجر به مرگ سلول های میکروبی با اختلال در عملکردهای ضروری سلولی و تضعیف ساختارهای میکروبی می شود [۲۲]. آئروژل‌های فوتوکاتالیستی با ترکیب آئروژل‌ها و مواد فوتوکاتالیستی مانند TiO_2، رویکرد جدیدی را به فناوری ضد میکروبی نشان می‌دهند. مکانیسم عمل آنها شامل استفاده از نور به عنوان یک کاتالیزور برای ایجاد فرآیندهای شیمیایی است که ROS را تولید می کند. TiO_2 موجود در ساختار متخلخل آئروژل‌ها، هنگامی که در معرض نور UV قرار می‌گیرد، فوتوکاتالیز را آغاز می‌کند و در نتیجه ROS مانند یون‌های سوپراکسید و رادیکال‌های هیدروکسیل تولید می‌شود. ترکیب سطح بالای آئروژل و فعالیت فوتوکاتالیستی اثر ضد میکروبی آن را تقویت می کند [۲۳].

۴-خواص آنتی باکتری آیروژل ها:

در تحقیقات اخیر، مشخص شده است که بسیاری از مواد با خواص ضد باکتریایی در سیستم‌های ماتریکس نانوسلولزی در طول ساخت آئروژل‌ها گنجانده شده‌اند[۲۴].این سیستم های ماتریسی شامل عصاره های گیاهی، اسانس ها، نانوذرات نقره، و آنزیم ها، که نشان داده شده است که فعالیت ضد باکتریایی خود را پس از بی حرکت شدن در آئروژل حفظ می کنند[۲۵]. یحیی و همکاران دریافتند که فعالیت ضد باکتریایی عصاره پوست Punica granatum نسبت به آنتی‌بیوتیک‌های رایج، اثر قوی‌تری از فعالیت ضد باکتریایی نشان می‌دهد[۲۶].

در مطالعه ای توسط خان و همکاران، نانوذرات نقره و آنزیم‌ها در داخل آیروژل های نانو الیاف کربن قرار گرفتند، و برای کاربردهای بالقوه کارآزمایی بالینی مورد ارزیابی قرار گرفتند. آنها ثابت کردند که آئروژل های ساخته شده غیر سمی و زیست

تخریب پذیر هســتند. جدول ۲، خلاصــه ای از کاربردهای مختلف آیروژل های هیبریدی و تک جزئی انعطاف پذیر را نشــان میدهد [۲۷] .

جدول ۲. کاربردهای مختلف آیروژل های هیبریدی و تک جزئی انعطاف پذیر[۲۵-۳۰].

نام مواد	کاربرد	نتایج مهم
سلولز باکتریایی	ترمیم بافت پوست	استفاده از آیروژل اثر درمانی سریعتر و موثرتری داشت و پاسخ التهابی را کاهش داد.
آیروژل نانو سلولز		این اختراع جدید فرآیند امیدوارکننده ای را برای ساخت هواژل دولایه برای ترمیم پوست ارائه می دهد
آیروژل های آموکسی سیلین/سلولز		آموکسی سیلین را روی سلولز پیوند زد و افزایش فعالیت ضد میکروبی را در برابر باکتری های قارچ مشاهده کرد.
آیروژل CNF/PEGDA	داربست های بافتی	دارای سازگاری مکانیکی و زیستی عالی، سلول های آزمایش شده محکم چسبیده و پخش شده روی آئروژل، نشان دهنده تمایز و زنده ماندن عالی است.
آیروژل سلولز/ژلاتین		داربست تغییر یافته سطحی برای بازسازی پوست، چسبندگی و تکثیر خوبی کراتینوسیت ها را در طول دوره انکوباسیون ۷ روزه نشان داد.
آیروژل CNC خالص		ساختارهای مختلف داربست با موفقیت از طریق تکنیک نوشتن جوهر مستقیم چاپ شدند.

۵- پیشرفت اخیر در ساخت زخم پوش های آیروژلی در ترمیم زخم ها و کاربرد های زیست فناوری

ژنگ و همکاران (Zheng etal)، زخم چوش آیروژلی آلژینات با نانو ذرات کورکومین را برای بهود زخم های دیابتی طراحی کردند. نتایج نشـــان داد که، رویکردهای نوآورانه این پتانســـیل را دارند که با غلبه بر محدودیت‌های درمان‌های مرســـوم و درمان‌های مبتنی بر بیولوژیک، درمان زخم‌های دیابتی را به طور قابل‌توجهی افزایش دهند[۲۸]. همچنین ح ضور نانو ذرات کورکومین باعث کاهش التهاب، و حذف ROS و ارتقاء بهبود در فیبروبلاست‌ها و ماکروفاژها می شود. این زخم پوش خواص زیست سازگاری عالی، و جذب آب را از خود نشان داد. علاوه بر این با استفاده از یک مدل موش دیابتی، اثربخشی زخم پوش در تسهیل بهبود زخم دیابتی تایید شد[۳۰].

حمید و همکاران (Hamid etal)، زخم پوش آیروژلی نانو ذرات پالادیم و سدیم آلژینات را طراحی کردند. نتایج نشان داد که آیروژل به طور موثری باعث بهبود زخم و جلوگیری از عفونت های باکتریایی می شود. به طور کلی، این یافته ها پتانسیل قابل توجهی در پی شبرد ا ستراتژی های بهبود زخم و مبارزه با عفونت های باکتریایی پو ست دارند. همچنین قابل ذکر ا ست که ایروژل ظرفیت تورم تا ۲۰۰ در صد را دارد و خواص زی ست سازگاری خوبی را از خود ن شان داد. همچنین آزمایش‌ها تأیید کرد که این زخم پوش ، فعالیت ضد باکتریایی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد[۳۱].

