

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

پروردگارا.  
مرا آن ده که مرا آن به و از جانب خود برای من راهنمایی  
یاری دهنده قرار ده.  
پروردگارا.  
بر اراده، دانش، بی نیازی، حیرت، لطافت روح و شهامت  
ام بیفزای.  
پروردگارا.  
مرا مشمول رحمت خویش قرار ده و کارم را به سامان  
رسان.  
پروردگارا.  
به من قلبی فرمانبردار، گوش شنوا، ذهنی هوشیار و  
دستانی ساعی عنایت فرما تا بتوا نم تسلیم رضایت گردم و  
آنچه را که به کمال برایم خواسته ای به دیده منت  
بپذیرم.  
پروردگارا.  
به من زیستنی عطا کن که بر بیهودگی اش سوگوار نباشم،  
بگذار تا آن را من خود انتخاب کنم اما آنچنان که تو  
دوست داری.

### تقدیم به پدر و مادر عزیزم

که با صبر و پشتیبانی همیشگی خود و با چشم‌هایی پر از برق شوق در تمام دوران زندگی موفقیت را در من زنده نگه داشتند و تقدیم به برادر عزیزم که زیبایی حضورش در کنارم خستگی‌های این راه را به امید و روشنی تبدیل کرد.  
امیدوارم که قادر به درک زیبایی‌های وجودشان باشم.

سپاسگذاری

از زحمات بی دریغ، تلاشهای بی وقفه و راهنمایی های  
ارزشمند استاد گرامی جناب آقای دکتر وحید محمدی  
در راستای انجام این پایان نامه تشکر و قدردانی می  
نمایم.

از استاد گرامی سرکار خانم دکتر آزاده تجردی به دلیل  
یاری ها و راهنمایی های بی چشمداشت ایشان که  
بسیاری از سختی ها را برایم آسان تر نمودند،  
سپاسگذارم.

همچنین از زحمات استاد محترم جناب آقای دکتر  
مسعود رجبی که با راهنمایی های خود راهگشای  
اینجانب بوده اند کمال تشکر و سپاسگذاری را دارم.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
<b>فصل اول: مقدمه</b>	
۱	۱-۱) تاریخچه
۲	۲-۱) سیلیسیم دی اکسید
۳	۳-۱) سبوس برنج
۴	۴-۱) خاکستر سبوس برنج
۶	۵-۱) نانومواد
۷	۶-۱) فرایند سل-ژل
۸	۱-۶-۱) تشکیل سطوح نانوساختار با استفاده از فرایند سل-ژل
۹	۱-۶-۲) به دام افتادن از طریق سل-ژل ها
۱۰	۳-۶-۱) فرایند سل-ژل مواد سیلیکاتی
۱۰	۴-۶-۱) واکنش های هیدرولیز و تراکم
۱۴	۵-۶-۱) اثر pH
۱۵	۶-۶-۱) تبدیل سل به ژل
۱۸	۷-۶-۱) پیر شدن
۱۹	۸-۶-۱) خشک شدن
۲۰	۹-۶-۱) تکامل ساختاری ژل
۲۰	۷-۱) سیلیکاژل
۲۲	۱-۷-۱) سیلیکاژرژل
۲۲	۸-۱) مواد متخلخل
<b>فصل دوم: کربن فعال</b>	
۲۸	۱-۲) تاریخچه
۲۹	۲-۲) پیش ماده های کربن فعال
۳۰	۳-۲) فعالسازی فیزیکی
۳۱	۴-۲) فعالسازی شیمیایی
۳۱	۱-۴-۲) فعالسازی شیمیایی با KOH
۳۱	۲-۴-۲) فعالسازی شیمیایی با H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
۳۴	۵-۲) انواع کربن های فعال
۳۴	۱-۵-۲) کربن فعال پودری ( PAC )
۳۵	۲-۵-۲) کربن فعال دانه ای ( GAC )
۳۵	۳-۵-۲) کربن فعال قالبی ( EAC )
۳۵	۴-۵-۲) کربن های فعال قرصی
۳۵	۵-۵-۲) کربن بارور شده
۳۷	۶-۵-۲) کربن پوشیده شده با پلیمر
۳۷	۶-۲) خصوصیات

۳۸	۱-۶-۲) عدد یدی
۳۸	۲-۶-۲) عدد مولالس
۳۸	۳-۶-۲) دانسیته ظاهری
۳۸	۴-۶-۲) عدد سختی
۳۸	۵-۶-۲) ظرفیت جذب
۳۸	۷-۲) درصد خاکستر
۳۹	۸-۲) جذب
۳۹	۹-۲) پارامترهای ظرفیت
۳۹	۱۰-۲) توزیع اندازه ذره
۳۹	۱۱-۲) بازیابی کربن فعال
۴۰	۱۲-۲) کربن فیلترینگ
۴۱	۱۳-۲) آنالیز TGA
۴۱	۱۴-۲) میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM
۴۳	۱۵-۲) روش های جذب گاز
۴۳	۱-۱۵-۲) جذب فیزیکی
۴۳	۲-۱۵-۲) پس ماند جذب
۴۴	۳-۱۵-۲) طبقه بندی ایزو ترم های جذبی
۴۵	۴-۱۵-۲) آنالیز BET
۴۸	۱۶-۲) هدف از انجام تحقیق

### فصل سوم: بخش تجربی

۴۹	۱-۳) دستگاه های مورد استفاده
۴۹	۱-۱-۳) طیف سنجی مادون قرمز FT-IR
۴۹	۲-۱-۳) کوره
۴۹	۳-۱-۳) تجزیه عنصری ( CHN )
۴۹	۴-۱-۳) دستگاه آنالیز حرارتی ( TGA )
۴۹	۵-۱-۳) پراش سنج پرتو X ( XRD )
۴۹	۶-۱-۳) میکروسکوپ الکترونی روبشی ( SEM )
۴۹	۷-۱-۳) پراکندگی انرژی اشعه ایکس ( EDX )
۴۹	۸-۱-۳) آنالیز مساحت سطح ویژه به روش BET
۴۹	۹-۱-۳) تکان دهنده ( Shaker )
۴۹	۱۰-۱-۳) ترازو
۴۹	۱۱-۱-۳) آون
۴۹	۱۲-۱-۳) آون خلا
۴۹	۱۳-۱-۳) هیتر
۵۰	۲-۳) مواد شیمیایی مورد استفاده
۵۰	۳-۳) آزمایش ها
۵۰	۱-۳-۳) تهیه خاکستر سبوس برنج با شیب سریع

