

## هواژل‌ها، مواد نانوساختار سه‌بعدی: روش‌های سنتز، مشخصه‌یابی و کاربردها

مرتضی نامور<sup>۱</sup>، مصطفی مهین‌روستا<sup>۲</sup> و علی اله‌وردی<sup>۳\*</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقات صنایع شیمیایی معدنی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۲. دکتری مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقات صنایع شیمیایی معدنی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳. استاد مهندسی شیمی، آزمایشگاه تحقیقات صنایع شیمیایی معدنی، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

دریافت: فروردین ۱۴۰۱ بازنگری: تیر ۱۴۰۱ پذیرش: شهریور ۱۴۰۱



10.30495/JACR.2022.1955029.2024



20.1001.1.17359937.1401.16.3.1.7

### چکیده

هواژل‌ها به دلیل ویژگی شگفت‌انگیز و کاربردهای بالقوه‌شان در حوزه‌های بسیار متنوع فناوری، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. هواژل‌ها شبکه‌های متخلخل سه‌بعدی یا موادی با ساختار متخلخل هستند که از ژل‌های مرطوب به دست می‌آیند، جایی که حلال‌ها با هوا جایگزین شده‌اند. خشک کردن ژل یک مرحله حیاتی در تهیه هواژل است. تاکنون روش‌های زیادی برای خشک کردن هواژل به کار برده شده است که متداول‌ترین، امن‌ترین و ارزان‌ترین روش، روش خشک کردن در فشار محیط است. به دلیل هزینه بالا در سنتز هواژل‌های یکپارچه، در سال‌های اخیر تهیه هواژل‌های متخلخل با روش‌های نوین خشک کردن در مقیاس بالا مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این مقاله، به معرفی هواژل، انواع آن، تاریخچه، ویژگی‌ها، طبقه‌بندی، سنتز و کاربردهای این ماده ارزشمند پرداخته شده است. از هواژل‌ها در کاربردهای فنی جدیدی به‌عنوان عایق گرمایی کارآمد، کاتالیست، ذخیره‌ساز انرژی، جاذب تصفیه آب و جاذب صدا استفاده می‌شود. همچنین، هواژل‌ها در زیست‌پزشکی و حسگرها نیز به کار می‌روند. بحث در مورد چالش‌ها، محدودیت‌ها و نیاز مبرم به توسعه فناوری‌های جدید برای تولید هواژل ارایه شده است.

واژه‌های کلیدی: هواژل، سنتز، خشک کردن، مشخصه‌یابی، کاربردها

## مقدمه

اکسیدهای غیرسیلیکایی، هواژل ریزورسینول فرمالدهید<sup>۱</sup> و چندسازه‌های هواژل، هواژل نانولوله کربنی، هواژل گرافن، هواژل کاربید<sup>۲</sup> و انواع دیگر از هواژل‌ها که پیوسته به جامعه هواژل افزوده می‌شود، ادامه یافت [۶ تا ۸].

برای کاهش هزینه‌های سنتز هواژل استفاده از منابع ارزان قیمت مانند سرباره می‌تواند انتخاب مناسب و اقتصادی برای جایگزین پیش‌سازهای گران قیمت آزمایشگاهی باشد. بنابراین، در سال‌های اخیر استفاده از پسماندهای صنعتی به‌عنوان پیش‌ساز ارزان قیمت و سازگار با محیط‌زیست اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است [۹ تا ۱۳].

این مقاله به معرفی ویژگی‌ها، گروه‌بندی، تاریخچه، آماده‌سازی، ویژگی‌ها و کاربردهای هواژل به‌عنوان یک حالت ماده می‌پردازد.

## ویژگی‌ها، گروه‌بندی و تاریخچه

### ویژگی‌های پایه‌ای

هیچ تعریف واحدی از هواژل وجود ندارد. در واقع، این اصطلاح هنوز در حال توسعه است. با این حال، یک ویژگی مهم که به‌طور تقریبی در تمام هواژل‌ها گزارش شده، این است که ژل مرطوب از راه فرایند سل-ژل گرفته شده است؛ بنابراین، بدون مراجعه به ژل نمی‌توان هواژل را تعریف کرد. هواژل توسط آیوپاک<sup>۴</sup> به‌عنوان ژل متشکل از یک جامد ریزمتخلخل<sup>۵</sup> که فاز پراکنده در آن گاز است تعریف شده است [۱۴]. در کتاب راهنمای هواژل، پیر<sup>۶</sup> ایده اولیه کیستلر<sup>۷</sup> را به کار می‌برد تا آن را به‌عنوان ژل‌هایی که در آن مایع با هوا جایگزین شده است، با انقباض بسیار کم شبکه جامد،

به‌طور کلی برای حالت‌های متداول ماده (جامد، مایع و گاز)، چگالی مایع و جامد به تقریب یکسان است، ولی چگالی مایع و گاز بسیار متفاوت است. افزون‌بر آن، آنتالپی سامانه حالت مایع و گاز نیز بسیار متفاوت است. به‌طور کل، شکاف بزرگی بین حالت مایع و گاز وجود دارد. این شکاف نه تنها در حالت نظری وجود دارد، بلکه بر انسان نیز تأثیرگذار است. هواژل می‌تواند تا حد زیادی شکاف موجود بین حالت مایع و گاز را پر کند. هواژل ماده‌ای است با شبکه‌های باز سه‌بعدی که با نانوذره‌های منسجم یا مولکول‌های بسیار به هم پیوند شده‌اند [۱ و ۲]. با توجه به پیشرفت‌های اخیر در حوزه هواژل، هواژل‌ها نه تنها به‌عنوان یک ماده کاربردی ویژه بلکه به‌عنوان یک حالت جدید از ماده تشخیص داده شده است [۳]. به عبارت دیگر، هواژل‌ها تفاوت‌های کیفی زیادی در ویژگی توده‌ای در مقایسه با سایر حالت‌های ماده نشان می‌دهند؛ مانند حالت جامد، هواژل حجم و شکل ثابتی را حفظ می‌کند. با این حال، چگالی هواژل می‌تواند از  $1000 \text{ kg/m}^3$  (چگالی جامد) تا حدود  $1 \text{ kg/m}^3$  (کمتر از چگالی هوا) باشد که موجب تغییرهای چشم‌گیری در ویژگی می‌شود. نه تنها به دلیل تخلخل بالا مانند سایر فوم‌ها<sup>۱</sup>، بلکه به دلیل ماهیت ساختاری دوگانه میکروسکوپی (ساختار نانویی) و ماکروسکوپی (حالت تراکم ماده)، هواژل‌ها دارای ویژگی‌های بی‌همتا متنوعی مانند، رسانندگی گرمایی بسیار کم، سرعت صوتی بسیار پایین، ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین، ضریب انکسار پایین، سطح ویژه بسیار بالا و گستره قابل تنظیم بسیار وسیع چگالی است [۲، ۴ و ۵]. به عبارت دیگر، ماده حالت هواژل مانند سایر حالت‌ها شامل ترکیب‌های متنوعی است. در مدت ۷۰ سال پس از اختراع هواژل (۱۹۳۲)، پژوهش‌های هواژل بر ترکیب‌هایی مانند سیلیکا، انواع متفاوتی از

1. Foam

2. Resorcinol formaldehyde

3. Carbide

4. IUPAC

5. Microporous

6. Pierre

7. Kistler

### گروه‌بندی

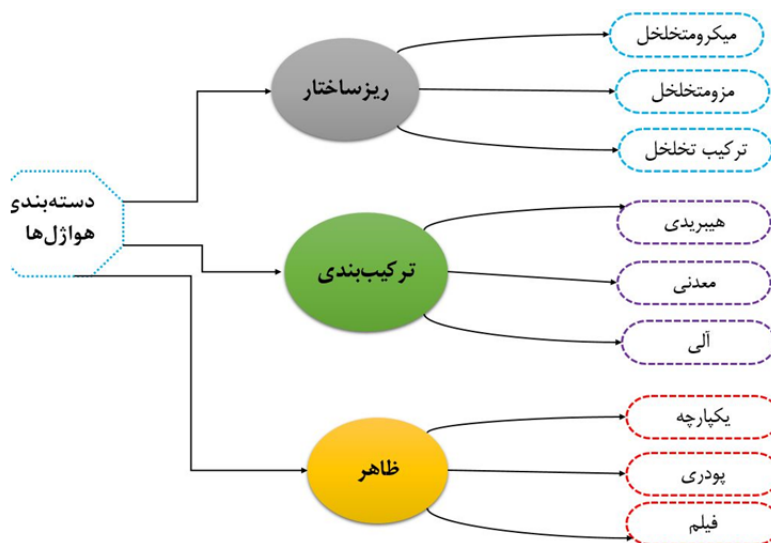
همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، روش‌های متفاوتی برای گروه‌بندی هواژل‌ها استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن ظاهر آن، هواژل را می‌توان به یکپارچه، پودری و فیلم گروه‌بندی کرد. با در نظر گرفتن روش آماده‌سازی، هواژل می‌تواند از چهار نوع هواژل، زئروژل، کریوژل و سایر مواد مرتبط با هواژل ساخته شود. درحالی‌که با توجه به ریزساختار متفاوت، هواژل را می‌توان به ریزمتخلخل (کوچک‌تر از ۲ نانومتر)، مزومتخلخل (۲ تا ۵۰ نانومتر) و هواژل ترکیب ریزمتخلخل و مزومتخلخل گروه‌بندی کرد. از دید ترکیب‌بندی، هواژل‌ها را می‌توان به دو گروه هواژل‌های تک جزئی و چندسازه‌های هواژل تقسیم‌بندی کرد. هواژل‌های تک جزئی متشکل از هواژل اکسیدی (سیلیکایی و غیرسیلیکایی)، هواژل آلی (بر پایه رزین و سلولز)، هواژل‌های کربنی (پلاستیک کربن‌دار، گرافن) و انواع دیگر از هواژل‌ها است. چندسازه‌های هواژل شامل هواژل چندترکیبی و چندسازه نانو/ میکرو هواژل است [۱۶ تا ۱۹].

تعریف کند [۱۵]. این مفهوم ساده و مناسب به‌طور گسترده قابل استفاده است.

یک ماده حالت هواژل باید دو ویژگی زیر را داشته باشد:  
 ۱. مشخصه ساختار: ساختار ژل‌گونه، به‌طور معمول با ساختمان و منافذ منسجم در مقیاس نانو، قادر به تشکیل ساختار یکپارچه ماکروسکوپی، شبکه به‌صورت پیوندهای به هم وصل‌شده تصادفی و به‌طور معمول از مواد غیربلوری تشکیل شده است.

۲. ویژگی خاص: توده‌ای بی‌همتا متفاوت از ماده جامد، ماده گاز یا فوم معمولی، مانند رسانندگی گرمایی بسیار پایین، ضریب شکست بسیار کم، ثابت دی‌الکتریک بسیار پایین، سرعت صوت بسیار پایین، سطح ویژه بسیار بالا و گستره قابل تنظیم چگالی بسیار گسترده (به‌ویژه برای هواژل سیلیکا)، چگالی نسبی بسیار پایین و تخلخل بسیار بالا.

ساختار هواژل را می‌توان با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، تحلیل گر اندازه منافذ، پراش پرتو ایکس با زاویه کوچک و ... مشخص کرد.



شکل ۱ گروه‌بندی کلی هواژل‌ها (بازطراحی شده از مرجع [۲۰])

کاربردهای صنعتی بالقوه هواژل‌ها برای مثال، کاتالیست و مواد عایق را درک کرد.

پس از کیستلر، ترکیب شیمیایی مواد که به صورت هواژل ساخته می‌شدند به تدریج متنوع شد. طیف وسیعی از اکسیدهای ساده یا دوتایی توسط تیچنر<sup>۳</sup> و همکارانش بررسی شد [۲۳]. هواژل‌های بورات در آزمایشگاه ملی ساندا تهیه شدند [۲۴]. در ابتدا پیش‌ساز شیمیایی شامل کاتیون‌های M که از آن ژل اکسید ساخته می‌شد، به‌طور پایه‌ای نمک‌های فلزی بودند. سدیم سیلیکات که در ابتدا توسط کیستلر استفاده شده بود، ارزان قیمت بود. از این‌رو، یک فرایند صنعتی مبتنی بر این پیش‌ساز برای مدتی توسط شرکت BASF توسعه یافت [۲۵]. قابل ذکر است که نمک‌های فلزی ساده نیز زمانی که پیش‌سازهای پیشرفته‌تر به راحتی در دسترس نبودند، بسیار مورد علاقه بودند. در سال‌های اخیر، استفاده از نمک‌های فلزی به‌عنوان پیش‌سازهای سل-ژل، در حالتی که سنتز در یک حلال آلی انجام می‌شود و به آن یک رابنده پروتون مانند یک اپوکسید افزوده می‌شود، مورد توجه قرار گرفته است [۲۶]. هواژل‌های خوبی از این راه با کاتیون‌های کروم، آهن، آلومینیم و سایر کاتیون‌ها به دست آمده‌اند.

پری<sup>۴</sup> نخستین کسی بود که تترائیل‌اورتوسیلیکات (TEOS) را به‌عنوان پیش‌ساز هواژل سیلیکا معرفی کرد [۲۷]. کارهای گسترده‌تری در این راستا توسط گروه تیچنر بر سیلیکا و همچنین، طیف وسیع‌تری از ترکیب‌های یادشده پیشین انجام شد [۲۸]. در میان برجسته‌ترین نتیجه‌ها، وگنیر<sup>۵</sup> تغییر ساختار را در طول استخراج ابربحرانی با دمای بالا در الکل مطالعه کرد [۲۹]. یک مدل رشد سینتیک که کنترل بافت هواژل‌های سیلیکا را آسان‌تر می‌کند نیز در

اصطلاح هواژل برای نخستین بار توسط کیستلر در سال ۱۹۳۲ معرفی شد تا ژل‌هایی که در آن‌ها مایع با گاز جایگزین می‌شود، بدون فروپاشی شبکه جامد ژل معرفی شود [۲۱]. درحالی‌که ژل‌های مرطوب پیش‌از آن، با تبخیر خشک می‌شدند، کیستلر یک روش جدید ابربحرانی را اعمال کرد که برپایه آن مایعی که ژل‌ها را آغشته می‌کرد پس از تبدیل شدن به مایع ابربحرانی تخلیه می‌شد. در عمل خشک کردن ابربحرانی شامل گرمادهی ژل در دم‌فشار بود. گرمادهی تا زمانی که فشار و دما از دمای بحرانی و فشار بحرانی مایع محبوس در منافذ ژل بیشتر شد، ادامه داشت. در نهایت سیال ابربحرانی را می‌توان به شکل گاز تخلیه کرد که در پایان اسکلت جامد خشک ماده مرطوب اولیه به دست آید و همچنین، نمونه‌های خشک شده به دست آمده بافت متخلخل بسیار باز، مشابه بافت در مرحله مرطوب، داشتند.