چنگ و همکاران(Cheng etal)، با استفاده از نانو سلولز باکتری و محلول‌های $CaCl_2$ وK_2HPO_4 ، توانست ساختارهای طبیعی اســتخوان را طراحی کند. [۹۲]. نانوالیاف ســلولزی تراز شــده، الگویی برای گنجاندن یکنواخت هیدروکســی آپاتیت (HAP)با محتوای مواد معدنی بالا فراهم می کند. کامپوزیت ســلولز باکتریایی همراســتا و کانی شــده دارای ســختی ۰/۳۷ گیگا پاسکال و مدول الاستیک ۱۰/۹۱ گیگا پاسکال است که استحکام مکانیکی قابل توجهی را نشان می دهد[۳۲].

ژی و همکاران(Xie etal) ، زخم پوش آیروژلی نانو الیاف پلی کاپرو لاکتون حاوی ســیســتین و مس را طراحی کردند. نتایج نشان داد که ، این آئروژل‌های کانالی از طریق آزادسازی تنظیم‌شده مس و تولید نیتریک اکساید، نه تنها حمایت ضد باکتریایی را ارائه می‌کنند، بلکه رگ‌زایی را نیز ارتقا می‌دهند. در مجموع، گنجاندن سیستین و مس در داربست‌های 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 بسته شدن زخم در مقیاس آزمایشگاهی و فعالیت ضد باکتریایی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. فیبرهای ایروژل درصدهایی از ناحیه خراش بازیابی شده را حدود ۷۵ در صد نشان می‌دهند، و همچنین یک فعالیت ضد باکتریایی واضح در برابر استافیلوکوکوس اورئوس و کلبسیلا پنومونیه از خود نشان داد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که این الیاف آیروژل حاوی آلژینات-کیتوسان می‌توانند انتخاب مناسبی برای کاربردهای بهبود زخم باشند[۳۴].

پژوهشگران زخم پوش حاوی پلی لاکتیک اسید و ژلاتین به همراه نانو ذرات اکسید روی طراحی کردند. به طور خلاصه، داربست ساخته شده، از ترکیب فناوری الکتروریسی و خشک کردن انجمادی تهیه شدند. آزمایش‌های مختلف نشان داده‌اند که داربست‌ها سه مزیت اصلی دارند. در مرحله اول، داربست های آیروژلی دارای خواص ضد باکتریایی خوبی هستند. هنگامی که غلظت ZnO در حدود ۱/۵ در صد باشد، استفاده از نانو ذرات اکسید روی منجر به بهترین اثر ضد باکتریایی می شود. بنابراین، داربست ها می توانند یک مانع فیزیکی در برابر عفونت ایجاد کنند. ثانیاً، آنها در جذب ترشحات زخم خوب هستند و همچنین به دلیل ساختار نانوالیافی سه بعدی خود اجازه تبادلات گازی را می دهند[۳۵].

متوالی و همکاران(Metwaly)، زخم پوش آیروژلی کربوکسی متیل سلولز و پلی وینیل الکل و عصاره آنتی سیانین را ساختند. سپس کامپوزیت‌های تولید شده در حالت انجمادی خشک شدند تا پانسمان زخم هوشمند مشابه آئروژل را فراهم کنند تا به عنوان یک توده ضد باکتری و بیوکرومیک عمل کند و یک حسگر زیستی پانسمان راحت را برای نظارت بر روند بهبود زخم ارائه دهد. نتایج این زخم پوش نشان داد که، کاهش pH زخم منجر به تغییر هیپسوکرومیک از ۵۹۲ به ۴۴۶ نانومتر شد. فعالیت هالوکرومیک آنتوسیانین تغییرات رنگ سنجی را از بنفش به صورتی نشان داد. این طراحی باعث میشود که، پانسمان زخم بیوکرومیک حالت جامد برگشت پذیر، حساس، سازگار با محیط زیست، قابل حمل و مقرون به صرفه برای نظارت بر بهبود زخم ایجاد باشد[۳۶].

محققان زخم پوش آیروژلی حاوی پلی وینیل الکل و هیدروکسی آپاتیت را برای بهبود زخم سنتز کردند. نتایج نشان داد که، هواژل با بهره مندی از آب دوستی عالی و ساختار تخلخل بالا، می تواند به سرعت آب را از خون جذب کند تا سلول های خونی و پلاکت های زخم پوش را متمرکز کند و هموستاز را تسریع کند. قابل ذکر است که همسازگاری و سازگاری سلولی

خوبی را نشان می دهد و می تواند باعث بهبود زخم پوست شود. از این رو آیروژل ساخته شده، پتانسیل زیادی در هموستاز سریع و بهبود زخم برای تنظیمات بالینی دارد[۳۴].

در پژوهشی دیگر، به کمک مایکروویو آیروژل های آنتی اکسیدانی کیتوسان را سنتز کردند. نتایج نشان داد که، بیشتر با عصاره Tilia platyphyllos فعال می شوند. همچنین که آیروژل های کیتوسان به طور قابل توجهی تکثیر سلولی را تقویت کرده و رشد استافیلوکوکوس اورئوس را مهار می کنند. آیروژل های پایه کیتوسان حاوی ونکو مایسین سنتز شد. نتایج نشان داد که، آیروژل‌های کیتوسان با وانکومایسین اثرات ضد باکتریایی قابل‌توجهی داشتند، در حالی که هیچ اثر منفی قابل توجهی بر فعالیت کلاژناز(کلاژنازها آنزیم‌هایی هستند که پیوندهای پپتیدی در کلاژن را می‌شکنند) و روند طبیعی فیزیولوژیکی بهبود زخم نداشتند[۳۵] .

