



معاونت پژوهش و فناوری



جمهوری اسلامی ایران

# دستیابی به دانش فنی ساخت نسوزهای عایق آلومینایی به روش تزریق گاز

(۲۳۰۸-۲۱)

(گزارش نهایی)

سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد

لیلا شریفی

تیرماه ۱۳۹۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Archive of SID

## شناسنامه گزارش

عنوان گزارش: دستیابی به دانش فنی ساخت نسوزهای عایق آلومینایی به روش تزریق گاز

شماره ویرایش: اول

عنوان فارسی طرح پژوهشی: دستیابی به دانش فنی ساخت نسوزهای عایق آلومینایی به روش تزریق گاز

عنوان انگلیسی طرح: FM Report foam

کد طرح: ۲۳۰۸-۲۱

نام فایل گزارش: FM Report ink digital

تالیف کننده‌ها: لیلا شریفی - سیدحسین میرحسینی - علی دهقانی

ویرایش علمی: حسین عجمین

ویرایش ادبی: فرناز آسا

تاریخ طرحنامه: ۱۳۹۳/۱۲/۰۷

تاریخ تصویب در شورای بررسی نهایی طرح‌ها: ۱۳۹۴/۹/۱۴

تاریخ شروع اجرای طرح: ۱۳۹۴/۱۰/۱

سطح دسترسی به سند: محرمانه (بدون موافقت کتبی، نسخه‌برداری یا تکثیر ممنوع است)

نام مسئول یا همکار	محل استخدام	تخصص	عناوین فعالیت‌هایی که در طرح انجام داده‌اند	کارکرد در طرح به ساعت
سید حسین میرحسینی	سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد	سرامیک	تهیه گزارش مروری بر منابع	۳۰۰
لیلا شریفی	سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد	سرامیک	مسئول طرح	۵۲۰
علی دهقانی	سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد	سرامیک	انجام آنالیزها	۴۰۰
محسن نوری	شرکت VGH AG	سرامیک	گردآوری	۴۰۰
هادی بلوریان	شرکت سیالکاران	مکانیک	ساخت دستگاه	۱۰۰

سازمان مجری: سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد

گروه مجری: گروه سرامیک صنعتی

نشانی: یزد- خیابان کاشانی- طبقه فوقانی مجتمع تجاری سیدالشهداء- سازمان جهاد دانشگاهی استان یزد

تلفن محل کار تالیف کننده اصلی: ۰۳۵-۳۶۲۴۱۰۸۱

نشانی پست الکترونیک تالیف کننده اصلی: [sharifi.leila.jd@gmail.com](mailto:sharifi.leila.jd@gmail.com)

## چکیده:

در این طرح، ابتدا دوغاب پایدار شده از اکسید آلومینیوم با کمک پراکنده‌ساز دولاپیکس تهیه و خواص رئولوژیکی و پایداری آن بررسی شد و پس از تهیه فوم در مرحله دوم قطعه متخلخل آلومینایی ساخته شده و عوامل موثر بر خواص نهایی قطعه بررسی می‌شود.

در بخش دیگر تحقیق دستگاه فوم‌ساز ساخته شد. دوغاب آلومینایی پایدار شده در بخش اول طرح وارد محفظه فوم‌ساز شده و با تزریق هوا تبدیل به فوم گردید. به فوم آلومینایی بایندر سیلیکا سل افزوده شد. پس از ریختن در قالب‌های پلیمری فرایند گیرش از طریق ژلاسیون سیلیس کلوئیدی صورت پذیرفت. پس از خروج قالب‌ها، نمونه‌ها از قالب خارج شده و در دماهای مختلف پخت گردیدند. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها با تغییر دمای پخت، میزان SDS و درصد جامد بررسی گردید. با توجه به بررسی‌های انجام شده نمونه با ۰.۷۸٪ جامد و میزان ۰.۳۵٪ SDS و زینتر شده در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی-گراد دارای خواص بهینه می‌باشد.

## فهرست مطالب

فصل ۱	مروری بر منابع مطالعاتی	۱
۱-۱	مواد متخلخل	۱
۱-۱-۱	ویژگی مواد متخلخل	۳
۱-۱-۲	مروری بر روش‌های مختلف ساخت مواد متخلخل	۶
۲-۱	آلومینا	۷
۱-۲-۱	ساختارهای آلومینا	۹
۱-۱-۲-۱	هیدروکسیدهای آلومینیوم	۹
۲-۱-۲-۱	اکسیدهای آلومینیوم	۱۱
۲-۲-۱	کاربردهای آلومینا	۱۴
۳-۲-۱	آلومینای متخلخل	۱۷
۴-۲-۱	کاربرد آلومینای متخلخل	۱۷
۱-۴-۲-۱	آجرهای عایق مقاوم به دما	۱۸
۲-۴-۲-۱	فیلتر فلز مذاب	۲۴
۳-۴-۲-۱	پایه کاتالیست	۲۶
۴-۴-۲-۱	بیورآکتورها	۲۶
۵-۴-۲-۱	غربال‌های مولکولی برای فرآیندهای شیمیایی	۲۷
۶-۴-۲-۱	ایمپلنت‌های پزشکی	۲۷
۵-۲-۱	روش‌های فوم‌سازی	۲۷
۱-۵-۲-۱	روش کپی‌برداری	۲۷
۲-۵-۲-۱	روش شابلون از بین رونده	۲۹
۳-۵-۲-۱	ایجاد فوم به روش‌های مستقیم	۳۴
۳-۱	ساخت فوم‌های سرامیکی به روش تزریق گاز	۳۷
۱-۳-۱	فوم‌های مایع، پیش‌مواد فوم‌های جامد	۴۰
۴-۱	رفتار رئولوژیکی سیستم‌های سرامیکی	۴۵
۱-۴-۱	انواع رفتارهای جریان	۴۶
۱-۱-۴-۱	رفتارهای مستقل از زمان	۴۶
۲-۱-۴-۱	رفتارهای وابسته به زمان	۴۸

۴۹.....	۲-۴-۱ عوامل موثر بر خواص رئولوژی دوغاب‌های سرامیکی
۵۰.....	۱-۲-۴-۱ گرانروی فاز مایع
۵۰.....	۲-۲-۴-۱ غلظت حجمی مواد جامد
۵۱.....	۳-۲-۴-۱ اندازه ذرات
۵۱.....	۴-۲-۴-۱ شکل ذرات
۵۱.....	۵-۲-۴-۱ نیروهای بین ذرات
۵۲.....	۶-۲-۴-۱ افزودنی‌ها (چسب‌ها)
<b>۵۳.....</b>	<b>فصل ۲ : فعالیت‌های آزمایشگاهی</b>
۵۴.....	۱-۲ مقدمه
۵۴.....	۲-۲ مواد اولیه
۵۴.....	الف). پودر آلومینا
۵۵.....	ب). دولاپیکس CE64
۵۵.....	ج). سیلیکا سل
۵۵.....	۳-۲ ساخت دستگاه فوم‌ساز (نازل)
۵۷.....	۴-۲ تهیه دوغاب پایدار آلومینایی
۵۸.....	۵-۲ آزمایش‌های انجام شده روی دوغاب‌های ساخته شده
۵۸.....	۱-۵-۲ آزمایش رسوب
۵۸.....	۲-۵-۲ بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌ها (آزمایش‌های رئومتری)
۵۹.....	۶-۲ - بررسی عوامل موثر بر خواص قطعات فومی
۵۹.....	۱-۶-۲-۱ محاسبه بهینه درصد SDS
۵۹.....	۲-۶-۲-۲ اثر تغییر دمای پخت بر خواص فوم تهیه شده
۵۹.....	۳-۶-۲-۳ اثر تغییر درصد جامد روی فوم تهیه شده
۵۹.....	۷-۲-۷ خشک کردن قطعات
۶۰.....	۸-۲ پخت نمونه‌ها
۶۱.....	۷-۲-۷-۲ آنالیزهای انجام شده بر روی بدنه‌های نهایی
۶۱.....	۱-۷-۲-۱ محاسبه چگالی و درصد تخلخل قطعات
۶۱.....	۲-۷-۲-۲ بررسی ریزساختار و مورفولوژی تخلخل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی
۶۱.....	۳-۷-۲-۳ اندازه‌گیری استحکام فشاری
۶۳.....	فصل سوم : نتایج و مباحث

- ۱-۳- دستیابی به فرمولاسیون دوغاب با خواص بهینه ..... ۶۴
- ۱-۱-۳- بررسی پایداری دوغاب آلومینا ..... ۶۴
- ۱-۱-۱-۳- بررسی اثر pH بر پایداری دوغاب‌های بدون پراکنده‌ساز ..... ۶۴
- ۱-۱-۲- بررسی اثر همزمان پراکنده‌ساز و pH بر پایداری دوغاب‌ها ..... ۶۶
- ۱-۲- بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی ..... ۶۸
- ۱-۲-۱- تأثیر میزان پراکنده‌ساز بر رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی ..... ۶۹
- ۱-۲-۲- تأثیر درصد جامد بر رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی ..... ۷۰
- ۱-۲-۳- تأثیرافزایش بایندر رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینا ..... ۷۲
- ۱-۲-۴- آزمایش Oscillation ..... ۷۴
- ۲-۳- دستیابی به فوم آلومینا با خواص بهینه ..... ۷۷
- ۱-۲-۳- فرایند ژلاسیون و تشکیل فوم مرطوب ..... ۷۷
- ۲-۲-۳- تأثیر دمای پخت بر خواص نمونه‌های فومی ..... ۷۸
- ۳-۲-۳- تأثیر میزان سورفکتانت بر خواص فوم نسوز ساخته شده ..... ۸۱
- ۳-۲-۵- تأثیر میزان درصد جامد بر خواص فوم نسوز ساخته شده ..... ۸۴
- مراجع ..... ۹۸

## فهرست جداول

- جدول ۱-۱: مواد متخلخل و خواص مورد نیاز آنها برای کاربردهای متفاوت [۵]..... ۴
- جدول ۲-۱: خواص ساختمانی هیدروکسیدهای آلومینا [۱۶]..... ۹
- جدول ۳-۱: خصوصیات ساختاری فازهای مختلف آلومینا..... ۱۳
- جدول ۴-۱: انواع کاربرد آلومینای متخلخل با توجه به نوع تخلخل..... ۱۸
- جدول ۵-۱: انواع شابلون‌های از بین رونده و کاربردهای آنها [۱۰]..... ۳۱
- جدول ۱-۲: ویژگی‌های پودر آلومینای مورد استفاده..... ۵۴

Archive of SID



## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱: ارتباط بین اندازه تخلخل‌ها و کاربرد مواد متخلخل [۵]..... ۲
- شکل ۲-۱: شمایی از مورفولوژی انواع تخلخل [۵]..... ۳
- شکل ۳-۱: تقسیم‌بندی مواد متخلخل بر اساس اندازه حفرات [۵]..... ۵
- شکل ۴-۱: تاثیر درصد تخلخل بر برخی از خواص فیزیکی مواد متخلخل سرامیکی [۸]..... ۵
- شکل ۵-۱: روش‌های مختلف مصرفی برای تولید سرامیک‌های متخلخل [۱۰]..... ۷
- شکل ۶-۱: ساختار مولکولی بوهمیت..... ۱۱
- شکل ۷-۱: تغییرات فاز آلومینا [۱۳]..... ۱۲
- شکل ۸-۱: شمایی از کوره بلند تولید آهن..... ۲۰
- شکل ۹-۱: شمایی از کوره دوار سیمان..... ۲۱
- شکل ۱۰-۱: طرح‌واره واحد سنتز آمونیاک..... ۲۳
- شکل ۱۱-۱: طرح‌واره واحد گوگرد زدایی..... ۲۴
- شکل ۱۲-۱: ساختار سلولی تولید شده به روش حذف اسفنج پلیمری پلی‌اورتان [۷]..... ۲۸
- شکل ۱۳-۱: ساختار متخلخل هیدروکسی آپاتیتی با استفاده از مرجان دریایی [۱۰]..... ۲۹
- شکل ۱۴-۱: روش سل-ژل با دو مسیر مختلف برای تشکیل ژل [۴۷]..... ۳۱
- شکل ۱۵-۱: درصد تخلخل و میانگین اندازه حفرات به دست آمده از فرآیندهای کپی‌برداری، قالبی و فوم‌سازی مستقیم..... ۳۳
- شکل ۱۶-۱: استحکام فشاری نسبی به عنوان تابعی از چگالی نسبی [۱۰]..... ۳۴
- شکل ۱۷-۱: شماتیکی از یک نمونه نازل تزریق مستقیم گاز برای تولید فوم متخلخل..... ۳۷
- شکل ۱۸-۱: نازل تزریق مستقیم گاز به دوغاب طراحی شده توسط لوتارت و همکارانش..... ۳۹
- شکل ۱۹-۱: تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های فوم متخلخل الف) خلل و فرج ریز، ب) حفرات بزرگ..... ۴۰
- شکل ۲۰-۱: زه‌کشی فوم..... ۴۲
- شکل ۲۱-۱: وابستگی فشار بین دو حباب به عنوان تابعی از فاصله آنها..... ۴۳
- شکل ۲۲-۱: پایداری بیشتر حباب‌ها در اثر جذب سورفکتانت‌ها و بیومولکول‌ها در فصل مشترک گاز-مایع و کاهش انرژی فصل مشترک [۱۰]..... ۴۴
- شکل ۲۳-۱: منحنی تغییرات تنش برشی بر حسب سرعت برشی برای رفتارهای جریان متفاوت [۵۸]..... ۴۹
- شکل ۱-۲: شمایی از فرآیند بررسی خواص دوغاب‌های آلومینایی..... ۵۸

## فصل ۱ مروری بر منابع مطالعاتی

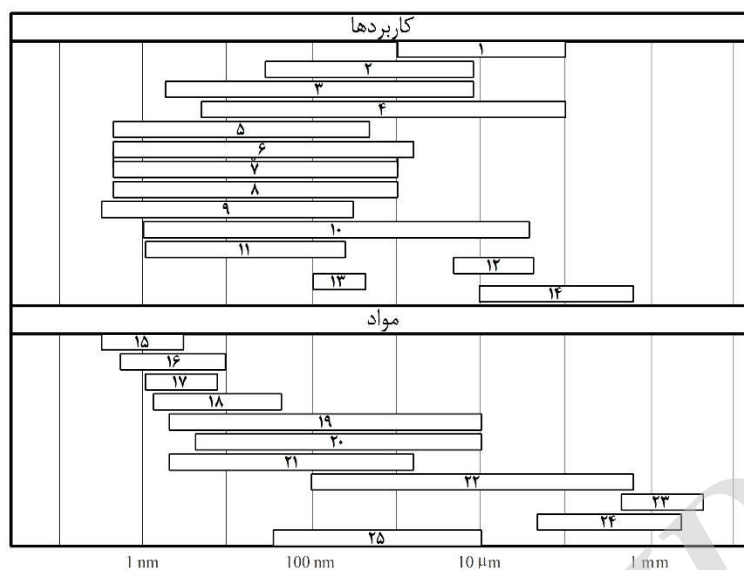
Archive of SID

## ۱-۱ مواد متخلخل

به موادی که خصوصیات آنها در تقابل با وزن مواد بهینه شده باشد، مواد متخلخل گفته می‌شود. بسیاری از خصوصیات فیزیکی نظیر چگالی، رسانایی گرمایی، استحکام و غیره به میزان تخلخل بستگی دارد. کنترل دقیق ریزها، به ویژه در کاربردهای صنعتی مانند طراحی کاتالیست‌ها، مواد جاذب صنعتی، غشاهای مواد ساختمانی و سرامیک‌ها اهمیت زیادی دارد. همچنین تخلخل یکی از عواملی است که در واکنش‌پذیری شیمیایی و برهمکنش‌های فیزیکی جامدات با گازها و مایعات تاثیر می‌گذارد. از این رو مواد متخلخل به طور بالقوه در کاربردهای سازه‌ای و غیر سازه‌ای به کار برده می‌شوند [۱، ۲].

اصطلاح ماده متخلخل به طور کلی به جامدی اطلاق می‌شود که دارای ۹۵-۲۰٪ تخلخل باشد. ساختار جامدهای متخلخل به دو گروه سه بعدی یا دو بعدی تقسیم‌بندی می‌شود. ساختارهای دو بعدی یا لانه زنبوری‌ها دارای سلول‌های منشوری تو خالی می‌باشند که به طور موازی آرایش یافته‌اند. ساختارهای نیز سه بعدی شامل بدنه‌های متخلخل فومی هستند که از چینش منظم حفره‌های چند بعدی به وجود آمده‌اند. جامدات متخلخل شامل فلزات، پلیمرها و سرامیک‌ها می‌شوند که هر کدام خواص و کاربردهای ویژه‌ای دارند. به خاطر برخی خواص رو به گسترش سرامیک‌های متخلخل نظیر پایداری و استحکام دما بالا، فعالیت کاتالیستی، مقاومت به سایش و مقاومت به خوردگی در شرایط کاربردی سخت‌تری نسبت به فلزات، شیشه‌ها و پلیمرهای متخلخل مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳، ۴].

مواد متخلخل بر اساس شاخص‌های متفاوتی تقسیم‌بندی می‌شوند. این معیارها شامل شکل، هندسه، اندازه و نوع حفره‌های موجود در این قطعات و در نتیجه کاربرد آنها و یا جنس و خواص و روش ساخت این مواد می‌باشند. شکل ۱-۱ ارتباط بین اندازه تخلخل‌ها و کاربرد مواد متخلخل را نشان می‌دهد [۵].



- |  |   |                     |
|--|---|---------------------|
| ۱۹. شیشه متخلخل<br>(روش جداسازی فازی)                  | ۱۱. تثبیت یون                                 | ۱. فیلتراسیون       |
| ۲۰. شیشه متخلخل<br>(روش سل-ژل)                         | ۱۲. تثبیت باکتری                              | ۲. میکروفیلتراسیون  |
| ۲۱. غشاهای سرامیکی متخلخل                              | ۱۳. سنسور رطوبت                               | ۳. اولترافیلتراسیون |
| ۲۲. مواد متخلخل تفجوشی شده<br>(سرامیکها، فلزات و غیره) | ۱۴. فیلتراسیون گازی                           | ۴. کروماتوگرافی ژل  |
| ۲۳. فومهای سرامیکی                                     | ۱۵. زئولیتها                                  | ۵. اسمز معکوس       |
| ۲۴. غربالهای فلزی                                      | ۱۶. خاک رس                                    | ۶. دیالیز           |
| ۲۵. خاک سیلیسی   | ۱۷. کربن فعال و غربالهای<br>مولکولی مزومتخلخل | ۷. الکترودیالیز     |
|  | ۱۸. اگزوزها                                   | ۸. تعویض یون        |
|  |   | ۹. جذب              |
|  |   | ۱۰. کاتالیست        |

شکل ۱-۱: ارتباط بین اندازه تخلخلها و کاربرد مواد متخلخل [۵]

در سالهای اخیر تولید و کاربرد سرامیکهای متخلخل روند رو به رشدی داشته است که این امر به دلیل خواصی مانند سطح ویژه بالا، عبورپذیری زیاد، چگالی کم، گرمای ویژه پایین و عایق حرارتی بودن چنین بدنههایی می باشد. خواص ذکر شده برای برخی کاربردها مثل پایه کاتالیست، فیلتر مذاب فلزات، فیلتر گاز، آسترهای دیرگداز کوره، مبدل های حرارتی و ایمپلنت های متخلخل برای بیومواد ضروری است. اگرچه توانایی های بالقوه سرامیک های متخلخل به دلیل مشکلاتی نظیر تردی، سختی کنترل اندازه حفرات، فقدان فرآیندهای پیوسته، استفاده از کمک فرآیندها که چقرمگی را محدود می کند، عدم حضور یک مدل ارتباطی ساختار حفره با خواص مکانیکی و غیره به طور کامل مورد بهره برداری قرار نگرفته است [۵-۷].