با در نظر گرفتن پیشرفت‌های اخیر در سنتز هواژل‌ها، واقعی‌تر است که این مواد را با استناد به تعریف اولیه کیستلر، به‌سادگی به‌عنوان ژل‌هایی که در آن مایع با هوا، با انقباض بسیار کم شبکه جامد جایگزین شده‌اند، تعریف کنیم. این تعریف تفاوت اصلی بین هواژل‌ها و زیروژل‌ها را روشن می‌کند. اصطلاح زئروژل توسط آیوپاک به‌عنوان یک شبکه باز که با حذف تمام عوامل متورم‌کننده از ژل تشکیل می‌شود، تعریف می‌شود [۲۲]. کیستلر در نوآوری خود مجموعه‌ای از هواژل‌ها با ماهیت بسیار متفاوت را سنتز کرد. افزون بر هواژل‌های سیلیکا که می‌توان آن‌ها را بدون هیچ‌گونه آسیب به ساختار سنتز کرد، او موفق به ساخت هواژل‌های آلومینیا شد که از نظر مکانیکی بسیار ضعیف بودند. او همچنین، هواژل‌های دیگری از تنگستن، آهن یا قلع اکسید و نیکل تارترات<sup>۲</sup> را سنتز کرد. افزون‌بر این، سیالاتی که در آن‌ها خشک کردن ابربحرانی انجام شد نیز بسیار متنوع بود که در نهایت کیستلر به سرعت

1. Xerogel

2. Nickel tartrate

3. Teichner

4. Peri

5. Woignier

داخل حفره‌های هواژل و سنتز چندسازه‌ها، با حفظ ساختار اولیه هواژل، می‌توان کاربردهای آن را گسترش داد.

#### سنتز

طراحی کاربردی هواژل برپایه ویژگی آن است که به ریزساختار متکی است. بنابراین، واپایش ریزساختار در طول سنتز بسیار مهم است. به‌طور معمول، فرایند سنتز هواژل شامل سه مرحله کلیدی است که در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱. تغییر حالت محلول سل: ذره‌های نانوسل در محلول پیش‌ساز به‌طور خودبه‌خود تشکیل می‌شوند یا با کاتالیست‌ها از راه واکنش‌های آب‌کافت و تراکم تسریع می‌شوند.

۲. تبدیل سل به ژل (ژل‌سازی): ذره‌های سل به‌صورت عرضی و سلسله‌مراتبی به یک ژل مرطوب با شبکه منسجم تشکیل می‌شوند.

۳. تبدیل ژل به هواژل (خشک‌کردن): حلال داخل ژل مرطوب با هوا بدون آسیب جدی به ریزساختار جایگزین می‌شود.

هر سه مرحله می‌تواند ریزساختار هواژل را تعیین کند و بر ویژگی کاربردهای آن تأثیر بگذارد.

روش‌های خشک‌کردن متنوع هستند که شامل خشک‌کردن سیال ابربحرانی در دمای بالا، خشک‌کردن سیال ابربحرانی در دمای پایین، خشک‌کردن طبیعی، خشک‌کردن با روش تبادل حلال در فشار محیط، خشک‌کردن با اصلاح سطحی در فشار محیط، خشک‌کردن انجمادی و غیره است [۳۴، ۳۵].

آزمایشگاه‌های ملی ساندا<sup>۱</sup> توسعه داده شد و یک فرایند کاتالیز اسید-باز دو مرحله‌ای اجازه طراحی هواژل سیلیکا یکپارچه با چگالی بسیار پایین را داد [۳۰]. پس از آن، تیلوتسون<sup>۲</sup> و هرویش<sup>۳</sup> این فرایند دو مرحله‌ای را با جایگزینی الکل با یک حلال بی‌پروتون<sup>۴</sup> (حلال بدون آزادسازی پروتون) با تقطیر اصلاح کردند تا از واکنش‌های آب‌کافت جلوگیری کنند [۳۱].

با توجه به شکننده بودن هواژل‌ها، ویژگی مکانیکی آن‌ها توسط لمی<sup>۵</sup> و همکارانش [۳۲] در کالیفرنیا بررسی و یک رابطه مقیاس‌بندی بین مدول الاستیک و چگالی وابسته به شیمی سنتز برقرار شد. یک پیامد جالب این مطالعه این بود که هواژل‌های با چگالی کم می‌توانستند به‌راحتی فشرده شوند و برای طراحی قطعاتی که قادر به جذب انرژی درگیر در فشرده‌سازی ضربه هستند، استفاده شوند. جذب تدریجی انرژی شوک توسط هواژل سیلیکا یکپارچه توسط آزمایشگاه پیشرفته جت برای جمع‌آوری غبار ستاره دنباله‌دار در فضا استفاده شد [۳۳].

#### اهمیت هواژل‌ها

هواژل‌ها به دلیل ویژگی‌های بی‌همتا، هم در علم و هم در فناوری توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. همان‌طور که در مقدمه هم گفته شد هواژل‌ها موادی هستند که با جایگزین کردن مایع درون یک ژل، با هوا بدون افت حجمی به‌دست می‌آیند. این مواد به دلیل داشتن تخلخل و سطح ویژه بالا و حفره‌های باز کاربردهای متفاوتی را در زمینه‌های گوناگون چون عایق صوتی و گرمایی، کاتالیست‌ها، جاذب‌ها و ... دارند. افزون بر کاربردهایی که از هواژل‌های خالص به‌دست می‌آیند، با قراردادن فلزها، اکسید فلزها و آلیاژها

1. The Sandia National Laboratories

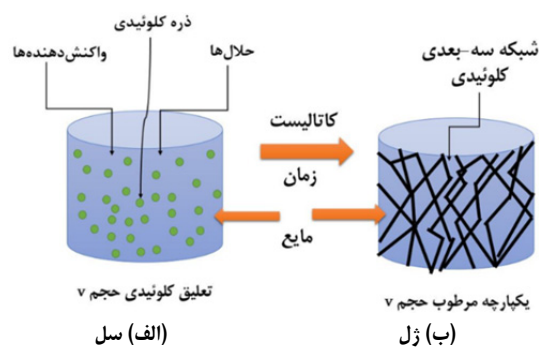
2. Tillotson

3. Hrubesh

4. Aprotic

5. LeMay

درحالی که در حلال هستند به یکدیگر متصل می‌شوند تا یک شبکه باز سه‌بعدی بسازند که ژل نامیده می‌شود (شکل ۳-ب). تبدیل سل به ژل فرایند ژل شدن را تشکیل می‌دهد و ژل‌های به‌دست آمده ژل کلونیدی نامیده می‌شوند.

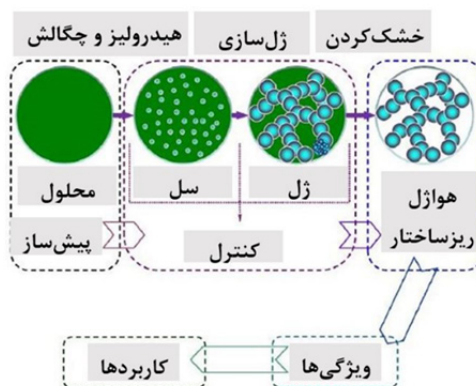


شکل ۳ فرایند سل-ژل:  
سل (الف) و ژل (ب) [۴] (با کسب اجازه از ACS)

#### ژل‌های معدنی

نخستین ژل‌های معدنی که به‌طور تصادفی توسط شیمیدان‌ها سنتز شدند، ژل‌های سیلیکا بود که توسط ایلمن<sup>۱</sup> در سال ۱۸۴۶ میلادی ساخته شد [۳۹]. ولی ژل‌های طبیعی با ماهیت آلی در جهان متداول است. برای مثال، زجاجیه چشم یک ژل طبیعی است. به‌طور کلی ژل‌ها موادی هستند که در مرز بین شیمی آلی، معدنی و زیست‌شناسی قرار دارند. هواژل‌ها به‌طور قطع در بین این مواد جدید، شگفت‌انگیزترین هستند زیرا می‌توانند در حالت خشک نوع بسیار باز شبکه‌ای را که در حالت مرطوب داشتند، حفظ کنند.

نخستین پیش‌سازهای مورد استفاده در فرایند سل-ژل نمک‌های فلزی  $MX_n$  بودند که در آن فلز M با n آنیون X پیوند دارند. در حلال‌های آبی، این پیش‌سازها به‌صورت گونه‌های یونی وجود دارند که در آن اتم‌های فلز به‌صورت کاتیون حل شده  $M[H_2O]_N^{z+}$  هستند. واکنش‌های تشکیل



شکل ۲ طرح پژوهش‌های پایه برای هواژل‌ها [۳۶]

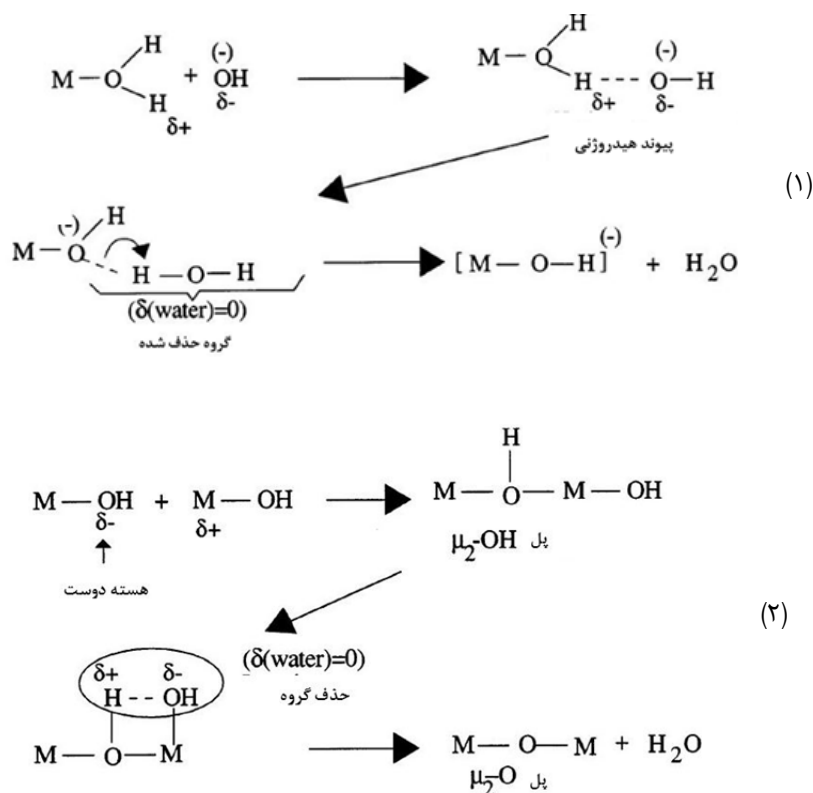
#### فرایند سل-ژل

فرایند سل-ژل نوعی روش سنتز مواد جامد را مشخص می‌کند که در یک مایع و در دمای پایین (به‌طور معمول کمتر از  $100^\circ C$ ) انجام می‌شود. جامد در یک فرایند بسپارش که شامل ایجاد پل‌های M-OH-M یا M-O-M بین اتم‌های فلزی M از مولکول‌های پیش‌ساز است، تشکیل می‌شود. چنین تبدیل‌هایی معادل فرایند بسپارشی است که در شیمی آلی به‌خوبی شناخته شده است و شامل ایجاد پیوندهای مستقیم بین اتم‌های کربن و پیش‌سازهای آلی است. در واقع، تقسیم متداول بین شیمی معدنی و آلی به‌گونه‌ای بوده است که در مدت طولانی، این دو زمینه علم سل-ژل توسط گروهی به‌طور کامل متفاوت از شیمیدانان مورد توجه قرار گرفتند، بدون اینکه هیچ ارتباطی بین آن‌ها وجود داشته باشد. در مورد ژل‌های معدنی، یعنی به‌طور عمده اکسیدها، ذره‌های کلونیدی جامد مستقل (نانوذره‌ها با اندازه زیر یک میکرومتر) بیشتر در نخستین مرحله فرایند تشکیل می‌شوند [۳۷ و ۳۸]. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، هر ذره کلونیدی ساختار داخلی کم‌وبیش متراکم دارد. به‌طور معمول نگهداری چنین ذراتی در حالت پراکنده در حلال آسان است، در این صورت یک تعلیق کلونیدی به نام سل نیز به دست می‌آید. در مرحله دوم، این ذرات کلونیدی

1. Ebelmen

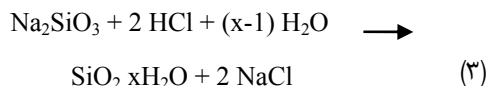
یک  $\text{OH}^-$  جایگزین مستقیم کرد. سازوکار تبادل پروتون از راه پیوندهای هیدروژنی که توسط لیواگ و همکارانش [۴۱] پیشنهاد شده (سازوکار ۱)، مشابه آن چیزی است که در یونش خود آب رخ می‌دهد. در مرحله بعد، واکنش‌های چگالش می‌تواند منجر به تشکیل پل‌های M-OH-M یا M-O-M شود (سازوکار ۲) [۴۱].