۵۰	۲-۳-۳) تهیه سیلیکازروژل با شیب سریع در ۵ و ۴ = pH
۵۱	۳-۳-۳) تهیه سیلیکازروژل با شیب سریع در pH = ۷ (با هیدروکلریک یا اگزالیک اسید)
۵۱	۴-۳-۳) تهیه سیلیکازروژل با شیب سریع در pH = ۷ (با سولفوریک اسید)
۵۲	۵-۳-۳) تهیه خاکستر سیوس رنج با شیب ملایم
۵۲	۴-۳) تهیه کربن فعال
۵۳	۱-۴-۳) شستشو و خشک کردن
۵۳	۲-۴-۳) تعیین pH کربن فعال
۵۳	۳-۴-۳) تیتراسیون بوهم

### فصل چهارم: بحث و نتیجه گیری

۵۴	۱-۴) بررسی واکنش های تهیه سیلیکازروژل از سیوس برنج
۵۴	۲-۴) بررسی واکنش تهیه کربن فعال
۵۴	۳-۴) تجزیه عنصری CHN
۵۴	۴-۴) اندازه گیری دانسیته سیلیکازروژل ها
۵۵	۵-۴) مقایسه روش شیب ملایم و سریع
۵۵	۶-۴) بازده محصول در عدادی از pH ها
۵۵	۷-۴) بررسی طیف های ارتعاشی سیلیکازروژل ها
۵۷	۸-۴) بررسی منحنی های TG/DTA سیلیکازروژل ها
۵۹	۹-۴) بررسی الگوهای پراش اشعه ایکس سیلیکازروژل ها
۶۰	۱۰-۴) بررسی تصاویر SEM و EDX سیلیکازروژل ها
۶۲	۱۱-۴) ایزوترم های جذب-واجذب سیلیکازروژل در pH = ۵
۶۳	۱۲-۴) آنالیز BET سیلیکازروژل در pH = ۵
۶۴	۱۳-۴) آنالیز BJH سیلیکازروژل در pH = ۵
۶۴	۱۴-۴) بررسی t-plot سیلیکازروژل در pH = ۵
۶۵	۱۵-۴) تجزیه عنصری برای کربن فعال حاصل
۶۵	۱۶-۴) بررسی طیف ارتعاشی نمونه کربن فعال
۶۶	۱۷-۴) بررسی دیاگرام TGA نمونه کربن فعال
۶۷	۱۸-۴) بررسی الگوی پراش اشعه ایکس نمونه کربن فعال
۶۷	۱۹-۴) بررسی تصاویر SEM نمونه کربن فعال
۶۸	۲۰-۴) بررسی ایزوترم های جذب-واجذب نمونه کربن فعال
۶۹	۲۱-۴) آنالیز BET نمونه کربن فعال
۷۰	۲۲-۴) آنالیز BJH نمونه کربن فعال
۷۰	۲۳-۴) آنالیز حفره ای نمونه کربن فعال به وسیله روش t-plot
۷۱	۲۴-۴) نتایج آنالیز شیمیایی
۷۱	۲۵-۴) نتیجه گیری
۷۲	۲۶-۴) پیشنهاد برای ادامه کار

۷۳-۷۶

منابع  
پیوست



## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۹	شکل (۱-۱) طرحی از فرایند سل-ژل
۱۶	شکل (۲-۱) نفوذ سایتی بر روی یک شبکه مربعی
۱۸	شکل (۳-۱) کره های سیلیکای مونومر با قطر در حدود ۰/۲ میکرومتر ساخته شده به وسیله فرایند استابر
۲۵	شکل (۴-۱) انواع مختلف خلل و فرج
۲۵	شکل (۵-۱) طرحی از جذب گاز بر روی یک ماده متخلخل به وسیله گازها
۲۵	با اندازه های مولکولی مختلف
۲۶	شکل (۶-۱) مکانیسم های انتقال از میان حفرات
۴۵	شکل (۷-۱) ایزوترم ها
۵۰	شکل (۱-۳) تهیه سیلیکا زروژل از سدیم سیلیکات در ۵ و ۴ pH
۵۱	شکل (۲-۳) تهیه سیلیکا زروژل از سدیم سیلیکات در ۷ pH
۵۲	شکل (۳-۳) روش شماتیک از تهیه زروژل از خاکستر سبوس برنج
۵۶	شکل (۱-۴) طیف های FT-IR سیلیکازروژل
۵۸	شکل (۲-۴) منحنی های TGA سیلیکازروژل
۵۹	شکل (۳-۴) الگوی XRD از سیلیکازروژل تهیه شده در (الف) ۴ pH, (ب) ۵ pH, (ج) ۷ pH
۶۰	شکل (۴-۴) تصاویر SEM سیلیکازروژل تهیه شده در (الف) با HCl ۷ pH, (ب) با H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> در ۷ pH, (ج) با HCl در ۵ pH
۶۱	شکل (۵-۴) EDX سیلیکازروژل تهیه شده در (الف) ۴ pH, (ب) ۵ pH, (ج) ۷ pH
۶۲	شکل (۶-۴) ایزوترم های جذب - و جذب از نیتروژن در ۷۷ K برای سیلیکا زروژل در ۵ pH
۶۳	شکل (۷-۴) BET سیلیکا زروژل در ۵ pH
۶۴	شکل (۸-۴) توزیع اندازه حفرات سیلیکا زروژل با استفاده از ایزوترم جذب به وسیله روش BJH در ۵ pH
۶۵	شکل (۹-۴) جذب نیتروژن به عنوان تابعی از ضخامت لایه جذب شده برای سیلیکا زروژل در ۵ pH
۶۶	شکل (۱۰-۴) طیف FT-IR نمونه RH <sub>450</sub> به صورت قرص KBr
۶۷	شکل (۱۱-۴) TGA نمونه RH <sub>450</sub>
۶۷	شکل (۱۲-۴) الگوی XRD نمونه RH <sub>450</sub>
۶۸	شکل (۱۳-۴) تصویرهای SEM نمونه RH <sub>450</sub>
۶۹	شکل (۱۴-۴) ایزوترم جذب - و جذب نیتروژن در ۷۷ K برای RH <sub>450</sub>
۶۹	شکل (۱۵-۴) BET نمونه RH <sub>450</sub>
۷۰	شکل (۱۶-۴) توزیع اندازه حفرات RH <sub>450</sub> با استفاده از ایزوترم جذب نیتروژن (روش BJH)
۷۱	شکل (۱۷-۴) جذب نیتروژن به صورت تابعی از ضخامت لایه (t) برای RH <sub>450</sub>