پژوهشگران، آیروژل های کامپوزیتی خشک و پایدار را با اکسید گرافن و پلی وینیل الکل با روش سل-ژل تهیه کردند و عصاره طبیعی انگور را در آئروژل ها ترکیب کردند. کامپوزیت آیروژل با عصاره انگور دارای خواص پایداری، ظرفیت جذب سریع آب را از خود ، ظرفیت انعقاد عالی و ظرفیت ترکیبات زیست فعال را می باشد. با توجه به عملکرد قابل توجه هموستاتیک، فرآیند آماده سازی ساده، هزینه کم و غیر سمی بودن، این آیروژل های جدید پتانسیل زیادی در بهبود زخم دارد[۳۶].

آیروژل های بر پایه کلاژن را با کورکومین سنتز کردند. آیروژل های ساخته شده دارای خواص فیزیکی و مکانیکی عالی با افزایش فعالیت ضد پروتئولیتیک و پیش رگ زایی بودند. ریزساختار سه بعدی ایروژل کلاژن به طور 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. آیروژل های کلاژن حاوی کورکومین به دلیل فعالیت ضد رگ زایی و فعالیت ضد پروتئولیتیک تنظیم شده، می توانند در طیف متنوعی از مناطق زیست پزشکی، از جمله ترمیم بافت های آسیب دیده استفاده شوند[۳۷].

Commented [M1]: فاعلش کو؟

درپژوهشی دیگر، از ترکیبات زیست فعال جوانه گندم اصلاح شده آیروژل بر پایه کلاژنب رای بهود در ساخت زخم پوش های آیروژلی استفاده شد. این آیروژل‌ها به عنوان یک ماتریکس خارج سلولی برای گردش کلاژن و رگ‌زایی برای کاربرد در

ترمیم زخم کار می‌کردند. معماری متخلخل سه بعدی آئروژل های کلاژن با اجزای فعال زیست فعال علف گندم بیشتر بهبود یافت که به نوبه خود خواص فیزیکی، شیمیایی و بیومکانیکی ساختار را افزایش داد. رهایش پایدار ماده شیمیایی بیواکتیو ضد باکتریایی و پیش رگ زایی مبتنی بر آیروژل سه بعدی به ریزمحیط سلولی باعث بهبود زخم می شود[۳۸].

Commented [M2]: نامفهوم

Commented [M3]: بازبینی شود.

محققان، آیروژل با استفاده از پلی اتیلن ایمین پیوند شده با نانوالیاف سلولزی با روش خشک کردن انجمادی سنتز کردند. نتایج نشان داد که، آیروژل‌ها می‌توانند باعث رهایش کنترل شده سدیم سالیسیلات شود و همچنین به عنوان یک عامل درمانی مورد استفاده در بیماری‌هایی مانند دیابت، ورم مفاصل قرار گیرد[۲۶].

زخم های مزمن علت اصلی کاهش کیفیت زندگی هستند و بار میکروبی عاملی مانع از روند طبیعی ترمیم زخم می شوند. در پژوهشی، از کیتوسان حاوی ونکومایسین به عنوان یک فرمول بالقوه برای درمان و پیشگیری از عفونت در محل زخم مورد آزمایش قرار گرفتند. فرآوری کیتوسان به شکل آیروژل به این پلی ساکارید ظرفیت جذب آب و نفوذپذیری هوا را افزایش داده است. محتوای وانکومایسین و پروفایل‌های رهایش دارو از آیروژل، انتشار سریع دارو را نشان می‌دهد. مطالعات سلولی با فیبروبلاست ها و آزمایش های ضد میکروبی علیه استافیلوکوکوس اورئوس نشان داد که ذرات آیروژل بارگذاری شده با وانکومایسین با سازگار بوده و در جلوگیری از باکتریایی زیاد در محل زخم موثر هستند[۲۷].

Commented [M4]: یعنی چی؟

سلولز و کیتوسان به دلیل زیست سازگاری، زیست تخریب پذیری، آنتی ژنی کمتر و تجدید پذیری برای پانسمان زخم مورد مطالعه قرار گرفته اند. ویژگی های عملکردی و ساختاری چنین پلیمرهای زیستی را می توان با تبدیل آنها به زیست آیروژل های فیبری به دلیل ویژگی های برجسته آنها مانند چگالی کم، تخلخل بالا و سطح ویژه بزرگ به طور چشمگیری بهبود بخشید. تولید آیروژل ها به شکل الیاف و منسوجات نه تنها می تواند خواص مکانیکی، سفتی و شکل پذیری آئروژل ها را افزایش دهد، بلکه منجر به زمان خشک شدن کوتاه و فرآیندهای تولید مقیاس پذیر می شود. بدین وسیله، میکروالیاف کیتوسان و سلولز برای کاربرد پانسمان زخم تولید شده‌اند. و داروی ایبوپروفن در این سیستم بارگذاری شد. نتایج نشان داد

که، الیاف به شبکه‌های بافته‌ای تبدیل شدند که بسیار قابل جذب آب (~۴۰۰ درصد وزنی) و ضد باکتری در برابر اشریشیا کلی و ا ستافیلوکوکوس اورئوس بودند. علاوه بر این، ساختارهای فیبری با ا ستفاده از سلول‌های فیبروبلا ست هیچ سمیت سلولی نشان ندادند و همچنین الیاف هیبریدی منجر به رهایش پایدار دارو در مدت ۴۸ ساعت شد[۲۸-۳۰].