ذره‌های سل و ژل شامل واکنش‌های آب‌کافت است که با جایگزینی گروه‌های  $\text{H}_2\text{O}$  با  $\text{OH}$  با از دست‌دادن پروتون‌ها و واکنش‌های چگالش منجر به ساخت پل‌های M-OH-M یا پل‌های M-O-M با حذف مولکول‌های آب می‌شود. چندین سازوکار هم‌زمان برای این واکنش‌ها پیشنهاد شده است [۴۰]. برای مثال، یک لیگاند  $\text{H}_2\text{O}$  را می‌توان ابتدا با

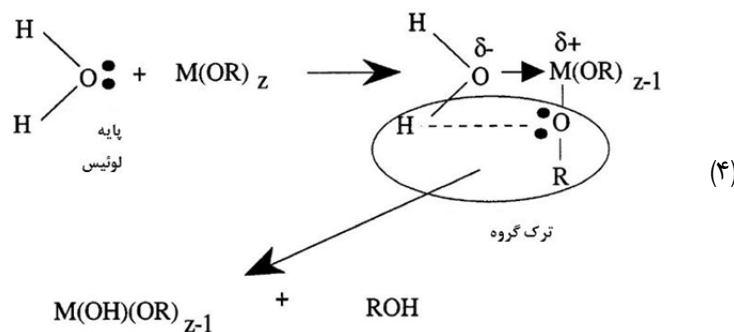


شدید<sup>۱</sup> از بین برود. این روش سنتز برای نخستین بار توسط کیستلر برای تولید هواژل‌ها به کار گرفته شد [۲۱].

برای ژل سیلیکا، پیش‌ساز مهمی به نام سدیم متاسیلیکات ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) وجود دارد که به آن آب‌شیشه نیز گفته می‌شود و با اسیدی مانند  $\text{HCl}$  می‌تواند مشابه واکنش ۳، واکنش دهد. همان‌طور که در این واکنش مشاهده می‌شود، نمکی در واکنش تولید می‌شود باید با تراکافت



بیشتر به صورت محلول در الکل اصلی خود در دسترس هستند. تبدیل آن‌ها در یک حلال آلی انجام می‌شود و آب به یک واکنش‌دهنده تبدیل می‌شود که به نسبت کنترل شده افزوده می‌شود. واکنش‌های آب‌کافت برپایه سازوکار ۴ منجر به جایگزینی لیگاندهای OR با لیگاندهای OH می‌شوند که به دنبال آن واکنش‌های چگالش، مشابه آنچه برای نمک‌های فلزی اتفاق می‌افتد، انجام می‌شود [۴].



واکنش‌پذیری بالای آلومینیم آلکوکسید و قابلیت ترک‌خوردگی در طول خشک‌شدن می‌شود، دشوار است که به‌طور معمول برای واپایش آب‌کافت و تراکم آلومینیم آلکوکسید، مخلوط حلال‌های پیچیده یا افزودن عوامل چندگانه<sup>۳</sup> ساز نیاز است [۴۶].

هواژل‌های آلی و کربنی

پیش‌سازهای آلی می‌توانند بسپارهای آلی را بر روی پیوندهای کووالانسی قوی (پیوند کربن-کربن) بسازند، حتی بسیار راحت‌تر از پیش‌سازهای سیلیکا. در نتیجه، آن‌ها سنتز یک نوع جدید جالب از هواژل‌های یکپارچه، مانند ذره‌های هواژل با اندازه‌های متفاوت از زیر میکرومتر تا چند صد میکرومتر را که با روش نامیزه<sup>۴</sup> سل-ژل تهیه شده بودند، ممکن ساختند [۴۷].

نسل دوم پیش‌سازها که امروزه به‌طور گسترده استفاده می‌شوند، آلکوکسیدهای  $M(OR)_n$  هستند. این مواد شیمیایی از ترکیب یک فلز M با یک گروه آلکوکسید OR که در آن R یک گروه آلکیل را مشخص می‌کند، تشکیل می‌شوند. آن‌ها با وجود پیوندهای کووالانسی قطبی M-O در مولکول‌هایشان مشخص می‌شوند. در عمل، آن‌ها بیشتر به‌صورت مجموعه‌های کم و بیش کوچک بسپارش یافته،

پیش‌سازهای سیلیکون، به‌طور عمده آلکوکسیدهای  $Si(OR)_4$ ، یک استثنای مهم را تشکیل می‌دهند و بسیار گسترده‌تر از پیش‌ساز سایر فلزها مطالعه شده‌اند. در این آلکوکسیدها R بیشتر یک گروه آلکیل،  $CH_3$ ، است، به‌طوری‌که پیش‌ساز را تترامتوکسی‌سیلان<sup>۱</sup> یا TMOS می‌نامند، یا اگر R یک گروه اتیل،  $C_2H_5$ ، است در این صورت پیش‌ساز تترا‌توکسی‌سیلان<sup>۲</sup> یا TEOS نامیده می‌شود [۴۲ تا ۴۴].

هواژل اکسید آلومینیم به‌طور عمده با استفاده از دو نوع پیش‌ساز، نمک‌های آلومینیم هیدراته ( $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ ) و  $(Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O)$  و آلکوکسیدهای آلومینیم (ایزوپروپوکسید آلومینیم)، سنتز شده‌اند [۴۵]. تهیه هواژل آلومینیا یکپارچه از آلومینیم آلکوکسید به‌طور معمول به دلیل مسیره‌های شیمیایی پیچیده‌ای که منجر به ژل‌شدن،

1. Tetramethoxysilane

2. Tetraethoxysilane

3. Chelate

4. Emulsion



محلول اولیه از ساعت‌ها تا چند روز طول می‌کشد. شرر<sup>۶</sup> و همکارانش [۵۱] تلاش قابل‌توجهی برای توضیح در ادبیات پدیده پیرش به‌صورت نظری انجام دادند. در واقع هدف از پیرش بهبود ویژگی مکانیکی ساختار هواژل‌ها است و در طول پیرش، ذره‌های شبکه تحت عمل‌آوری استوالد<sup>۷</sup> دستخوش تغییرهای بیشتری می‌شوند. از آنجایی که آب‌کافت و چگالش واکنش‌های برگشت‌پذیری هستند، در طول فرایند پیرش، توده در مکان‌های شبکه مطلوب‌تر (از نظر ترمودینامیکی) تجمع می‌یابد که منجر به افزایش میانگین اندازه ذره‌ها و ضخیم‌تر شدن بیشتر پیوندهای شبکه می‌شود. در طول پیرش ساختار جامد تقویت‌شده و در نتیجه انقباض ژل در هنگام خشک‌شدن کاهش می‌یابد. دما، فشار و pH عوامل تأثیرگذاری هستند که می‌توانند سینتیک پیرش را تغییر دهند. بیشتر ویژگی فیزیکی و بافتی مانند اندازه منافذ، تخلخل و مساحت سطح ژل‌های سنتز شده در طول پیرش تغییر می‌کند. در بیشتر پژوهش‌ها، فرایند پیرش را به‌عنوان یک مرحله تقویت‌کننده ساختار شبکه ناشی از واکنش‌های سل-ژل در نظر گرفته‌اند [۱۵ و ۵۲].

#### خشک‌کردن

یک نمودار گردشی کلی برای یک فرایند کامل سل-ژل در شکل ۴ نشان داده شده است. پس از فرایند ژل‌سازی، ژل مرطوب را می‌توان به‌صورت اختیاری در محلول مادر یا در حلال دیگری پیرش و شست که در نهایت ژل شسته شده را باید خشک کرد. تاکنون تمام بخش‌های ارایه شده با هدف بیان توضیحاتی در مورد تهیه ژل مرطوب بوده است. در مرحله بعد، به چگونگی خشک‌کردن ژل‌های مرطوب به‌دست‌آمده از فرایند سل-ژل پرداخته می‌شود. حلال داخل منافذ برای به‌دست‌آوردن هواژل باید حذف شود که چالش اصلی، خشک‌کردن بدون شکست معماری ژل سه‌بعدی است. ژل‌های مرطوب به دلیل ایجاد تنش موینگی در

گسترده‌ترین مواد مطالعه شده، هواژل‌های رزورسینول فرمالدهید<sup>۱</sup> و ملامین فرمالدهید<sup>۲</sup> هستند. آن‌ها را می‌توان از راه واکنش‌های چندتراکمی رزورسینول یا ملامین با فرمالدهید در یک محلول آبی کمی بازی، بیشتر با سدیم هیدروکسید یا هیدروژن سدیم کربنات به‌عنوان کاتالیست ژل‌سازی تهیه کرد [۴۸ و ۴۹]. هواژل‌های کربنی از راه کربنی‌کردن<sup>۳</sup> هواژل‌های بسیار تهیه شده با مسیر سل-ژل از بسپارش تراکمی<sup>۴</sup> مونومرهای آلی سنتز می‌شوند. آن‌ها به‌عنوان یک نوع از مواد کاربردی جذاب برای عایق دمای بالا در اتمسفرهای غیراکسیدکننده یا خلأ در نظر گرفته می‌شوند [۴۵]. گسترده‌ترین هواژل‌های بسیار مطالعه شده آن‌هایی هستند که از محلول‌های آبی رزورسینول و فرمالدئید حاوی یک کاتالیست بازی یا اسیدی ساخته شده‌اند. به‌طور کلی چهار مرحله را می‌توان در سنتز هواژل‌های کربنی در نظر گرفت: (۱) آماده‌سازی مخلوط سل-ژل، (۲) تشکیل ژل، (۳) خشک‌کردن ژل خیس، (۴) کربن‌دهی ژل خشک‌شده و گاهی اوقات فعال کردن بیشتر مشتق کربن‌شده [۵۰].

#### پیرش<sup>۵</sup>

یکی از جنبه‌های مهم سنتز هواژل این است که واکنش‌های شیمیایی با تشکیل ژل به پایان نمی‌رسد. این از نظر مفهومی به دو دلیل است. ابتدا، مایع موجود در منافذ حاوی گونه‌های متراکم یا مونومرهایی است که می‌توانند به‌آرامی در شبکه متراکم شوند. دوم، در هواژل‌های سیلیکا، هواژل حاوی Si-OH و Si-OR که واکنش نداده‌اند به دلیل انعطاف ذاتی شبکه می‌توانند به هم نزدیک شوند و تحت واکنش‌های چگالش قرار گیرند. این فرایند پیرش نامیده می‌شود و به‌طور معمول کل فرایند با غوطه‌ور کردن ژل در

1. Resorcinol-formaldehyde

2. Melamine-formaldehyde

3. Carbonizing

4. Polycondensation

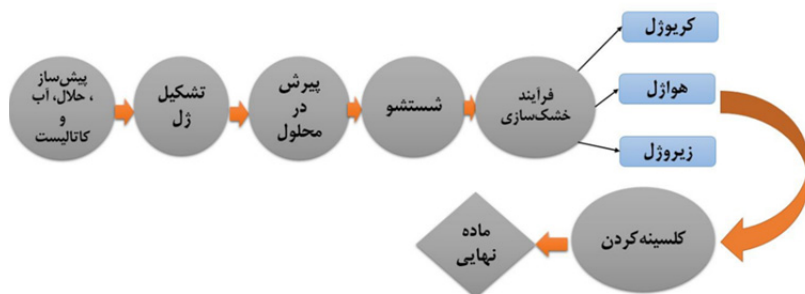
5. Aging

6. Sherer

7. Ostwald ripening

دشوار است.

دیواره‌های منافذ در حین خشک‌شدن که ناشی از کشش سطحی مایع در فصل مشترک جامد-مایع-بخار است، بسیار



شکل ۴ نمودار گردش سل-ژل و خشک‌کردن [۴] (با کسب اجازه از ACS)

که در آن  $V_p$  و  $S_p$  حجم منافذ و مساحت سطح ویژه هستند [۵۴ و ۵۵].

خشک‌کردن ابربحرانی<sup>۱</sup>

یکی از روش‌های متداول خشک‌کردن هواژل، خشک‌کردن به روش ابربحرانی است. این نوع از خشک‌کردن موجب کاهش تنش سطحی بین بخار و مایع در حین تخلیه منافذ در ژل مرطوب می‌شود و به علت کشش سطحی مایع، یک گرادیان فشار موئینگی در دیواره‌های منافذ ایجاد می‌شود که می‌تواند بیشتر بخش حجم منافذ را فرو بریزد. برای جلوگیری از این رویداد لازم است کشش سطحی مایع از بین برود. یک روش راحت برای انجام این کار تبدیل مایع به یک سیال ابربحرانی با کشش سطحی صفر است. این روش خشک‌کردن بافت متخلخل را با اجتناب از پدیده فروپاشی منافذ به‌طور کامل دست‌نخورده آزاد می‌کند. در عمل خشک‌کردن ابربحرانی شامل گرمادهی ژل مرطوب در یک ظرف در بسته است، به‌گونه‌ای که فشار و دما از دمای بحرانی و فشار بحرانی مایع محبوس در منافذ داخل ژل بیشتر شود. این روش در ابتدا توسط کیستلر و همکارانش بررسی شد [۲۱]. سنتز هواژل‌های سیلیکا یکپارچه از

از نظر مفهومی، پدیده انقباض نتیجه تراکم گروه‌های آویزان -OH در همسایگی دیواره منافذ است. در طول خشک‌شدن، گروه‌های -OH از سیلانول‌های غیرمتراکم به دلیل انعطاف‌پذیری ذاتی اسکلت هواژل، به اندازه‌ای نزدیک می‌شوند که متراکم شوند تا پیوندهای سیلوکسان جدید تشکیل شوند. در این حالت اگر واکنش‌های تراکم واپایش نشوند (برای مثال، با یک اصلاح سطحی مناسب)، انقباض شدید یا حتی ترک خوردن پس از خشک‌شدن رخ می‌دهد [۵۳]. روش استاندارد برای خشک‌کردن ژل‌های مرطوب غلبه بر تنش‌های موئینگی با حذف مایع با روش‌های خشک‌کردن ابربحرانی یا استفاده از اصلاح سطحی برای خشک‌کردن در فشار محیط است.