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۴	جدول ۱-۱) اجزاء اصلی سیوس برنج
۵	جدول ۲-۱) اجزاء اصلی خاکستر سیوس برنج
۲۴	جدول ۳-۱) خصوصیات یک جا مد متخلخل
۵۰	جدول ۱-۳) مشخصات مواد شیمیایی مورد استفاده
۵۲	جدول ۲-۳) مراحل تهیه خاکستر سیوس برنج با شیب ملایم
۵۴	جدول ۱-۴) آنالیز عنصری سیوس برنج
۵۵	جدول ۲-۴) دانسیته زروژل های تهیه شده در pH های ۴، ۶، ۵، ۷ و ۸
۵۵	جدول ۳-۴) داده های حاصل از مقایسه روش شیب ملایم و سریع
۶۳	جدول ۴-۴) مساحت سطح و خصوصیات حفره سیلیکازروژل در pH = ۵
۶۴	جدول ۴-۵) داده های حاصل از آنالیز BJH
۶۵	جدول ۴-۶) داده های حاصل از آنالیز t-plot
۶۵	جدول ۴-۷) داده های آنالیز CHN نمونه کربن اکتیو
۶۹	جدول ۴-۸) مساحت سطح و خصوصیات حفره نمونه کربن اکتیو
۷۰	جدول ۴-۹) داده های حاصل از آنالیز BJH
۷۱	جدول ۴-۱۰) داده های حاصل از t-plot نمونه کربن اکتیو
۷۱	جدول ۴-۱۱) نتایج تیتراسیون بوهم

## چکیده

سیلیکازروژل بیش از ۴٪ سدیم به صورت یک آلوده کننده داشت. روشی جهت تهیه سیلیکا زروژل با سدیم کمتر مورد مطالعه قرار گرفت. روش توسعه یافته تهیه سیلیکا آکواژل را به وسیله افزودن محلول سیلیکات به محلول های هیدروکلریک اسید، یا اگزالیک اسید با pH ۱/۵ تا زمانی که pH ۴ یا ۵ شود، به کار می گیرد. آکواژل برای تهیه سیلیکا زروژل شسته و خشک شد. برای مقایسه همچنین سیلیکازروژل ها در pH=۷ به وسیله روش منتشر شده تهیه شد. از BET، SEM، FT-IR و TG/DTA جهت بررسی و شناسایی سیلیکازروژل حاصله استفاده گردید. کربن فعال از سبوس برنج به وسیله فعالسازی با فسفریک اسید در یک مرحله تهیه شد. ساختار خلل و فرج و شیمی سطح در دمای فعالسازی ۴۵۰°C با تکنیک های شناسایی متنوع مانند BET، BJH و t-plot بررسی شد. کربن فعال با ساختار خلل و فرج در دو مدل (۱ nm < حفره و ۱ nm > حفره) در ۴۵۰°C به دست آمد. نتایج FT-IR وجود گروه های دارای کربونیل، فسفر و گروه های دارای پیوند Si-O را معلوم کرد. غلظت نسبی گروه های دارای کربونیل در ۴۵۰°C کم است، در حالیکه این وضعیت در مورد گروه های دارای فسفر برعکس است. در این دما محتوای Si-O بالاست. این مطالعه اثبات کرد که محصولات کربن با محتوای خاکستر کم و درجه فعالسازی بالا می تواند از سبوس برنج به وسیله فعالسازی H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> در دمای مناسب تهیه شود. ۵۸ درصد و ۲۵ درصد ریز تخلخل به ترتیب برای کربن فعال و سیلیکازروژل تعیین شد.

**واژه های کلیدی:** سیلیکا زروژل، سبوس برنج، استخراج شیمیایی، کربن فعال، بارورشدن با H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>، تخلخل



# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱) تاریخچه

ایلمن<sup>۱</sup> در سال ۱۸۲۴ اولین آلکوکسید فلزی را از  $\text{SiCl}_4$  والکل تهیه کرد [۱]. وی متوجه شد در صورتی که این ترکیب در معرض هوا قرار گیرد، به ژل تبدیل می شود، به هر حال، این مواد فقط برای شیمیدانان مورد توجه بود. به گزارش باردلی و همکارانش رجوع شود. [۲]. در سال ۱۸۵۰، مندلیف<sup>۲</sup> تصدیق کرد که از هیدرولیز  $\text{SiCl}_4$ ،  $\text{Si}(\text{OH})_4$  حاصل می گردد که دستخوش واکنش های تراکم تکراری برای تشکیل پلی سیلوکسان ها با وزن مولکولی بالا می شود [۳]. در نهایت توسط گوفکن<sup>۳</sup> در ۱۹۳۰ تشخیص داده شد که آلکوکسیدها می توانند در تهیه فیلم های اکسیدی استفاده شوند [۴].

ژل های معدنی مشتق شده از نمک های آلی برای مدت زمان طولانی مورد مطالعه قرار گرفتند. گراهام<sup>۴</sup> نشان داد که آب در سیلیکاژل می تواند با حلال های آلی مبادله شود [۵]. ساختار شبکه ای سیلیکاژل ها در ۱۹۳۰ مورد پذیرش قرار گرفت. هارد<sup>۵</sup> در این زمینه نقش بسزایی را ایفا کرد زیرا وی ثابت کرد که باید از یک اسکلت سیلیسیک اسید که یک فاز مایع پیوسته اطراف آن را در بر گرفته است، تشکیل شده باشند [۶].

اکثر محققان تا قبل از سال ۱۹۷۹ معتقد بودند که  $\text{Si}(\text{OH})_4$  به زنجیر های سیلوکسان پلیمریزه می شود. در همان زمان، معدن شناسان علاقمند به استفاده از محلول ها و ژل ها برای تهیه پودر های همگن به منظور استفاده در مطالعات تعادل فازی شدند [۷ و ۸].