یک مونومر پیش ساز N-هالامین، تری متیل آمونیوم کلرید (APTMAC) بر روی سیلیس مزوپور متصل شد. هیدروژل کیتوسان و پیش سازهای N-halamine با سیلیس مزوپور (MSSNPs) با ۷-کلروپروپیل-تری اتوکسی سیلان (CPTES) به عنوان عامل اتصال متقابل تهیه شد. یک ریزساختار متخلخل سه بعدی از آیروژل های سیلوکسان با چگالی کم و تخلخل بالا از طریق لیوفیلیزاسیون به دست آمد. پس از کلرزنی، آیروژل‌ها فعالیت‌های ضد باکتریایی قوی علیه ۱۰۰ درصد استافیلوکوکوس اورئوس و ایکولی در ۳۰ دقیقه نشان دادند. در مقایسه با مواد هموستاتیک سنتی (پالچ و باند)، آیروژل‌های سیلوکسان میزان احتباس مایع و خواص هموستاتیک خوبی از خود نشان دادند. گلبول های قرمز و پلاکت ها خواص چسبندگی خوبی بر روی سطح آیروژل ها نشان دادند. آیروژل‌های 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 هیدروفیل دگزامتازون سدیم فسفات با آغشته کردن هیدروژل کیتوسان بارگیری شد و رهاسازی از کرایوژل یا آئروژل در دو مقدار pH مربوط به بهبود زخم بررسی شد. هدف، مقایسه کارایی بارگذاری دارو و رفتار رهاسازی از آئروژل ها و کرایوژل ها به عنوان تابعی از روش خشک کردن، خواص فیزیکوشیمیایی مواد (چگالی، مورفولوژی)، و pH محیط رهاسازی بود. کرایوژل ها راندمان بارگذاری بالاتر و رهاسازی سریع تری را در مقایسه با آیروژل ها نشان دادند. چگالی نمونه بالاتر و مقدار pH کمتر محیط رهایش منجر به انتشار پایدارتر در مورد آیروژل‌ها 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. محققین آیروژل هموستاتیک غیرآلی عمدتاً بر پایه نانو هیدروکسی آپاتیت فوق‌العاده معدنی زیست سازگار (HAP) با پلی وینیل الکل (PVA) به عنوان چسب آلی ساختند. هنگامی که محتوای نانو هیدروکسی آپاتیت به ۸۰ درصد وزنی می رسد، آیروژل ، آب دو ستیفوق هماتوفیلی و لخته شدن خون در شرایط آزمایشگاهی را نشان می دهد. همچنین نتایج نشان داد که، از آب

دوستی عالی و ساختار تخلخل بالا، می تواند به سرعت آب را از خون جذب کند تا سلول های خونی و پلاکت ها را متمرکز کند و هموستاز را تسریع کند. قابل ذکر است که هم‌سازگاری و سازگاری سلولی خوبی را نشان می دهد و قادر به بهبود زخم های پوستی است. بنابر این این زخم پوش، دارای پتانسیل زیادی در هموستاز سریع و بهبود زخم برای تنظیمات بالینی است[۳۳].

زخم های مزمن غیر التیام بخش بار اقتصادی قابل توجهی را برای سیستم های مراقبت های بهداشتی نشان می دهد و باعث کاهش قابل توجه کیفیت زندگی افراد مبتلا می شود. 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 آیروژل ها برای کاربردهای ترمیم زخم به دلیل 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، آیروژل‌های آلژینات حاوی کلسیم، روی ونقره را سنتز کردند. نتایج نشان داد که، آیروژل ها جذب مایع عالی از هر یک از فرمول ها و ظرفیت های بالای نگهداری مایع را نشان می دهند. کلسیم فقط به صورت جزئی در حلال های متورم کننده آزاد می شود، بنابراین به در آلژینات باقی می ماند که به جذب و انتقال سریع مایعات به شبکه آیروژل کمک می کند.. همچنین حضور نقره، منجر به تعادل بین اثر ضد باکتریایی در مقابل سمیت سلولی می شود[۳۴-۳۵].

Commented [M5]: نامفهوم

پژوهشگران، آیروژل سیلیکا بارگذاری شده با رسوراترول (RSA) را با استفاده از روش سل-ژل سنتز کردند و از آن به عنوان نانو حامل استفاده کردند. نتایج نشان داد که، نانو حامل زیست سازگار و پایدار است و ممکن است به دلیل اثرات ضد التهابی آن برای درمان آرتروز استفاده شود[۳۵].

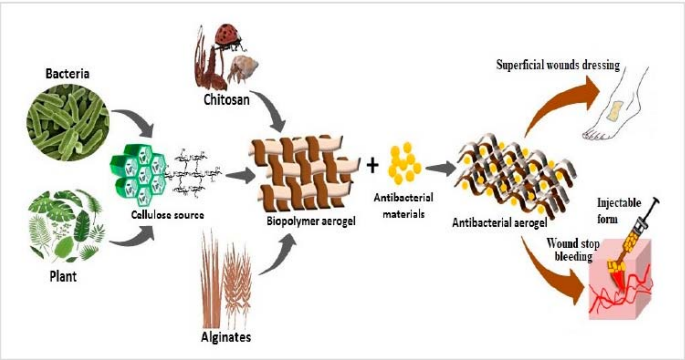
در گزارش دیگری، آیروژل هیبریدی سیلیس نانوالیافی با سلول‌های سالم سازگاری زیستی داشت، اما فعالیت ضد توموری آن‌ها هنگام بارگیری با کمپتوتسین (CPT) به طور قابل‌توجهی افزایش یافت[۳۶].