خشک‌کردن با فشار موئینگی واپایش می‌شود. انقباض ژل‌ها در طول خشک‌شدن با فشار موئینگی که در معادله ۵ نشان داده شده است، هدایت می‌شود.

$$P_c = -\gamma_v / (r_p - \delta) \quad (5)$$

که در آن  $\gamma_v$  کشش سطحی مایع نفوذی است،  $r_p$  شعاع منافذ است که می‌توان آن را با معادله ۶ نشان داد.  $\delta$  ضخامت لایه جذب‌شده سطحی است [۵۴].

$$r_p = 2V_p / S_p \quad (6)$$

1. Supercritical drying

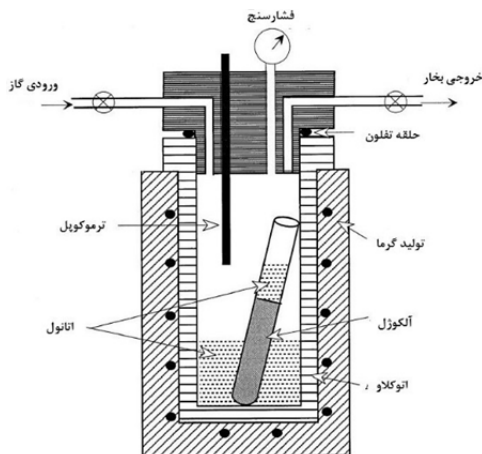
می‌شود. مسیر خشک کردن ابربحرانی در نمودار فاز  $\text{CO}_2$  و یک دم فشار برای خشک کردن ابربحرانی با الکل در شکل ۵ ارایه شده است [۵۷ و ۵۸].

جدول ۱ عامل‌های نقطه بحرانی سیال‌های معمولی [۴]

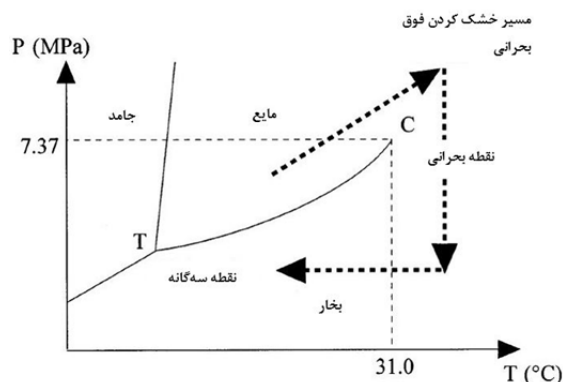
سیال	فرمول	دمای بحرانی (°C)	فشار بحرانی (MPa)
آب	$\text{H}_2\text{O}$	۳۷۴٫۱	۲۲٫۰۴
کربن دی‌اکسید	$\text{CO}_2$	۳۱٫۰	۷٫۳۷
فریون ۱۱۶*	$(\text{CF}_3)_2$	۱۹٫۷	۲٫۹۷
استون	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$	۲۳۵٫۱	۴٫۶۶
نیتروژن اکسید	$\text{N}_2\text{O}$	۳۶٫۴	۷٫۲۴
متانول	$\text{CH}_3\text{OH}$	۲۳۹٫۴	۸٫۰۹
اتانول	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	۲۴۳٫۰	۶٫۳۰

\* Freon 116

تترااتوکسی‌سیلان (TEOS) با خشک کردن ابربحرانی در متانول توسط پری [۵۶] به منظور مطالعه شیمی سطح این مواد استفاده شد. شرایط بحرانی بسته به مایعی که ژل مرطوب را آغشته می‌کند بسیار متفاوت است. پارامترهای بحرانی برخی از سیال‌ها در جدول ۱ داده شده است. اگر حلال یک الکل یا استون باشد می‌توان از روش خشک کردن ابربحرانی در دمای بالا که به عنوان روش داغ یا دما-بالا شناخته می‌شود، استفاده کرد، ولی در روش خشک کردن دما-بالا، چون فشار و دما بالا است، مشکل اشتعال‌پذیری حلال پیش می‌آید. برای جایگزینی این روش، یک روش خشک کردن سرد معرفی شده است که در آن کربن دی‌اکسید مایع با شرایط ابربحرانی خفیف برای خشک کردن ژل‌های مرطوب به‌ویژه ژل‌هایی که دارای اجزای با تجزیه گرمایی کم هستند (ژل‌های آلی و پلی‌ساکاریدی) استفاده



(ب)



(الف)

شکل ۵ طرحواره‌ای از یک دم فشار برای خشک کردن ابربحرانی با اتانول (الف) و مثالی از مسیر خشک کردن ابربحرانی سرد (ب) [۴] (با کسب اجازه از ACS)

می‌تواند انتخاب مناسبی باشد که امکان کاهش هزینه‌ها و مصرف انرژی را با انجام بسیار ساده و ایمن فراهم می‌کند. باین حال تا زمانی که تنش‌های موینگی در منافذ باقی

خشک کردن در فشار محیط برای غلبه بر مشکلات و نواقص به‌وجود آمده در خشک کردن ابربحرانی، خشک کردن تحت فشار محیط

### مقایسه روش‌های خشک‌کردن

مقایسه مستقیم روش‌های خشک‌کردن با استفاده از پیش‌سازهای متفاوت، مدت‌زمان پیرش و همچنین، روش‌های متفاوت استخراج حلال پیچیده است. برای مثال، برای روش‌های استخراج در دمای پایین، پیرش کافی لازم است تا ژل‌های مرطوب دچار مقداری انقباض شوند، به طوری که ژل‌ها بتوانند از ظرف تبادل حلال خارج شوند. در فرایندهای استخراج سریع ابربحرانی، به‌طور معمول مدت‌زمان پیرش کمی وجود دارد. با این‌حال، دمای بالا به کار گرفته‌شده در این فرایندها تأثیر قابل‌توجهی بر سینتیک واکنش‌های تراکمی دارد. محدودیت‌های اصلی روش‌های استخراج ابربحرانی الکل در دمای بالا، دشواری‌های مرتبط با به‌دست آوردن دماهای بالا برای رسیدن به نقطه بحرانی حلال الکی و همچنین، نگرانی‌های ایمنی در کارکرد مخزن تحت فشار در آن شرایط است. در روش خشک‌کردن در دما و فشار بحرانی، روش‌های استخراج در دمای پایین به‌طور گسترده در تولید هواژل‌های کوچک تا بسیار بزرگ به‌کارگرفته شده است. با این‌حال ساخت آن‌ها ممکن است روزها تا هفته‌ها طول بکشد و مراحل متعدد تعویض حلال، فرایند را پیچیده می‌کند و یک نقطه ضعف روش استخراج در دما و فشار بالا این است که هم دمای بالا و هم فشار بالا نیاز دارد. مزیت اصلی روش‌های فشار محیطی این است که به تجهیزات پرفشار گران‌قیمت و بالقوه خطرناک نیاز ندارند. با این‌حال به مراحل متعدد فرایندهای تبادل حلال، نیاز دارند.

تا به امروز پژوهش‌های محدودی در مورد به‌کارگیری روش‌های خشک‌کردن انجمادی انجام شده است. این روش‌ها به تجهیزات ویژه‌ای نیاز دارند تا به دمای پایین موردنیاز برای تصعید حلال برسند و به‌طور عمده به‌جای هواژل یکپارچه، پودرهای هواژل ایجاد می‌کنند.

بماند، ژل دچار انقباض شدید یا فروپاشی منافذ خواهد شد. تنش‌های موئینگی ایجاد شده به کشش سطحی و گران‌روی حلال، سرعت خشک‌شدن و نفوذپذیری ژل مرطوب بستگی دارد. برای اجتناب از این تنش‌ها روش‌های متفاوتی پیشنهاد شده است [۱۵]. برای مثال، یکی از روش‌ها، آب‌گریز کردن ژل‌های مرطوب پس از ژل‌سازی است که می‌توان آن‌ها را با غوطه‌ور کردن در یک حلال آب‌گریز مانند هگزان یا هپتان و در محلول TMCS و به دنبال آن خشک‌کردن در فشار محیط انجام داد [۵۵].

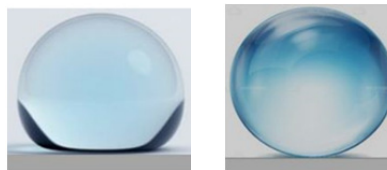
روش دیگر استفاده از هم‌پیش‌ساز<sup>۱</sup> است که در آن عوامل اصلاح سطحی مانند پیش‌ساز MTMS به پیش‌ساز سیلیکا (آب‌شیشه یا TMOS) برای اصلاح شیمی سطح افزوده می‌شود. در نهایت افزودن مواد شیمیایی واپایش‌کننده خشک‌کردن مانند پلی‌اتیلن گلیکول، پلی‌وینیل‌الکل یا ماده-های سطح‌فعال، برای کاهش اثرات منفی خشک‌کردن و امکان واپایش اندازه و حجم منافذ و توزیع اندازه ذره‌های آن‌ها انجام می‌شود. در حال حاضر روش خشک‌کردن در فشار محیط نوید بخش‌ترین روش برای تولید هواژل‌های متفاوت است [۵۹].

### خشک‌کردن/انجمادی

یکی دیگر از روش‌های خشک‌کردن که در آن مرز فازی بین فاز گاز و مایع وجود ندارد و در نتیجه فشار موئینگی نقش مهمی را ایفا نمی‌کند، خشک‌کردن انجمادی است. در اینجا حلال باید با ضریب انبساط کم و فشار تصعید بالا مبادله شود. مایع منافذ منجمد و تحت خلأ تصعید می‌شود و ماده‌ای که با این روش به‌دست می‌آید کریوژل نامیده می‌شود. از معایب خشک‌کردن انجمادی می‌توان به این موارد اشاره کرد که دوره پیرش برای تثبیت شبکه باید طولانی شود و در برخی موارد ممکن است شبکه ژل با تبلور حلال در منافذ از بین برود [۶۰].

### هواژل‌های آب‌گریز

سطح آب‌گریز، سطحی است که آب را دفع می‌کند، درحالی‌که سطح آب‌دوست آب را جذب می‌کند، ولی طیف وسیعی از رفتار سطحی وجود دارد. بیشتر سطوح نه به‌طور کامل آب‌دوست و نه به‌طور کامل آب‌گریز هستند که یکی از عوامل تعیین آب‌گریزی کلی یک نمونه، مقدار تعامل گروه‌های عاملی بر سطح ماده با آب است. این برهم‌کنش‌های شیمیایی شامل نیروهای بین‌مولکولی (برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی و پیوندهای هیدروژنی) اسید/ باز و انواع دیگر واکنش‌های سطحی مربوط به آب است. آب به‌آسانی سطح آب‌دوست را خیس می‌کند ولی بر سطح آب‌گریز مانند منجوق قرار می‌گیرد (شکل ۶).



ب

الف

شکل ۶ تصویری از قطره آب بر سطح آب‌گریز (الف) و آب‌دوست (ب) (بازطراحی‌شده از مرجع [۱۵])

بالایی هستند، نقطه تماس احتمالی زیادی با آب موجود در محیط وجود دارد [۱۵].

هواژل‌های سیلیکا تهیه‌شده از TMOS یا TEOS دارای گروه‌های Si-OH و Si-OR هستند که گروه‌های Si-OH هواژل‌ها را آب‌دوست می‌کنند و گروه‌های Si-OR می‌توانند پیوند هیدروژنی قوی با آب تشکیل دهند. مشاهده شده است که وقتی هواژل‌ها بر پایه TMOS در آب قرار می‌گیرند، دچار فروپاشی ساختاری می‌شوند که برای کاربردهای حسگر شیمیایی در نمونه‌های آبی نامناسب هستند. در واقع برخی هواژل‌های سیلیکا آن‌قدر آب‌دوست هستند که در رطوبت‌سنجی به کار می‌روند. ماینر<sup>۱</sup> و همکارانش اشاره کردند که جذب قابل‌توجه آب توسط هواژل‌های سیلیکا در محیط‌های مرطوب منجر به کدر شدن مواد هواژل و حتی تکه‌تکه شدن آن‌ها می‌شود. این پدیده استفاده از مواد هواژل را برای عایق‌گرایی پیچیده می‌کند. افزون بر این، Si-OH یک اسید ضعیف است. در نتیجه میانگین بار این گروه‌های سطحی به pH محیطی که ژل در آن ایجاد می‌شود، بستگی دارد [۶۱ و ۶۲]. این ویژگی سیلیکا در کاربردهای سوانگاری<sup>۲</sup> و الکتروفورز<sup>۳</sup> به کار گرفته می‌شود.

وجود تعداد قابل‌توجهی از گروه‌های جانبی غیر قطبی (Si-R) بر سطح هواژل سیلیکا، آن را آب‌گریز می‌کند و مولکول‌های آب تنها تحت نیروهای بین‌مولکولی ضعیف با هیدروکربن‌ها قرار می‌گیرند، ولی به دلیل نیروهای بین‌مولکولی بسیار قوی با سایر مولکول‌های آب، آب بر سطوح هواژل‌های آب‌گریز جمع می‌شود.

یکی از روش‌هایی که برای ارزیابی درجه آب‌گریزی استفاده می‌شود، قراردادن هواژل در یک محیط مرطوب و نظارت بر افزایش جرم هواژل با گذشت زمان است. اگر یک هواژل آب‌دوست باشد، جرم آن به دلیل جذب آب به مقدار

فرایند سل-ژل سیلیکا از راه یک سری واکنش‌های چگالش مولکول‌های منفرد آلکوکسید انجام می‌شود. با این حال، در پایان واکنش بسپارش برخی از زنجیره‌های جانبی آلکوکسید بدون واکنش باقی می‌مانند (Si-OR) و برخی از آن‌ها تا حدی واکنش می‌دهند (Si-OH). اگر پیش‌سازهای سیلیکا حاوی گروه‌هایی باشند که نتوانند از طریق چگالش (Si-R) واکنش دهند، آن گروه‌ها در بافت هواژل وجود خواهند داشت. هنگامی که این گروه‌ها (Si-R, Si-) OH, Si-OR در سطح هواژل وجود داشته باشند، می‌توانند با آب موجود در محیط تماس بگیرند و از آنجایی که هواژل‌ها در مقایسه با بسیاری از مواد دیگر دارای سطح غیرعادی

1. Miner

2. Chromatography

3. Electrophoresis

### ساختار منافذ

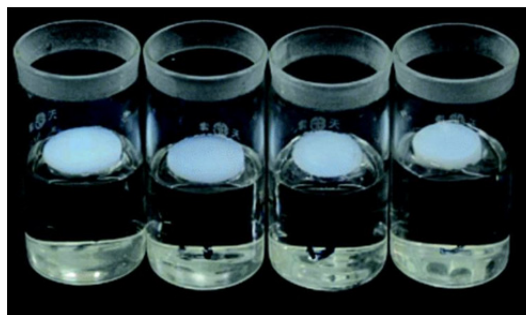
برپایه گروه‌بندی آیوپاک برای مواد متخلخل، منافذ با قطر کمتر از ۲ نانومتر، ریزحفره نامیده می‌شوند. آن‌هایی که قطرهای بین ۲ تا ۵۰ نانومتر دارند، مزوحفره و آن‌هایی که قطر بیشتر از ۵۰ نانومتر دارند، درشت‌حفره نامیده می‌شوند. هواژل‌های سیلیکا هر سه نوع حفره را دارند، ولی بیشینه منافذ مزوحفره هستند و درصد به‌نسبت کمی نیز از ریزحفره‌ها وجود دارند و تخلخل می‌تواند تا ۹۹٪ هم باشد [۶۵]. تعیین روش برای بیان داده‌های تخلخل بسیار اهمیت دارد و پرکاربردترین روش برای تعیین تخلخل هواژل، روش جذب و دفع نیتروژن است. در این روش مقدار گاز جذب‌شده اندازه‌گیری می‌شود. با روش جذب نیتروژن می‌توان شکل‌های متفاوت منافذ را با توجه به شکل همدمای جذب تشخیص داد [۶۶ و ۶۷].