این روش بعدها در انجمن سرامیک توسط ری<sup>۶</sup> برای تهیه پودر های همگن، مورد پسند قرار گرفت [۹ و ۱۰]. آن کار به هر حال، درک مکانیسم های واکنش یا ژله ای شدن را هدایت نکرد. کار های پیشرفته زیادی، هم علمی و هم تکنولوژیکی، در صنعت سوخت هسته ای به سمت جلو انجام شد، اما منتشر نشد [۱۱ و ۱۲]. هدف از این کار، تهیه کردن کره های کوچک (دهها میکرومتر) از اکسید های پرتو افشان بود که به درون سلول های سوختی برای راکتور های هسته ای، بسته بندی شدند. مزیت فرایند سل-ژل این بود که از بوجود آمدن گرد و خاک زیاد چنانکه در فرایند های متداول تهیه سرامیک ها خواهد بود، اجتناب می کرد و شکل گیری کره ها را آسان می ساخت. بعد متفرق کردن محلول آبی در یک مایع آلی آبگریز انجام شد بنابراین محلول به شکل قطرات کوچکی در آمد، سپس هر کدام از آنها تبدیل به ژل شدند. در اواخر دهه شصت و اوایل دهه هفتاد به ژل ها توجه شد. هیدرولیز و تراکم کنترل شده آلکوکسیدها برای تهیه شیشه های چند جزئی به طور مستقلی توسط لون<sup>۷</sup>، توماس<sup>۸</sup> و دیسلیج<sup>۹</sup> پیشرفت کرد [۱۳ و ۱۴]. رشته های سرامیکی از پیش ماده های آلی فلزی بر پایه تجاری بوسیله شرکت های متعدد ساخته شدند [۱۵-۱۷]. سرو صدای این فعالیت که تا امروز ادامه یافت این بود که یولداس<sup>۱۰</sup> [۱۸ و ۱۹]، یامان<sup>۱۱</sup> و همکارانش اثبات کردند، [۲۰] که مونولایه ها می توانند به وسیله خشک شدن با دقت ژل ها تهیه شوند. به طور معمول، تکنولوژی بر علم فرایند سل-ژل مقدم است، اما قدم های بزرگی در چند سال اخیر در جهت درک محورهای بنیادی تهیه سرامیک های چندجزئی همگن از ژل های مشتق شده از آلکوکسید برداشته شده است.

۱. Ebelmen  
۲. Mendeleev  
۳. Geffcken  
۴. Graham  
۵. Hurd  
۶. Roy  
۷. Levene  
۸. Thomas  
۹. Dislich  
۱۰. Yoldas  
۱۱. Yaman

فلینت<sup>۱</sup> تشخیص داد سنگ های محکم موجود از اسکلت های سیلیسی اسفنج های قدیمی تشکیل شده اند [۲۱]. همچنین، در سال ۱۹۷۰ تشخیص داده شد که سیلیکای محلول نقش موثری را در زندگی پستانداران ایفا می کند.

## ۲-۱) سیلیسیم دی اکسید

ترکیب شیمیایی سیلیسیم دی اکسید، که همچنین به عنوان سیلیکا<sup>۲</sup> (از لاتین سیلکس) شناخته شده است، فرمول شیمیایی  $\text{SiO}_2$  دارد و از نظر سختی از دیرباز معروف بوده است. سیلیکا، معمول ترین یافته در طبیعت به صورت شن، یا کوارتز، همچنین در دیوارهای حفره مانند دیاتومه ها است و فراوان ترین ماده معدنی در قشر زمین محسوب می شود. [۲۲ و ۲۳].

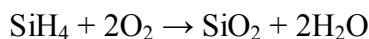
سیلیکا به اشکال مختلفی که شامل کوارتز گداخته، بلور، سیلیکای بخاری (سیلیکای آذرین، آئروسیل تجاری) سیلیکای کلوئیدی، سیلیکاژل، و آئروژل است، ساخته می شود. به علاوه، نانوفنرهای سیلیکا به وسیله روش جامد - مایع - بخار، تهیه می شوند [۲۴]. از سیلیکا اصولاً در تولیدشیشه پنجره، لیوان های نوشیدنی، فیبرهای نوری، ظروف سرامیکی و نیز سیمان پورتلند صنعتی استفاده می شود.

در سیلیسیم دی اکسید، اتم  $\text{Si}$  کوئوردیناسیون چهاروجهی دارد که ۴ اتم اکسیژن در اطراف آن وجود دارد. متداول ترین نمونه آن، سیلیکای بلوری کوارتز است. در شکل پایدار ترمودینامیکی سیلیکا، به طور میانگین ۴ محور  $\text{SiO}_4$  (اتم های اکسیژن) چهاروجهی با یکدیگر به اشتراک گذاشته می شوند، و فرمول شیمیایی شبکه ای را به وجود می آورند [۲۵].

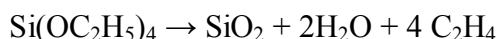
$\text{SiO}_2$ ، شکل های بلوری ( پلی مورف) علاوه بر شکل های آمورف دارد. اغلب شکل های بلوری دارای واحدهای چهاروجهی  $\text{SiO}_4$  هستند که به یکدیگر به وسیله محورهای به اشتراک گذاشته شده در جهت های مختلف، متصل شده اند.

روش های تولید  $\text{SiO}_2$  عبارتند از [۲۶]:

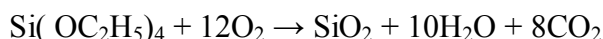
- اکسایش در دمای پایین (  $450 - 400$  °C ) سیلان:



- تجزیه تترااتیل اورتو سیلیکات ( TEOS ) در  $730 - 680$  °C:

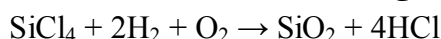


- رسوب گیری با بخار شیمیایی پلاسما با استفاده از TEOS در حدود  $400$  °C:



- پلیمریزاسیون تترااتیل اورتو سیلیکات ( TEOS ) در کمتر از  $100$  °C با استفاده از آمینو اسید به عنوان کاتالیزور [۲۷].

سیلیکای آذرین ( گاهی اوقات سیلیکای گازی یا بخار سیلیکا نامیده می شود)، شکل ذره ای بسیار ریز  $\text{SiO}_2$  است، که از سوختن  $\text{SiCl}_4$  در شعله اکسیژن غنی از هیدروکربن تهیه می شود [۲۸]:

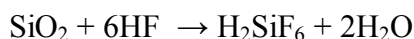


سیلیکای آمورف، از اسیدی کردن محلول سدیم سیلیکات برای تولید یک رسوب ژلاتینی، تهیه می شود سپس شسته و در نهایت برای تهیه سیلیکای میکروپروس بی رنگ آگیری می شود. فلئوئر با سیلیکون دی اکسید برای شکل دادن  $\text{SiF}_4$  و  $\text{O}_2$  واکنش می دهد در حالیکه گازهای هالوژن دیگر ( $\text{I}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ) آمادگی بسیار کمی برای واکنش دارند.