در پژوهشی دیگر، در مطالعه خود یک میکروذرات آیروژل سیلیکا-ژلاتین نشاندار شده با فلورسین (FSGM) برای ارزیابی سمیت حاد تزریق کردند. آنها گزارش کردند که هیچ ناهنجاری یا اختلال فیزیولوژیکی پس از یک آزمایش سه هفته ای کشف نشده است[۳۷].

محققان، آیروژل پایه کیتوسان را با خواص افزایش یافته برای بهبود زخم های سوختگی ایجاد کردند. مطالعات نشان داد که آیروژل کیتوسان، حاوی نانوذرات طلا زیست سازگار بوده و تکثیر فیبروبلاست را تقویت می کند[۳۸].

۶- آیروژل پلی ساکارید / کیتوسان برای ساخت زخم پوش ها

تخلخل آیروژل ها آنها را قادر می سازد تا حجم بیشتری از ترشحات را در محل زخم جذب کنند. این به نوبه خود التهاب را کاهش می دهد و از ایجاد عفونت های باکتریایی در زخم ها جلوگیری می کند[۳۷]. آیروژل های پلی ساکارید به دلیل سمیت کم، پایداری بالا و غیر حساسیت زایی با عملکرد بیولوژیکی خوب، اغلب در مراقبت از زخم استفاده می شوند. ساختار جامد آیروژل پلی ساکارید باعث گسترش و مهار محیط رشد سلول های زنده می شود. آنها همچنین می توانند حاوی یک ماده فعال اولیه مانند یک داروی ضد میکروبی برای کمک و تسریع روند بهبود باشند. شکل ۲، آیروژل های زیست پلیمری را در کاربردهای ترمیم زخم نشان می دهد[۳۸].



شکل۲. آیروژل های زیست پلیمری برای بهبود زخم در زخم پوش ها[۱۹].

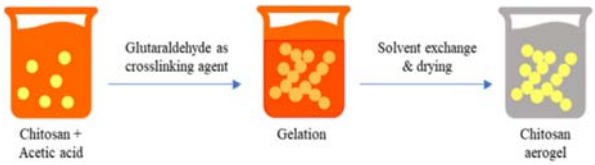
در جدول ۳، ترمیم زخم و فعالیت ضد میکروبی آیروژل ها را به صورت خلاصه جمع آوری شده است[۲۰].

جدول ۳. بررسی بهبود زخم و فعالیت ضد میکروبی برای انواع مختلف آیروژل ها[۲۲-۲۷].

نوع آیروژل	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 زیست سازگار	دارای خواص ضد باکتریایی برتر در برابر باکتری های ذکر شده بود
غیر آلی	سیلیکا	اصلاح سطح در فاز گاز	آئروژل مملو از کلرهگزیدین قدرت خود را در از بین بردن باکتری E. coli تایید کرد.
کربن	گرافن	فرآیند هیدروترمال و پس از پیرولیز	کارایی بهبود زخم را در عرض ۱۲ ساعت کامل کنید
پلیمر	نشاسته	اتصال عرضی فیزیکی از طریق تکنیک انجماد- ذوب	به نمایش گذاشته فعالیت ضد میکروبی عالی در برابر باکتری ذکر شده است
پلیمر	آلژینات	اشباع فوق بحرانی مزوگلیکان (MSG)	اشباع فوق بحرانی برای به دست آوردن سیستم های بارگذاری شده با MSG مناسب است
پلیمر	آلژینات و کیتوسان	ژل شدن امولسیونی	درصد سطح خراش بازیابی شده 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 فرآیند خشک کردن انجمادی	فعالیت های ضد باکتریایی قوی تر علیه استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli
پلی ساکارید	اسید هیالورونیک	روش الکترواسپری	آئروژل HA مایکوباکتری ها را متصل می کند و می کشد
پلیمر	متوکسی پلی اتیلن گلیکول پلی کاپرول اکتون	الکتروریسی، پراکندگی همگن، خشک کردن انجمادی و عملیات حرارتی	فعالیت ضد میکروبی خوب
پلیمر	نانو سلولز	انجماد خشک	فعالیت ضد میکروبی عالی و طولانی مدت علیه استافیلوکوکوس اورئوس (گرم مثبت) و E. coli (گرم منفی)
پلیمر	نانو الیاف کربن و کیتوسان	همگن شدن با فشار بالا و خشک کردن انجمادی	تست کاهش باکتری E. coli و S. aureus
پلیمر	آلژینات و کیتوسان	سل-ژل و سیال فوق بحرانی	زمان طولانی و ایمنی به سطح زخم
پلیمر	کیتوسان	خشک کردن انجمادی	دارای آنتی باکتریال عالی برای بهبود زخم
غیر آلی	سیلیکا	تبلور از محلول های فوق بحرانی	نرخ مهار ۹۵٪ حتی پس از آزاد شدن تقریبا ۹۰٪ سینامالدئید (CA) به عنوان عامل ضد باکتریایی
پلیمر	کیتوسان	روش قالبگیری یا کستینگ	بسیار موثر در مورد E. coli و S. aureus به عنوان عوامل ضد باکتری
پلیمر	آلژینات	واکنش میلارد و خشک کردن انجمادی	فعالیت ضد میکروبی عالی علیه استافیلوکوکوس اورئوس و E. coli
پلی ساکارید	پلی وینیل الکل	فرآیند خشک کردن انجمادی / اتصال متقابل	قابلیت آنتی باکتریال خوبی از خود نشان داد
پلیمر	کیتوسان	افزودن و لیوفیلیزاسیون	خواص ضد میکروبی خوب