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) روش‌هایی هستند که ممکن است اطلاعاتی در مورد ریزساختار هواژل ارائه دهند، ولی این روش‌ها همچنین، مشکلاتی را به همراه دارند که به‌طور عمده مربوط به آماده‌سازی نمونه است. در طول آزمایش، پودر هواژل ممکن است به‌صورت الکترواستاتیکی بارگیری شود و در نتیجه به‌نوعی تغییر کند [۶۸]. با این حال، این روش‌ها به بررسی مستقیم ساختار هواژل پرداخته تا اندازه ذره‌ها و اندازه منافذ تخمین زده شود. تصاویر معمولی SEM و TEM از یک هواژل نیکل در شکل ۸ نشان داده شده است [۶۹].

### چگالی

انقباض حجمی هواژل‌ها از تغییر حجم رخ داده در طی تبدیل هیدروژل به هواژل محاسبه می‌شود. دو اصطلاح متفاوت «چگالی توده‌ای» و «چگالی اسکلتی» برای توصیف چگالی هواژل‌های سیلیکایی به‌کارگرفته می‌شوند. چگالی توده‌ای ( $\rho_b$ ) به‌عنوان نسبت جرم هواژل به حجم آن تعریف می‌شود. بافت جامد هواژل‌ها از ذره‌های بسیار ریز تشکیل

قابل توجهی افزایش می‌یابد. هنگامی که هوای مرطوب به هواژل نفوذ می‌کند، مولکول‌های آب به‌شدت با گروه‌های Si-OH واکنش نداده، برهم‌کنش می‌کنند. از طرف دیگر جرم یک هواژل آب‌گریز باید با قرار گرفتن در معرض هوای مرطوب بدون تغییر باقی بماند. همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، این مطالعه‌ها را می‌توان با قراردادن هواژل‌ها در محیطی مرطوب با رطوبت کنترل‌شده (به‌طور معمول رطوبت بیش از ۹۶٪) یا با اجازه دادن به هواژل‌ها برای شناور شدن مستقیم بر روی آب برای مدتی معین انجام داد. مطالعه‌های جذب آب به‌طور معمول در یک دوره یک تا شش ماهه انجام می‌شود. شورت‌فرگر<sup>۱</sup> و همکارانش [۶۳] رفتارهای هواژل آب‌دوست و آب‌گریز را در محیطی با دمای ۲۰ °C و رطوبت ۹۶٪ به مدت ۴۰ روز نظارت کردند که هواژل‌های آب‌دوست در پنج روز اول ۱۰ تا ۶۰٪ افزایش جرم نشان دادند.



شکل ۷ هواژل‌های شناور بر آب [۶۴]

### ویژگی هواژل‌ها

توجه گسترده به هواژل‌ها به‌دلیل ویژگی جالب و غیرعادی آن‌ها است. از این رو، در این بخش ویژگی هواژل سیلیکا به‌طور ویژه مورد بحث قرار گرفته است.

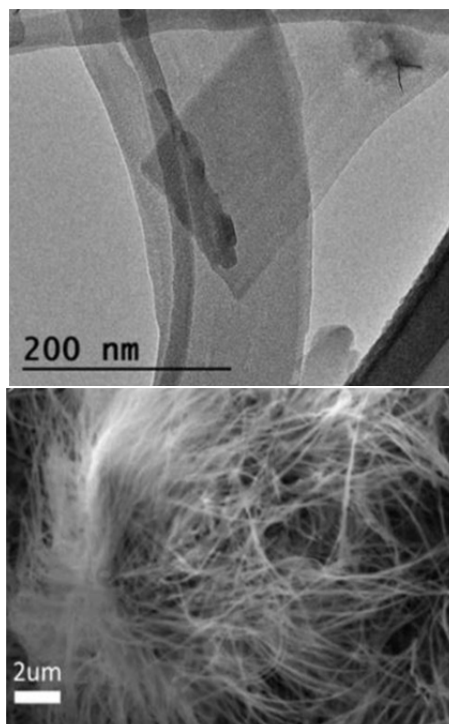
شده است. چگالی اسکلتی این ذره‌ها قرار است بسیار نزدیک به چگالی توده‌ای باشد.

#### رسانندگی گرمایی

به دلیل تخلخل و اندازه منافذ نانومتری، هواژل‌های سیلیکا مواد بسیار عایق با رسانندگی گرمایی کمتر از هوای ساکن هستند. کیستلر نشان داد که رسانندگی گرمایی یک هواژل در فشار محیط در هوا  $0.702 \text{ W/mK}$  است [۲۱]. از آنجایی که هواژل‌های سیلیکا کسر بسیار کوچکی از سیلیکا جامد را دارند، رسانندگی کمتری از خود نشان می‌دهند و از این رو، انرژی گرمایی کمتری را منتقل می‌کنند. حالت نهایی انتقال گرمایی از راه هواژل‌های سیلیکا شامل تابش پرتوهای فروسرخ است و عامل مهمی که بر این مسیر انتقال تأثیر می‌گذارد، ضخامت نوری است. در دماهای پایین، مؤلفه تابشی انتقال گرما کم است ولی در دماهای بالاتر انتقال تابشی به یک حالت غالب رسانندگی گرمایی تبدیل می‌شود [۷۱ و ۷۲].

#### آب‌گیری

هواژل‌های سیلیکا بسته به شرایط در حین سنتز می‌توانند آب‌دوست یا آب‌گریز باشند. گروه‌های قطبی سیلانول Si-OH موجود در ساختار هواژل منبع اصلی آب‌دوستی هستند، چون می‌توانند جذب آب را افزایش دهند. به‌طور کلی، هواژل‌هایی که با آب‌کافت اصلاح‌نشده و چگالش آلکیل‌اورتوسیلیکات‌ها<sup>۱</sup> سنتز می‌شوند و در فشار ابربحرانی در دمای بالا خشک می‌شوند، آب‌گریز هستند و آن‌هایی که با  $\text{CO}_2$  خشک می‌شوند آب‌دوست هستند. این تفاوت به دلیل گروه‌های متفاوت سطحی است که در طی فرایند خشک کردن در دما و فشار ابربحرانی تشکیل شده‌اند. خشک کردن ابربحرانی در دمای پایین موجب ایجاد گروه‌های هیدوکسیل (-OH) بر سطح می‌شود که موجب ایجاد هواژل‌های آب‌دوست می‌شود. خشک کردن ابربحرانی در دمای بالا اجازه می‌دهد تا واکنش گروه‌های هیدروکسیل سطحی با حلال برای تشکیل گروه‌های متوکسی X



شکل ۸ تصویرهای TEM (الف) و SEM (ب) از هواژل نیکل [۶۹]

درصد انقباض حجمی، حجم منافذ و تخلخل هواژل‌ها با معادله‌های ۷ تا ۹ تعیین می‌شود [۷۰].

$$V_s \% = (1 - V_a/V_g) \times 100 \quad (7)$$

$$V_p = (1/\rho_b - 1/\rho_s) \quad (8)$$

$$\text{درصد تخلخل} = (1 - \rho_b/\rho_s) \times 100 \quad (9)$$

که در آن‌ها  $V_a$ ،  $V_g$  و  $V_p$  به ترتیب حجم هواژل، حجم آلکوزل و حجم حفره‌ها هستند و  $\rho_b$  و  $\rho_s$  به ترتیب چگالی اسکلتی و چگالی توده‌ای هواژل سیلیکا است.

هیبریدشدگی<sup>۲</sup> است. برای مثال، هواژل‌های هیبریدی سیلیکا را می‌توان برای اهداف تقویتی با مخلوط کردن یک آلکوکسید سیلیکا با پیش‌سازهای هیبریدی مانند پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) ساخت [۷۵]. برخی از هواژل‌های سیلیکا انعطاف‌پذیر با ویژگی ابرآب‌گریز نیز از متیل‌تری‌متوکسی‌سیلان (MTMS) توسط راتو<sup>۳</sup> و همکارانش [۷۵] ساخته شد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که پیوندهای عرضی بسیار اسکلت سیلیکا نیز می‌تواند به افزایش شدید ویژگی مکانیکی کمک کند. افزون‌براین، ویژگی مکانیکی به شیمی سنتز ژل، محیط و زمان پیرش حساس است که با افزایش پیرش، استحکام فشاری و مدول الاستیک افزایش می‌یابد درحالی‌که کرنش در هنگام شکست کاهش می‌یابد [۷۶ و ۷۷].

#### ویژگی نوری

ویژگی عبور و پراکندگی نوری، از دیگر ویژگی‌های مهم هواژل‌های سیلیکا است که همراه با ویژگی گرمایی آن‌ها هنگامی که یک عایق گرمایی شفاف مانند پنجره‌ها در نظر باشد، به کار می‌آیند. نخستین بررسی این موضوع توسط پاچونک<sup>۴</sup> منتشر شد. شفافیت و عبور نور مرئی هواژل‌های سیلیکا می‌تواند زیاد باشد، ولی تمایل دارند نور عبوری را تا حد زیادی پراکنده کنند که کیفیت نوری را کاهش می‌دهد. پراکندگی ریلی به دلیل ناهمگونی شبکه ژل جامد در گستره نانومتری دلیل رنگ زرد سیلیکا در هنگام انتقال و رنگ مایل به آبی در حالت انعکاس در پس‌زمینه تاریک است [۷۸].

در بسیاری از کاربردها، شفافیت نقش مهمی را ایفا می‌کند که به همین دلیل ویژگی عایق گرمایی بسیار بالا و شفافیت نوری هواژل‌ها در ناحیه مرئی، آن‌ها برای پنجره‌های دوجداره پیشنهاد شده‌اند [۷۹]. بنابراین، تلاش‌های بسیاری مانند تأثیرهای روش‌های متفاوت

(-OCH<sub>3</sub>) انجام شود و در نتیجه منجر به هواژل‌های آب‌گریز شود.

دو مسیر متفاوت برای افزایش آب‌گریزی یک هواژل وجود دارد:

۱. ویژگی آب‌گریزی را می‌توان با افزودن یک عامل سیلاتین<sup>۱</sup> در مرحله سل-ژل افزایش داد. این اصل در روش‌های خشک کردن در فشار محیط استفاده می‌شود.

۲. اصلاح سطح هواژل پس از خشک شدن است. سطح هواژل‌های آب‌دوست را می‌توان با متانول گازی اصلاح کرد. آب‌گریزی هواژل‌ها با اندازه‌گیری زاویه تماس ( $\theta$ ) قطره آب با سطح هواژل با معادله ۱۰ به دست می‌آید.

$$\theta = 2 \tan^{-1} (2h / w) \quad (10)$$

که در آن  $h$  ارتفاع و  $w$  عرض قطره آب در تماس با سطح هواژل است. از میکروسکوپ‌های متحرک برای اندازه‌گیری  $h$  و  $w$  استفاده می‌شود. اصلاح سطح با طیف‌سنجی FTIR ارزیابی شد.

پایداری گرمایی هواژل‌ها از نظر حفظ آب‌گریزی از تجزیه‌های گرمایی وزن‌سنجی و تفاضلی گرمایی (-TGA DTA) و همچنین، با گرمادهی هواژل‌ها در کوره و سپس قراردادن نمونه‌های گرمادهی شده بر سطح آب برآورد می‌شود [۷۳]. ژل‌های آب‌گریز فقط برای مدت معینی آب‌گریزی را نشان می‌دهند. همچنین، قرار گرفتن در معرض هوا برای مدت طولانی منجر به جذب آب می‌شود [۶۰ و ۷۴].

#### ویژگی مکانیکی

استحکام فشاری، استحکام کششی و مدول الاستیک هواژل‌ها بسیار کم است و تا حد زیادی به پیوند شبکه و چگالی هواژل بستگی دارد. همان‌طور که پیش‌ازین اشاره شد، بسیاری از مسیرهای ترکیبی با هدف تقویت هواژل‌های سیلیکا بررسی شدند که محبوب‌ترین آن‌ها پیرش و

1. Silylating

2. Hybridization

3. Rao

4. Pajonk

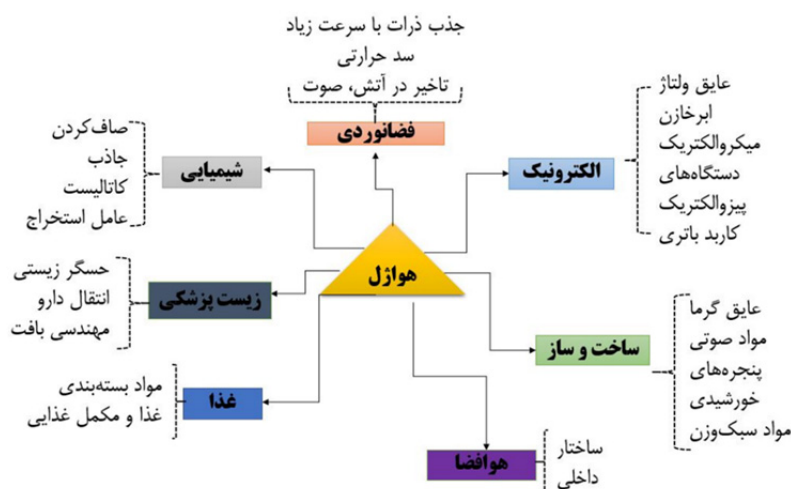


نوری تا ۹۳٪ (برای هوآزل‌های با ضخامت در حدود ۱ سانتی‌متر) در طول موج ۹۰۰ نانومتر به‌دست آورد [۸۱]. کاربرد هوآزل‌ها

به‌طور کلی کاربردهای هوآزل‌ها در دهه‌های اخیر برای اهداف ویژه‌ای که در شکل ۹ نشان داده شده‌اند، بررسی شدند.