<sup>۱</sup>.Flint

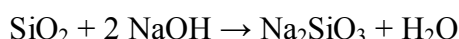
<sup>۲</sup>.Silica

سیلیکون دی اکسید برای تهیه هگزا فلئورو سیلیسیک اسید مورد حمله هیدروفلئوریک اسید (HF) قرار می گیرد [۲۹]:

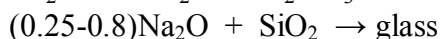
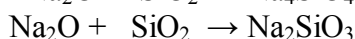


HF به عنوان الگوی سیلیکون دی اکسید در صنعت نیمه هادی ها استفاده می شود.

سیلیکون دی اکسید در هیدروکسید حل می شود:

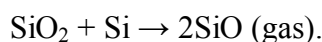


سیلیکون دی اکسید با اکسید های فلزی بازی (مانند سدیم اکسید، پتاسیم اکسید، سرب(II) اکسید، روی اکسید) واکنش می دهد. به عنوان مثال از واکنش سدیم اکسید و  $\text{SiO}_2$  سدیم ارتوسیلیکات، سدیم سیلیکات، و شیشه ها متناسب با خصوصیات واکنشگرها تولید می شود:



شیشه آهکی سدیم کربنات، شیشه بوروسیلیکات، شیشه سربی مثال هایی از این نوع شیشه هستند که اهمیت تجاری دارند. در این شیشه ها، سیلیکا به عنوان تشکیل دهنده شبکه در نظر گرفته می شود.

سیلیکون در دما های بالا  $\text{SiO}$  گازی را به وجود می آورد:



### ۳-۱) سبوس برنج:

سبوس های برنج پوشش های سختی از دانه های برنج هستند که می توانند به عنوان ماده ساختاری، ماده عایق یا غذا استفاده شوند. دسته ای از مواد عایق اند که به سختی می سوزند و زمانی که سبوس برنج می سوزد، مقداری سیلیکا به دست می آید. به همین دلایل است که عایق بندی دمایی عالی را فراهم می سازد. سبوس برنج، یک منبع زیستی از سیلیکات است که به شکل تردیمیت و کریستوبالیت یافت می شود. از سبوس برنج برای تهیه غربال های مولکولی مزوحفره (مانند MCM)، به عنوان کاتالیزورهای برای واکنش های شیمیایی متنوع، به عنوان یک پایه برای سیستم رهایش دارو و به عنوان جاذب در از بین بردن آلاینده های آب می توان استفاده کرد. چیاراکورن<sup>۱</sup> و همکارانش اثر گروه های عاملی سیلان را بر روی آبگریزی ۴۱-MCM سنتز شده از سبوس برنج مورد بررسی قرار دادند [۳۰]. چومی<sup>۲</sup> و همکارانش نیز کاتالیزورهای آهن و پلاتین را بر روی پایه سنتز شده با سیلیکای حاصل از سبوس برنج و عمل آنها بر روی هیدروکسیل دار کردن فنل را شناسایی کردند [۳۱]. کارهای متعددی در شکل گیری سیلیکا از سبوس برنج انجام گرفته است [۳۲-۳۴]. تی زانگ<sup>۳</sup> -هانگ لیو<sup>۴</sup> شناسایی سیلیکای تهیه شده به وسیله گرم کردن سبوس برنج در سرعت های مختلف گرم کردن (۵، ۱۵، ۲۰ K/min) در هوا را بررسی کردند. علاوه بر این، سبوس برنج را با اسید برای حذف ناخالصی ها از نمونه ها شستشو دادند. تست های شیمیایی و فیزیکی مورد استفاده در این تحقیق، شامل میکروسکوپ الکترونی انتقالی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف سنجی X-Ray، طیف سنجی زیرقرمز فوری، دستگاه جذب  $\text{N}_2$ ، طیف سنجی جرمی و تجزیه عنصری بوده است. گروهی نیز، آنالیزگرماوزن سنجی (TGA) برای شناسایی فرایند تجزیه از سبوس برنج را انجام دادند [۳۵].

جاذب هایی مانند کربن اکتیو، سیلیکا و خاک رس اسیدی به طور گسترده ای به وسیله عمل کننده های روغن

<sup>۱</sup>.Chiarakorn et al.

<sup>۲</sup>.Chumee et al.

<sup>۳</sup>.Tzong.

<sup>۴</sup>.Hong Liou.

سزيجات برای حذف اجزاء روغن کمتر از قبيل اسيدهای چرب (FFA)، پروکسيدها، کاروتنوئيدها و فسفوليبيدها استفاده می شوند. مونجونگ کيم و همکارانش میکروساختارهای خاکستر سبوس برنج (RHA) و سيلیکا سبوس برنج (RHS) را برای درک جذب آن برای اسيد های چرب (FFA) روغن سبوس برنج مورد بررسی قرار دادند. هدف آنها از اين مطالعه بررسی جذب و میکروساختارهای RHA و RHS بود. RHA را به وسيله حرارت دادن سبوس برنج در دماهای ۳۰۰ (RHA300)، ۵۰۰ (RHA500)، ۷۰۰ (RHA700)، ۹۰۰ (RHA 900) و RHS را از RHA500 به وسيله استخراج قليايی تهيه کردند [۳۶].

در یک تحقيق ديگر، چيانگ مای<sup>۱</sup> سبوس برنج را در ۷۰۰ °C برای ۳ و ۶ ساعت، به ترتيب سوزاندند. خاکستر سبوس برنج (RHA)، به وسيله روش استخراج قليايی با استفاده از سدیم هيدروکسيدها<sup>۲</sup>، ۲/۵ و ۳ نرمال خالص سازی شد. سپس، RHA تحت روش رسوبی به منظور تهيه نانو سيلیکا قرار گرفت. رسوب سازی به وسيله رفلاکس سيلیکا از RHA در حال جوشيدن NaOH<sup>۲</sup>، ۲/۵ و ۳ نرمال، به ترتيب انجام شد [۳۷].