## ۱-۱-۱ ویژگی مواد متخلخل

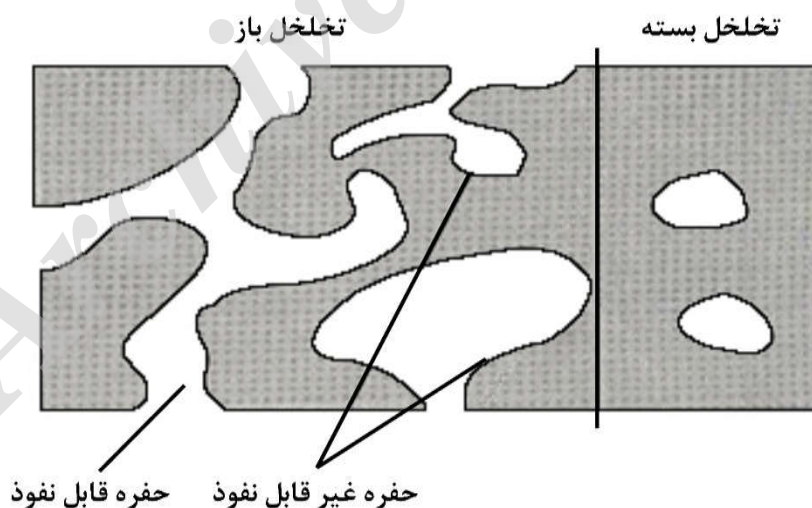
به طور کلی خواص اجسام متخلخل تحت تاثیر سه فاکتور اساسی زیر می‌باشند [۷]:

۱- ویژگی‌های جامد (شامل خواص مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و ...) که بدنه متخلخل از آن ساخته می‌شود؛

۲- ساختار، شکل حفره‌ها و نحوه اتصال آنها؛

۳- چگالی نسبی فوم  $\bar{\rho}/\rho_s$ ، که  $\bar{\rho}$  چگالی فوم و  $\rho_s$  چگالی جامدی است که فوم از آن ساخته می‌شود.

این دسته از مواد در مقیاس میکروسکوپی دارای دو نوع تخلخل باز<sup>۱</sup> و بسته<sup>۲</sup> می‌باشند. تخلخل‌های باز با بیرون ماده در ارتباط بوده و تخلخل‌ها و فاز جامد در سه جهت به یکدیگر متصل می‌باشند. تخلخل‌های بسته به سبب حضور لایه‌های جامد از سطوح بیرونی ماده جامد، جدا شده‌اند و ممکن است حاوی سیال باشند. حفرات قابل نفوذ<sup>۳</sup> نیز تخلخل‌های بازی هستند که به دو سمت قطعه متخلخل راه دارند. در شکل ۱-۲ انواع تخلخل نشان داده شده است [۵].



شکل ۱-۲: شمایی از مورفولوژی انواع تخلخل [۵]

<sup>1</sup> Open pores  
<sup>2</sup> Closed pores  
<sup>3</sup> Penetrating

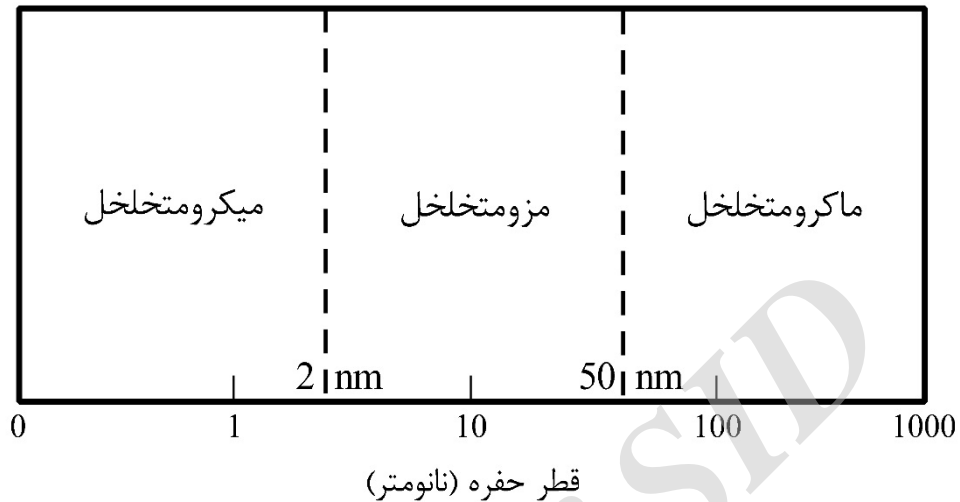
برای اغلب کاربردهای صنعتی نظیر فیلترها، بیوراکتورها، کاتالیست‌ها و غیره، مواد متخلخل با تخلخل -های باز مورد نیاز می‌باشند [۸]. از مواد متخلخل با تخلخل بسته، عموماً در عایق‌های حرارتی، صوتی و یا سازه‌های سبک استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که ایجاد تخلخل در ماده باعث تغییر در خواص آن می‌شود که کاهش چگالی و افزایش سطح ویژه از اساسی‌ترین این تغییرات هستند. جدول ۱-۱ خواص مواد متخلخل را در مورد کاربردهای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱: خواص مواد متخلخل و خواص مورد نیاز آنها برای کاربردهای متفاوت [۵]

سنسور	توزیع کننده گاز	بیوراکتور	کاتالیست	فیلتر	% تخلخل باز
۳۰ <	۳۰ <	۳۰ <	۳۰ <	۳۰ <	
بسته به کاربرد	< میکرون	برای باکتری ۳۰-۵ میکرون؛ برای آنزیم‌ها ۱۰۰-۱۰ نانومتر	بسته به کاربرد متفاوت	بسته به کاربرد متفاوت	اندازه تخلخل
باریک	باریک	باریک (بسته به کاربرد دو گانه)	باریک (بسته به کاربرد دو گانه)	باریک	توزیع اندازه تخلخل
< ۱ متر مربع بر گرم	بسته به اندازه تخلخل	< ۱ متر مربع بر گرم	۱-۲۰۰۰ متر مربع بر گرم	بسته به کاربرد	سطح ویژه به ازای واحد حجم
بسته به کاربرد	بالا	بسته به کاربرد	بسته به کاربرد	بالا	عبورپذیری
بسته به کاربرد	بالا، بسته به کاربرد	بالا	بسته به کاربرد	بالا	استحکام مکانیکی
خواص سطح مناسب	-	پتانسیل سطحی مناسب	عملکرد کاتالیزوری	به لحاظ شیمیایی مقاوم	سایر موارد

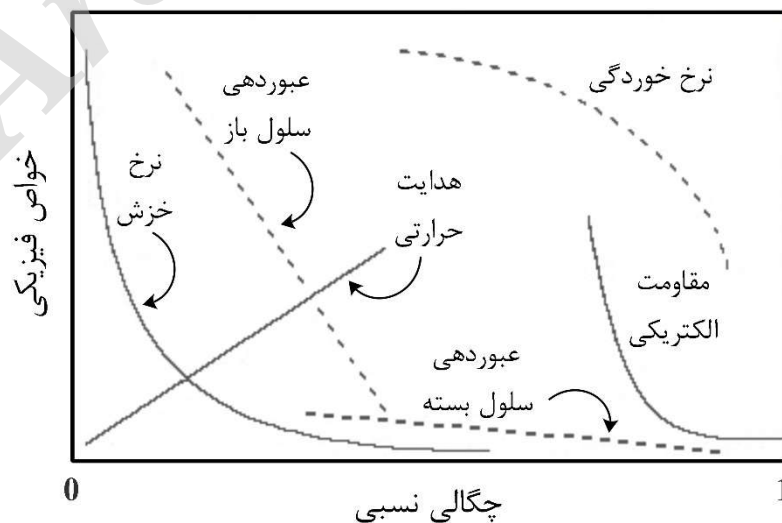
کاربرد مواد متخلخل علاوه بر نوع حفره‌ها متأثر از عوامل دیگری مانند اندازه، توزیع اندازه، شکل حفره‌ها و روش‌های تولید قطعات نیز می‌باشد. طبقه‌بندی مواد متخلخل براساس اندازه و شکل حفره مناسب‌ترین معیار برای بیان نحوه ساخت، تولید و کاربرد آنها می‌باشد. مواد متخلخل دارای اندازه حفرات از محدوده نانومتری تا میلی‌متری می‌باشند که بسته به کاربرد گاهی توزیع اندازه حفرات باریک، وسیع یا یک توزیع دوگانه مورد نیاز بوده و روش تولید نیز تغییر می‌کند. اتحادیه بین‌المللی شیمی محض و کاربردی (IUPAC)

فهرست اطلاعاتی و واژه‌ای برای مواد متخلخل (تقسیم‌بندی مواد متخلخل براساس اندازه حفره) پیشنهاد کرده که در شکل ۳-۱ آمده است [۹, ۱].



شکل ۳-۱: تقسیم‌بندی مواد متخلخل بر اساس اندازه حفرات [۵]

همان‌طور که ذکر شد مواد متخلخل به دلیل داشتن حفرات دارای چگالی پایین، سطح ویژه و عبورپذیری بالایی دارند. بدیهی است که با افزایش درصد تخلخل، چگالی نسبی کاهش می‌یابد. علاوه بر چگالی پایین، این دسته از مواد هدایت حرارتی کمی نیز دارند ( $1-10 \text{ W/mK}$ ). در شکل ۴-۱ تاثیر تخلخل بر خواص فیزیکی مواد متخلخل مشاهده می‌شود [۸].



شکل ۴-۱: تاثیر درصد تخلخل بر برخی از خواص فیزیکی مواد متخلخل سرامیکی [۸]

## ۲-۱-۱ مروری بر روش‌های مختلف ساخت مواد متخلخل

به دلیل ضرورت نیاز به خواص متفاوت سرامیک‌های متخلخل، استفاده از روش‌های مختلف ساخت را ایجاب می‌کند. این امر منجر به ایجاد روش‌های متفاوت ساخت سرامیک‌ها در دنیا شده است که این روش‌ها به طور عمده به سه دسته تقسیم می‌شوند [۷, ۱۰]:

۱- روش کپی‌برداری<sup>۱</sup> قدیمی‌ترین روش است که بر پایه غوطه‌ور نمودن یک ساختار متخلخل در دوغاب سرامیکی برای تولید بدنه متخلخل سرامیکی با حفظ ساختار متخلخل اولیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- دومین گروه بر اساس به دام انداختن<sup>۲</sup> افزودنی‌هایی به شکل دانه‌های کروی در دوغاب است. بسته به میزان افزودنی، تخلخل‌ها به صورت بسته یا باز خواهند بود.

۳- گروه آخر بر پایه تبدیل دوغاب سرامیکی به فوم از طریق وارد نمودن گاز به صورت مکانیکی و یا ایجاد گاز به صورت درجا در دوغاب می‌باشد که منجر به تولید گسترده‌ترین محدوده ساختارهای متخلخل و متنوع‌ترین خواص می‌شوند.

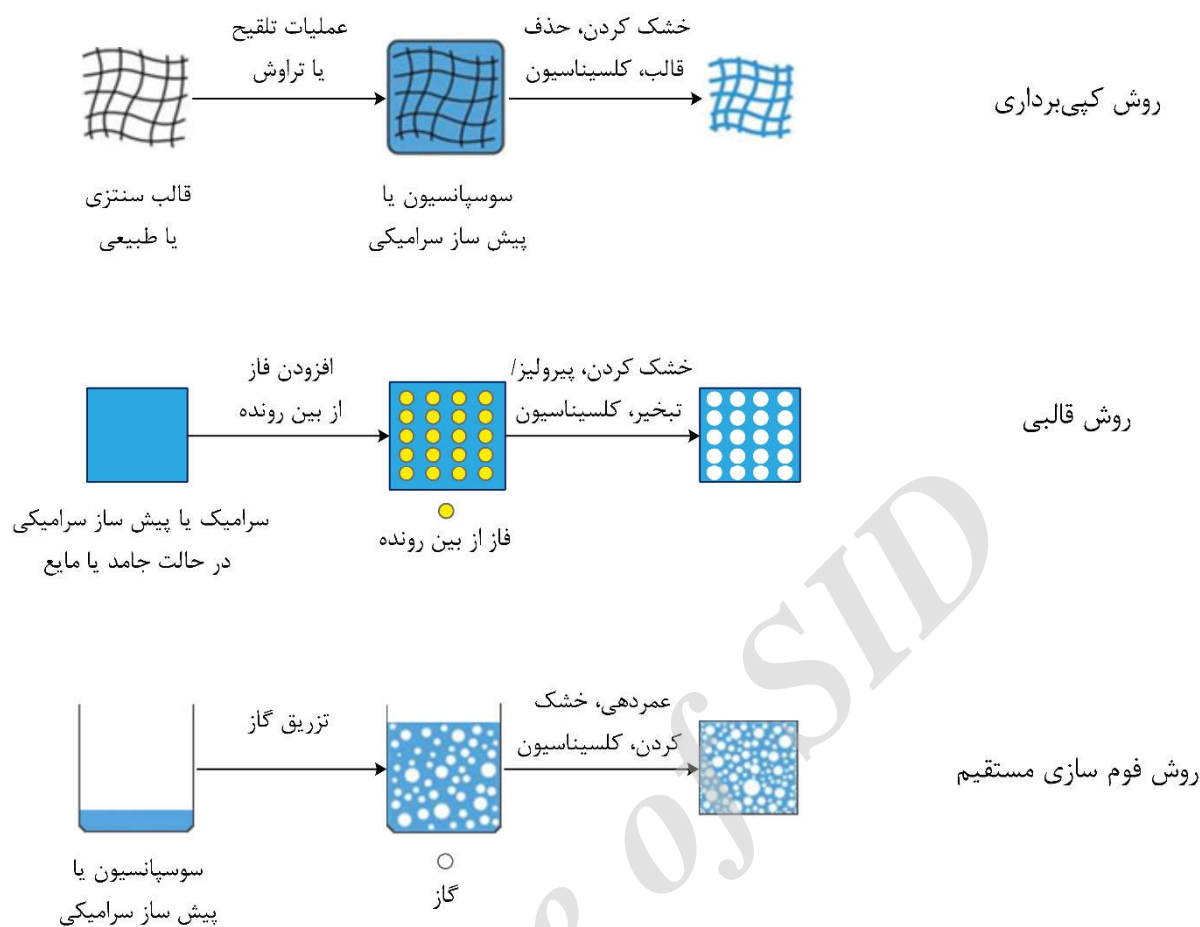
در شکل ۱-۵ خلاصه‌ای از دسته‌بندی فوق ارائه شده که در ادامه به طور مفصل به شرح آنها پرداخته می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Replica

<sup>۲</sup> Sacrificial template method





شکل ۱-۵: روش‌های مختلف مصرفی برای تولید سرامیک‌های متخلخل [۱۰]

## ۲-۱ آلومینا

اکسید آلومینیم<sup>۱</sup>، ترکیب شیمیایی آلومینیم و اکسیژن با فرمول شیمیایی  $Al_2O_3$  است. این ترکیب، فراوان‌ترین نوع اکسید آلومینیم است و به نام اکسید آلومینیم III شناخته می‌شود. بسته به نوع کاربرد یا شکل، آلومینا<sup>۲</sup>، آلوکساید، آلوکسایت یا آلودوم نامیده می‌شود. اکسید آلومینیم معمولاً به شکل کریستالی آلفا آلومینا<sup>۳</sup> متبلور می‌شود که ساختار کریستالی کانی کوراندوم را تشکیل می‌دهد و برخی از انواع آن، سنگ‌های قیمتی یاقوت و یاقوت کبود می‌باشند. از مهم‌ترین کاربردهای اکسید آلومینیم، ماده اولیه تولید فلز

<sup>1</sup> Aluminiumoxide

<sup>2</sup> Alumina

<sup>3</sup>  $\alpha-Al_2O_3$

آلومینیم، ساینده‌ها و دیرگدازها است. ۹۰٪ اکسید آلومینیم تولید شده در جهان برای تولید فلز آلومینیم و ۱۰٪ بقیه برای مواردی چون کاتالیست‌ها، ساینده‌ها، نسوزها، عایق‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱، ۱۲].

در سال ۱۷۶۱ شرکت فرانسوی گیتون<sup>۱</sup> نام آلومین را بر اساس آلوم تعریف نمود [۱۳]. کلمه آلومین توسط دِ مورویو<sup>۲</sup> در سال ۱۷۸۱ میلادی به عنوان نام عمومی برای خاک‌های پایه آلومینیوم پیشنهاد شد. این کلمه در انگلستان آلومینا تلفظ می‌شد [۱۴]. این ماده در سال ۱۷۸۷ میلادی توسط لاوزیه<sup>۳</sup>، به عنوان اکسید ناشناخته معرفی شد. گرویل<sup>۴</sup> در سال ۱۷۹۸ میلادی، مینرالی از هند که دارای ترکیب  $Al_2O_3$  بود را مورد بررسی قرار داد و نام آن را کراندوم گذاشت [۱۳].

آلومینا در مقیاس صنعتی از مینرال بوکسیت به وسیله فرآیند بایر در سال ۱۹۷۶ میلادی تولید شد. این کانی شامل هیدروکسیدهای آلومینیم از قبیل گیبسیت، بوهمیت، دیاسپور و ناخالصی‌هایی همچون سیلیس، اکسید آهن و اکسید تیتانیوم است که در سال ۱۸۲۱ میلادی توسط برتیر<sup>۵</sup> کشف شده بود [۱۴]. فرآیند بایر شامل کانی‌شویی توسط سود سوزآور و تشکیل رسوب هیدروکسید آلومینیوم می‌باشد که در اثر حرارت‌دهی به آلومینا تبدیل می‌شود. در سال ۲۰۰۱ میلادی، مقدار ۴۸۴۸۸۰۰۰ تن ماده اولیه آلومینا (هیدروکسید) تولید و به فازهای گوناگون آلومینا تبدیل شد [۱۵]. در بین فازهای مختلف آلومینا، فاز آلفا موارد کاربرد تکنولوژیکی و صنعتی گسترده‌ای را به خود اختصاص داده و پس از آن فاز گاما در موارد کاربردی پوششی و استفاده در کاتالیست‌های صنعتی قرار دارد.

---

<sup>1</sup> Guyton

<sup>2</sup> De Morveau

<sup>3</sup> Lavoisier

<sup>4</sup> Greville

<sup>5</sup> Bertier

## ۱-۲-۱ ساختارهای آلومینا

آلومینا به دلیل اختلاف در ترکیب شیمیایی و ساختار کریستالی، در اشکال گوناگونی می‌باشد. بیش از ۲۵ فاز آلومینا در سال‌های اخیر کشف و شناسایی شده است و در حالت کلی این فازها به دو گروه هیدروکسیدی و اکسیدی تقسیم می‌گردد [۱۴].

### ۱-۱-۲-۱ هیدروکسیدهای آلومینیوم

در سال ۱۹۳۰، کمپانی آلکوا نامگذاری هیدرات‌های آلومینیوم را با استفاده از حروف یونانی ارائه داد. در این سیستم، انتخاب ترتیب عبارات یونانی بر اساس فراوانی نسبی فاز در طبیعت می‌باشد. گیبسیت آلفا آلومینای تری‌هیدراته، بوهمیت آلفا آلومینای مونوهیدراته، بایریت بتا آلومینای تری‌هیدراته و دیاسپور بتا آلومینای مونوهیدراته نامیده شد [۱۶]. خواص ساختمانی هر یک از این هیدروکسیدها در جدول ۲-۱ نشان داده شده است.

جدول ۲-۱: خواص ساختمانی هیدروکسیدهای آلومینا [۱۶]

کانی	فرمول	سیستم کریستالی	تعداد مولکول‌ها در هر سلول واحد	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )
گیبسیت	Al(OH) <sub>3</sub>	مونوکلینیک	۴	۲٫۴۲
بایریت	Al(OH) <sub>3</sub>	تری‌کلینیک	۲	۲٫۵۳
نرداستراندیت	Al(OH) <sub>3</sub>	مونوکلینیک	۴	۳٫۰۱
دیاسپور	AlOOH	ارتورومبیک	۲	۳٫۰۱
بوهمیت	AlOOH	ارتورومبیک	۲	۳٫۴۴

روش تهیه هر یک از این فازها به شرح زیر می‌باشد؛

### ۱-۱-۱-۲-۱ گیبسیت

فاز گیبسیت از روش معمول فرآیند بایر قابل تهیه می‌باشد که شامل مراحل زیر است [۱۷]:

(۱) خروج ناخالصی با استفاده از روش جدایش فیزیکی،

<sup>1</sup> Alcoa

۲) فرایند هیدروترمال بوکسیت در محلول هیدروکسید سدیم در فشار ۰/۵ مگاپاسکال و دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد. به این ترتیب، آلومینیوم به صورت آلومینات سدیم در آمده و ناخالصی‌هایی از جمله سیلیکا، تیتانیا و اکسید فریک به صورت غیر محلول در می‌آید.

۳) محلول پس از سرد شدن، فیلتر شده و ذرات گیبسیت شروع به جوانه‌زنی می‌کنند.

#### ۲-۱-۱-۲-۱ بایریت

فاز بایریت را می‌توان از محلول آلومینات سدیم در دمای ۳۵-۳۰ درجه سانتی‌گراد به دست آورد ولی با این روش، تولید بایریت خالص مشکل می‌باشد. همچنین با استفاده از ماده آلومینیومی مانند نیترات یا کلراید آلومینیوم به همراه آب در دمای زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌توان بایریت را به دست آورد. بایستی توجه کرد pH کمتر از ۹ نشود [۱۸].