خشک‌کردن و همچنین، تأثیرهای مقدار آب‌گیری و آب‌دوستی هوآزل برای بهبود این ویژگی هوآزل‌های سیلیکا انجام شده است. گرم‌کردن هوآزل‌ها شفافیت آن‌ها را به دلیل دفع آب و سوزاندن اجزای آلی بهبود می‌بخشد. همچنین، عامل‌های فرایند سل-ژل تا حد زیادی بر ویژگی نوری هوآزل‌ها تأثیر می‌گذارد [۸۰].

به‌طور معمول، هوآزل‌های تهیه‌شده از تترامتیل اورتوسیلیکات (TMOS) در متانول را می‌توان با نسبت عبور



شکل ۹ طیف گسترده‌ای از کاربرد هوآزل‌ها در زمینه‌های فنی متفاوت (باز طراحی‌شده از مرجع [۸۲])

بیشترین مقدار انرژی در ساختمان‌ها مصرف می‌شود که این مقدار فقط برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌های مسکونی و تجاری است [۸۳]. در این شرایط، عایق گرمایی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است و تلاش‌ها در توسعه دستگاه‌های جدید با ویژگی عایق گرمایی پیشرفته متمرکز شده است [۸۴]. رسانندگی گرمایی چندین ماده مورد استفاده برای عایق گرمایی در جدول ۲ آورده شده است که نشان می‌دهد هوآزل‌ها رسانندگی گرمایی بسیار پایین‌تری نسبت به مواد عایق معمولی دارند.

#### هوآزل به‌عنوان عایق گرمایی

نرخ رشد بالای جمعیت همراه با افزایش مصرف سرانه انرژی در کشورهای در حال توسعه موجب افزایش مستمر تقاضای جهانی برای انرژی شده است. افزایش تولید انرژی برای پاسخگویی به این تقاضا منجر به افزایش قیمت انرژی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و بدتر شدن محیط‌زیست به دلیل افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌شود. این مشکل‌ها را می‌توان با به‌کارگیری منابع انرژی تجدیدپذیر، کاهش مصرف انرژی یا هردو برطرف کرد.

جدول ۲ ویژگی گرمایی مواد عایق در دمای اتاق [۸۵]

مواد	رسانندگی گرمایی (W/m.K)
پلی استیرن قالبی*	۰/۰۳۴
پلی استیرن تزریقی**	۰/۰۳۴
تخته پلی اورتان**	۰/۰۲۳
الیاف شیشه****	۰/۰۲۵
پشم سنگ*****	۰/۰۴۲
بتن سبک	۰/۱۲۰
هواژل سیلیکا	۰/۰۱۶

\* Molded polystyrene  
 \*\* Injected polystyrene  
 \*\*\* Polyurethane board  
 \*\*\*\* Glass fiber  
 \*\*\*\*\* Rock wool

شکل ۱۰ نمایش طرحواره سازوکارهایی را نشان می‌دهد که با آن‌ها گرما می‌تواند در یک ماده متخلخل منتقل شود که شامل رسانایی، همرفت و تابش هستند. رسانندگی، انتقال گرما از راه رسانش الکترونیکی همراه با رسانش فنونی ماتریس جامد و با رسانایی فاز گاز که به دلیل حضور مولکول‌های گاز در منافذ رخ می‌دهد، به دست آمد.

اعتقاد بر این است که هواژل‌ها به دلیل چگالی کم و بازده عایق گرمایی بالا بیشترین پتانسیل را برای جایگزینی عایق‌های چندلایه در فضاپیماها دارند. هنوز پژوهش‌های بیشتری برای توسعه سامانه‌های عایق برپایه هواژل مورد نیاز است که بتواند از ویژگی عایق برتر استفاده و همچنین، امکان استفاده گسترده از آن‌ها را فراهم کند. یکی از کاربردهای هواژل‌های عایق، به‌کارگیری آن در پنجره‌های عایق است [۸۶].

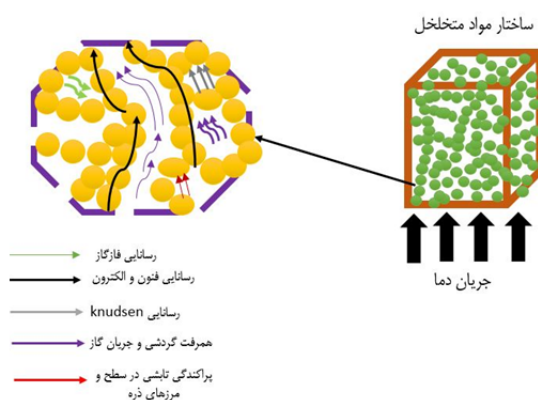
#### هواژل به‌عنوان کاتالیست

مساحت سطح بالای هواژل منجر به کاربردهای زیادی مانند جذب شیمیایی برای تمیزکردن لکه‌ها را به دنبال دارد. برای مثال، هواژل‌های کربنی به‌عنوان کاتالیست برای واپایش انتشار هیدروژن سولفید ( $H_2S$ ) از پالایشگاه‌های نفت خام، گاز طبیعی و جریان‌های صنعتی استفاده شده‌اند. هواژل‌های کربنی با اندازه منافذ بزرگ انتقال آسان‌تر واکنش‌دهنده‌ها و فراورده‌ها را امکان‌پذیر می‌سازد، با این حال حجم مزومتخلخل بالا، ذخیره‌سازی برای عنصر گوگرد را فراهم می‌کند [۸۷ و ۸۸].

#### هواژل به‌عنوان دستگاه‌های ذخیره انرژی

با توجه به اینکه انرژی بیشتری از منابع متناوب به دست می‌آید و شبکه برق به سرعت در حال تغییر برای مدیریت نوسان‌های بزرگ در تقاضا و عرضه انرژی است، ذخیره انرژی اهمیت فزاینده‌ای پیدا می‌کند. خازن‌ها وسایلی هستند که برای ذخیره انرژی استفاده می‌شوند.

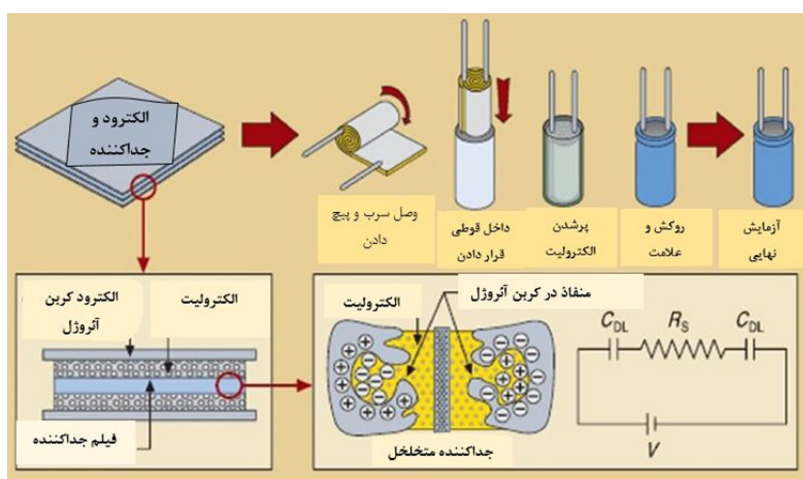
عملکرد عایق گرمایی این مواد نانوساختار سبک وزن بسیار متخلخل به شدت به ساختار متخلخل آن‌ها بستگی دارد که به نوبه خود با شرایط سنتز، نوع و مقدار اجزای مورد استفاده در فرایند و به‌ویژه روش خشک کردن تعیین می‌شود. درک انتقال گرما در محیط متخلخل برای توسعه مواد عایق گرمایی بسیار مهم است.



شکل ۱۰ سازوکار انتقال گرما در یک ماده متخلخل (باز طراحی شده از مرجع [۸۵])

جلوگیری و بنابراین، یک عایق الکترونیکی ایجاد می‌کند. تخلخل زیاد الکترودها مساحت سطح بالایی را برای تشکیل یک لایه دوگانه فراهم می‌کند. سرب امکان شارژ و تخلیه انرژی ذخیره شده را در خازن فراهم می‌کند. هواژل‌ها با سطح ویژه بالا، تخلخل بالا و ساختار بسیار مزومتخلخل، ویژگی ابرخازنی بی‌مانندی به مقدار ۶۲۳ فاراد بر گرم ایجاد می‌کند [۸۹].

هواژل‌های کربنی به دلیل سطح ویژه بالا، چگالی کم و رسانندگی الکتریکی بالا به‌عنوان مواد الکترودها بالقوه جذاب هستند. افزون بر این، آن‌ها را می‌توان به‌طور مستقیم بدون مواد چسبیده اضافی به دلیل شبکه پیوند شیمیایی پیوسته آن‌ها استفاده کرد. تهیه ابرخازن‌های مبتنی بر هواژل‌های کربنی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. خازن بارگیری شده با الکترولیت حاوی دو ماده الکترودها با مساحت سطح بالا و یک جداکننده نازک متخلخل است که از تماس آن‌ها



شکل ۱۱ طرحواره یک ابرخازن مبتنی بر هواژل [۸۵]

گزینه‌پذیری کم و سینتیک کندی دارند. هواژل‌ها با سطوح آب‌گریز امکان بهبود جذب آلاینده‌ها را فراهم می‌کنند و هواژل‌های سیلیکا آب‌گریز ظرفیت بالایی برای جذب ترکیب‌های آلی غیرمحلول دارند درحالی‌که به‌نظر می‌رسد هواژل‌های سیلیکا آب‌دوست برای جذب ترکیب‌های آلی محلول در آب کارآمدتر هستند.

جداسازی اجزا در فاز گاز با سه سازوکار اصلی صافش در صورت جداسازی ذره‌ها، جذب گاز و تخریب ترکیب‌ها با به‌کارگیری واکنش‌های شیمیایی، امکان‌پذیر است. هواژل‌های سیلیکا مواد جاذب مناسبی برای این منظور هستند، زیرا ذره‌ها آلاینده موجود در جریان گاز هنگام عبور

#### هواژل‌ها به‌عنوان جاذب

هواژل‌ها به دلیل مساحت سطح زیاد، تخلخل بالا و ساختار قابل واپایش، ظرفیت جذب بالایی برای انواع مواد دارند. هواژل‌ها به‌عنوان جاذب برای پاک‌سازی نشت نفت، حذف یون‌های فلزهای سنگین، فنل و رنگ‌ها از محلول آبی، جذب کربن دی‌اکسید و جذب هیدروژن کاربرد دارند [۹۰ و ۹۱].

روش‌های زیادی برای جداسازی روغن و سایر ترکیب آلی‌های سمی از آب وجود دارد که روش‌های اصلی شامل جذب مستقیم از راه صافش با جذب آلودگی‌های شیمیایی و زیستی است [۹۲]. جاذب‌های صنعتی فعلی حذف و

ترکیب مؤثر داروها را ایجاد می‌کنند [۹۵]. ترکیب داروها در هواژل‌ها می‌تواند در طی فرایند سل-ژل در طی تبادل حلال‌های ژل‌ها یا با آغشته‌سازی در طول خشک‌کردن ابربحرانی کربن دی‌اکسید انجام شود. کیفیت بارگذاری به‌طور طبیعی به میل جذبی به سطح ژل، پایداری دارو در حلال‌های آلی یا کربن دی‌اکسید مورد استفاده به‌عنوان محیط، بستگی دارد.

مرتبط‌ترین کاربرد هواژل‌ها در مهندسی بافت به‌طور عمده بر توسعه مواد متخلخل قابل کاشت برای ترمیم بافت استخوان متمرکز است که ساختار پر از منافذ هواژل، ساختار متخلخل طبیعی در بافت استخوان اسفنجی را تقلید می‌کند. تخلخل موجود در هواژل‌ها می‌تواند پیوند سلولی را تقویت و پیوند متقابل منافذ می‌تواند تأمین مواد مغذی و اکسیژن را برای سلول‌ها فراهم کند و درعین حال فرآورده‌های جانبی دگرگشتی سلول‌ها را از بین ببرد [۹۶].

ویژگی مکانیکی هواژل‌ها به‌طور معمول برای تحمل تنش‌های مکانیکی مورد نیاز برای کاشتینه‌های استخوانی بزرگ کافی نیست. باین‌حال، تلاش‌های زیادی برای توسعه ویژگی مکانیکی هواژل‌ها انجام شده است. هواژل‌های تقویت‌شده به‌طور معمول مخلوطی از بسپارهای زیستی یا پرکننده‌های معدنی هستند که نه تنها استحکام بلکه شکل‌پذیری و درعین حال چگالی آن را افزایش می‌دهند. تقویت هواژل‌ها را می‌توان با خیساندن ژل مرطوب در محلول یا پراکندگی حاوی عامل تقویت‌کننده انجام داد. عامل تقویت‌کننده، بیشتر یک بسپار زیستی، بر ژل رسوب می‌کند و به دنبال آن می‌تواند خشک شود [۹۷].

#### هواژل برای حسگرها

مواد چندسازه‌ای مبتنی بر هواژل استحکام مکانیکی قوی، انعطاف‌پذیری عالی، تخلخل بالا، وزن پایین و دوام عالی دارند. این ویژگی‌ها علائق پژوهشگر را به خود جلب

از هواژل به دلیل منافذ کوچک هواژل به‌وسیله آن جذب می‌شوند. روش جذب برای جداسازی مولکولی در فازهای گازی به‌کارگرفته می‌شود و به‌وسیله هواژل‌ها با اصلاح سطح با گروه‌های عاملی مناسب به‌دست می‌آیند. ترکیب‌ها می‌توانند بر سطح جذب شوند و یا در منافذ هواژل به دام بیفتند و با گروه‌های عاملی بر سطح، واکنش شیمیایی بدهند [۹۳].