لی وانگ<sup>۳</sup> و همکارانش، سولفوریک اسيد را به صورت یک معرف مناسب برای سرعت بالای هيدروليز RH که بيوماکرومولکول ها را به مولکول های کوچک تبديل می کند و همچنين پليمريزاسيون مولکول های کوچک را درمراحل بعدی آسان می کند، استفاده کردند. زغال آبدار از طريق دهيدراسيون شکرهای مشتق شده از هيدروليز سبوس برنج با سولفوریک اسيد تهيه شدند. واکنش ها در دمای پايين و فشار محيط به علت کاتاليز سولفوریک اسيد، که شرايط ملايم برای تهيه هيدروکربن هایي بود که می توانست در آینده، استفاده صنعتی داشته باشند، رخ داد. اثر غلظت های مختلف اسیدی روی شکل و ساختار بررسی شد. خصوصيات شيميایی و ویژگی های فیزیکی به وسيله تکنیک های مختلف شناسایی شد [۳۸].

جدول ۱-۱. اجزاء اصلی سبوس برنج [۳۹].

محتوا (درصد وزنی)	اجزاء اصلی
۱۸/۸-۲۲/۳	SiO <sub>2</sub>
۹-۲۰	ليگنين
۲۸-۳۸	سلولز
۱/۹-۳	پروتئين
۰/۳-۰/۸	اسيد چرب
۹/۳-۹/۵	مواد مغذی بعد از هضم کامل

#### ۴-۱) خاکستر سبوس برنج:

خاکستر حاصل از سوختن، (RHA<sup>۳</sup>) غنی از سيلیکا است که می توان به منظورهای زیر از آنها استفاده کرد.

- مصالح دانه ای و پر کننده ها برای تهيه بتن
- جایگزین اقتصادی برای میکرو سيلیکا
- جاذب ها برای روغن ها و مواد شيميایی
- اصلاح کننده های خاک

<sup>۱</sup>.Chiang Mai

<sup>۲</sup>.Lili Wang

3.Rice Husk Ash;RHA



- به عنوان یک منبع سیلیسیم اکسید
- به عنوان پودر در آسیاب های فولادین
- به عنوان دافع در قطران - سرکه
- به عنوان یک ماده رها کننده در صنعت سرامیک
- به عنوان یک ماده عایق برای یخچال ها و خانه ها

تقریباً یک پنجم خاکستر، از سوختن سیوس برنج در هوا به دست می آید، طبیعت سلولی سیوس برنج، ساختار حفره دار RHA را به وجود می آورد. خاکستر دارای بیش از ۷۸ درصد سیلیکا به همراه مقادیر کم عناصر فلزی را دارد. چون خاکستر به صورت پودر ریز است، به نرم شدن بیشتر احتیاج ندارد، و این خاکستر را بهترین منبع اقتصادی نانوسیلیکا می سازد. دلا<sup>۱</sup> و همکارانش مشاهده کرده اند سیلیکای اکتیو با گستره سطحی بالا می تواند از خاکستر سیوس برنج بعد از حرارت دادن در ۹۷۳ K در هوا به دست آید. پتانسیل RHA برای کاربرد صنعتی بستگی به امکان استخراج سیلیکای خالص از آن دارد [۴۰]. سیلیکا در حالت بازی قوی محلول است (  $\text{pH} > 10$  ) و یک شبکه ژل سه بعدی سخت و محکم را وقتی که pH محلول سیلیکات به زیر ۱۰ می رسد، تشکیل می دهد. اگر فاز آبی درون حفرات سیلیکاژل به وسیله تبخیر حذف شود، به آن زروژل گفته می شود. [۴۱].

جدول ۱-۲. اجزاء اصلی خاکستر سیوس برنج [۴۲].

ترکیب	مقدار
$\text{K}_2\text{O}$	۱/۴۶ (درصد وزنی)
$\text{CaO}$	۰/۴۵ (درصد وزنی)
$\text{Na}_2\text{O}$	۰/۰۹ (درصد وزنی)
$\text{MgO}$	۰/۱۷ (درصد وزنی)
$\text{Al}_2\text{O}_3$	۰/۴۲ (درصد وزنی)
$\text{ZnO}$	۰/۰۸ (درصد وزنی)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	۰/۱۹ (درصد وزنی)
$\text{MnO}_2$	۰/۱ (درصد وزنی)
$\text{CuO}$	۳۷۵ ppm
$\text{TiO}_2$	۱۳ ppm
$\text{SiO}_2$	۷۸/۴۴ (درصد وزنی)
C	۱۸/۲۴ (درصد وزنی)
Others	۰/۳۶ (درصد وزنی)

<sup>۱</sup>. Della et al.

## ۵-۱) نانو مواد

همه نانو مواد از ریز دانه هایی تشکیل شده اند که به نوبه خود از اتمهای زیادی ساخته شده اند. این دانه ها را بسته به اندازه شان، با استفاده از چشم غیرمسلح، می توان دید و یا نمی توان دید. مواد رایج، حاوی دانه هایی هستند که اندازه آنها در هر عمقی و در هر جایی از نمونه ماده، از چند صد میکرون تا چند سانتی متر تغییر می کنند. نانو مواد را گاهی اوقات، وقتی که متراکم و فشرده نشده باشند، نانوپودر<sup>۱</sup> می نامند که اندازه دانه های آنها حداقل در یک بعد و یا معمولاً در سه بعد، در محدوده ۱-۱۰۰ nm می باشد. نانو مواد موضوع تازه ای نیست، اما در عین حال پی بردن به رموز تهیه و ساخت بعضی از انواع اکسیدها، فلزات، سرامیکها و سایر مواد که نانومواد هستند، بسیار تازگی دارد و اخیراً درک شده است. یک سرامیک، ماده معدنی است که آن را می توان در اثر حرارت به قطعاتی سودمند با ساختار فوق العاده سخت مبدل کرد. کربن سیاه یا کربن بلک، نانوماده ای است که در تایرهای اتومبیل به منظور افزایش طول عمر تایر به کار رفته است و علت رنگ سیاه تایر هم، وجود این افزودنی سیاه رنگ است. معلوم شده است که اندازه ذرات کربن بلک و سیلیکای دودکننده<sup>۲</sup>، در حد نانومتر می باشد. در نوعی از نانومواد، اکثر اتمها در سطح ذرات قرار گرفته اند، در صورتی که، در مواد متداول همان ذرات در توده و عمق قرار گرفته اند، در نتیجه خواص ذاتی نانومواد از مواد رایج کاملاً متفاوت می باشند. چرا که، اکثریت اتمها، در مواد رایج در محیط های مختلفی قرار گرفته اند. نانومواد تقریباً، بالاترین سطح مقطع افزایش یافته را نسبت به مواد فعلی از خود نشان می دهند.