#### ۳-۱-۱-۲-۱ نردستراندیت

ون نورستراند<sup>۱</sup> و همکاران، الگوی پراش اشعه ایکس ژلی که از کلراید آلومینیوم یا نیترات آلومینیوم در pH بین ۷/۵-۹ به دست آمده بود را شناسایی و پیشنهاد دادند ماده به دست آمده سومین فاز  $Al(OH)_3$  است که ساختار مونوکلینیک دارد [۱۹].

#### ۴-۱-۱-۲-۱ دیاسپور

منبع اصلی این فاز در یونان و رومانی می‌باشد. ویسز<sup>۲</sup> برای اولین بار دیاسپور را از طریق واکنش شیمیایی به دست آورد. به این صورت که تحت شرایط هیدروترمال هیدروکسید آلومینیوم با آب و در حضور جوانه‌های دیاسپور، کریستال‌های دیاسپور به وجود آمدند.

<sup>1</sup> Van Nordstrand

<sup>2</sup> Weisz

## ۵-۱-۱-۲-۱ بوهمیت

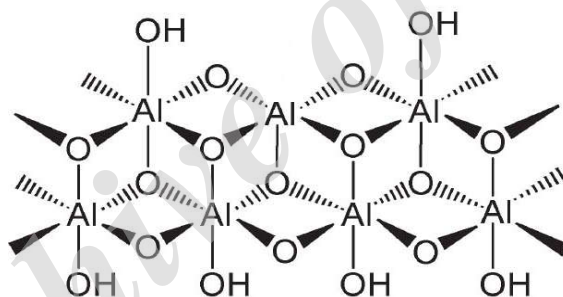
دارای ساختار کریستالی لایه‌ای و تقارن ارتورومبیک است که آلومینیوم‌های هشت وجهی‌ها به وسیله ۴ اکسیژن و دو گروه هیدروکسیلی احاطه شده است. ذکر این نکته ضروری است که پیوستگی لایه‌ها در جهت محور  $Y$  با پیوند هیدروژنی بین دو لایه و در جهت محور  $Z$  به صورت زیگزاگ شکل می‌گیرد. در حقیقت مولکول‌های آب به صورت ساندویچی بین لایه‌های بوهمیت است.

در حالت کلی سه روش برای تهیه فاز بوهمیت وجود دارد [۲۰].

۱- رسوب از محلول آلومینات سدیم با اسید یا محلول نمک آلومینیوم به همراه قلیا،

۲- تهیه بوهمیت در اثر هیدرولیز آلکوکسیدها،

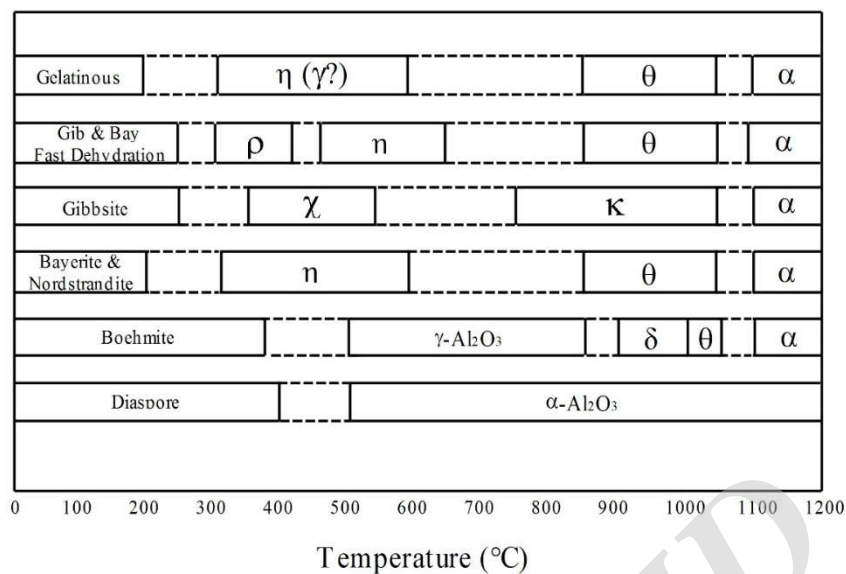
۳- تهیه بوهمیت از هیدروکسیدهای ۳ آبه آلومینیوم و کلسینه کردن در اتمسفر تحت فشار.



شکل ۱-۶: ساختار مولکولی بوهمیت

## ۲-۱-۲-۱ اکسیدهای آلومینیوم

تغییرات فازی ترکیبات هیدروکسیدی و اکسیدی آلومینیوم در شکل ۱-۷ نشان داده شده است. البته بایستی این نکته را در نظر داشت که عواملی مانند نوع مواد اولیه اندازه، شکل و میزان ناخالصی بر روی دمای تبدیلات فازی تأثیرگذار است. ناحیه پایداری هر فاز در محدوده وسیعی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱-۷: تغییرات فازی آلومینا [۱۳]

لیپن ۱ و استرگردا ۲ فازهای آلومینا را بر اساس دمایی که از هیدروکسید آلومینیوم به دست می‌آیند، به سه گروه تقسیم نموده‌اند [۱۳].

#### ۱-۲-۱-۲-۱ آلومینای دما پایین

این گروه از فازهای آلومینا در دمای زیر ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست می‌آیند و شامل آلومیناهای  $\rho$ ،  $\eta$  و  $\chi$  می‌باشد که مهم‌ترین فاز این گروه، گاما آلومینا است. گاما آلومینا دارای ساختار تتراگونال بوده و موقعیت‌های هشت وجهی آن به طور کامل توسط اکسیژن و جاهای خالی چهار وجهی به طور تصادفی پر شده است. این امر موجب شده گاما آلومینا طبیعت جاذب داشته باشد. تبدیل بوهمیت به گاما در دمای ۴۰۰- ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته و تا دمای حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد فاز غالب است. خصوصیات ساختاری فازهای مختلف آلومینا در جدول ۱-۳ مشاهده می‌شود.

<sup>1</sup>Lippen  
<sup>2</sup>Sterggerda

جدول ۱-۳: خصوصیات ساختاری فازهای مختلف آلومینا

فاز	Chi	Eta	Gamma	Delta	Iota	Thelta	Kappa
سیستم کریستالی	مکعبی	مکعبی	تتراگونال	تتراگونال	ارتورومبیک	مونوکلینیک	ارتورومبیک
a	۷٫۹۵	۷٫۹	۷٫۹۵	۷٫۹۶	۷٫۷۳	۵٫۶۳	۸٫۴۹
b	-	-	۷٫۹۵	۷٫۹۶	۷٫۷۸	۲٫۹۵	۱۲٫۷۳
c	-	-	۷٫۷۹	۲۳٫۴۷	۲٫۹۲	۱۱٫۸۶	۱۳٫۳۹
دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )	۳	۲٫۵-۳٫۶	۳٫۲	۳٫۲	۳٫۷۱	۳٫۵۶	۳٫۳

### ۲-۲-۱-۲-۱ آلومینای دما بالا

این فازها در دماهای بین ۸۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به دست آمده و گروه دلتا نامیده می‌شوند. آلومیناهای  $\delta$ ،  $\kappa$  و  $\theta$  جزء این گروه محسوب می‌شوند که نسبت به گروه گاما از نظم کریستالی بیشتری برخوردار می‌باشند.

### ۳-۲-۱-۲-۱ آلفا آلومینا

آلفا آلومینا پایدارترین و سخت‌ترین فاز آلومینا می‌باشد. مدل ساختاری آلفا آلومینا ابتدا توسط براگ<sup>۱</sup> در سال ۱۹۱۶ میلادی و به دنبال آن توسط پالینگ<sup>۲</sup> و هندریک<sup>۳</sup> در سال ۱۹۲۵ ارائه شد. این ماده به وفور در طبیعت با نام کراندوم یافت می‌شود. ساختار کریستالی آلفا آلومینا سلول هگزاگونال با ۶ اتم آلومینا و برای هر سلول واحد هگزاگونال با پارامترهای شبکه‌ای  $a$  (۴٫۷۵۴ °A) و  $b$  (۱۲٫۹۸۲ °A) می‌باشد. روش معمول سنتز آلفا آلومینا، عملیات حرارتی پودر آلومیناهای انتقالی در درجه حرارت‌های نسبتاً بالا در حدود ۱۲۰۰-۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۲۱].

<sup>1</sup>Bragg  
<sup>2</sup>Pauling  
<sup>3</sup>Hendricks

## ۱-۲-۲ کاربردهای آلومینا

در طول تاریخ بشر، ترکیبات آلومینایی دارای کاربردهای متعددی بوده است. تقریباً ۴۰۰۰ سال پیش مصری‌ها و بابلیان، ترکیبات آلومینیوم را در صنایع دارویی و شیمیایی مختلف استفاده می‌کردند.

اکسید آلومینیم به دلیل داشتن نقطه ذوب بالا، عایق بودن و مقاومت شیمیایی خوب به عنوان بلوک و لوله‌های نسوز، غلاف ترموکوپل و بوته ذوب مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. آلومینا با اندازه متوسط دانه‌های کریستالی بزرگتر از ۲۰۰ میکرون و فاز شیشه کم در کاربردهای فوق مطمئن‌تر نیز عمل می‌کند. به همین دلیل ۲-۴٪ ترکیباتی چون  $\text{CaO-SiO}_2$  و یا  $\text{CaO-MgO-SiO}_2$  به آلومینا اضافه شده که در دمای پخت، ایجاد فاز مایع نموده و زمینه رشد دانه را ایجاد می‌نمایند [۲۲].

نسوزهای آلومینایی به علت پایداری حرارتی و شیمیایی خوب در هر دو محیط قلیایی و اسیدی کاربرد دارند. به عنوان مثال نسوزهای زاک که شامل ۵۰٪ اکسید آلومینیم، ۴۰٪ زیرکونیا و ۱۰٪ سیلیس است، جهت وان‌های ذوب شیشه استفاده می‌شود. آلومینا به دلیل مقاومت دی‌الکتریک نسبتاً بالا و تلفات دی‌الکتریک پایین در کاربردهای الکترونیکی به عنوان پایه مدارها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۳]. شرایط لازم برای این پایه‌ها عبارتند از:

۱- هدایت حرارتی بالا،

۲- مقاومت الکتریکی بالا و اتلاف دی‌الکتریک کم،

۳- پایداری بالا در برابر ولتاژ،

۴- پایداری شیمیایی،

۵- زبری کم سطح،

۶- انعکاس حداقل تشعشعات،

۷- پایداری در برابر حرارت،

۸- استحکام مکانیکی،

۹- قیمت پایین.



هدایت حرارتی برای آلومینا بدون تخلخل و تک کریستال نسبتاً بالا بوده، به طوری که قابلیت برش و یا سوراخ شدگی به اندازه دلخواه با لیزر را دارد. هدایت الکتریکی آلومینا با افزایش دما افزایش یافته و در دماهای بالای ۸۳۰ درجه سانتی‌گراد هدایت یونی به هدایت الکترونی تبدیل می‌شود. با حضور ناخالصی‌های قلیایی در محدوده ۴۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، مقاومت ویژه آلومینا به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نمونه‌های ریز دانه با عیوب بالا مقاومت الکتریکی بالاتر دارند. هر اندازه آلومینا خالص‌تر و فاز شیشه‌ای کمتری داشته باشد، عایق الکتریکی بهتری خواهد بود چرا که فاز شیشه با داشتن یون‌های قلیایی و ایجاد پیوندهای ضعیف مقاومت الکتریکی را کاهش می‌دهند [۲۴].

آلومینا یک ماده دیامغناطیس یا غیرمغناطیسی است و عایق در برابر جرقه نیز محسوب می‌شود. این سرامیک می‌تواند تخلیه الکتریکی حدود چند صد هزار ولت که فشار حدود ۱۰ مگا پاسکال را ایجاد می‌نماید برای چندین ساعت تحمل نموده و از طرفی به علت استحکام پیچشی خوب برای کاربردهایی چون پایه شمع اتومبیل، پرسلان‌ها و مقره‌های الکتریکی استفاده می‌شود. آلومینای بدون تخلخل که از شفافیت خوبی برخوردار است جهت ساخت لوله‌های لامپ قوس الکتریکی چون لامپ بخار سدیم مورد استفاده قرار می‌گیرد که بازده آن بسیار بالاتر از لامپ‌های جیوه‌ای و یا فلورسنت می‌باشد چرا که قابلیت کار در دماهای بالاتر را داشته و بیشتر نور آن در طیف مرئی قرار می‌گیرد [۲۵].

آلومینا به جهت دارا بودن مقاومت به خوردگی بالا در برابر مایع غضروفی، تحمل بار خوب، فعالیت مورد نیاز متابولیکی، خنثی بودن، زیست سازگاری خوب (سازگار با فیزیولوژی بدن و جوش خوردن با استخوان)، مقاومت به سایش بالا (میزان سایش آن حدود ۱/۱ فلزات می‌باشد)، ضریب اصطکاک کم و آبدوست بودن (شکل‌گیری یک لایه هیدراته بسیار نازک به ضخامت ۵۰ آنگستروم که بسیار سازگار با بدن می‌باشد) به عنوان ایمپلنت (قطعات بیوسرامیکی) کاربرد دارد. در قسمت‌هایی که استحکام مطرح نباشد استفاده از آلومینای متخلخل (با اندازه بزرگ‌تر از ۱۰۰ میکرون) امکان رشد بافت‌های بدن در داخل آن وجود داشته که سازگاری بهتری ایجاد می‌نماید (ران و دندان). البته سرامیک‌های بر پایه زیرکونیا Y-TZP و Mg-TZP به

جهت استحکام و چقرمگی بالاتر اولویت بالاتری نسبت به آلومینا دارند. از جمله سرامیک‌های کریستالی مناسب برای دندان آلومینا می‌باشد [۲۶].

برای ساخت قطعات بیوسرامیکی از مخلوط پودر آلومینا با یک ماده افزودنی چون متیل سلولز استفاده می‌کنند. سپس این مخلوط از لوله‌های باریک کاربرد تنگستن عبور داده شده تا فرم مورد نظر را به خود بگیرد (میله‌ای، ورقه‌ای، لوله‌ای). متیل سلولز نقش افزایش پلاستیسیته و شکل‌پذیری آلومینا را دارد. اشکال فرم داده شده مورد عملیات خشک کردن و سپس پخت تا دمای ۱۶۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. سرامیک‌های تک کریستال برای کاربردهای بیوسرامیکی اولویت دارند.

آلومینا از یک طرف به دلیل سازگاری بالا و آب‌بندی خوب با فلزات و از طرف دیگر با داشتن مقاومت به خوردگی بالا به عنوان اجزای پمپ در صنایع شیمیایی کاربرد دارد. آلومینا و اکسید تیتانیوم به جهت مقاومت به سایش خوب و داشتن سطحی صیقلی و ضد اصطکاک به عنوان هدایت کننده الیاف نساجی و تغییر جهت آنها در صنعت نساجی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل ضد سایش بودن و سختی بالا به عنوان ساینده چون گلوله‌های آسیا و سمباده‌ها، ابزارهای برشی، سیم‌های هدایت کننده در حنجره‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علت خواص خوب ترمودینامیکی به عنوان تیغه تراش استفاده می‌شود زیرا تراشنده‌های فلزی در سرعت‌های بالا به دلیل افزایش شدید دما، نرم شده و دفرمه می‌شوند [۲۷].

آلومینا نقش مهمی در صنعت تولید سرامیک‌های ظریف داشته که می‌توان به مواردی چون ساخت لعاب‌ها به خصوص به شکل هیدراته، پوشش بر روی ساگارهای مورد استفاده در کوره پخت سرامیک‌ها جهت جلوگیری از چسبیدن بدنه‌های سرامیکی، به عنوان پر کننده در بدنه‌های سرامیکی ظریف (ظروف خانگی و سرامیک‌های بهداشتی) جهت افزایش خواص مکانیکی و تولید بدنه‌های نازک‌تر، کاهش تغییر شکل قطعه در ضمن پخت، پخت سریع‌تر سرامیک‌ها بدون ترک خوردگی، بهبود رنگ محصول، افزایش مقاومت شیمیایی و الکتریکی، کاهش قابل توجه خطر بیماری سیلیکوز با جایگزینی سیلیس توسط آلومینا و سایر موارد را نام برد [۲۸].

### ۳-۲-۱ آلومینای متخلخل

با وجود این که در دهه‌های گذشته وجود تخلخل در سرامیک‌های صنعتی به عنوان یک مشکل شناخته می‌شد، ولی افزایش روز افزون کاربردهای آلومینای متخلخل در سال‌های اخیر به خصوص در مورد محیط‌های شامل دمای بالا، ساییدگی گسترده و مواد خورنده موجب شده است که تولید این گونه مواد بیشتر مورد توجه قرار گیرد [۲۹، ۳۰]. استفاده از آلومینای متخلخل به دلیل مزایای این مواد به خصوص دمای ذوب بالا، خواص الکتریکی متناسب، مقاومت بالای خوردگی و سایشی می‌باشد. همچنین وجود خلل و فرج‌های پر شده از هوا منجر می‌شود تا این مواد دارای هدایت حرارتی پایین، مساحت سطح بالا، چگالی کم، نفوذپذیری کنترل شده و ثابت دی الکتریک پایین باشند [۳۱، ۳۲]. البته این گونه خصوصیات آلومینای متخلخل با کنترل ترکیب بندی و ساختار میکرومتخلخل آنها قابل تنظیم می‌باشند. تغییر در نوع تخلخل به صورت بسته یا باز، اندازه حفرات و مورفولوژی حفرات می‌تواند خواص آلومینای متخلخل را دستخوش تغییر نماید. تمامی این خصوصیات به صورت مستقیم به فرآیند تولید آلومینا و به خصوص ایجاد تخلخل در ساختار آن بستگی دارد [۳۳، ۳۴].

### ۴-۲-۱ کاربرد آلومینای متخلخل

آلومینای متخلخل به دلیل خواص منحصر به فردی نظیر سطح ویژه بالا، نفوذپذیری زیاد، چگالی کم، گرمای ویژه پایین و عایق حرارتی بودن در زمینه‌های متفاوت کاربردهای زیادی دارند. برخی از این کاربردها با توجه به نوع تخلخل موجود در جدول ۴-۱ آورده شده است. عمده این کاربردها شامل استفاده در فیلتر مذاب فلزات، فیلتر گاز، آستر دیرگداز کوره، مبدل‌های حرارتی، ایمپلنت‌های پزشکی، غشاء، سنسور، پایه کاتالیست و مواد ساختمانی می‌شود. روش ساخت و مواد مصرفی برای تهیه بدنه متخلخل، دو عامل اساسی و تاثیرگذار بر روی خواص نهایی قطعه می‌باشند. در اغلب موارد، انتخاب فرآیند ساخت با توجه به خواص نهایی و کاربرد مد نظر می‌باشد.