#### هواژل‌ها در زیست‌پزشکی

در سال‌های اخیر هواژل‌ها در زمینه زیست‌پزشکی به‌عنوان مواد زیستی اهمیت پیدا کرده‌اند. آن‌ها می‌توانند برای تجویز واپایش‌شده و موضعی داروها یا پروتئین‌ها، مهندسی بافت، پیوند استخوان و سنجش زیستی به‌کارگرفته شوند. همه مواد زیستی پیش از استفاده در یک اندام ویژه باید به‌منظور تشخیص پاسخ‌های زیستی نامطلوب مانند آلرژی، پاسخ التهابی و انعقاد که به دنبال آن می‌توانند موجب ایجاد آسیب به سلول شوند، آزمایش شوند. برخی از ترکیب‌های هواژل از راه یک سری از تجزیه‌های ویژه، زیست‌سازگاری زیادی را نشان داده‌اند. با این حال سامانه‌های توسعه یافته‌تر هنوز باید در روش‌ها و فن‌های پزشکی پیاده‌سازی شوند. حجم زیادی از پژوهش‌ها و مطالعه‌های انجام‌شده برای بهبود فرایند و فرمولاسیون آن‌ها می‌تواند هواژل‌ها را به مواد نسل بعدی برای کاربردهای تخصصی زیست‌پزشکی، تبدیل کند [۹۴].

هواژل‌ها به‌عنوان سامانه‌های انتقال دارو برپایه رهایش واپایش‌شده داروها یا مواد است. برای این منظور، ترکیب هواژل باید بتواند دارو را بدون تغییرهای عمده در طول نگهداری آن در داخل هواژل نگه دارد و سپس بتواند دارو را به‌صورت واپایش‌شده آزاد کند. تجویز واپایش‌شده این نوع دارو را می‌توان با هواژل‌ها بهبود بخشید، زیرا سطح ویژه بزرگ، تخلخل طراحی‌شده و طیف گسترده‌ای از گروه‌های عملکردی سطحی که می‌توانند در هواژل گنجانده شوند،

می‌کند و الزامات ساخت انواع متفاوت حسگرها مانند حسگرهای گاز، حسگرهای الکتروشیمیایی، حسگرهای فشار و حسگرهای رطوبت را برآورده می‌کند. با پیشرفت علم و پژوهش، حسگرهای گاز در بسیاری از زمینه‌ها برای تشخیص گازهای انفجاری و سمی اهمیت قابل توجهی یافته‌اند.

انواع مقاومتی حسگرهای گاز به دلیل ساخت آسان، هزینه کم و کارکرد آسان، بیشتر به کار گرفته می‌شوند. در حسگرهای مقاومتی، عملیات سنسجش ربر سطح ماده حسگر فعال انجام می‌شود و رسانندگی در طول جذب مولکول‌های گاز بر سطح لایه حسگر فعال تغییر می‌کند. حسگرهای مبتنی بر هواژل دو مزیت عمده دارند. برای مثال، نخستین مزیت سطح ویژه بالا و نسبت سطح به حجم که سطوح کافی برای جذب مولکول‌های گاز را فراهم می‌کند. دومین مزیت یک شبکه ساختاری متخلخل سه بعدی به هم پیوسته که یک کانال انتقال پایدار و سریع برای انتشار مولکول‌های گاز فراهم می‌کند. بنابراین، حسگرهای برپایه هواژل نرخ بازیابی سریع، حد شناسایی پایین، حساسیت بالا و نرخ پاسخ سریع را نشان می‌دهند [۹۸].

#### هواژل‌ها به عنوان جاذب صدا

روش‌های متفاوتی برای واپایش اثر نامطلوب صدا یا جذب صدا با توجه به شرایط لازم برای به کارگیری نهایی وجود دارد. هنگامی که یک موج صوتی به یک ماده برخورد می‌کند تا حد زیادی منعکس، منتقل و جذب می‌شود. مواد جاذب صدا به طور معمول مواد متخلخل با چگالی کم، با مقاومت جریان هوای متوسطی هستند که می‌توانند بیشتر انرژی صوتی را جذب کنند و با اجازه دادن به صدا برای نفوذ در حفره‌ها یا کانال‌های باز، از بازتاب صدا جلوگیری کنند. جاذب‌های صوتی معمولی مانند پشم سنگ و فوم‌های سلول باز به طور سنتی برای جذب صدا و عایق در ساختمان‌ها استفاده می‌شوند، ولی صنعت و جامعه به دنبال مواد جایگزین

و سازگار با محیط زیست با ویژگی جذب صدا و عایق هستند. هواژل‌ها فرصتی برای ترکیب عملکرد عایق گرمایی خوب با ویژگی صوتی مفید هستند. جذب صدا و عایق به دست آمده با هواژل‌ها به شدت به روش تهیه مواد، چگالی هواژل و ساختار منافذ بستگی دارد. تضعیف صدا در یک هواژل به کسری از اتلاف انرژی امواج صوتی بستگی دارد زیرا آن‌ها به طور متوالی از فاز گاز به فاز جامد ساطع می‌شوند، این امر دامنه و سرعت امواج صوتی را کاهش می‌دهد و موجب کاهش سرعت و پراکندگی آن می‌شود. بنابراین، می‌توان هواژل‌ها را به مواد خوبی برای عایق صوتی تبدیل کند [۹۹].

#### چالش‌ها و روندهای آینده

مطالعه‌ها در دهه‌های اخیر با موفقیت به بررسی ویژگی ساختاری و عملکردی هواژل‌ها پرداخته است. دلیل اصلی اینکه چرا هواژل‌ها هنوز از نظر تجاری قابل دوام نیستند، ویژگی مکانیکی آن‌ها است. ماهیت شکننده هواژل‌ها آن‌ها را محدود می‌کند. افزون بر این ماهیت نم‌گیر هواژل هم استفاده از آن را به محیط خشک محدود می‌کند. از جنبه اقتصادی، خشک کردن ابربحرانی گران‌ترین روش برای جایگزینی حلال داخل هواژل است.

تولید اقتصادی و عمده هواژل‌های باکیفیت هنوز یک مسئله است که باید حل شود. تلاش‌هایی برای ساده‌سازی سازوکار سنتز به منظور افزایش مقیاس و کاهش هزینه انجام شده است. بنابراین، از روش‌های خشک کردن انجمادی، خشک کردن ابربحرانی اصلاح شده و خشک کردن محیطی استفاده شده است. باین حال، در طول شرایط خشک کردن، حفظ کامل ریزساختار ژل آسان نیست. بنابراین، آسیب بیشتر رخ می‌دهد.

روش‌های اصلاح سطح به کاررفته برای خشک کردن در فشار محیط به طور اجتناب‌ناپذیری بر عملکرد هواژل‌ها تأثیر منفی می‌گذارد. ویژگی کلی هواژل‌ها در طول اصلاح سطح مختل می‌شود. بنابراین، هواژل‌هایی که هیچ‌گونه تغییر

ترکیب‌ها بیش از پیش در حال گسترش هستند. از این رو، گنجاندن همه آن‌ها در این مقاله امکان‌پذیر نبود. با این حال می‌توان گفت که هواژل‌ها نقش اقتصادی و فناوری مهمی در کاربردهای اخیر مانند عایق‌کاری ساختمان‌ها و سامانه‌های گرمایش و سرمایش داشته‌اند. فرآورده‌های تجاری به‌دست‌آمده با فناوری‌های مبتنی بر هواژل‌ها با هدف استفاده معقول از منابع انرژی و در نتیجه به کمینه‌رساندن تأثیرهای محیطی ناشی از انسان در طول تولید برق و بهره‌برداری از منابعی مانند آب آشامیدنی برای مصرف است. جذب، خنثی‌سازی و حذف ترکیب‌های به‌دست آمده از فرایندهای صنعتی با سامانه‌های جذب امکان‌پذیر و بسیار انتخابی است.

برپایه کاربردهای هواژل‌ها مبتنی بر توسعه سایر فناوری‌ها، می‌توان به سامانه‌های تشخیص با استفاده از هواژل‌ها اشاره کرد که با به‌کارگیری آن‌ها می‌توان گازها یا ترکیب‌های آلی را با گزینش‌پذیری بالا به راحتی تشخیص داد. سایر زمینه‌های کاربردی مهم هواژل‌ها در زمینه زیست‌پزشکی به‌عنوان داربست‌های زیست‌سازگار و تجزیه‌پذیر برپایه سلول بسیار متخلخل در بازسازی بافت، زمینه دارویی، انتقال دارو و حسگرهای عملیاتی با توان عملیاتی بالا هستند. به‌کارگیری هواژل‌ها برای تولید بافت‌های مصنوعی که در آن بافت‌های طبیعی می‌توانند بازسازی شوند، موضوعی جذاب در زمینه نانوپزشکی و مهندسی بافت است. در اروپا تولید فناوری‌های مبتنی بر هواژل‌ها برپایه سامانه‌های عایق گرمایی به‌طور عمده به شکل پودر یا دانه‌ای است که بر میله‌های ایافی برای تشکیل صفحه‌ها نصب می‌شوند.

ساختار ندارند، ویژگی‌های برتر دارند و تولید هواژل‌های ارزان‌قیمت در مقیاس بزرگ با کیفیت برتر حیاتی است و باید محقق شود.

در سال‌های اخیر مواد خام ارزان، غیرسمی با دسترس‌پذیری راحت، علاقه زیادی را از نظر کاهش هزینه‌های پیش‌سازهای گران‌قیمت برای تولید هواژل به خود جلب کرده‌اند. برای مثال، بسیاری از پسماندهای صنعتی حاوی مواد با ارزشی مانند سیلیکا، آلومینیم، آهن و ... هستند که به مقدار انبوهی در کارخانه‌ها جمع‌آوری شده است.

### نتیجه‌گیری

هواژل‌ها گروه جذابی از مواد متخلخل جامد هستند که با فرایند سل-ژل و همراه با روش خشک‌کردن به‌طور عمده از طریق فشار و دمای ابربحرانی به‌دست می‌آیند. کاربردهای فنی هواژل‌ها برپایه بهره‌برداری از مشخص‌ترین ویژگی‌های فیزیکی و ساختاری است که می‌تواند مرتب با مسیرهای مصنوعی تنظیم شود. مساحت سطح ویژه بزرگ، تخلخل زیاد (۹۰ درصد هوا و فقط ۱۰ درصد جامد) و چگالی بسیار پایین با تنها چند میلی‌گرم بر سانتی‌متر و به دنبال آن یک ریزساختار به شکل منافذ و کانال‌های به‌هم‌پیوسته این مواد را برای بیشتر برنامه‌های کاربردی با کارایی بالا، بسیار جذاب ساخته است.

ترکیب نهایی هواژل‌ها و همچنین، ریزساختارها به‌شدت به نوع پیش‌ساز مورد استفاده برای تولید آن‌ها، فرایندهای شیمیایی در تشکیل ژل، اصلاح شیمیایی سطح و خشک‌کردن بستگی دارد. انواع متفاوتی از ترکیب‌ها یا مواد وجود دارد که می‌توانند به هواژل تبدیل شوند. امروزه این

### مراجع

[1] Fricke, J.; Journal of Non-Crystalline Solids 100, 169-173, 1988.

[2] Fricke, J.; Emmerling, A.; Journal of Sol-Gel Science and Technology 13, 299-303, 1998.

- [3] Namvar, M.; Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; Mohammadzadeh, K.; Journal of Non-Crystalline Solids 586, 121561, 2022.
- [4] Pierre, A.C.; Pajonk, G.M.; Chemical Reviews 102, 4243-4266, 2002.
- [5] Gesser, H.D.; Goswami P.C.; Chemical Reviews 89,765-788, 1989.
- [6] Wu, X.; Zhou, J.; Xing, W.; Wang, G.; Cui, H.; Zhuo, S.; Xue, Q.; Yan, Z.; Qiao, S. Z.; Journal of Materials Chemistry 43, 23186-23193, 2012.
- [7] Lin, Y.; Ehlert, G.J.; Bukowsky, C.; Sodano, H.A.; ACS Applied Materials & Interfaces 7, 2200-2203, 2011.
- [8] Leventis, N.; Sadekar, A.; Chandrasekaran, N.; Sotiriou-Leventis, C.; Chemistry of Materials 22, 2790-2803, 2010.
- [9] Namvar, M.; Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; Ceramics International 47, 2222-2229, 2021.
- [10] Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; "Production of High Purity  $\alpha$ - and  $\gamma$ -Alumina from Aluminum Dross", Elsevier, Netherlands, 2020.
- [11] Allahverdi, A.; Mahinroosta, M.; "Recycling Aluminosilicate Industrial Wastes Into Geopolymer: A Review", Elsevier, Netherlands, 2020.
- [12] Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; Dong, P.; Bassim, N.; Journal of Alloys and Compounds 792, 161-169, 2019.
- [13] Maghsoodloord, H.; Allahverdi, A.; Journal of Materials in Civil Engineering 29, 04017006, 2017.
- [14] McNaught, A.D.; Wilkinson, A.; "Compendium of Chemical Terminology", Blackwell Science Oxford, United Kingdom, 1997.
- [15] Aegerter, M.A.; Leventis, N.; Koebel, M.M.; Aerogels Handbook, Springer Science & Business Media, New York, 2011.
- [16] Lin, Y.L.; Y, X.W.; Yu, Z.W.; Polymer 10, 623, 2018.
- [17] Tang, S.; Zhang, X.; Fan, J.; Li, B.; Li, Z.; Wang, C.; Li, H.; Zhang, P.; Zhou.; J. Applied Materials Today 26, 101399, 2022.
- [18] Tafreshi, O.A.; Mosanenzadeh, S.G.; Karamikamkar, S.; Saadatnia, Z.; Park, C.B.; Naguib, H.E.; Materials Today Chemistry 23, 100736. 2022.
- [19] Dong, K.; Xu, K.; Wei, N.; Fang, Y.; Qin, Z.; Chemical Engineering Research and Design 179, 227-236. 2022.
- [20] Karamikamkar, S.; Naguib, H.E.; Park, C.B.; Advances in Colloid and Interface Science 276, 102101, 2020.
- [21] Kistler, S.; Rubber Chemistry and Technology 5, 600-603, 1932.
- [22] Alemán, J.V.; Chadwick, A.V.; He, J.; Hess, M.; Horie, K.; Jones, R.G.; Kratochvíl, P.; Meisel, I.; Mita, I.; Moad, G.; Penczek, S.; Stepto, R.F.T.; Pure and Applied Chemistry 79, 1801-1829, 2007.
- [23] Teichner, S.; "Aerogels of inorganic oxides" in: "Aerogels", Springer, Berlin, Heidelberg 22-30, 1986.
- [24] Brinker, C.; Ward, K.; Keefer, K.; Holupka, E.; Bray, P.; Pearson, R.; "Synthesis and structure of borate based aerogels" in: "Aerogels", Springer, Berlin, Heidelberg 57-67, 1986.
- [25] Broecker, F.; Heckmann, W.; Fischer, F.; Mielke, M.; Schroeder, J.; Stange, A.; "Structural analysis of granular silica aerogels" in: "Aerogels", Springer, Berlin, Heidelberg 160-166. 1986.
- [26] Gash, A.E.; Tillotson, T.M.; Satcher Jr, J.H.; Hrubesh, L.W.; Simpson, R.L. Journal of Non-Crystalline Solids 285, 22-28, 2001.
- [27] Peri, J.B.; The Journal of Physical Chemistry 70, 2937-2945, 1966.
- [28] Teichner, S.J.; Aerogels of Inorganic Oxides, in: J. Fricke (Ed.) "Aerogels", Springer, Berlin Heidelberg, 22-30, 1986.
- [29] Woignier, T.; Phalippou, J.; Quinson, J.; Pauthe, M.; Laveissiere, F.; Journal of Non-Crystalline Solids 145, 25-32, 1992.
- [30] Brinker, C.; Keefer, K.; Schaefer, D.; Ashley, C.; Journal of Non-Crystalline Solids 48, 47-64, 1982.
- [31] Tillotson, T.M.; Hrubesh, L.W.; Journal of Non-Crystalline Solids 145, 44-50, 1992.