مواد با سطح مقطع بالا، خواص شیمیایی، مکانیکی، نوری و مغناطیسی بهتری را از خود نشان می دهند و به همین دلیل کاربردهای ساختاری و غیر ساختاری فراوانی دارند. نانومواد، به لحاظ شیمیایی، بسیار فعال می باشند زیرا تعداد ملکولها یا اتمهای موجود در سطح در مقایسه با تعداد اتمها یا ملکولهای موجود در توده نمونه بسیار زیاد است. در بعضی از مواقع برای حفظ خواص مطلوب نانومواد، جهت پیشگیری از واکنش بیشتر، یک پایدارکننده را بایستی به آنها اضافه کرد که آنها را قادر می سازد تا در برابر سایش، فرسودگی و خوردگی مقاوم باشند اما این مقاومت از طریق بعضی از انواع مکانیزمهای حفاظت عملی می گردد.

شش روش شناخته شده گسترده برای تولید نانومواد وجود دارند که عبارتند از قوس پلاسما، رسوب گذاری شیمیایی فاز بخار، رسوب گذاری الکتریکی، سنتز از طریق سل-ژل، آسیاب کردن و سایش با حرکت گلوله ها و استفاده از نانوذرات طبیعی. در دو روش اول، ملکولها و اتمها از طریق فرایند تبخیر از هم جداسازی می شوند و سپس این امکان فراهم می شود که تحت کنترل دقیق و در یک آرایش منظم نانوذرات را پدید آورند و بر روی یک سطح ته نشین گردند. در روش سوم، یعنی رسوب گذاری الکتریکی فرایند مشابهی انجام می گردد چرا که نمونه های منفرد از محلول جدا شده و بر روی سطح می نشینند. در فرایند چهارم یعنی سنتز از طریق سل-ژل، قبل از رسوب گذاری بر روی سطح، منظم شدن قبلی انجام می شود. در سایش از طریق آسیاب های تویی و گلوله ای، معلوم شده است که ساختارهای درشت بلوری<sup>۳</sup> به ساختارهای نانوبلوری<sup>۴</sup> شکسته و خرد می گردند ولی تمامیت و ماهیت اصلی و اولیه ماده تغییری نمی کند. در هر صورت، نانوذرات را می توان به مواد جدید، دوباره تغییر شکل داد که مستلزم شکستن پیوندهای بلوری اولیه است [۴۳].

در حال حاضر مواد نانو سیلیکا به روش های متعددی تهیه می شوند که شامل واکنش فاز-بخار، سل-ژل و تجزیه حرارتی می شود [۴۴-۴۸]. به هر حال، قیمت بالای این روشها، کاربرد وسیع آنها را محدود کرده است. در مقابل، سبوس برنج یک محصول فرعی کشاورزی است که اجزاء اصلی آن مواد آلی و سیلیسیم دی اکسید آبدار می باشد. چون اتم های سیلیسیم در سبوس برنج به طور طبیعی و یکنواخت پراکنده شده اند، ذرات بسیار ریز پودر سیلیکا با

<sup>۱</sup>. Nanopowder

<sup>۲</sup>. Fumed silica

<sup>۳</sup>. macro crystalline

<sup>۴</sup>. nano crystalline

خلوص بالا و مساحت سطح بالا می توانند تحت شرایط کنترل شده تهیه شوند. افزون بر این، واکنش می تواند بسیار آسانتر از تکنیک تجربی متداول انجام شود. این فرایند نه تنها در تهیه پودر سیلیکای با ارزش، سودمند است بلکه در کاهش مشکلات آلودگی موجود نیز موثر است.

ریل<sup>۱</sup> و همکارانش دریافته اند که توزیع همگن ذرات نانوسیلیکا می تواند از سوزاندن سبوس برنج در  $1073-873\text{ K}$  در هوا به دست آید [۴۹]. کالاپا تی<sup>۲</sup> و همکارانش [۵۰] از یک روش توسعه یافته برای تهیه سیلیکا با محتوای سدیم کمتر با افزودن محلول سیلیکات به هیدروکلریک و یا اگزالیک اسید با  $\text{pH } 1/5$  تا زمانی که  $\text{pH}$  به ۴ برسد، استفاده کردند. کامات<sup>۳</sup> و پروکتور<sup>۴</sup> گزارش داده اند [۵۱] که سبوس برنج می تواند در محلول سدیم هیدروکسید حل شود و سپس با اسید برای به دست آوردن سیلیکاژل تیترا گردد.

مطالعات وسیعی بر روی ساختن سیلیکا از سبوس برنج انجام شده است. به هر حال، مکانیسم تجزیه حرارتی به اندازه شناسایی سطح محصول، تحت شرایط غیر گرمایی توجه کمتری را به خود جلب کرده است. تا زمانیکه بحران انرژی تا سال ۱۹۷۰ وجود داشت، بهره برداری انرژی از منابع زیست توده ( انرژی زیست توده ) توجه زیادی را به خود جلب کرد. انرژی حاصل از زائدات کشاورزی، شکلی از انرژی تجدید شدنی است، که در اصل بهره برداری از آن کربن دی اکسید را برخلاف سوخت های فسیلی وارد هوا نمی کند. همچنین، به علت مقادیر کمتر گوگرد و نیتروژن در زائدات زیست توده ای، بهره برداری از این انرژی آلودگی محیطی کمتری را نسبت به سوخت های فسیلی تولید می کند [۵۲].

#### ۱-۶) فرایند سل - ژل

فرایند سل - ژل<sup>۵</sup> می تواند به عنوان ایجاد یک شبکه اکسید از واکنش های پلی تراکمی تصاعدی از مولکول های پیش ماده در یک مایع میانی یا به عنوان یک فرایند برای شکل دهی مواد از راه یک محلول، ژل شدن محلول و سرانجام حذف حلال توصیف شود.

یک کلئید یک تعلیق است که در آن فاز متراکم بسیار کوچک است و نیروهای جاذب قابل چشم پوشی هستند و برخورد ها در گستره کوچکی، از قبیل نیروهای واندروالس و بارهای سطحی بوجود می آیند.