جدول ۱-۴: انواع کاربرد آلومینای متخلخل با توجه به نوع تخلخل

کاربردها	نوع تخلخل
فیلتر فلز مذاب، فیلتر لوله آگزوز، پایه کاتالیست، سوخت‌پاش متخلخل، منتشرکننده گاز، مانع شعله‌ور شدن آتش، جایگزین استخوان، حمل‌کننده سلول، آنزیم و باکتری، زمینه برای کامپوزیت با اتصالات داخلی، هوادهی به مایعات	تخلخل باز
ساختارهای ساندویچی سبک‌وزن، اسباب واثاثیه اجاق و تنور، عایق حرارتی، جاذب ضربه، سیستم انتقال دارو، تضعیف صوت، مواد گرمایشی	تخلخل بسته
سیستم تبادل حرارت، راکتور فاز گازی، جداکننده غشاءها، حسگرهای شیمیایی، قالبهای ریخته‌گری لغزشی، ماده با خواص درجه‌بندی شده	تخلخل غیر یکنواخت و شیب‌دار

### ۱-۴-۲-۱ آجرهای عایق مقاوم به دما

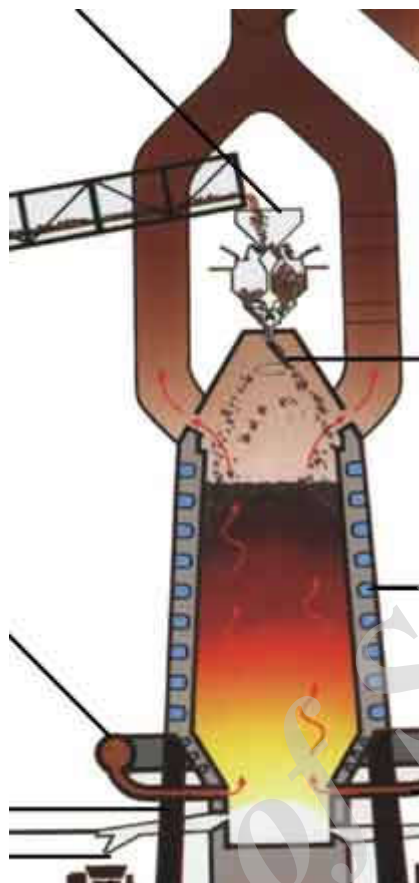
یکی از مهم‌ترین کاربردهای آلومینای متخلخل در تولید آجرهای عایق می‌باشد. این نوع آجرها مقاوم به دمای حدود ۱۷۰۰ درجه سانتیگراد بوده و در مقابل عوامل ساینده و یا خورنده در دماهای بالا مقاومند. عوامل خورنده و یا ساینده می‌توانند در حالت جامد، مایع و یا گاز باشند. این نوع آجرها جزء مهمی از نسوزها هستند. مهم‌ترین ویژگی نسوزها عبارتند از ترکیب شیمیایی، دانسیته بالک، تخلخل ظاهری، دمای ذوب، دیرگدازی تحت بارگذاری، نقطه نرمی و پایداری حجمی. قدرت پایداری در درجه حرارت‌های زیاد اگر چه یک عامل تعیین کننده برای گروه‌بندی یک ماده به عنوان دیر گداز می‌باشد ولی با این حال انتظار می‌رود که ماده نسوز در مقابل نیروهای مخرب دیگری که احیاناً در شرایط عمل روبرو می‌شود نیز مقاوم باشد. از جمله این عوامل مخرب می‌توان به سایش، ضربه، حمله‌های شیمیایی و بار مکانیکی زیاد اشاره نمود. مواد دیر گداز معمولاً نقطه ذوب مشخصی ندارند و غالباً در یک دامنه دمایی کم و بیش باریک، ذوب یا نرم می‌شوند، در نتیجه به جای بیان یک نقطه ذوب مخصوص، دمای نرم شدن اندازه‌گیری می‌شود [۳۵].

عمده استفاده از نسوزها در صنایع فولاد، سیمان، شیشه، سرامیک و پتروشیمی می‌باشد که از این میان حدود ۷۰٪ کل تولید مواد نسوز در صنایع فولاد مورد استفاده قرار می‌گیرد. مذاب فلزات و سرباره اثرات مخربی بر روی آستر کوره‌های مورد مصرف در صنایع آهن و فولاد دارد. این مواد موجبات آلودگی، پوسیدگی، سائیدگی، شستن و حمل کردن آجرهای دیرگدازی را که ظاهراً باید در مقابل عوامل شیمیایی سخت و مقاوم باشند را فراهم می‌سازند. هدف اصلی طراحان و سازندگان مواد نسوز این است که موادی برای

آسترها تهیه کنند که فلز و سرباره نه در آنها نفوذ نماید و نه با آنها وارد واکنش گردند. از جمله موارد استفاده نسوزها در صنعت فولاد آستر کوره‌های بلند است. کوره بلند عبارت است از یک سیلندر مخروطی فولادی که آستر آن به دلیل شرایط متفاوت ساختمان هر قسمت از کوره توسط مواد دیرگداز مختلفی پوشیده شده است. مواد شارژ شامل سنگ معدن آهن، کک و آهک از دهانه بالای کوره که می‌تواند تا حدود ۳۶ متر نیز ارتفاع داشته باشد، وارد کوره بلند می‌گردد. هوای پیش گرم شده اغلب به همراه مواد دیگری چون اکسیژن، بخار آب و دیگر گازها از میان لوله‌هایی به درون توده شارژ دمیده می‌شود. در نتیجه این عمل کک سوخته و به  $CO_2$  تبدیل می‌گردد و آهن موجود در سنگ معدن شارژ را احیاء کرده و به آهن فلزی تبدیل می‌کند. انتخاب دقیق مواد نسوز مناسب همراه با تعبیه سیستم خنک کننده در نقاط گرم کوره به خصوص نواحی شکم و بوته (محل جمع‌آوری مذاب) عمر کوره را افزایش می‌دهد اگر چه غالباً در اثر عملکرد عوامل مخرب ناشناخته، امکان بروز شکست‌های ناگهانی وجود دارد. مجموعه‌ای از عوامل چون درجه حرارت بالا، گرد و غبار معلق در کوره و مواد ساینده ناشی از حرکت نزولی شارژ کوره از بالا به پائین، مدت عمر آستر را معین می‌سازد. برحسب مواد دیرگداز به کار رفته برای کوره بلند دو ناحیه متفاوت را می‌توان تصور نمود:

الف) منطقه فوقانی که بحرانی‌ترین ناحیه این قسمت، بدنه کوره بلند است،

ب) منطقه تحتانی شامل قسمت‌های تنوره، کف، شکم و لوله‌های دمنده هوا.



شکل ۱-۸: شمایی از کوره بلند تولید آهن

از آنجائی که برای هر تعمیر اساسی لازم است کاملاً کار کوره متوقف گردد و بنابراین تنوره کوره بلند باید با مراقبت‌های ویژه‌ای ساخته شود. سرعت سایش و خوردگی مواد نسوز علاوه بر نوع و کیفیت دیرگداز به کار رفته تحت تأثیر نوع آهن شارژ شده نیز می‌باشد. ریخته‌گری چدن اسفنجی و فرو سیلیس‌ها نیاز به کوره‌های با درجه حرارت بالاتری نسبت به فولادریزی‌های معمولی دارد. آهن‌های فسفردار به دلیل ویسکوزیته کمتر دارای قدرت سایش بیشتری بر روی کف کوره هستند. سایش کف کوره‌های بلند نیز بسیار پیچیده و نامشخص است. علت این مسئله این است که از مواد دیرگداز کف کوره در طول انجام عملیات نمی‌توان به سادگی نمونه‌برداری و آزمایش نمود. کف کوره به صورت مداوم پوشیده از فلز مذاب آهن بوده و بنابراین تحت فشار زیاد قرار دارد [۳۶-۳۸].

صنایع تولید سیمان نیز از مصرف کنندگان دیرگذاها می‌باشند. سیمان تولیدی از مجموعه‌ای از کوره‌ها و خشک‌کن‌ها عبور می‌کند. این ادوات از کوره‌ی پخت کلینکر گرفته تا کوره‌های کلسینه کننده نیازمند به آسترکاری هستند. دیرگذاهای مورد استفاده در صنعت سیمان بیشتر در قسمت‌های پیش کلسینه کننده‌ها، کوره دوار، سردکننده‌ها و مجراها مصرف می‌شوند. کوره‌ی دوار موجود در یک کارخانه سیمان به عنوان قلب آن کارخانه تلقی می‌شود. این بخش به صورت مستقیم بر روی تولید کارخانه تأثیر دارد. با توجه به محل احداث کارخانه و کیفیت مواد اولیه، نوع دیرگذاهای مصرفی در صنعت سیمان تغییر می‌کند [۳۹].



شکل ۱-۹: شمایی از کوره دوار سیمان

صنایع تولید شیشه نیز از جمله صنایعی هستند که به دلیل فعالیت در دماهای بالا به نسوزها نیازمند هستند. دیرگذاهای مورد مصرف در کوره‌های ذوب شیشه معمولاً در نواحی ذوب کننده، پالایش دهنده، داگ هوس و خروجی‌های کوره مصرف می‌شوند. دیرگذاهای مورد نیاز برای ساخت ذوب کننده‌ها باید دارای خواصی نظیر مقاومت بالا در برابر بخارات قلیایی، استحکام بالا در دماهای بالا و مقاومت بالا در برابر خوردگی باشند. سقف کوره‌های ذوب شیشه از مواد دیرگذاز عایق ساخته می‌شوند تا میزان اتلاف گرمایی کاهش یابد [۲۳].

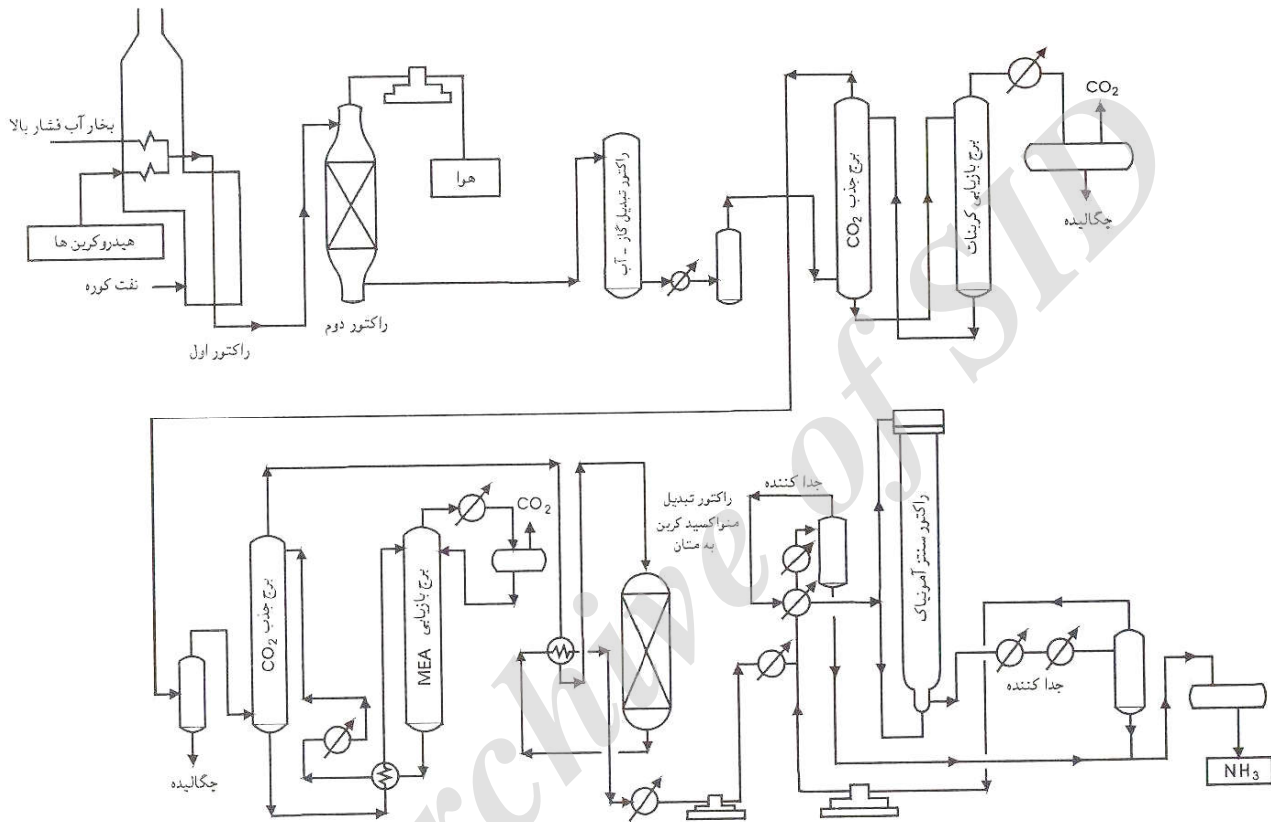
یکی دیگر از موارد کاربرد نسوزها در صنایع نفت، پالایش و پتروشیمی می‌باشد. کوره‌های فرآیندی از جمله قسمت‌های متداول در این صنایع می‌باشد که جهت جلوگیری از اتلاف حرارتی لازم است از دیرگذاها

استفاده شود. این کوره‌ها معمولاً برای تامین حرارت مورد نیاز برای انجام یک واکنش شیمیایی نظیر کراکینگ یا ریفرمینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. بدین منظور مواد واکنش‌گر از درون لوله‌هایی که در سراسر کوره کشیده شده‌اند عبور کرده و در حین گذر از لوله واکنش مورد نظر انجام می‌گیرد. به طور مثال در واحد الفین مجتمع‌های پتروشیمی محصولات سنگین جدا شده از نفت خام به عنوان خوراک واحد وارد کوره کراکینگ می‌شوند. این مواد در حین عبور از لوله‌های درون کوره بر اثر گرمای زیاد شکسته شده و به هیدروکربن‌های سبک‌تر تبدیل می‌شوند. ولی در واحدهایی نظیر ریفرمینگ لوله‌های ورودی به کوره خالی نیستند و کاتالیست‌های جامدی از جنس ترکیب نیکل و آلومینا درون لوله‌ها پر شده که واکنش‌گرها با عبور از روی این کاتالیست‌ها و بر اثر گرمای کوره با یکدیگر واکنش داده و به محصولات تبدیل می‌شوند. در تمامی این موارد لازم است تا کوره‌ها دارای حرارت یکنواختی باشند لذا مسئله هدایت حرارتی در کوره‌ها بسیار مورد توجه بوده و نگهداری از حرارت تولید شده در کوره، جلوگیری از هدر رفتن آن و همچنین محافظت از جداره خارجی فلزی کوره در برابر حرارت و شعله مستقیم وظیفه نسوزهای مصرفی در کوره‌ها می‌باشد. در این کوره‌ها عمدتاً دیواره‌ها، سقف، کف کوره، دودکش و اطراف مشعل‌ها از جمله نقاطی هستند که نیاز به عایق‌کاری با استفاده از نسوزها را دارند [۴۰، ۴۱].

واحد تولید آمونیاک نیز به دلیل نیاز به دما و فشار بالا از جمله مصرف‌کنندگان عمده نسوز در صنعت پتروشیمی می‌باشد. در این واحد ابتدا گاز متان پس از خالص‌سازی در قسمت گوگردزدایی در کوره‌ای با دمای ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد به مرحله ریفرمینگ وارد می‌گردد. در این قسمت با بخار آب فراوان مخلوط شده به راکتور ریفرمر اول با دمایی در حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد وارد می‌شود. در این قسمت متان و بخار آب به هیدروژن، دی‌اکسیدکربن و منوکسیدکربن تبدیل می‌شوند. مشعل‌های تعبیه شده در کوره این راکتور دمایی در حدود ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد را تامین می‌نمایند. در این بخش کلیه دهانه‌های مشعل‌ها و جداره داخلی کوره، کانال‌های پخش و یکنواخت‌کننده حرارت به همراه سقف و کف کوره از جنس نسوز می‌باشند. پس از آن جهت تکمیل واکنش مواد وارد ریفرمر دوم می‌گردند که از لحاظ نوع مواد نسوز مورد استفاده شبیه ریفرمر اول است. گازهای خروجی از این دو راکتور دارای حرارت زیادی می‌باشند که جهت استفاده



بهینه از این حرارت گازهای خروجی وارد مبدل‌های حرارتی می‌شوند تا آب را بخار آب تبدیل نمایند. جداره داخلی این مبدل‌های حرارتی نیز از نوع نسوزهای ضد سایش می‌باشد. در مرحله آخر فرایند جریان هیدروژن تصفیه شده از دی‌اکسید و منوکسید کربن با یک جریان غنی از نیتروژن وارد راکتور آمونیاک می‌شوند که در آنجا طبق واکنش هابر نیتروژن و هیدروژن به آمونیاک تبدیل می‌گردند [۴۲].

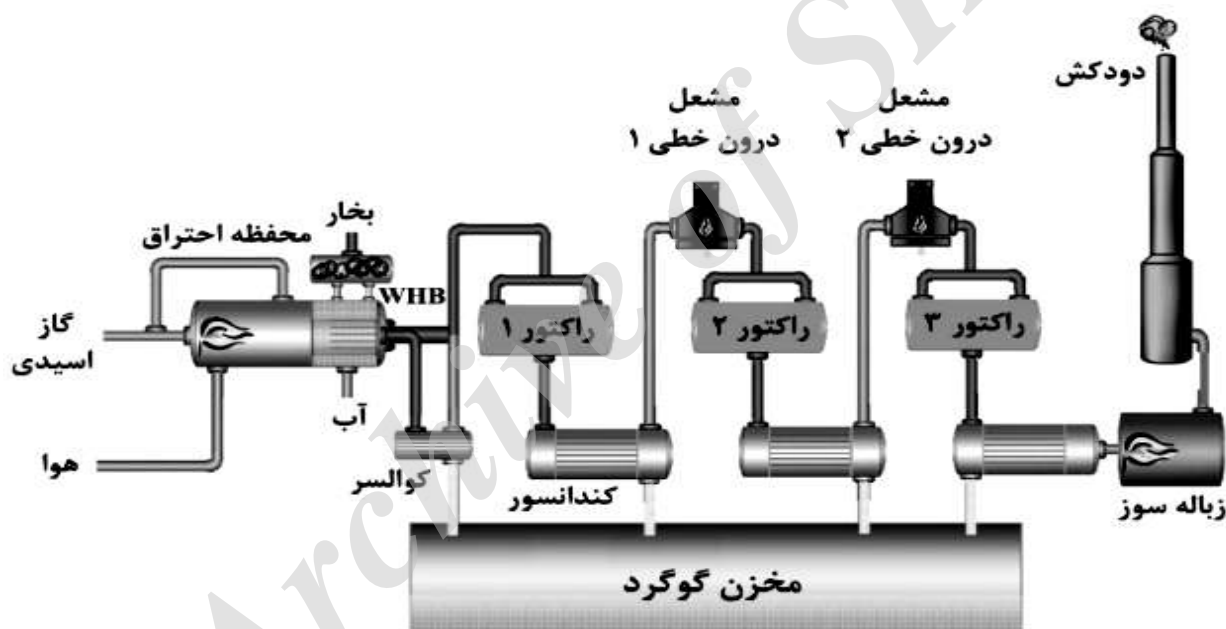


شکل ۱-۱۰: طرح‌واره واحد سنتز آمونیاک

فرآیند کلاوس برای استحصال گوگرد یکی دیگر از واحدهای صنایع نفت و گاز است که نیاز به استفاده از دیرگدازها دارد. از جمله قسمت‌های مصرف مواد نسوز در واحد گوگردزایی راکتورهای حرارتی، راکتورهای کاتالیستی، مشعل‌های گوگرد و مخازن نگهداری گوگرد می‌باشد. در این واحد کوره‌های احتراق برای واکنش کلاوس دمایی در حدود ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند که این حرارت توسط چند مشعل تامین می‌گردد. نسوزهای این حرارت توسط چند مشعل تامین می‌شود. در راکتورهای کاتالیستی دما

به علت استفاده از چند نوع کاتالیست تسریع کننده واکنش، پایین تر و در حدود ۶۵۰ درجه سانتی گراد است. مشکل عمده نسوزهای واحد گوگرد خوردگی شیمیایی توسط گازهای اسیدی گوگردار می باشد [۴۳].

در صنایع پتروشیمی و پالایشگاهی، فلرها کاری شبیه به سوپاپ اطمینان دارند و بدین گونه عمل می کنند که اگر در واحدی فشار از حد مجاز بالاتر رود و نیاز به تخلیه مواد مازاد از سیستم باشد، این مواد به فلزها فرستاده می شود و در آن جا سوزانده می شود. با توجه به دمای بالای سوزاندن مواد در فلزها از حجم زیادی از نسوز برای جلوگیری از آسیب رساندن به دستگاهها استفاده می شود که معمولاً برای این منظور از نسوزهای آلومینایی متخلخل استفاده می شود [۴۴].



شکل ۱-۱: طرحواره واحد گوگرد زدایی

#### ۱-۲-۴-۲-۱ فیلتر فلز مذاب

مانند سایر صنایع، تقاضای روزافزون مشتریان برای تهیه قطعاتی با کیفیت بهتر، کارایی بالاتر و قیمت کمتر در صنعت ریختگری، طراحان و تولیدکنندگان را بر بازنگری مستمر روند تولید و ارائه روشها و طرحهای جدید تشویق کرده است. اغلب طراحان به منظور صرفه جوئی و کاهش وزن قطعات سعی در کاهش ابعاد قطعات دارند، اما با کاهش ضخامت، حساسیت به آخالها و عیوب ناشی از آن افزایش می یابد. استفاده

از مواد اولیه با کیفیت بالاتر در تهیه ذوب و قالب می‌تواند نقش موثری در کاهش این عیوب ایفا کند اما معمولاً منجر به افزایش قیمت تولیدات می‌شود. از این رو، یکی از بهترین روش‌ها در حذف ناخالصی‌ها، تصفیه مذاب در سیستم راهگامی است تا از ورود آخال به قطعه ریخته‌گری ممانعت به عمل نماید. این روش علاوه بر کارائی بالا دارای هزینه کمی است و تاثیر چندانی بر قیمت قطعات ندارد. عموماً با به کارگیری فیلترهای سرامیکی در فرآیند ریخته‌گری اهداف مورد نظر برآورده شده است. در بین انواع مختلف فیلترها، فیلترهای سرامیکی اسفنجی تاکنون بیشترین کارائی را از خود نشان داده‌اند. از این رو، علیرغم مطالعه پیرامون کاربردهای جدید فیلترهای سرامیکی اسفنجی بیشترین کاربرد آنها هنوز به عنوان فیلتر فلز مذاب است [۴۵].