آیروژل های پلی ساکارید/کیتوسان نوعی از زیست مواد هستند که استفاده از آنها در پانسمان های زخم امیدوار کننده است. کیتوسان، پلی ساکارید زیست سازگار و زیست تخریب پذیر مشتق شده از کیتین، دارای خواص ضد میکروبی است که می تواند به جلوگیری از عفونت در زخم ها کمک کند[۲۱]. هنگامی که با پلی ساکاریدهای دیگر مانند آلژینات یا سلولز ترکیب می شود، می تواند ساختاری داربست مانند ایجاد کند که باعث بهبود زخم می شود. این آیروژل ها دارای سطح و تخلخل بالایی هستند که امکان جذب بیشتر ترشحات زخم و حفظ رطوبت را فراهم می کند[۲۲]. آنها همچنین یک سد محافظ در برابر آلاینده های خارجی ایجاد می کنند و در عین حال محیط مرطوبی را حفظ می کنند که برای بهبود زخم مفید است. علاوه بر خواص ترمیم زخم، آیروژل های پلی ساکارید/کیتوسان دارای اثرات ضد التهابی و آنتی اکسیدانی بوده و باعث بازسازی بافت و کاهش زخم می شود[۲۳]. آنها را می توان به راحتی در شکل ها و اندازه های مختلف برای متناسب با انواع زخم ها و مکان های مختلف قالب بندی کرد. به طور کلی، آیروژل های پلی ساکارید/کیتو سان پتانسیل زیادی را به عنوان یک ماده همه کاره و موثر برای پانسمان زخم نشان می دهند و ترکیبی از خواص ضد میکروبی، جاذب و بهبود دهنده را ارائه می دهند که می تواند درمان انواع مختلف زخم ها را بهبود بخشد[۲۴-۲۷].

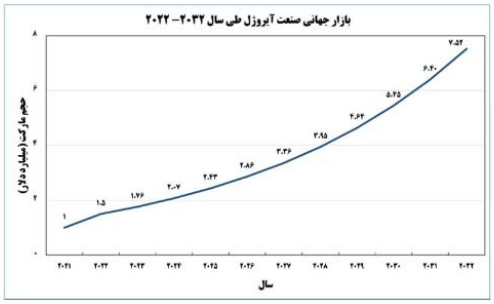
تاکشیتا وهمکاران سنتز کیتوسان بدون آلدهید را با استفاده از اوره نشان دادند. اوره با فرآیند آنزیمی یا حرارتی تجزیه می شود و NH_3 آزاد می کند که به نوبه خود باعث افزایش pH می شود. سیستمی که منجر به انعقاد (coagulation)، فیزیکی کیتوسان می شود(شکل۳) [۱۲].



شکل۳. آیروژل کیتوسان

۷- بازار و چشم انداز آتی

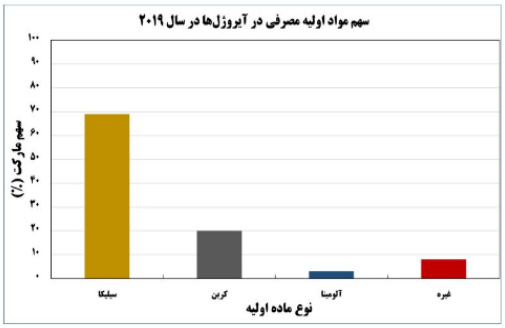
با توجه به گزارش بین المللی futuremarketinsights منتشر شده در سال ۲۰۲۲، حجم بازار جهانی آیروژل‌ها ۱/۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۲ ارزیابی شده است که پیشبینی می شود که با تجربه یک نرخ رشد مرکب سالیانه ۱۷در صد به ۷/۵میلیارد دلار در سال ۲۰۳۲ برسد. شکل ۴، روند کلی این بازار را طی دوره ۲۰۲۲ تا ۲۰۳۲ نشان می‌دهد[۳۵].



شکل۴. روند جهانی محصولات آیروژل طی سال های ۲۰۳۲-۲۰۲۲[۳۵].

۷-۱- بازار از منظر نوع ماده اولیه

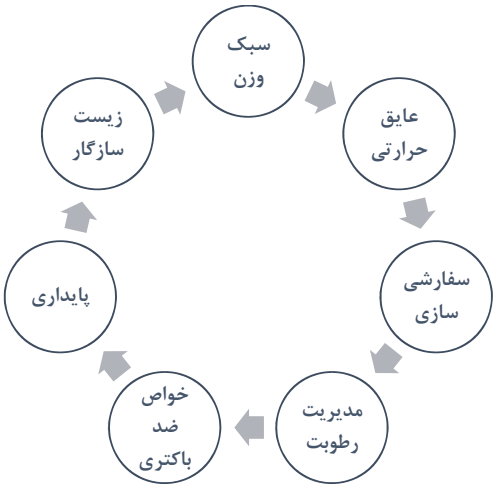
در سال ۲۰۱۹، بخش سیلیکا آیروژل بی شترین سهم را با ۶۹ در صد در بازار جهانی به خود اخت صاص داد. این امر به این واقعیت ن سبت داده می شود که آیروژل‌های سیلیکا دارای خواص منح صر به فرد عایق حرارتی و ویژگی‌هایی مانند سبک وزنی، خنثایی شیمیایی و قابلیت استفاده مجدد می‌باشند(شکل۵)[۳۶].