یک سل یک تعلیق ثابتی از ماده ژلاتینی ذرات جامد یا پلیمرها در یک مایع است. ذرات می توانند بی شکل یا بلوری باشند. یک ژل از یک شبکه جامد پیوسته سه بعدی حفره دار که یک فاز مایع پیوسته را احاطه و نگهداری می کند تشکیل شده است. ( ژل مرطوب ). در ژل های کلئیدی ( ذره ای ) ژل ها از انباشتگی ذرات متراکم ساخته شده اند، درحالیکه در ژل های پلیمری ذرات یک زیر ساختار پلیمری دارند که با اجماع واحد های شیمیایی کلئیدی پایه ساخته شده اند. به طور کلی، ذرات محلول می توانند به وسیله پیوندهای کووالانسی، نیرو های واندروالسی، یا پیوندهای هیدروژنی به هم متصل شوند.

همچنین ژل ها می توانند بوسیله ژولیدگی زنجیرهای پلیمری شکل بگیرند. در اغلب سیستم های مورد استفاده برای سنتز مواد، ژل شدن ( شکل گیری ژل ها ) بعلا شکل گیری پیوند های کووالانسی و تغییر ناپذیر است. شکل گیری ژل می تواند برگشت پذیر باشد زمانیکه پیوندهای دیگر در ژل شدن وارد شده اند. پودرها می توانند به وسیله ترشح - خشک شدن از یک سل به دست آیند. فیبر های ژل می توانند به طور مستقیم از سل خیس شوند، یا فیلم های نازک می توانند به وسیله تکنولوژی های پوششی استاندارد از قبیل پوشش - چرخش، خشک شدن، ... آماده شوند. در اینجا، ژل شدن طی آماده سازی فیلم یا فیبر که به علت تبخیر سریع حلال است رخ می دهد.

<sup>۱</sup>.Real et al.

<sup>۲</sup>.Kalapathy et al.

<sup>۳</sup>.Kamath

<sup>۴</sup>.Proctor

<sup>۵</sup>.Sol-gel

خشک کردن با تبخیر مایع حفره منجر به نیروهای موئینی می شود که سبب انقباض شبکه ژل می گردد. ژل خشک حاصل، زروژل نامیده می شود. در مقایسه با ژل مرطوب اصلی، حجم آن اغلب به میزان ۱۰ - ۵ برابر کاهش می یابد. به علت فشار خشک شدن، بدنه ژل یکپارچه اغلب خراب شده و پودر ها به دست می آیند. هنگامی که ژل مرطوب به روشی خشک می شود که حفره و ساختار شبکه ژل حتی بعد از خشک شدن حفظ می شود، ژل خشک حاصل، آئروژل نامیده می شود. آئروژل ها معمولاً بعد از فرایند خشک شدن فوق بحرانی، که در آن از رویارویی بین مایع و بخار در طی خشک شدن جلوگیری می شود، و بنابراین هیچگونه فشار موئینی وجود ندارد. شیشه ها یا سرامیک های سفالین، می توانند بعد از عملیات گرمایی زروژل ها یا آئروژل ها در دمای بالا تهیه شوند [۵۳].

### ۱-۶-۱) تشکیل سطوح نانو ساختار با استفاده از فرایند سل-ژل

فرایند سل-ژل، که تا کنون مورد بحث قرار گرفته است، از مرحله اول تا مرحله سوم یعنی مرحله ژل شدن در شکل ۱-۱ خلاصه شده است. هنگامی که کره ها را می توان به صورت کره های ژل شده یا ژل های فروریخته<sup>۱</sup> زروژلها<sup>۲</sup> جمع آوری کرد، یک وسیله بهتر برای استفاده از سطح مقطع آنها، آن است که ژل را بر روی یک سطح پخش<sup>۳</sup> کرد. با استفاده از این روش، نسبت مساحت سطح به مساحت سطح توده بزرگتری به دست می آید. امکان دیگر، استفاده از آئروژلها<sup>۴</sup> است. آئروژلها از شبکه ای از ذرات به هم پیوسته سه بعدی تشکیل شده اند که در درون شکاف یا منافذ آنها، هوا (یا هر نوع گاز دیگری) به دام افتاده است. آئروژلها متخلخل و فوق العاده سبک هستند، در حالی که می توانند تا ۱۰۰ برابر وزن خودشان را تحمل کنند.

یک راه ماهرانه تر<sup>۵</sup> برای افزایش سطح مقطع، عبارتست از کریستالیزاسیون یا بلوری شدن کلونیدی<sup>۶</sup> بر روی سطوح یعنی بتوانیم بلورهای کلونیدی را بر روی سطوح تشکیل دهیم. در این فرایند، آب خیلی بدقت جابه جا می شود، به طوری که ساختمان سل ژل در رسوب حاصله دچار تغییر نمی گردد و ساختار پدیدآمده آن از بین نمی رود. سیلیکای نانو ساختار با اندازه حفره، شکل و ترتیب کنترل شده را می توان از این طریق به دست آورد.

وقتی که کاهنده های کشش سطحی با آب مخلوط گردند، ساختارهای فضایی<sup>۷</sup> با معماری متناوب و با دامنه تغییر گسترده درون یک نانو ماده پرتخلخل<sup>۸</sup> (نانوکف) پدید می آید که پارامترهای شبکه آن در دامنه ۲ تا ۱۵ نانومتر تغییر می کند. واکنشهای هیدرولیز و پلیمریزاسیون تراکمی که بر روی پیش سازهای سیلیکائی به وقوع می پیوندد به قلمروهای آبی از این فازها محدود می گردد و روش تولید گسترده ای را برای تولید سیلیکای نانو ساختار منولیتیک<sup>۹</sup> فراهم می سازد که ساختار و معماری آن تحت تاثیر قالب ساختار فاز بلور مایع به کار رفته در فرایند سنتز آن می باشد. مثلاً، الگوهای شش وجهی سیلیکا با حفره های استوانه ای به قطر ۲-۳ نانومتر از طریق هدایت واکنش در فاز بلوری مایع شش وجهی و در نتیجه زدودن کاهنده های کشش سطحی از طریق حرارت دادن (که کلسیناسیون<sup>۱۰</sup> نامیده می شود) به دست آمده است. در این ماده، دیواره های سیلیکایی ضخامت تقریباً ۱۰۲ نانومتر دارند [۵۴].

<sup>۱</sup>. Collapse Gels; to fall down or fall in suddenly

<sup>۲</sup>. Xerogels

<sup>۳</sup>. Capture

<sup>۴</sup>. Aerogel

<sup>۵</sup>. Very Clever Way

<sup>۶</sup>. colloidal Crystallization

<sup>۷</sup>. long range spatially periodic architectures

<sup>۸</sup>. nanofoam

<sup>۹</sup>. monolithic

<sup>۱۰</sup>. calcination