در تولید اجزای آلومینیومی برای این که خواص نهایی محصول قابل قبول باشد، نیاز است قبل از شکل‌دهی آلومینیوم مذاب آن فیلتر شود. زمانی که فیلتراسیون انجام شد، آلومینیوم ریخته‌گری و به شکل نهایی در آورده می‌شود. شکل دادن اجزای آلومینیومی با فرآیند نورد یا اکستروژن صورت می‌گیرد که نیاز است فلز خیلی تمیز باشد. در این تولیدات گسترش فیلتراسیون تاکید شده است تا محصول نهایی کیفیت مورد نیاز را داشته باشد. عموماً محتوایی که از مذاب آلومینیوم توسط فیلتراسیون حذف می‌شود، جامد هستند مانند پوسته‌های اکسیدی، آلومینات منیزیم، اسپینل‌ها و بوریدها یا مایعاتی مانند نمک‌های کلراید منیزیم و آگلومره‌های نمکی - اکسیدی.

در بدنه فیلتر، به ندرت از فسفات یا سیلیکا در باند متراکم آلومینایی استفاده می‌شود. عموماً ترکیبات بدنه را ۹۰-۸۰٪ آلومینا با درصد تعادلی از فسفات یا بایندر سیلیکایی تشکیل می‌دهد. بایندر اجازه می‌دهد تا فیلتر ساخته شده دارای ویژگی‌های کافی در حجم‌های بالا، دمای نسبتاً پایین، انقباض جز نزدیک به صفر و هزینه کمتر داشته باشد. انتخاب اندازه تخلخل فیلتر برای فرآیند بحرانی و مهم است. از لحاظ دهانه، زمانی که مذاب آلومینیوم برای اولین بار با فیلتر برخورد می‌کند، پوسته نازکی از آلومینیوم رابط بین فلز و فیلتر می‌شود. نیاز است فشار دهانه از طریق این پوسته شکسته شود تا اجازه دهد فلز وارد محیط فیلتر شود، اندازه ریزتر تخلخل فیلتر، نیاز به محیط دهانه بزرگ‌تر دارد. در این کاربرد، الزام‌آور است اندازه تخلخل

عبوری فیلتر نسبتاً یک شکل باشد. اگر نباشد، وقتی جریان فلز در محیط فیلتر شروع شود، مسیری که کوچک‌ترین مقاومتی را داشته باشد، گرفته می‌شود و فقط بخشی از محیط فیلتر باقی می‌ماند. فیلتراسیون نیازمند طراحی تجهیزاتی است که فیلتر را در مسیر فلز مذاب حمایت کند، بنابراین فیلتر قبل از تماس با مذاب باید پیش‌گرم شود. فیلتراسیون مذاب آلومینیوم در دمای ۷۵۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود، فیلترها آلومینایی قید شده‌اند، اگر چه هزینه اثرگذار است، اما برای تحمل شوک حرارتی طراحی نشده‌اند. با این حال، نیاز است به دقت روش‌های پیش‌گرم کنترل شود و مطمئن شد که فیلتر زمانی که با مذاب رو به رو می‌شود دچار شوک حرارتی نگردد [۴۶].

#### ۳-۴-۲-۱ پایه کاتالیست

مواد متخلخل به عنوان کاتالیست یا پایه‌های آنها به کار می‌روند. سطح ویژه بالا، پایداری شیمیایی بالا تحت شرایط خورنده و پایداری حرارتی بالا برای کاربرد تحت دماهای بالا (مانند استفاده در لوله آگزوز اتومبیل) از ویژگی‌های این مواد است. سرامیک‌هایی از جنس زئولیت، کوردیریت و آلومینای گاما سطح مخصوص بالایی دارند. بدنه‌های ساخته شده از مواد Pt و Au مستقیماً به عنوان کاتالیست استفاده می‌شوند و یا مواد گران‌قیمتی مانند  $MnO_2$  کاتالیتیکی مانند آلومینای گاما و به عنوان کاتالیست بر روی پایه‌های سرامیکی پوشش یا رسوب داده می‌شوند.

#### ۴-۴-۲-۱ بیوراکتورها

بیوراکتور وسیله‌ای برای هدایت واکنش‌های شیمیایی با استفاده از میکروارگانیسم و ساکن کردن آنزیم‌ها در بسترهای متخلخل است که در آن گونه‌های مواد پزشکی، غذاها و مواد خام صنعتی تولید می‌شود. سرامیک‌های متخلخل به دلیل مقاومت شیمیایی بالا اغلب به عنوان بسترهای متخلخل در بیوراکتورها به کار می‌روند. تخلخل‌هایی با ابعاد ۷۰-۱۵ نانومتر برای ساکن کردن آنزیم‌ها و در حدود ۳۰-۵ میکرومتر برای ساکن کردن میکروارگانیسم‌ها مورد نیاز است. استفاده از کوردیریت متخلخل دارای توزیع دوتایی و شامل حفرات کوچک حدود ۱۰ میکرومتر و بزرگ ۱۰۰ میکرومتر در بیوراکتورهای گزارش شده است.

### ۱-۲-۴-۵ غربال‌های مولکولی برای فرآیندهای شیمیایی

کاربرد غربال‌های مولکولی از تولید پاک‌سازهای تجزیه‌پذیر بیوتکنولوژی تا حذف رطوبت از خط لوله گاز طبیعی و شکست کاتالیزوری نفت سنگین به بنزین گسترده است که شکست کاتالیزوری نفت سنگین به بنزین، متداول‌ترین و پرسودترین کاربرد غربال‌های مولکولی می‌باشد. بیشتر غربال‌های مولکولی بر پایه زئولیت هستند که در حذف آب از گازها و مایعات کارآمدتر از مواد متخلخل عمل می‌کنند.

### ۱-۲-۴-۶ ایمپلنت‌های پزشکی

بیوسرامیک‌های بر پایه آلومینای متخلخل به دلیل ایجاد اتصال طبیعی هنگام رشد بافت در آنها و مقاومت سایشی بالا بسیار سودمند هستند. به منظور افزایش رشد بافت‌ها و تثبیت پروتزها نیاز به وجود تخلخل‌های باز است. در اندازه تخلخل‌های ۷۵-۱۰۰ میکرومتر رشد بافت‌ها و اتصال آنها کامل بوده است و رشد استخوان تا عمق ۱۰۰ میکرومتر در سرامیک مشاهده شده است. در دی‌کلسیم فسفات متخلخل نیز رشد استخوان مشاهده شده است.

### ۱-۲-۵ روش‌های فوم‌سازی

#### ۱-۲-۵-۱ روش کپی‌برداری<sup>۱</sup>

این روش اولین و متداول‌ترین روش برای ساخت سرامیک‌های فومی بوده و توسط غوطه‌وری یک شابلون<sup>۲</sup> با ساختار سلولی نظیر اسفنج پلیمری (غالباً پلی‌اورتان) در دوغاب سرامیکی مورد نظر و سپس حذف دوغاب اضافی با روش‌های مختلف، پیرولیز پلیمر و در نهایت زینتر بدون فشار، به دست می‌آید. ساختارهای سلولی بسیاری به دو صورت طبیعی و یا سنتزی وجود دارند که به عنوان شابلون مورد استفاده قرار می‌گیرند. از شابلون‌های سنتزی می‌توان به پلیمر و کربن و از شابلون‌های طبیعی می‌توان به چوب و مرجان دریایی اشاره نمود. مواد پلیمری مختلفی نظیر پلی‌اورتان<sup>۳</sup>، پلی‌وینیل‌کلرید<sup>۱</sup>، پلی‌استرن<sup>۲</sup> و غیره به

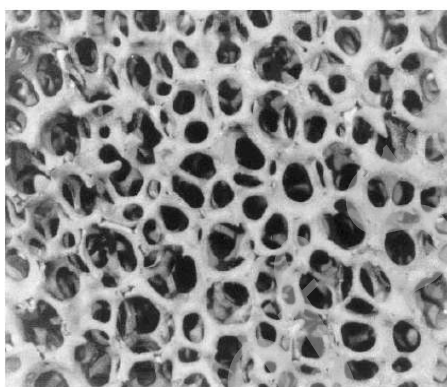
<sup>1</sup> Replica

<sup>2</sup> Template

<sup>3</sup> PU

عنوان شابلون پلیمری قابل استفاده می‌باشند که ساختار پلیمر مصرفی و اندازه حفرات، بر روی خواص نهایی قطعه مانند چگالی و عبورپذیری از تاثیر بالایی برخوردار می‌باشند [۷, ۱۰].

به طور کلی انواع مختلف پودرهای سرامیکی در این روش قابل به کارگیری بوده و خواص رئولوژیکی مشابه سایر فرآیندهای شکل‌دهی سرامیک‌ها می‌باشد [۱۰]. در شکل ۱-۱۲ نمونه‌ای از ساختار متخلخل تولید شده به این روش مشاهده می‌گردد [۷].



شکل ۱-۱۲: ساختار سلولی تولید شده به روش حذف اسفنج پلیمری پلی‌اورتان [۷]

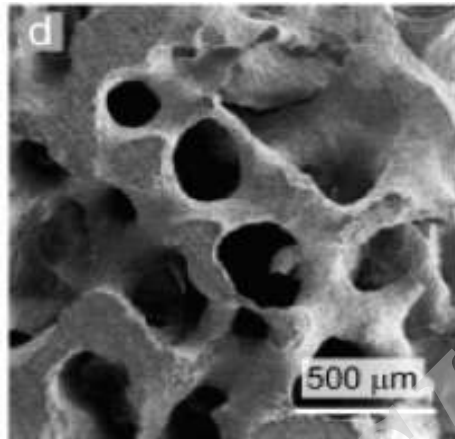
علاوه بر استفاده از اسفنج پلیمری، ساختارهای سلولی طبیعی نیز وجود دارند که مورفولوژی حفرات آنها منحصر به فرد بوده و از روش‌های سنتزی قابل دستیابی نمی‌باشند. به طور مثال مرجان دریایی به دلیل دارا بودن ساختاری خاص، برای ایجاد بافت مهندسی و جای‌گذاری به جای استخوان بسیار مناسب است. در دهه ۱۹۷۰، وایت<sup>۳</sup> و همکارانش روش جالبی برای کپی‌برداری از ساختار مرجان ابداع نمودند که در آن ابتدا مرجان تحت خلاء، درون موم قرار گرفته و اشباع می‌شود و در نتیجه یک ساختار سلولی منفی حاصل می‌شود. پس از آن که گیرش در موم رخ داد و سفت شد، با استفاده از یک محلول اسیدی قوی، اسکلت کربنات کلسیمی مرجان حل شده و خارج می‌گردد. با غوطه‌ور کردن ساختار سلولی منفی به دست آمده درون

<sup>1</sup> PVC

<sup>2</sup> PS

<sup>3</sup> White

دو غاب سرامیکی مورد نظر و سپس حذف موم آلی توسط پیرولیز، قطعه متخلخل تولید می‌شود. شکل ۱-۱۳ ساختار متخلخلی از هیدروکسی آپاتیت با استفاده از مرجان را نشان می‌دهد [۱۰].



شکل ۱-۱۳: ساختار متخلخل هیدروکسی آپاتیتی با استفاده از مرجان دریایی [۱۰]

از چوب اغلب برای تولید قطعات سرامیکی متخلخلی مثل کاربید سیلیکون<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که در آنها به منبع کربنی نیاز است. در تمامی این روش‌ها پس از پیرولیز چوب، کربن مورد نیاز برای تبدیل به کاربید سیلیکون به دست می‌آید ولی منبع تامین سیلیکون در آنها متفاوت است. سیلیکون مورد نیاز می‌تواند از نفوذ سل سیلیکا به درون نمونه پیرولیز شده، نفوذ مذاب فلز سیلیکون به درون این شابلون کربنی و یا نفوذ بخار سیلیکون به درون این ساختار تامین شود [۱۰].

#### ۲-۵-۲-۱ روش شابلون از بین رونده<sup>۲</sup>

این فرآیند اغلب شامل آماده‌سازی یک ترکیب دو فاز از یک زمینه پیوسته از ذرات سرامیکی و یک فاز از بین رونده<sup>۳</sup> که به صورت کاملاً یکنواخت در زمینه پراکنده شده است، می‌باشد (شکل ۱-۱۴). ترکیب دوفازی اغلب به روش‌های زیر تهیه می‌شود:

<sup>۱</sup> SiC

<sup>۲</sup> Sacrificial template method

<sup>۳</sup> Sacrificial phase

الف) پرس کردن یک مخلوط پودری دو جزئی،

ب) تهیه یک دوغاب دوفازی که بعداً تحت فرآیندهای تر نظیر ریخته‌گری دوغابی یا نواری، متخلخل خواهد شد،

ج) اشباع ماده از بین رونده که قبلاً شکل‌دهی شده و توسط دوغاب به صورت جامد درآمده است [۱۰].

در جدول ۱-۴ انواع شابلون‌های از بین رونده و موارد مصرف آنها آمده است.

لیکفلت<sup>۱</sup> و فریرا<sup>۲</sup> نشان دادند که سرعت سوختن و خروج مواد آلی باید محدود به ۲۰ میلی‌گرم بر دقیقه باشد تا در حین فرآیند از ایجاد ترک در قطعات با ضخامت ۳-۴ سانتی‌متر اجتناب شود. برای قطعات بزرگ-تر مانند یک قطعه آلومینایی با ابعاد ۵×۱۰×۲۳ سانتی‌متر با هدف ایجاد تخلخل ۵۰ درصدی به عملیات حرارتی بیش از ۳ هفته نیاز است. عدم تطبیق ضرایب انبساط حرارتی بین فازهای آلی و غیرآلی نیز می‌تواند در حین پیرولیز، منجر به ایجاد ترک در قطعه شود [۵، ۷، ۱۰].

مواد تخلخل‌زای دیگر نظیر ذرات سرامیکی و فلزی، بیشتر از عملیات حرارتی توسط روش‌های شیمیایی استخراج می‌شوند. همچنین استخراج نمک‌ها نیز به وسیله شستشو دادن ترکیب توسط آب انجام می‌گیرد.

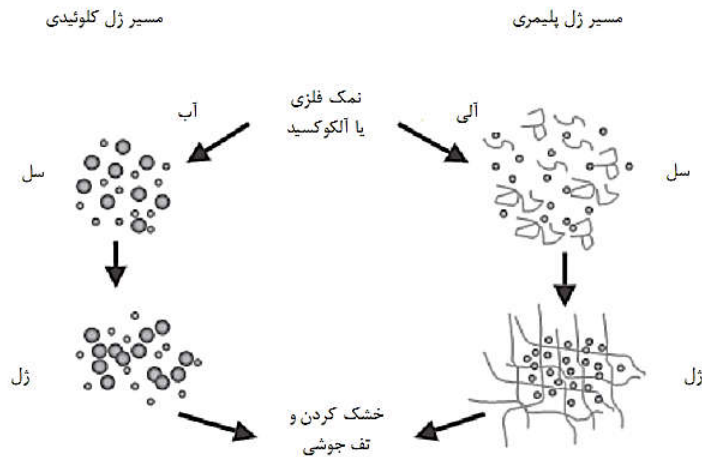
در تمام این فرآیندها، فاز زمینه باید قبل از حذف فاز دوم به صورت جامد در آید. بنابراین ساختار متخلخل در حین فرآیندهای بعدی تخریب نخواهد شد. هنگامی که فاز زمینه سوسپانسیون سرامیکی باشد، جامدسازی آن به کمک عوامل گیرش و افزودن چسب میسر است. روش سل-ژل که بر اساس متراکم نمودن آلکوکسیدهای فلزی و هیدروکسیدها در محلول است نیز می‌تواند جهت جامدسازی فاز زمینه به کار رود.

---

<sup>1</sup> Lyckfeldt

<sup>2</sup> Ferreira





شکل ۱-۴: روش سل-ژل با دو مسیر مختلف برای تشکیل ژل [۴۷]

استفاده از روغن‌های نسبتاً فرار به عنوان شابلون در امولسیون‌های آبی و غیرآبی نیز فرآیندهای جالبی برای تولید ساختارهای متخلخل می‌باشند. مهم‌ترین مزایای این روش به صورت زیر می‌باشند [۱۰]:

الف) اتصال آسان شابلون و فاز زمینه توسط تلاطم و اختلاط؛

ب) ایجاد تخلخل‌های بسیار ریز با استفاده از مایعات نامحلول که انرژی بین سطحی اندکی از خود نشان می‌دهند؛

ج) حذف آسان شابلون.

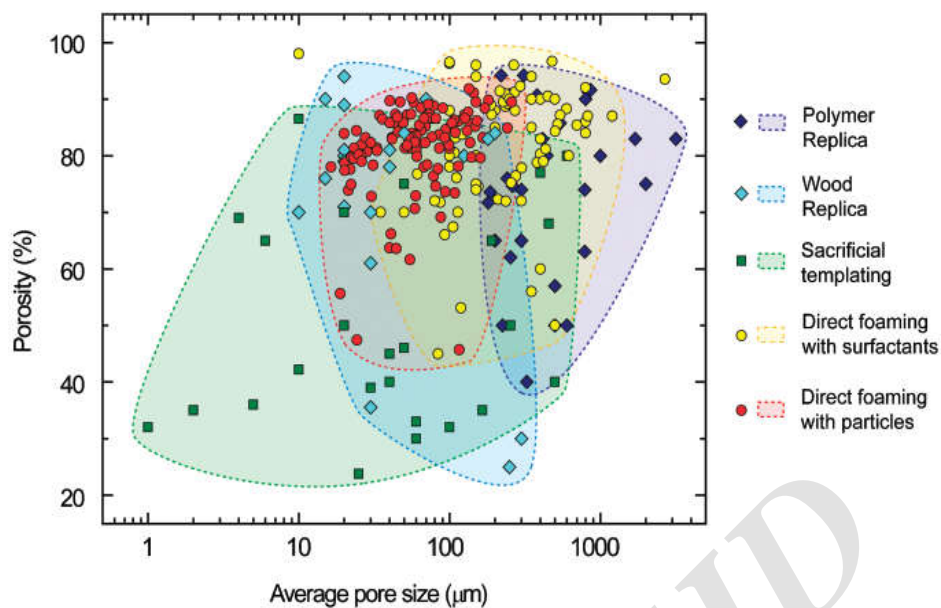
جدول ۱-۵: انواع شابلون‌های از بین رونده و کاربردهای آنها [۱۰]

ترکیبات	شابلون‌های Sacrificial
<b>مواد آلی سنتزی</b>	
Zr <sub>4</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> , (Ca <sub>1-x</sub> Mg <sub>x</sub> ) و PZT و Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ذرات PVC
SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> -SiO <sub>2</sub> , Zeolite, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ذرات PS
PZT و هیدروکسی آپاتیت	ذرات PVB یا PEO
SiO <sub>2</sub> , SiC و PZT و هیدروکسی آپاتیت و تری کلسیم فسفات	ذرات PMMA-PEG یا PMMA
SiC	نابلون
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub>	استات سلولز
SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub>	ژل‌های پلیمری
فسفات کلسیم	نفتالین
<b>مواد آلی طبیعی</b>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ژلاتین

سلولز / کتان	$Al_2O_3$ و مولایت
چغندر قند	فسفات کلسیم
دکسترین	SiC
واکس	هیدروکسی آپاتیت
آلیژینات	$Al_2O_3$
نشاسته	$Al_2O_3$ , PZT, $SiO_2$ - $Na_2O$ - $CaO$ - $Si_3N_4$ - $CaCO_3$ , MgO glass, هیدروکسی آپاتیت، کوردیریت، دیاتومیت و مولایت
	<b>مایعات</b>
امولسیون - روغن	$TiO_2$ , $Al_2O_3$ , $SiO_2$ , $CaCO_3$ , FeOOH, CoOOH, $Mn_7O_{13} \cdot 5H_2O$ هیدروکسی آپاتیت
	<b>نمک‌ها</b>
NaCl	SiC
$SrSO_4$ و $BaSO_4$	$Al_2O_3$
$K_2SO_4$	$PbTiO_3$ , $La_{1-x}Sr_xMnO_3$
	<b>فلزات / سرامیک‌ها</b>
نیکل	YSZ, $Al_2O_3$
کربن (گرافیت، فیبر، نانوتیوب)	SiC و مولایت
$SiO_2$	SiC
ZnO	NiO