شکل۵. روند جهانی محصولات آیروژل طی سال های ۲۰۳۲-۲۰۲۲[۳۶].

۷-۲- آینده بازار زخم پوش های پلیمری

آیروژل‌ها می‌توانند به حفظ یک محیط مرطوب کمک کنند، که برای بهبودی بســـیار مهم اســـت و همچنین اجازه می‌دهد رطوبت اضـــافی تبخیر شـــود و به طور بالقوه خطر عفونت را کاهش دهد برای بهبود زخم پوش های تجاری آیروژلی باید خواص مطابق با شکل۶، سنتز شود تا طراحی زخم پوش های آیروژلی با آینده بازار موفقی روبرو شوند[۳۰-۳۵].



شکل۶. خواص مورد انتظار در سنتز موفق برای زخم پوش آیروژلی ایده آل در بازار

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

مقدار استفاده از آیروژل ها در کاربرد های زیست فناوری در بازار جهانی ۸/۴ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۰ ارزش گذاری شد و انتظار می رود در دوره پیش بینی شده با نرخ ر شد مرکب سالانه ۱۱/۵ در صد ر شد کند[۳۲]. تقا ضای فزاینده در این حوزه، محققان را برانگیخته است تا روش‌های جایگزینی برای عملکرد بافت‌ها و اندام‌های مصنوعی بیابند. خواص منحصر به فرد فیزیکی وشیمیایی و بیولوژیکی زیست پلیمر ها و ویژگی‌های ساختاری جذاب آیروژل‌ها مانند تخلخل بسیار بالا، چگالی فوق‌العاده کم و مساحت سطح بالا، ترکیب این مواد را در داربست بافتی مورد توجه قرار می‌دهد.آیرو ژل ها می توانند، باعث ایجاد کاربردهای پز شکی متعددی برای باز سازی پو ست، غضروف، ا ستخوان و حتی دریچه های قلب و عروق خونی با ر شد سلول های مورد نظر و همچنین همراه با فاکتور رشد در داربست های مهندسی شوند.[۳۳].

بافت جهانی اندازه بازار مهندسی در سال ۲۰۱۹ تقریباً ۹/۹ میلیارد دلار محاسبه کرده است، بنابر این انتظار می رود که از سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۷ شاهد نرخ رشد ترکیبی سالانه ۱۴/۲ درصدی باشیم و همچنین پتانسیل روش های مهندسی بافت در درمان آسیب های برگشت ناپذیر بافت ، به طور قابل توجهی رشد بازار را تقویت می کند[۳۴].

Commented [M6]: نامفهوم

آینده بازار آیروژل ها در پانسمان زخم و بیوتکنولوژی امیدوارکننده به نظر می رسد که توسط چندین روند کلیدی و پیشرفت های تکنولوژی هدایت می شود. آیروژل ها که به دلیل ساختار سبک وزن و بسیار متخلخل خود شناخته می شوند، ویژگی های منحصر به فردی مانند جذب بالا، عایق حرارتی و زیست سازگاری را ارائه می دهند که آنها را برای کاربردهای مختلف پزشکی جذاب می کند. از آنجایی که تقاضا برای راه حل های پیشرفته مراقبت از زخم همچنان در حال رشد است، آیروژل ها به دلیل توانایی آنها در بهبود بهبود و در عین حال به حداقل رساندن خطر عفونت احتمالاً کشش پیدا می کنند[۳۵]. شیوع روزافزون زخم‌های مزمن و پیری جمعیت، نیاز به مواد نوآورانه‌ای را که می‌توانند به طور موثر محیط زخم را مدیریت کنند، افزایش می‌دهد. توانایی آیروژل ها برای حفظ تعادل رطوبت و ایجاد یک مانع تنفسی، به خوبی با تقاضا برای بهبود نتایج بیمار همخوانی دارد.

علاوه بر این، تحقیق و توسعه مداوم در بیوتکنولوژی احتمالاً کاربردهای آیروژل‌ها را فراتر از پانسمان‌های زخم گسترش می‌دهد. ادغام بالقوه آنها با عوامل زیست فعال، مانند فاکتورهای رشد یا ترکیبات ضد میکروبی، می تواند خواص درمانی آنها را افزایش دهد و به گزینه های درمانی موثرتری منجر شود. ترکیب آئروژل‌ها با فناوری‌های هوشمند، مانند حسگرهایی که شرایط زخم را بررسی می‌کنند، می‌تواند با فعال کردن بازخورد و تنظیمات در زمان واقعی، مراقبت از بیمار را متحول کند[۳۶]. علاوه بر این، ملاحظات زیست محیطی و فشار برای مواد پایدار بر توسعه محصول تأثیر می گذارد. آیروژل ها را می توان از منابع طبیعی یا زیست تخریب پذیر مهندسی کرد و با تاکید روزافزون بر راه حل های بهداشتی سازگار با محیط زیست هماهنگ شد[۳۷]. این تغییر می تواند همکاری بین دانشمندان مواد و ارائه دهندگان مراقبت های بهداشتی را برای توسعه محصولات نوآورانه ای که نیازهای درمانی و محیطی را برآورده می کند، هدایت کند. با افزایش آگاهی از مزایای آیروژل ها در جامعه پزشکی، همراه با پیشرفت در تکنیک های تولید که هزینه ها را کاهش می دهد و مقیاس پذیری را بهبود می بخشد، بازار آئروژل ها در پانسمان زخم و بیوتکنولوژی به طور قابل توجهی گسترش می یابد[۳۸]. این تکامل احتمالاً باعث ایجاد چشم‌انداز رقابتی می‌شود و نوآوری مداوم و معرفی طیف متنوعی از محصولات را تشویق می‌کند. به طور خلاصه، آینده آیروژل‌ها در بخش‌های پانسمان زخم و بیوتکنولوژی به ویژگی‌های سودمند آنها، افزایش تقاضا برای راه‌حل‌های پزشکی پیشرفته و پتانسیل توسعه پایدار وابسته است. با پیشرفت تحقیقات و بررسی بیشتر کاربردهای مراقبت های بهداشتی، آیروژل ها می توانند به یک ماده اساسی در تکامل مراقبت از زخم مدرن و نوآوری های بیوتکنولوژیکی تبدیل شوند[۳۹-۴۰].