- [32] Lemay, J.; Tillotson, T.; Hrubesh, L.; Pekala, R.; MRS Online Proceedings Library 180, 321-324, 1990.
- [33] Tsou, P.; Journal of Non-crystalline Solids 186, 415-427, 1995.
- [34] Mena, B.; Mena, F.; Guimaraes, C.; Sharts, O.; International Journal of Nanotechnology 7, 1-45, 2010.
- [35] Mohammadzadeh, K.; Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; Dong, P.; Bassim, N.; Ceramics International 48, 13154-13162, 2022.
- [36] Du, A.; Zhou, B.; Zhang, Z.; Shen, J.; Materials (Basel) 6, 941-968, 2013.
- [37] Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; International Conference/Workshop of Inter-islamic Network on Nanotechnology, Materials and Energy Research Center, Karaj, Iran, Feb. 2018.
- [38] Mahinroosta, M.M.; Jomeh Farsangi, Z.; Allahverdi, A.; Shakoobi, Z.; Materials Today Chemistry 8, 42-55, 2018.
- [39] Hench, L.L.; West, J.K.; Chemical Reviews 90, 33-72, 1990.
- [40] Jafari, V.; Allahverdi, A. Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials 47, 105-112, 2014.
- [41] Livage, J.; Henry, M.; Sanchez, C. Progress in Solid State Chemistry 18, 259-341, 1988.
- [42] Tamon H.; Kitamura, T.; Okazaki, M.; Journal of Colloid and Interface Science 197, 353-359, 1998.
- [43] Wu, X.; Zhong, K.; Ding, J.; Shen, X.; Cui, S.; Zhong, Y.; Ma, J.; Chen, X.; Journal of Non-Crystalline Solids 530, 119826, 2020.
- [44] Sert Çok, S.; Gizli, N.; International Journal of Heat and Mass Transfer 188, 122618, 2022.
- [45] Poco, J. F.; Satcher Jr, J.H.; Hrubesh, L.W.; Journal of Non-Crystalline Solids 285, 57-63, 2001.
- [46] Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; Journal of Cleaner Production 179, 93-102, 2018.
- [47] Mo, L.; Shen, Y.; Tan, Y.; Zhang, S.; International Journal of Biological Macromolecules 193, 1488-1498, 2021.
- [48] Lermontov, S.A.; Malkova, A.N.; Sipyagina, N.A.; Baranchikov, A.E.; Kopitsa, G.P.; Bepalov, A.S.; Journal of Fluorine Chemistry 109742, 2021.
- [49] Sun, M.; Bu, Y.; Feng, J.; Li, C.; Han, S.; Ji, X.; Fan, J.; Microchemical Journal 159, 105573, 2020.
- [50] Mekonnen, B.T.; Ding, W.; Liu, H.; Guo, S.; Pang, X.; Ding, Z.; Seid, M.; Journal of Leather Science and Engineering 3, 1-16, 2021.
- [51] Zha, J.; Roggendorf, H.; Advanced Materials 3, 522-522, 1991.
- [52] Tarameshloo, A.; Kani, E.N.; Allahverdi, A.; Canadian Journal of Civil Engineering 44, 893-898, 2017.
- [53] Najafi Kani, E.; Allahverdi, A.; Iranian Journal of Materials Science & Engineering 8, 50-60, 2011.
- [54] Bhaduri, S.; Materials and Manufacturing Processes 8, 391-392, 1993.
- [55] Maleki, H.; Durães, L.; A. García-González C.; del Gaudio, P.; Portugal, A.; Mahmoudi, M.; Advances in Colloid and Interface Science 236, 1-27, 2016.
- [56] García-González, C.A.; Camino-Rey, M.C.; Alnaief, M.; Zetzl, C.; Smirnova, I.; The Journal of Supercritical Fluids 66, 297-306, 2012.
- [57] Matson, D.W.; Smith, R.D.; Journal of the American Ceramic Society 72, 871-881, 1989.
- [58] Pajonk, G.M. "A Short History of the Preparation of Aerogels and Carbogels", Sol-Gel Processing and Applications", Springer, Boston, 1994.
- [59] Bisson, A.; Rigacci, A.; Lecomte, D.; Rodier, E.; Achard, P.; Drying Technology 21, 593-628, 2003.
- [60] Dorcheh, A.S.; Abbasi, M.; Journal of Materials Processing Technology 199, 10-26, 2008.
- [61] Salem, S.; Jazayeri, S.; Bondioli, F.; Allahverdi, A.; Shirvani, M.; Journal of Color Science and Technology 5, 345-352, 2012.



- [62] Vafaei, M.; Allahverdi, A.; *Advanced Powder Technology* 28, 215-222, 2017.
- [63] Schwertfeger, F.; Glaubitt, W.; Schubert, U.S.; *Journal of Non-Crystalline Solids* 145, 85-89, 1992.
- [64] Zhanga, T.; Yuana, H.; Wang, S.; Guoa, X.; logoa, R.H.; Li, Yi.; Yang, G.; *RSC Adv.* 7, 32861-32865, 2017.
- [65] Hüsing, N.; Schwertfeger, F.; Tappert, W.; Schubert, U.; *Journal of Non-Crystalline Solids* 186, 37-43, 1995.
- [66] Salem, S.; Jazayeri, S.H.; Bondioli, F.; Allahverdi, A.; Shirvani, M.; Ferrari, A.M.; *International Journal of Applied Ceramic Technology* 9, 968-978, 2012.
- [67] Allahverdi, A.; Pourzade, F.; *Iranian Chemical Engineering Journal* 11, 48-54, 2012.
- [68] Salem, S.; Jazayeri, S.H.; Bondioli, F.; Allahverdi, A.; Shirvani, M.; *Thermochimica Acta* 521, 191-196, 2011.
- [69] Yong, X.G.; Jeremy, B.G.; *Journal of Composites Science* 4(73), 1-40, 2020.
- [70] Woignier, T.; Phalippou, J.; *Journal of Non-Crystalline Solids* 93, 17-21, 1987.
- [71] Yang, W.; Liu, J.; Wang, Y.; Gao, S.; *Energy and Buildings* 206, 109583, 2020.
- [72] Allahverdi, A.; Mahinroosta, M.; Pilehvar, S.; "The First Conference on New Approaches to Energy Conservation, University of Tehran, Tehran, March 2012.
- [73] Bakhtiyari, S.; Allahverdi, A.; Ramezaniipoor, A.A.; Parhizkar, T.; Rais-Ghasemi, M.; *Iranian Chemical Engineering Journal* 10, 62-80, 2011.
- [74] Wu, S.; Ning, D.; Xu, D.; Cheng, Y.; Mondal, A.K.; Zou, Q.; Zhu, H.; Huang, F.; *Carbohydrate Research* 511, 108488, 2022.
- [75] Kramer, S.J.; Rubio-Alonso, F.; Mackenzie, J.D.; *MRS Proceedings* 435, 295, 1996.
- [76] Marszewski, M.; Dashti, A.; McNeil, P.E.; Fox, M.; Wall, V.; Butts, D.M.; King, S.C.; Kashanchi, G.N.; Tolbert, S.H.; Dunn, B.; Pilon, L.; *Microporous and Mesoporous Materials* 330, 111569, 2022.
- [77] Bakhtiyari, S.; Allahverdi, A.; Rais-Ghasemi, M.; Ramezaniipoor, A.A.; Parhizkar, T.; Zarrabi, B.A.; *International Journal of Civil Engineering* 9, 215-222, 2011.
- [78] Hüsing, N.; Schubert, U.; *Angewandte Chemie International Edition* 37, 22-45, 1998.
- [79] Kim, C.; Kim, K.; *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230, 111224, 2021.
- [80] Rao, A.; Nilsen, E.; Einarsrud, M.-A.; *Journal of Non-Crystalline Solids* 296, 165-171, 2001.
- [81] Tajiri, K.; Igarashi, K.; *Solar Energy Materials and Solar Cells* 54, 189-195, 1998.
- [82] Y. Kumar, D. Saxena, 8th International Conference on Advancements in Engineering and Technology, Sangrur, India, March 2020.
- [83] Lu, Y.; Liu, Z.; Li, X.; Jiang Yin, X.; Djati Utomo, H.; *Energy and Buildings* 259, 111866, 2022.
- [84] Mahinroosta, M. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 3(47), 1-6, 2013.
- [85] Ülker, Z.; Sanli, D.; Erkey, C.; Elsevier. 157-180, 2014.
- [86] Umberto, B.; *Energy Procedia* 78, 394-399, 2015.
- [87] Smirnova, A.; Dong, X.; Hara, H.; Vasiliev, A.; Sammesa, N.; *International Journal of Hydrogen Energy* 30, 149-158, 2005.
- [88] Allahverdi, A.; Mahdavan, M.; *Ceramics – Silikaty* 57, 305-312, 2013.
- [89] Wei, T.-Y.; Chen, C.-H.; Chang, K.-H.; Lu, S.-Y.; Hu, C.-C.; *Chemistry of Materials* 21, 3228-3233, 2009.
- [90] Štandeker, S.; Novak, Z.; Knez, Ž.; *Journal of Colloid and Interface Science* 310, 362-368, 2007.
- [91] Mahinroosta, M.; Allahverdi, A.; *Environmental Technology & Innovation* 23, 101549, 2021.
- [92] Ganji, N.; Allahverdi, A.; Naeimpoor, F.; Mahinroosta, M.; *Research on Chemical Intermediates* 42, 5395-5412, 2016.

- [93] Hartmann, M.; Kullmann, S.; Keller, H. *Journal of Materials Chemistry* 20, 9002-9017, 2010.
- [94] Ferreira-Gonçalves, T.; Constantin, C.; Neagu, M.; Reis, C.P.; Sabri, F.; Simón-Vázquez, R. *Biomedicine & Pharmacotherapy* 144, 112356, 2021.
- [95] Singh, N.; Vinjamur, M.; Mukhopadhyay, M.; *The Journal of Supercritical Fluids* 181, 105510, 2022.
- [96] Iglesias-Mejuto, A.; García-González, C.A.; *Materials Science and Engineering: C* 131, 112525, 2021.
- [97] Pircher, N.; Veigel, S.; Aigner, N.; Nedelec, J.M.; Rosenau, T.; Liebner, F. *Carbohydrate Polymers* 111, 505-513, 2014.
- [98] Qin, Z.; Lv, Y.; Fang, X.; Zhao, B.; Niu, F.; Min, L.; Pan, K.; *Chemical Engineering Journal* 427, 131650, 2022.
- [99] Pu, H.; Ding, X.; Chen, H.; Dai, R.; Shan, Z. *Environmental Technology & Innovation* 24, 101874, 2021.

## **Aerogels, three-dimensional nanostructures: Synthesis methods, characterization and applications**

**M. Namvar<sup>1</sup>, M. Mahinroosta<sup>2</sup>, A. Allahverdi<sup>3,\*</sup>**

1. M.Sc. Student of Chemical Engineering, Research Laboratory of Inorganic Chemical Process Technologies, faculty of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2. Ph.D. of Chemical Engineering, Research Laboratory of Inorganic Chemical Process Technologies, faculty of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
3. Professor of Chemical Engineering, Research Laboratory of Inorganic Chemical Process Technologies, Faculty of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

**Abstract:** In recent years, aerogels attracted more attention due to their outstanding properties and potential applications in a wide variety of technological fields. Aerogels are three-dimensional porous networks or materials with a porous structure obtained from wet gels, where the solvents are replaced by air. A critical step in aerogel formation is the drying of the hydrogel. Many methods have been used to dry aerogel, the most common, safest, and cheapest method among the methods is ambient pressure drying. Due to the high-cost synthesis of monolithic aerogels, in recent years, researchers focused on the preparation of porous aerogels with modern drying methods on a large scale. In this article, aerogel, its types, history, characteristics, classification, preparation methods, properties, and applications of this interesting material are introduced. Aerogels are used in new technical applications as efficient thermal insulation, catalyst, energy storage material, water treatment adsorbent, and sound absorbent. Aerogels are also used in biomedicine and sensors. A discussion on the challenges, limitations, and urgent need to develop new technologies for aerogel production is presented.

**Keywords:** Aerogels, Synthesis, Drying, Characterization, Applications