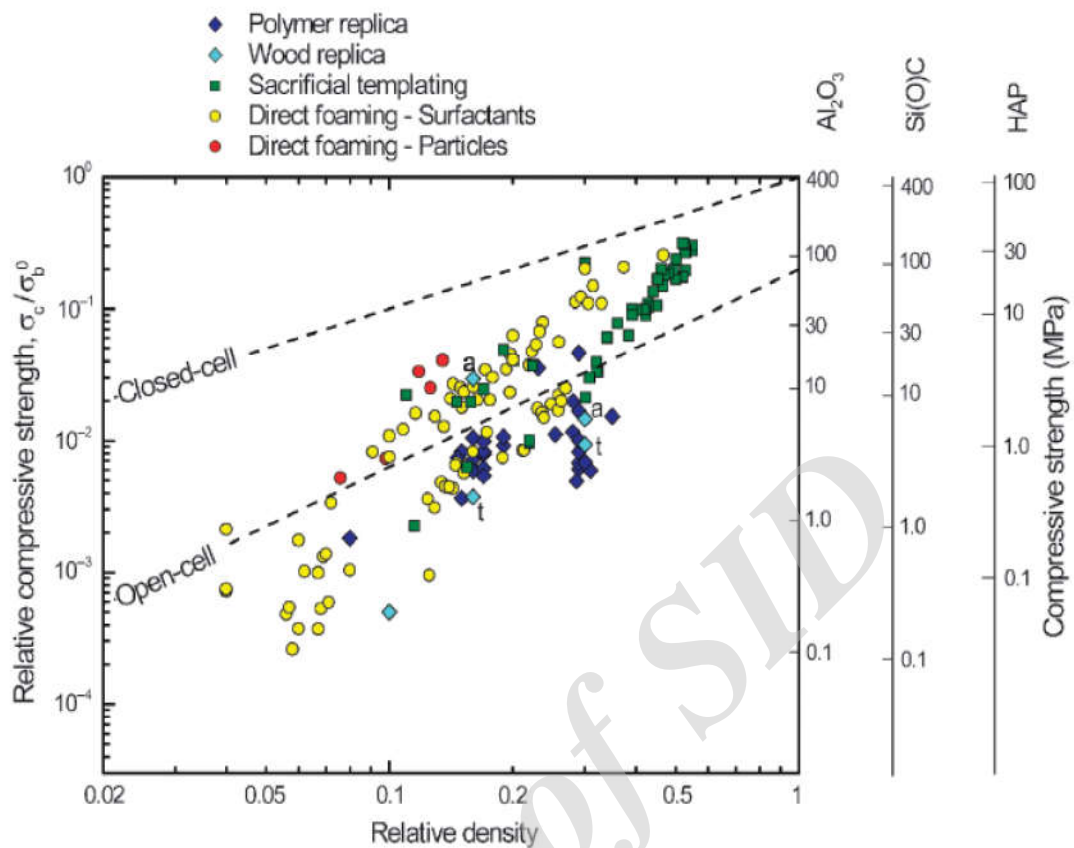
یکی از مهم‌ترین مزایای روش شابلون از بین رونده<sup>۱</sup> در مقایسه با سایر روش‌ها، ایجاد تخلخل‌های مناسب، توزیع اندازه تخلخل و مورفولوژی تخلخل مناسب قطعه نهایی می‌باشد. شکل ۱-۱۵ نشان می‌دهد که محدوده تخلخل و ابعاد تخلخل حاصل شده از این روش بسیار گسترده می‌باشد (۹۰-۲۰٪ تخلخل و ۱-۷۰۰ میکرومتر اندازه تخلخل) که فقط به کسر حجمی و ابعاد شابلون مصرفی بستگی دارد.

<sup>1</sup> Sacrificial template



شکل ۱-۱۵: درصد تخلخل و میانگین اندازه حفرات به دست آمده از فرآیندهای کپی برداری، قالبی و فوم سازی مستقیم [۱۰]

از آنجا که در این روش، قطعه متخلخل نهایی نسبت به شابلون اولیه ساختار منفی دارد لذا حذف فاز از بین رونده منجر به ایجاد عیوب در نقاط اتصال تخلخلها نمی شود و در نتیجه خواص مکانیکی بهتری به دست خواهد آمد. این در حالی است که در روش کپی برداری، حذف فاز از بین رونده منجر به ایجاد عیوب در نقاط اتصال تخلخلها می شود. شکل ۱-۱۶ استحکام فشاری نسبی را به عنوان تابعی از چگالی نسبی نشان می دهد [۱۰].



شکل ۱-۱۶: استحکام فشاری نسبی به عنوان تابعی از چگالی نسبی [۱۰]

### ۱-۲-۵-۳ ایجاد فوم به روش‌های مستقیم<sup>۱</sup>

در این روش‌ها، ایجاد تخلخل در قطعه توسط وارد نمودن گاز نظیر هوا به سوسپانسیون و سپس گیرش در بدنه جهت حفظ ساختار متخلخل انجام گرفته و در نهایت فوم جامد کلسینه می‌شود تا استحکام مناسب حاصل شود (شکل ۱-۱۶). روش فوم سازی مستقیم مسیری ارزان قیمت بوده و از لحاظ ترکیب شیمیایی خوراک و تنظیم ساختار میکرومتخلخل محصول نهایی انعطاف پذیری بالایی دارد. به علاوه با استفاده از این روش می‌توان به صورت مداوم به تولید فوم متخلخل پرداخت. میزان تخلخل کل در روش فوم سازی مستقیم به مقدار گاز تزریق شده به دوغاب در حین فرآیند فوم سازی بستگی دارد. از سوی دیگر توزیع اندازه حفرات

<sup>۱</sup> Directfoamingmethods

نیز به پایداری فوم تر قبل از عمردهی وابسته است. بنابراین در این روش نکته کلیدی ایجاد ثبات و تحکیم مناسب حباب‌ها در ساختار فوم تر می باشد. فوم تر از لحاظ ترمودینامیکی سیستمی ناپایدار بوده و فرآیندهایی نظیر تخلیه فاز مایع و بزرگ شدن حباب‌های گاز تخریب فوم می‌شوند. تخلیه فاز مایع به جریان این فاز به دلیل نیروی ثقل وابسته است. کاهش میزان فاز مایع منجر به نزدیکی بیش از حد حباب‌ها به یکدیگر و در نتیجه افزایش اندازه آنها می‌گردد. روش‌های گوناگونی برای حفظ پایداری حفرات فوم تر پیشنهاد شده‌اند که از آن جمله استفاده از مولکول‌های بلند زنجیر آمفیفیلیک و همچنین بیومولکول‌ها نظیر چربی‌ها و پروتئین‌ها به عنوان عوامل فعال‌سازی سطح جهت پایدار نمودن فوم تر می‌باشند. این مواد می‌توانند سرعت پیوستن حباب‌ها به یکدیگر را با جذب سطحی حباب‌های هوا و کاهش انرژی بین سطحی آب و هوا کاهش دهند. البته باید به این نکته نیز اشاره کرد که استفاده از سورفکتانت‌هایی نظیر مولکول‌های بلند زنجیر و بیومولکول‌ها تنها می‌توانند پایداری فوم تر را تا چند دقیقه حفظ نمایند و برای تثبیت این پایداری تا چندین ساعت بهترین گزینه پروتئین‌های می‌باشند. بنابراین در مواقعی که از سورفکتانت‌ها برای ایجاد ثبات فوم تر استفاده می‌شود لازم است که از یک عامل تنظیم کننده تحکیم ساختار قبل از ایجاد ناپایداری در ساختار فوم استفاده نمود. توزیع نهایی اندازه حفرات در سرامیک متخلخل به توازن بین سرعت تخریب حباب‌ها و سرعت تثبیت دوغاب بستگی دارد. تولید فوم‌هایی با اندازه حفرات ریز (در حدود ۵۰ میکرومتر) تنها در صورت استفاده از سورفکتانت‌های موثر و تثبیت سریع آن حاصل می‌شود. از جمله سورفکتانت‌های مورد استفاده برای جلوگیری از تخریب حباب‌ها در فوم تر می‌توان به بنرتوریم کلراید، سدیم دودکیل سولفات، پلی دی متیل سیلوکسان و کوکوالکیل دی متیل آمین اکسید اشاره کرد [۴۸-۵۰].

علاوه بر سورفکتانت‌ها، ذرات جامد با سطوح مهندسی شده می‌توانند به صورت موثری با جذب شدن در حد فاصل هوا و آب منجر به پایداری حباب‌ها شوند. این مواد می‌توانند با جذب شدن بین سطوح آب و هوا مانع تکمیل مکانیسم بی ثبات کردن حباب‌ها حتی برای مدت چند روز گردند. در این روش جذب ذرات کلونیدی بر روی سطح مشترک آب-هوا با ایجاد تغییرات عمدی بر روی خواص تر شوندگی ذرات بهبود می‌یابد. آمفیلیلک‌هایی که ابتدا اضافه می‌گردند موجب می‌شوند که ذره تا حدودی آبگریز شود و یک دنباله

آبگریز کوتاه در تماس با فاز آبی از خود به جای گذارد. از جمله این مواد آمفیلپیک که جهت اصلاح سطح ذرات به کار می‌روند می‌توان به والرپیک اسید، پروپیل گالات، بوتیل گالات و هگزیل آمین اشاره نمود. پس از اصلاح سطح ذرات هوا می‌تواند توسط کف سازی مکانیکی، تزریق جریان گاز و یا انجام یک واکنش شیمیایی که همراه با تولید گاز می‌باشد در داخل دوغاب ایجاد شود. بعد از تزریق هوا ذرات آبگریز شده یک شبکه نسبتاً منسجم در سراسر فاز آبی پیوسته ایجاد می‌نماید منجر به ایجاد فوم ویسکوالاستیک نسبتاً سفت با ثبات طولانی مدت می‌نماید [۵۱-۵۳].

همان طور که اشاره شد برای ایجاد حباب‌ها در داخل فوم تر لازم است تا دوغاب با یک گاز مخلوط شده تا حباب‌های ایجاد شده با استفاده از روش‌های استفاده از سورفکتانت یا ذرات جامد اصلاح شده تثبیت و سپس خشک و کلسینه گردند. برای اختلاط گاز و دوغاب روش‌های گوناگونی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۰]:

۱- کف سازی مکانیکی،

۲- ایجاد گاز به صورت درجا (به طور مثال از طریق انجام واکنش‌هایی که در سیستم، ایجاد گاز می‌نمایند)،

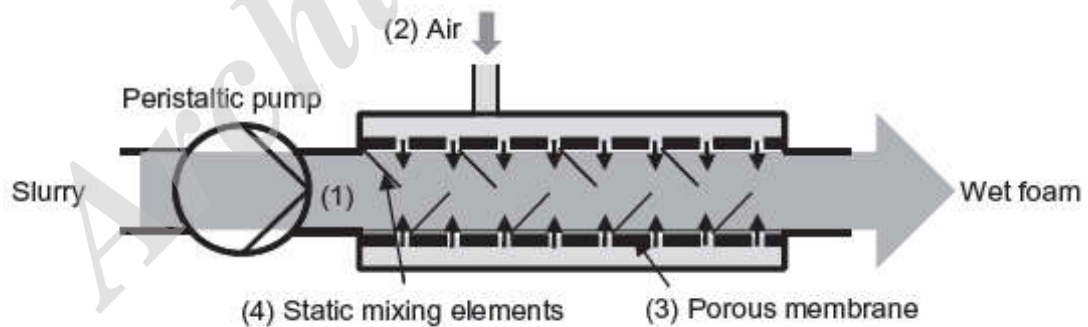
۳- دمیدن گاز خارجی به صورت مکانیکی.

در کف سازی مکانیکی از یک وسیله جهت همزدن سریع دوغاب استفاده می‌شود. در این حالت جهت افزایش بازده تولید کف یک عمل کف ساز مثل پروتئین‌های خوراکی نظیر سفیده تخم مرغ به دوغاب اضافه می‌شود. با وجود این که این روش طی سالیان برای تولید فوم‌های متخلخل استفاده می‌شده است ولی هزینه‌های بالای انرژی آن موجب شده است که در سال‌های اخیر تمایل چندانی برای استفاده از این روش وجود نداشته باشد. در روش ایجاد گاز به صورت درجا از یک واکنش شیمیایی استفاده می‌شود. در این روش با ایجاد دوغاب یک واکنش شیمیایی نیز در آن انجام می‌پذیرد که محصول جانبی آن یک گاز است. ایجاد حباب‌های گاز در داخل دوغاب منجر به تولید فوم متخلخل تر می‌گردد، اما ساده‌ترین و به صرفه‌ترین روش

برای فوم سازی مستقیم دمیدن گاز خارجی به داخل دوغاب می‌باشد. در این روش، یک گاز نظیر هوا توسط دستگاهی به داخل دوغاب سرامیکی دمیده می‌شود و منجر به ایجاد حباب در داخل آن می‌شود. از جمله مزایای این روش هزینه پایین، سادگی و تسهیل در قالب‌زنی فوم متخلخل تولید شده می‌باشد. به طور کلی درصد تخلخل در این روش، نسبت مستقیم با میزان گاز وارد شده به سیستم دارد و اندازه تخلخل‌ها نیز از روی پایداری فوم تر قبل از گیرش تعیین می‌شود [۱۰].

### ۳-۱ ساخت فوم‌های سرامیکی به روش تزریق گاز

همان‌گونه که اشاره گردید روش تزریق مستقیم گاز به داخل دوغاب از جمله جدیدترین روش‌های پیشنهادی برای تولید فوم‌های متخلخل می‌باشد که می‌تواند بازدهی بالایی برای تولید قطعات سرامیکی متخلخل با کیفیت دارد. بدین لحاظ در طرح حاضر نیز از این روش جهت تولید قطعات سرامیکی متخلخل استفاده خواهد گردید. در این روش ابتدا دوغابی از پودر سرامیکی آلومینا تهیه می‌شود و از طریق یک پمپ به نازلی که برای تزریق دوغاب به قالب تهیه شده هدایت می‌شود. نازل خود از چند بخش تشکیل می‌شود که در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱۷: شماتیکی از یک نمونه نازل تزریق مستقیم گاز برای تولید فوم متخلخل [۶۷]

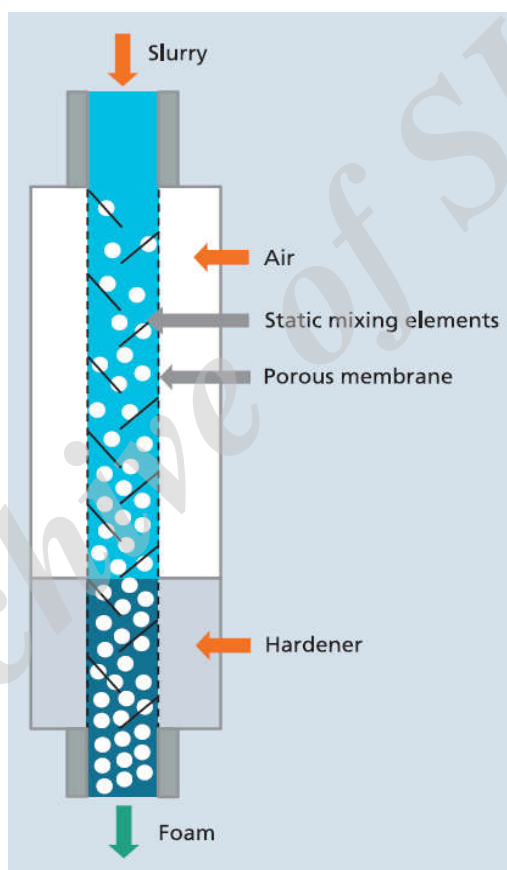
همان‌طور که در شکل ۱-۱۷ مشخص می‌باشد، بخش بالایی نازل از یک ممبران متخلخل تشکیل شده که از طریق آن هوا وارد دوغاب شده و با آن مخلوط می‌شود و بدین ترتیب یک دوغاب فومی ساخته می‌شود. در بخش پایینی نازل نیز یک سخت کننده با فوم مخلوط می‌شود به طوری که پس از ورود فوم به

قالب دوغاب سخت شده و از خروج حباب‌های هوا جلوگیری می‌شود. بدین ترتیب ساختار متخلخل دوغاب حفظ شده و قطعه‌ی متخلخل تولید می‌گردد. حجم تخلخل‌ها و اندازه‌ی آنها به وسیله‌ی فلوی گاز و جریان دوغاب قابل کنترل خواهد بود. بعد از خشک شدن، پخت نمونه‌ها در دمای ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود. با این روش ساخت قطعاتی تا میزان تخلخل ۹۰٪ و اندازه خلل و فرج ۲۰۰ میکرون تا ۲ میلی‌متر امکان‌پذیر خواهد بود. اندازه حفرات در این طرح به وسیله‌ی میکروسکوپ الکترونی محاسبه شده و خواص مکانیکی قطعات ساخته شده نیز به روش استحکام مکانیکی سرد اندازه‌گیری می‌شود. در مقاله‌ای که توسط لوتارت و همکارانش بر روی تولید پیوسته فوم‌های سرامیکی به روش تزریق مستقیم گاز به دوغاب انجام گردید از یک نازل به صورت شکل ۱-۱۸ استفاده گردید.





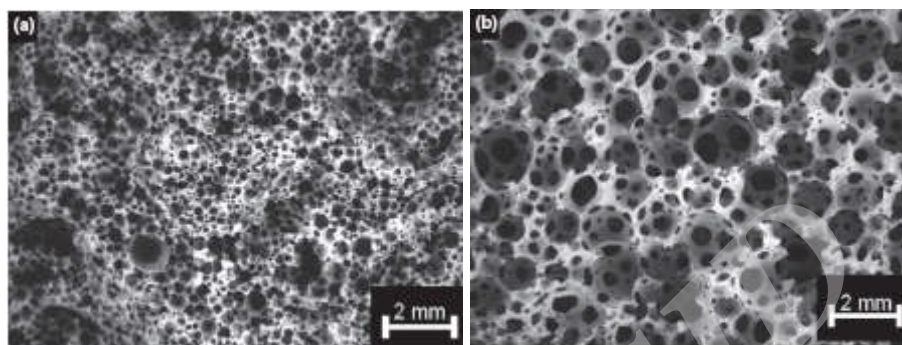
1



شکل ۱-۱۸: نازل تزریق مستقیم گاز به دوغاب طراحی شده توسط لوتارت و همکارانش [۶۸]

مطابق شکل مشاهده می‌شود که همانند توضیحات قبلی این دستگاه نیز از یک لوله داخلی با دیواره ممبران مانند دارای همزن‌های ساکن تشکیل شده است. دوغاب از داخل این لوله عبور کرده و هوا از پوسته خارجی آن به داخل دوغاب تزریق می‌شود. در قسمت پایینی این دستگاه نیز هاردنر اضافه می‌گردد که سبب

سفت شدن دوغاب هوادهی شده می‌گردد. در مقاله لوتارت فوم تر هوادهی شده در داخل قالب‌های استوانه-ای ریخته شده و خشک می‌گردند. نتایج آنالیز میکروسکوپ روبشی نمونه‌های سنتز شده توسط لوتارت و همکارانش در شکل ۱-۱۹ آورده شده است.



شکل ۱-۱۹: تصاویر آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی نمونه‌های فوم متخلخل الف) خلل و فرج ریز، ب) حفرات بزرگ

نتایج این آنالیز نشان می‌دهد که با استفاده از تزریق مستقیم گاز به داخل دوغاب سرامیکی می‌توان فوم‌هایی با حفرات ریز و درشت تولید نمود که این تنوع در اندازه حفرات به عوامل مختلفی نظیر شدت تزریق هوا و دبی دوغاب ورودی بستگی دارد. نکته حائز اهمیت درباره این نوع از فوم‌های متخلخل یکنواختی و همگنی حفرات می‌باشد به طوری که در فوم‌های با حفرات ریز اکثر خلل و فرج ایجاد شده دارای توزیع اندازه حفرات باریکی می‌باشند که این قضیه در مورد فوم با حفرات درشت نیز صدق می‌نماید.

### ۱-۳-۱ فوم‌های مایع، پیش مواد فوم‌های جامد

پیش مواد فوم‌های جامد، اغلب فوم‌های مایع می‌باشند. بنابراین یک فوم جامد معمولاً یک فوم مایع منجمد شده (یا فرآورده‌ای از آن) می‌باشد. از این رو در بردارنده تمام یا بسیاری از مشخصات ساختاری مایع قبلی می‌باشد [۷].