۸. نتیجه گیری:

آیروژل ها به دلیل خواص منحصر به فرد خود مانند تخلخل بالا، سطح بالای سطح و زیست سازگاری عالی به عنوان یک ماده امیدوارکننده در بهبود زخم ظاهر شده اند. این ویژگی ها امکان انتقال دارو، حفظ رطوبت و تکثیر سلولی را فراهم می کند و در نهایت باعث بهبود سریع تر زخم می شود. تحقیقات نشان داده است که آیروژل ها می توانند به طور موثر ترشح

زخم را مدیریت کنند، از عفونت جلوگیری کنند و بازســـازی بافت را تقویت کنند. علاوه بر این، ماهیت همه کاره آنها امکان سفارشی سازی برای برآوردن نیازهای خاص ترمیم زخم را فراهم می کند. در حالی که مطالعات بیشتری برای بهینه سازی خواص آیروژل و فرمولاسیون برای کاربردهای بالینی مورد نیاز است، مزایای بالقوه آیروژل در بهبود زخم واضح است. به طور کلی، آیروژل‌ها آینده امیدوارکننده‌ای را در زمینه مراقبت از زخم ارائه می‌کنند و این پتانســـیل را دارند که روش درمان زخم‌ها را متحول کنند. اســـتفاده از آیروژل های بر پایه کیتوســـان برای ترمیم زخم، رویکردی نویدبخش و نوآورانه در زمینه بیومواد ا ست. خواص منح صر به فرد آیروژل ها، مانند تخلخل بالا، م ساحت سطح بزرگ و زی ست سازگاری آنها، آنها را به عنوان کاندیدای ایده آل برای افزایش روند بهبود زخم تبدیل می کند. مطالعات نشـــان داده‌اند که آیروژل‌های مبتنی بر کیتوسان می‌توانند چسبندگی، تکثیر و مهاجرت سلولی را تقویت کرده و منجر به بسته شدن سریع‌تر و مؤثرتر زخم شوند. علاوه بر این، آزاد سازی کنترل شده مولکول‌های فعال زی ستی از آیروژل‌ها می‌تواند با کاهش التهاب و ترویج باز سازی بافت، روند بهبودی را بی شتر کند. به طور کلی، ترکیب آیروژل‌های بر پایه کیتوسان در پانسمان‌ها و داربست‌های زخم، پتانسیل ایجاد انقلابی در درمان زخم‌های حاد و مزمن را دارد. ادامه تحقیق و توســعه در این زمینه در بهینه ســازی طراحی و کارایی این بیومواد برای استفاده بالینی بسیار مهم خواهد بود.

References:

1. Alipour H., Koosha M., Sarraf Shirazi M.J., and Jebali A., Modern Commercial WoundDressings 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 Approachesfor 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 InjectableHydrogels for Regenerative Medicine, Prog. Polym. Sci., 39, 1973-1986, 2014.4. Hosseini M. and Mobedi H., Injectable in-Situ Forming Drug Delivery Systems Based onBiodegradable Polymers, *Basparesh*, **6**, 3-12, 2016.

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

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

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

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

8. Ruel-Gariepy E. and Leroux J.-C., In Situ Forming Hydrogels-Review of TemperatureSensitive Systems, *Europ. J. Pharm. Biopharm*., **58**, 409-426, 2004.

9. 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.

10. 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 DermalWound Healing: in-Vitro and in-Vivo Studies, *Mater. Sci. Eng -C*, **128**, 112263, 2021.

11.Castillo L., Castro-Alpízar J.A., Lopretti M., and Vega Baudrit J., Exploration ofBioengineered Scaffolds Composed of Thermo-Responsive Polymers for Drug Delivery inWound Healing, *Int. J. Mol. Sci*., **22**, 1408, 2021.

12.Zakerikhoob M., Abbasi S., Yousefi G., Mokhtari M., and Noorbakhsh M.S., CurcuminIncorporated 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.

13. 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.

14. 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.

15.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.

16. 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.

17. 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.

18.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.

19.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.

20.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.

21.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.

22. Karami M. H., Abdouss M.,Cutting-edge tumor nanotherapy: Advancements in 5-fluorouracil Drug-loaded chitosan nanoparticles, *Inorg. Chem. Commun*., **164,** 112430,2024.

23. 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.

24. Karami M. H., Abdouss M., Recent advances of carbon quantum dots in tumor imaging, *Nanomed J.***11(1)** , 13-35,2024.

25.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.

26.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.

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

28.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.

29. 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.

30.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.

31.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.

32.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.

33.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.

34.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.

35.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.

36. 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.

37. 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.

38. 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.

39. 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**, ٦١-٦٣, ٢٠٠٥.

40. 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.