فوم‌های تر به لحاظ ترمودینامیکی ناپایدار هستند زیرا سطح مشترک گاز-مایع در آنها زیاد می‌باشد. فرآیندهای فیزیکی بسیاری وجود دارند که از انرژی آزاد کل سیستم کاسته و منجر به عدم پایداری فوم می‌شوند [۱۰]. پایداری فوم را می‌توان به صورت مدت زمان سپری شده بین زمان تشکیل فوم و اضمحلال آن

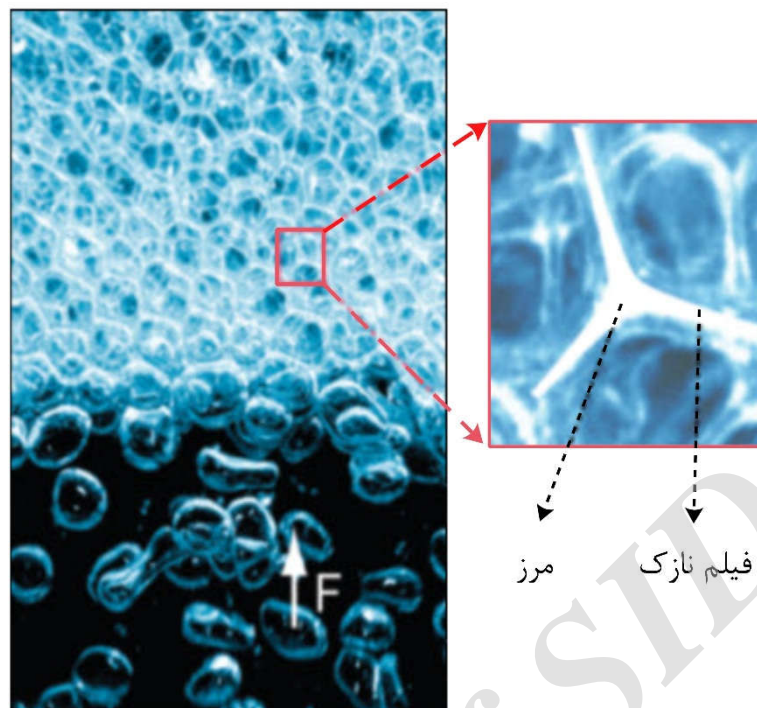
تعریف نمود. روش‌های متعددی برای بررسی جزئی یا کامل بودن خرابی فوم و اندازه‌گیری آن وجود دارد. برخی سیستم‌ها قبل از اینکه به طور کامل درهم بریزند، به صورت جزئی خراب می‌شوند در حالی که برخی دیگر فوراً به هم می‌ریزند. بنابراین نتایج حاصل نیز بسته به روش مورد استفاده متفاوت خواهد بود. به طور کلی هر چه مدت زمان درهم ریختن فوم طولانی‌تر باشد، فوم پایدارتر خواهد بود. یکی از ساده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری پایداری فوم، اندازه‌گیری ارتفاع آن با گذشت زمان می‌باشد [۶۲].

مهم‌ترین مکانیزم‌ها در جهت کاهش پایداری فوم، شامل زه‌کشی<sup>۱</sup>، انعقاد<sup>۲</sup>، کامل شدن استوالد<sup>۳</sup> می‌باشد. زه‌کشی در واقع جدایش فیزیکی بین فاز گازی و مایع در فوم می‌باشد که علت آن را می‌توان جاذبه زمین دانست. اگر در یک فوم، زه‌کشی اتفاق بیفتد، حباب‌های گاز که سبک هستند به سمت بالا حرکت کرده و یک لایه فوم متراکم در بالای قطعه تشکیل می‌دهند. در حالی که فاز مایع که سنگین‌تر است، در قسمت پایین بدنه تجمع می‌نماید. این حالت در شکل ۱-۱۷ نشان داده شده است. حباب‌هایی که در قسمت بالایی تجمع می‌یابند، اغلب تغییر شکل یافته و پس از آرایش مجدد، منجر به ایجاد فوم بسیار متراکم با سلول‌های چند وجهی می‌نمایند [۱۰، ۶۳، ۶۴]. فوم نهایی ریزساختار سه بعدی داشته و توسط فیلم‌های نازک<sup>۴</sup> یا دیواره‌های نازکی به نام لاملا<sup>۵</sup> که بین سلول‌ها قرار دارند جدا می‌شوند. به محل تلاقی سه فیلم نازک که با هم همسایه هستند مرز<sup>۶</sup> گفته می‌شود [۱۰].

انعقاد زمانی رخ می‌دهد که دیواره‌های نازک تشکیل شده پس از زه‌کشی به اندازه کافی پایدار نباشند تا سلول‌های در تماس با هم را جدا از هم نگه دارد و بنابراین منجر به بهم پیوستن حباب‌ها می‌شوند [۱۰، ۶۴].

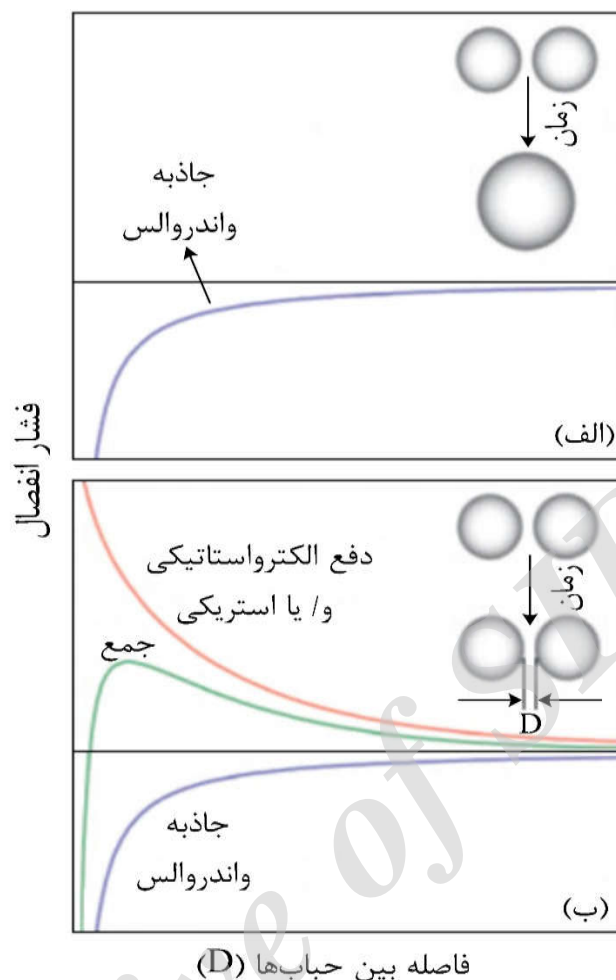
---

<sup>1</sup> Drainage  
<sup>2</sup> Coalescence  
<sup>3</sup> Ostwald ripening  
<sup>4</sup> Thin film  
<sup>5</sup> Lamella  
<sup>6</sup> Plateau borders



شکل ۱-۲۰: زه‌کشی فوم [۱۰]

پایداری دیواره‌های نازک همان طور که در شکل ۱-۱۷ ملاحظه می‌شود توسط نیروهای جاذبه و دافعه بین حباب‌ها تعیین می‌شود. نیروی جاذبه و اندروالس سبب کشش حباب‌ها به سمت یکدیگر (فشار منفی) شده و بنابراین تنها نیروی محرکه برای فروپاشی و اضمحلال دیواره‌های نازک می‌باشد. ممانعت از انعقاد تنها با استفاده از ایجاد نیروهای به اندازه کافی قوی دافعه استریکی و یا الکترواستاتیکی برای غلبه بر جاذبه و اندروالس میسر می‌شود (شکل ۱-۵ ب). این امر با به کارگیری مولکول‌های سورفکتانت و یا ذرات چسبیده شده به فصل مشترک هوا-آب محقق می‌شود [۱۰].



شکل ۱-۲۱: وابستگی فشار بین دو حباب به عنوان تابعی از فاصله آنها: (الف) نیروهای جاذبه واندروالس سبب ایجاد انعقاد می-

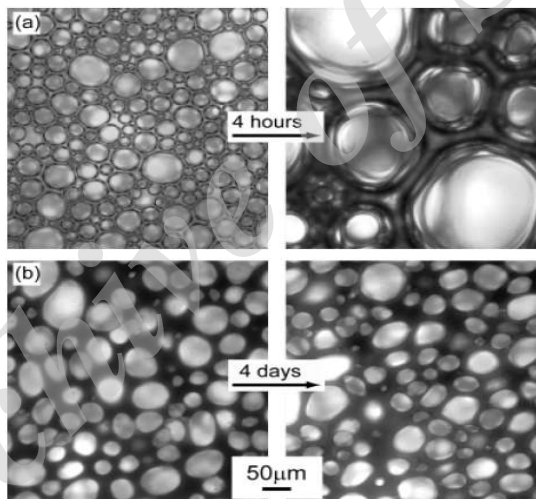
شوند و (ب) تنها توسط ایجاد دافعه استریکی یا الکترواستاتیکی می‌توان بر آن غلبه نمود [۱۰]

فوم‌ها اغلب می‌توانند در مقابل زه‌کشی و انعقاد مقاومت نمایند اما به ندرت می‌توانند در برابر کامل شدن استوالد پایدار بمانند. این مکانیزم در اثر تفاوت در فشار لاپلاس<sup>۱</sup> بین حباب‌های با اندازه متفاوت ایجاد می‌شود. فشار لاپلاس درون یک حباب گازی از انحنای سطح مشترک هوا-آب ناشی می‌گردد. برای حباب-های کروی با شعاع  $R$  و انرژی سطح مشترک گاز-مایع  $\gamma$ ، فشار لاپلاس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

<sup>۱</sup>Laplace pressure

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (1-1)$$

تفاوت در فشار لاپلاس بین حباب‌هایی با اندازه‌های متفاوت R منجر به تسهیم نامتناسب<sup>۱</sup> حباب‌ها و کامل شدن استوالد می‌شود، زیرا به مرور زمان مانند شکل ۱-۱۰ نفوذ ثابت مولکول‌های گاز از حباب‌های کوچک‌تر به بزرگ‌تر اتفاق می‌افتد. سورفکتانت‌ها و بیومولکول‌ها در فصل مشترک گاز-مایع جذب شده و با کاهش انرژی فصل مشترک  $\gamma$ ، سبب کند شدن این فرآیند می‌شوند [۱۰, ۶۵]. بنابراین ترکیبی از فرآیندهای فیزیکی فوق، می‌تواند باعث فروپاشی و اضمحلال فوم در عرض چند ثانیه پس از دمش هوا شود. دوام و عمر فوم را می‌توان با استفاده از جذب سورفکتانت‌هایی با زنجیرهای بلند یا پروتئین در فصل مشترک هوا-آب به چند دقیقه یا چند ساعت افزایش داد [۱۰].



شکل ۱-۲۲: پایداری بیشتر حباب‌ها در اثر جذب سورفکتانت‌ها و بیومولکول‌ها در فصل مشترک گاز-مایع و کاهش انرژی

فصل مشترک  $\gamma$  [۱۰]

اگر چه وجود یک عامل فعال‌کننده سطحی برای ایجاد فوم ضروری است ولی برای تولید فوم پایدار، کافی نمی‌باشد. یک فوم پایدار وقتی به وجود می‌آید که از گسیختن لاملا جلوگیری به عمل آید. فوم تشکیل

<sup>۱</sup>Disproportionation

شده، همواره در معرض اختلال‌های خارجی می‌باشد که عمر آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این اختلال‌ها منجر به دفرمه شدن فیلم، انتشار دفرمگی آن به صورت موج و از هم گسیختگی فوم (وقتی دامنه موج به اندازه کافی بزرگ شود) می‌شود. عوامل متعددی وجود دارند که از گسیختگی فیلم جلوگیری کرده و یا سرعت زه‌کشی مایع را کند می‌نماید و در نتیجه سبب افزایش پایداری فوم می‌شوند [۶۲].

از جمله مزایای روش تزریق گاز برای تولید فوم‌های سرامیکی عبارتند از:

- عدم نیاز به پرس در خط تولید و لذا کاهش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری
- استفاده از روش ریختنی برای تولید و لذا قابلیت افزایش سرعت تولید با افزایش تعداد قالبها
- امکان کنترل دقیق بر روی پارامترهای مهم محصول مثل اندازه‌ی تخلخل‌ها و درصد آنها
- امکان تولید قطعات عایق پیچیده
- امکان تولید قطعات عایقی با قابلیت تحمل دمای ۱۷۰۰ درجه سانتی‌گراد این قطعات در حال حاضر کاملاً وارداتی هستند.

در این روش آنچه دارای اهمیت زیاد می‌باشد، خواص دوغاب از جمله پایداری و رفتار رئولوژی دوغاب است.

#### ۴-۱ رفتار رئولوژیکی سیستم‌های سرامیکی

رئولوژی شاخه‌ای از علم فیزیک است که تغییر شکل خمیرها و سوسپانسیون‌های تحت تنش را مورد بررسی قرار می‌دهد و یکی از شاخه‌های اصلی آن رئولوژی سوسپانسیون‌های سرامیکی است [۵۴]. منظور از خواص رئولوژی سوسپانسیون‌ها، خواص سیالیت آنها بوده که توسط منحنی‌های سیالیت مورد بررسی قرار می‌گیرد. عوامل مختلفی بر خواص سیالیت سوسپانسیون‌ها تاثیر گذار می‌باشد که از آن جمله می‌توان به اندازه و شکل ذرات پراکنده شده، ویسکوزیته محیط مایع، غلظت سوسپانسیون و نیروهای بر هم کنش بین ذرات اشاره نمود. از این رو ساخت دوغاب مناسب با خواص تکرار پذیر یکی از اهداف مهم می‌باشد [۵۵].

### ۱-۴-۱ انواع رفتارهای جریان

به منظور بررسی رفتارهای جریان دوغاب‌های سرامیکی، از منحنی‌های تغییرات تنش بر حسب سرعت برشی استفاده می‌شود که شیب این منحنی گرانروی سیستم است. گرانروی یکی از پارامترهای مهم رئولوژیکی است که نشان دهنده میزان مقاومت و اصطکاک درونی یک سوسپانسیون در برابر تنش اعمالی به آن است. در حقیقت این مقاومت انتقال اندازه حرکت از یک لایه به لایه مجاور در یک سیال در حال حرکت می‌باشد. گرانروی مطابق با رابطه زیر تعریف می‌شود [۵۶].

$$\tau = \mu \frac{dc}{dy} \quad (۲-۱)$$

واحد گرانروی در سیستم متریک  $\text{N.S/m}^2$  یا  $\text{Pa.S}$  است که به افتخار پوازیه<sup>۱</sup> از پیشگامان ویسکوزیته سنجی، پواز نامگذاری شد. به طور کلی رفتارهای موجود در سیالات غیر نیوتنی را می‌توان به دو گروه رفتارهای مستقل از زمان و وابسته به زمان تقسیم نمود.

### ۱-۱-۴-۱ رفتارهای مستقل از زمان

در این سوسپانسیون‌ها با تغییر زمان در مقدار گرانروی تغییری ایجاد نمی‌شود. این رفتار را نیز می‌توان به دو دسته مستقل از تنش (نیوتنی) و وابسته به تنش (شبه پلاستیک و دیلاتانت) تقسیم کرد [۵۴].

### ۱-۱-۱-۴-۱ رفتار نیوتنی

در این سیالات، تنش برشی و سرعت برشی با یکدیگر رابطه مستقیم دارند و گرانروی مقدار ثابتی است. این رفتار در مایعات و سوسپانسیون‌های رقیقی که ذرات آن نسبت به هم جاذبه ندارند مشاهده می‌شود. گرانروی دوغاب‌های رقیق سرامیکی که حاوی ذرات کروی باشند به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\eta = \eta_0 (1 + 2.5v) \quad (۳-۱)$$

<sup>۱</sup>Poiseulle



در رابطه فوق  $\eta$  گر انرژی سوسپانسیون،  $\eta_0$  گر انرژی سوسپانسیون و  $\gamma$  درصد حجمی مواد جامد می‌باشد.

امروزه دوغاب‌های سرامیکی از ذرات ریز و با درصد حجمی جامد زیاد ساخته می‌شوند که این موضوع باعث شده تا ساختارهایی به واسطه واکنش این ذرات با محیط اطراف و یا با یکدیگر درون دوغاب تشکیل شود. این ساختارها باعث انحراف رفتار دوغاب از حالت نیوتنی شده، به طوری که رفتارهای دیگری مشاهده می‌شوند [۵۷].

#### ۲-۱-۱-۴-۱ جریان غلیظ شوندگی برشی

در این حالت، با افزایش سرعت برشی گر انرژی سوسپانسیون افزایش می‌یابد. شرط اولیه برای رخداد این پدیده ریز بودن و فقدان نیروی جاذبه بین ذرات است. وقتی این سوسپانسیون‌ها تحت برش قرار می‌گیرند کاملاً آزادانه جریان می‌یابد و آب از میان حفرات بین ذرات خارج شده، یک لایه مایع بر روی سطح سوسپانسیون ظاهر و فشردگی میان ذرات بیشتر می‌شود. با افزایش بیشتر برش، سوسپانسیون سفت‌تر می‌شود زیرا فشردگی کمتر و سیستم منبسط شده است. همچنین ذرات در تماس مستقیم با هم قرار می‌گیرند که این امر سبب اصطکاک و افزایش گر انرژی می‌شود [۵۸].

#### ۳-۱-۱-۴-۱ رفتار رقیق‌شوندگی برشی (شبه پلاستیک)

در این نوع دوغاب‌ها، گر انرژی با افزایش سرعت برشی کاهش می‌یابد. به دلیل نیروی جاذبه‌ای که بین ذرات سرامیکی وجود دارد، ساختارهایی درون دوغاب تشکیل شده که با اعمال تنش به دوغاب این ساختارها شکسته می‌شود. در سیالات دارای این رفتار، حلال در بین ذرات و ساختارهای تشکیل شده قرار می‌گیرد و با حبس شدن حلال در این ساختار، دوغاب در سرعت‌های برشی کم، سفت به نظر می‌رسد. با اعمال تنش به دوغاب ساختارهای درونی آن شکسته شده و آب موجود در ساختارهای مذکور وارد چرخه ذرات می‌شود [۵۷]. رابطه بین تنش برشی و سرعت برشی در دوغاب‌هایی با رفتار شبه پلاستیک در رابطه ۱-۷ نشان داده شده است.

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^{-n} \quad (n < 1) \quad (7-1)$$

در رابطه فوق،  $k$  ضریب سازگاری می‌باشد. معمولاً این رفتار در دوغاب‌هایی که نیروی جاذبه بین ذرات زیاد است بیشتر روی می‌دهد.

#### ۴-۱-۱-۴-۱ رفتار پلاستیک بینگهام

این سیالات در برابر تنش اعمالی مقاوم بوده و زمانی سیال جریان پیدا می‌کند که تنش به حد معینی برسد. همچنین گرانشی این سیالات ثابت بوده و منحنی آن نیز به صورت تخطی صاف می‌باشد. منحنی مربوط به رفتار این سیالات محور تنش را در نقطه تسلیم قطع می‌کند. به چنین موادی، پلاستیک بینگهام گفته می‌شود [۵۹].

#### ۵-۱-۱-۴-۱ رفتار شبه پلاستیک با تنش تسلیم

در این رفتار، سوسپانسیون‌ها در برابر تنش اعمالی از خود مقاومت نشان می‌دهند و بعد از حد معینی از تنش، سیالیت آنها آغاز می‌شود که این حد را نقطه تنش تسلیم می‌گویند [۵۶]. این رفتار در سوسپانسیون‌هایی که حاوی درصد چسب بالایی است مشاهده می‌شود. در این سوسپانسیون‌ها پیوند ضعیفی میان مولکول‌های پلیمری برقرار است که باعث تشکیل ساختاری ژل مانند می‌شود. این سوسپانسیون‌ها تا رسیدن به حد تنش تسلیم خاصیت الاستیسیته داشته و بعد از آن ساختارشان به هم می‌ریزد، به طوری که رفتار شبه پلاستیک از خود نشان می‌دهند.

#### ۲-۱-۴-۱ رفتارهای وابسته به زمان

رفتارهای جریانی که به آنها اشاره شد، بدون در نظر گرفتن اثر زمان هستند. در واقع با در نظر گرفتن اثر زمان دو نوع رفتار تیکسوتروپی و رئوپوسکی را می‌توان مورد بررسی قرار داد.

#### ۱-۲-۱-۴-۱ رفتارهای تیکسوتراپی

هنگامی که دوغابی تحت برش قرار گرفته و سپس به آن زمان داده شود، پس از مدتی سفت و غلیظ می‌شود که به این رفتار تیکسوتروپی گفته می‌شود. برای بررسی وضعیت تیکسوتروپی یک دوغاب با استفاده از یک ویسکومتر چرخشی، بایستی سرعت در فواصل زمانی یکسان تا رسیدن به سرعت ماکزیمم افزایش یافته و سپس با همان روند تا حد ممکن کاهش یابد. لذا یک منحنی رفت و برگشت وجود خواهد داشت که

این دو منحنی بر هم منطبق نخواهند بود و تشکیل یک حلقه هیستریزیس می‌دهند (شکل ۱-۲۰). علت این امر حضور ساختارهایی است که در دوغاب تشکیل می‌شوند. با افزایش سرعت در مرحله اول، این ساختارها شکسته شده و گرانروی کاهش می‌یابد. هنگام برگشت، زمانی که سرعت برشی کاهش می‌یابد، این ساختارها مجدداً تشکیل می‌شوند که این امر به کندی انجام می‌شود، به طوری که برای هر سرعت برشی خاص، سرعت تشکیل ساختارها کمتر از مقدار آن در حالت رفت در همان سرعت می‌باشد. مساحت محصور بین دو منحنی رفت و برگشت معیاری برای بیان وضعیت تیکسوتروپی دوغاب است [۵۸].

#### ۲-۲-۱-۴-۱ رئوپوسکی

این رفتار عکس رفتار تیکسوتروپی می‌باشد. در این حالت، در دوغاب با سرعت‌های برشی کم، امکان تشکیل ساختار بسیار زیاد است زیرا ذرات در جهات و مواضع مناسب برای تشکیل ساختار قرار می‌گیرند [۵۸].



شکل ۱-۲۳: منحنی تغییرات تنش برشی بر حسب سرعت برشی برای رفتارهای جریان متفاوت [۵۸]

#### ۲-۴-۱ عوامل موثر بر خواص رئولوژی دوغاب‌های سرامیکی

عوامل متفاوتی بر رفتار جریانی یک دوغاب مؤثر است که در ذیل به موارد مهم آن اشاره خواهد شد.

#### ۱-۲-۴-۱ گرانروی فاز مایع

گرانروی دوغاب‌ها تابع مستقیمی از گرانروی فاز پیوسته (مایع) می‌باشد. به طور مثال اگر تمام پارامترها ثابت نگه داشته شوند با دو برابر شدن گرانروی فاز مایع، گرانروی دوغاب دو برابر خواهد شد [۶۰].

#### ۲-۲-۴-۱ غلظت حجمی مواد جامد

غلظت حجمی مواد جامد عبارت از حجم کل ذرات به حجم دوغاب است. این پارامتر نقش اصلی را در رئولوژی دوغاب ایفا می‌کند [۵۸]. هرچه غلظت ذرات جامد بیشتر باشد، سیال کمتری برای حرکت دادن ذرات روی هم حضور خواهد داشت. در این حالت گفته می‌شود که دوغاب دارای دانسیته بالاتری بوده و گرانروی بیشتر خواهد شد، تا جایی که گرانروی در یک غلظت حجمی بیشینه ( $\Phi_{max}$ ) به بی‌نهایت می‌رسد. حداکثر غلظت حجمی وابسته به توزیع اندازه ذرات و شکل و اندازه آنها می‌باشد که یک توزیع وسیع اندازه ذرات باعث افزایش مقدار  $\Phi_{max}$  می‌شود. در این حالت ذرات کوچک می‌توانند در میان حفرات ذرات بزرگ قرار گیرند [۶۰].

در مورد شکل ذرات باید گفت که در سوسپانسیون‌های حاوی ذرات غیرکروی به هنگام چرخش، حجم قابل ملاحظه‌ای از ذرات به حرکت آورده می‌شود، لذا ناحیه آشفته حاصل از یک ذره ایزومتریک بیشتر از یک ذره کروی با حجم یکسان است. بنابراین می‌توان گفت  $\Phi_{max}$  برای ذرات کروی بیشتر می‌باشد. رابطه کریگر-داتری<sup>۱</sup> نشان می‌دهد که با افزایش کسر حجمی ذرات، گرانروی افزایش می‌یابد [۵۷]. در این رابطه  $\Phi_m$  غلظت حجمی بیشینه و  $\Phi$  کسر حجمی ذرات است.

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-n} \quad (\text{۸-۱})$$

<sup>۱</sup>Krieger- Dougherty

#### ۳-۲-۴-۱ اندازه ذرات

معمولاً در دوغاب‌های سرامیکی ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرون و به ویژه ذرات کلئیدی نقش به سزایی دارند [۶۱]. ذرات دیگر موجود در دوغاب قادر به تغییر رفتار جریانی دوغاب نبوده و تنها با افزایش درصد مواد جامد گرانروی افزایش می‌یابد. گرانروی دوغاب‌ها معمولاً با افزایش قطر ذرات تا حدود ۱۰ میکرون به دلیل کاهش نیروهای بین ذرات کاهش می‌یابد و پس از عبور از حد مذکور، در اثر تضعیف نیروهای بین ذرات و نیز به دلیل متناسب بودن انرژی لازم جهت تحرک ذرات با جرم آنها، گرانروی افزایش می‌یابد [۵۸].

#### ۴-۲-۴-۱ شکل ذرات

شکل ذرات از جمله عواملی است که بر روی گرانروی دوغاب اثر می‌گذارد. هرچه ذرات به لحاظ شکل نامتقارن‌تر باشد، انباشتگی آنها بر روی یکدیگر، مشکل‌تر و در نتیجه غلظت حجمی آنها کمتر و گرانروی بیشتر است. به طور کلی در یک غلظت حجمی ثابت، گرانروی اشکال هندسی مختلف به ترتیب از کره، بیضی، ذرات نامنظم کروی، ذرات دیسکی شکل و ذرات میله‌ای شکل افزایش می‌یابد [۵۸].

#### ۵-۲-۴-۱ نیروهای بین ذرات

در مورد ذرات واقع در محدوده اندازه کلئیدی (کمتر از ۱ میکرومتر)، اندازه و بزرگی نیروی بین ذرات تاثیر اساسی بر رفتار سوسپانسیون و رفتار رئولوژیکی آن خواهد داشت. نیروهای موجود در بین ذرات به دو دسته نیروهای جاذبه و نیروهای دافعه تقسیم می‌شوند.

عمده‌ترین نیروی جاذبه میان ذرات نیروی واندروالس می‌باشد که این نیرو به اندازه، شکل ذرات و فاز مایع وابسته است. نیروهای دافعه شامل نیروی دافعه الکترواستاتیک است که این نیرو نیز ناشی از حضور بار در فصل مشترک جامد-مایع است. در واقع بین لایه‌های مضاعف دو ذره، برهم کنشی ایجاد می‌شود که به علت همنام بودن بارها این نیرو دافعه خواهد بود. با نزدیک شدن ذرات نیروی دافعه سرانجام در نقطه‌ای توسط جاذبه واندروالس خنثی می‌شود.

دیگر نیروی دافعه، می‌تواند نیروی دافعه استریک یا ممانعت فضایی باشد که توسط لایه‌های پلیمری جذب شده، ایجاد شود. زمانی که در یک دوغاب، میانگین انرژی از نوع دافعه باشد گر انرژی سیستم کاهش می‌یابد.

#### ۶-۲-۴-۱ افزودنی‌ها (چسب‌ها)

چسب‌ها به شدت بر گر انرژی تأثیر دارند و ویژگی جریانی دوغاب را از حالت نیوتنی به شبه پلاستیک تبدیل می‌کنند. اغلب چسب‌های آلی، مولکول‌های پلیمری با زنجیره بلند هستند. گر انرژی دوغاب وابسته به درصد وزنی چسب (C) طبق رابطه زیر به دست می‌آید [۶۱].

$$\text{Log } \eta = kc \quad (9-1)$$

## فصل ۲: فعالیتهای آزمایشگاهی

Archive of SID

## ۱-۲ مقدمه

به طور خلاصه مراحل انجام پژوهش در بخش اول به صورت زیر می‌باشد:

- انتخاب مواد اولیه
- ساخت نازل جهت تولید فوم آلومینا
- تهیه دوغاب پایدار از پودر آلومینا با استفاده از پراکنده ساز
- بررسی خواص رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی به‌عنوان ورودی دستگاه فوم ساز

## ۲-۲ مواد اولیه

### الف). پودر آلومینا

در این تحقیق جهت آماده‌سازی دوغاب از پودر آلومینای آلفا استفاده شد که ویژگی‌های آن در جدول

۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲: نتایج پودر آلومینای مورد استفاده

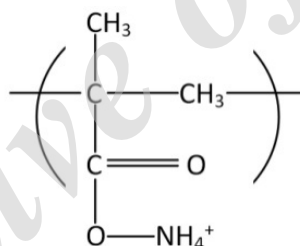
ZN-203	
Typical analysis (%):	≈ ۹۹٫۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰٫۰۱-۰٫۰۳
SiO <sub>2</sub>	۰٫۰۱-۰٫۰۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۰٫۰۱-۰٫۰۳
TiO <sub>2</sub>	≈ ۰٫۰۰۵
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≈ ۰٫۰۰۳
CAO	۰٫۰۱-۰٫۰۵
Na <sub>2</sub> O total	۰٫۳۵-۰٫۵۰
Loss on ignition (%) :	≈ ۰٫۲
Alpha - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) :	≤ ۹۰
Specific surface area (BET) (m <sup>2</sup> /g)	۱۰ - ۲۰
Primary crystal (μm)	۲٫۸ - ۳٫۵
Primary size distribution (%):	
μm ۱۰٫۶ >	



$\mu\text{m} 1.6-63$	
$\mu\text{m} 63-45$	
$\mu\text{m} 45 <$	0-3
$\mu\text{m} 45 <$	5-15
$\mu\text{m} 45-10$	70-80
$\mu\text{m} 10-1.6$	
$\mu\text{m} 1.6 <$	5-15
Density ( $\text{g/cm}^3$ ):	$\leq 3.9$
Bulk density ( $\text{kg/m}^3$ ):	700 - 800

### ب). دولاپیکس CE64

از دولاپیکس CE64 به عنوان عامل پراکنده‌ساز جهت پایدارسازی ذرات آلومینای درون دوغاب استفاده شد. دولاپیکس CE64 یک ترکیب پلی‌آکریلیکی بوده و توسط مکانیزم الکترواستاتیکی سبب پایدارسازی ذرات دوغاب می‌شود. ساختار مولکولی دولاپیکس CE-64 در شکل ۱-۲ آورده شده است.



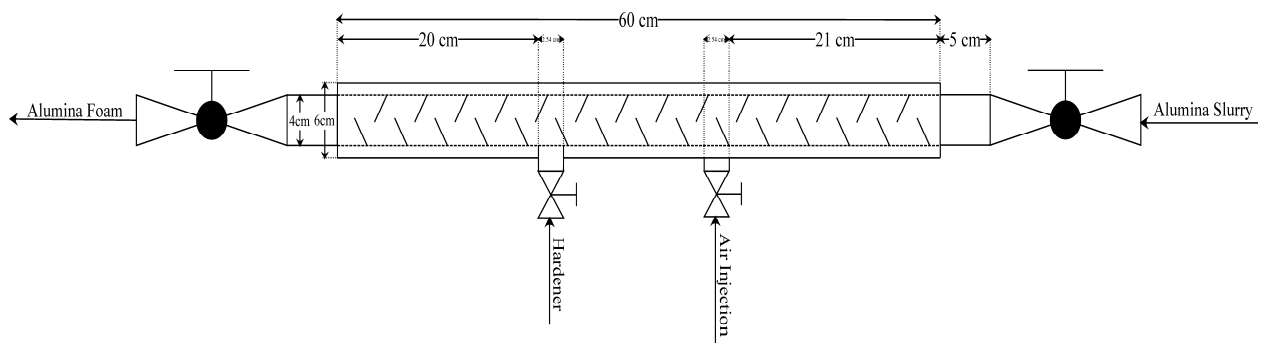
شکل ۱-۲: ساختار مولکولی دولاپیکس CE-64

### ج). سیلیکا سل

از سیلیکا سل پایدار با ۴۰٪ وزنی سیلیس محصول شرکت Schwar به عنوان ترکیب اتصال دهنده استفاده شد.

### ۳-۲ ساخت دستگاه فوم ساز (نازل)

در این طرح جهت تهیه فوم متخلخل آلومینا از دستگاه فوم ساز استفاده می‌گردد. این دستگاه با توجه به مطالعات انجام گرفته در گروه سرامیک های صنعتی جهاد دانشگاهی استان یزد طراحی و تولید گردید. نقشه فنی دستگاه به همراه نمونه ساخته شده آن در شکل ۲-۲ آورده شده است.



شکل ۲-۲: نقشه فنی و تصویر دستگاه فوم ساز

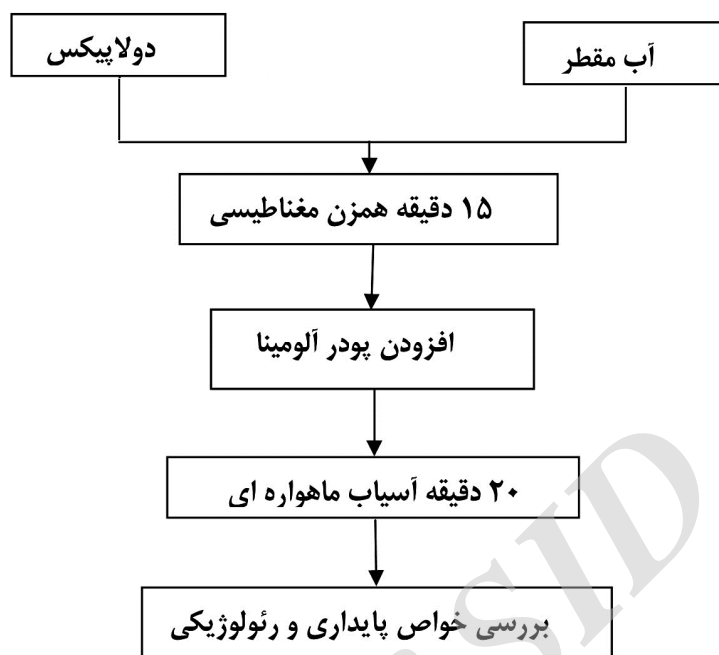
دستگاه طراحی شده دارای یک ورودی دوغاب، ورودی هوای فشرده، ورودی سفت کننده و یک خروجی فوم می باشد. طول لوله اصلی این دستگاه حدود ۶۰ سانتی متر با قطر ۶ سانتی متر می باشد. این لوله اصلی به صورت پوسته و لوله است. بدین معنی که در درون پوسته بیرونی همان طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می شود، یک لوله درونی نیز قرار دارد که در داخل این لوله صفحات موربی با زاویه ۴۵ درجه پشت سر هم قرار گرفته اند که خروج مایع را با دشواری همراه ساخته و کند می نمایند. با وجود پوسته صلب بیرونی لوله داخلی به صورت مشبک طراحی شده است. در دو سوی لوله اصلی دستگاه شیرهای ورودی و خروجی دوغاب و فوم قرار دارند. در فاصله ۲۱ سانتی متری از ورودی لوله اصلی شیر ورودی هوای فشرده قرار گرفته است که هوا را به فاصله بین پوسته و لوله تزریق می نماید و هوای تزریق شده ناگزیر است که از سوراخهای لوله درونی به درون دوغاب در حال حرکت از درون لوله درونی تزریق شده و موجب شود که علاوه بر مخلوط شدن دوغاب داخل لوله سبب ایجاد تخلخل در فوم نهایی گردد. این هوا در سرتاسر لوله اصلی به درون لوله درونی تزریق می شود. در فاصله ۲۰ سانتی متری از ته لوله اصلی شیر ورودی ماده سفت کننده قرار دارد. این ماده سفت کننده در انتهای لوله به دوغاب هوادهی شده تزریق گردیده و سبب محکم شدن دوغاب می گردد. این

دستگاه قابلیت نصب بر روی پایه و یا استفاده به صورت پرتابل را دارد. برای انتقال دوغاب به داخل دستگاه از یک پمپ دوغابی استفاده می‌شود. در حالیکه مایع سفت کننده توسط یک پمپ دیافراگمی به داخل دستگاه تزریق می‌گردد. همچنین هوای فشرده لازم برای ایجاد حباب در ساختار دوغاب برای تولید فوم نیز توسط یک کمپرسور هوا تامین می‌گردد.

## ۴-۲ تهیه دوغاب پایدار آلومینایی

نمونه‌هایی با ۷۰ درصد وزنی پودر آلومینا و مقادیر مختلف پراکنده‌ساز دولاپیکس از ۰ تا ۰/۷ درصد بر مبنای پودر خشک تهیه شد. روند تهیه دوغاب بدین صورت بود که پس از حل کردن دولاپیکس و به وسیله همزن مغناطیسی و به مدت زمان ۱۵ دقیقه در آب مقطر، پودر آلومینا به آن افزوده شد و به جهت دستیابی به یکنواختی بالاتر، عمل اختلاط توسط آسیاب ماهواره‌ای انجام گرفت. مدت زمان آسیاب ۲۰ دقیقه و سرعت آن ۲۰۰ دور بر دقیقه و جنس گلوله مصرفی آلومینایی بود. همچنین پس از تعیین میزان بهینه پراکنده‌ساز دوغاب با درصدهای مختلف جامد طبق شرایط عنوان شده تهیه و خواص پایداری و رئولوژی دوغاب‌ها بررسی شد.

در نهایت درصدهای مختلف PVA به دوغاب پایدار شده با دولاپیکس اضافه شد و خواص دوغاب بررسی گردید. در نهایت جهت بررسی خواص الاستیک دوغاب‌ها از تست Oscillation استفاده می‌شود. شمایی از فرایند در شکل ۲-۳ آورده شده است.



شکل ۲-۳: شمایی از فرآیند بررسی خواص دوغاب‌های آلومینایی

## ۲-۵ آزمایش‌های انجام شده روی دوغاب‌های ساخته شده

### ۲-۵-۱ آزمایش رسوب

۱۰ میلی‌لیتر از هر یک سوسپانسیون‌های تهیه شده را داخل لوله‌های آزمایش با اندازه یکسان ریخته شد و برای مدت زمان ۲۴ ساعت در مکان ساکن قرار گرفتند. وزن رسوب اندازه‌گیری شد و پایدارترین سوسپانسیون مشخص گردید. برای محاسبه درصد رسوب از فرمول ۲-۱ استفاده شد:

$$\text{درصد رسوب} = \frac{\text{وزن رسوب}}{\text{وزن جامد روی رسوب} + \text{وزن رسوب}} \times 100 \quad (1-2)$$

### ۲-۵-۲ بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌ها (آزمایش‌های رئومتری)

دوغاب‌هایی با ۷۰ درصد وزنی آلومینا و مقادیر مختلف دولاپیکس از ۰ تا ۰٫۷ بر مبنای پودر خشک تهیه و ۲۰ میلی‌لیتر از هر یک از نمونه‌ها درون محفظه رئومتر ریخته شد و گرانیوی آنها در محدوده سرعت برشی  $s^{-1}$  ۱۰۰۰-۰٫۱ و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد ثبت گردید. خواص رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی با استفاده از دستگاه رئومتر مدل Phisica MCR300 (ساخت شرکت Auton Pear) انجام گرفت. علاوه بر آن

جهت بررسی خواص الاستیک دوغاب‌های نهایی آزمون Oscillation مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۶- بررسی عوامل موثر بر خواص قطعات فومی

### ۲-۶-۱- محاسبه بهینه درصد SDS

در این مرحله جهت دستیابی به درصد بهینه SDS، پس از افزودن مقادیر مختلف SDS از ۰/۰۱ تا ۰/۰۵ درصد بر مبنای پودر خشک به دوغاب پایدار ۷۵ درصد وزنی آلومینا، دوغاب وارد محفظه فوم‌ساز شده، فشار هوای ورودی به محفظه جهت هوادار کردن دوغاب ۰/۳ Mpa بود. از ورودی دیگر محفظه، سیلیکا سل (۴ درصد وزنی) و اکسید منیزیم (۰/۶ درصد وزنی) به دوغاب اضافه می‌شود. ریخته‌گری در قالب پلیمری به ابعاد ۱۶۰×۴۰×۴۰ mm انجام شد و با بررسی خواص قطعات نهایی، بهینه درصد SDS به دست آمد.

### ۲-۶-۲- اثر تغییر دمای پخت بر خواص فوم تهیه شده

در این مرحله جهت دستیابی به درصد بهینه SDS، پس از افزودن مقادیر مختلف SDS به مقدار ۰/۰۳ درصد وزنی بر مبنای پودر خشک به دوغاب ۷۵ درصد وزنی آلومینا، دوغاب وارد محفظه فوم‌ساز شده، فشار هوای ورودی ۰/۳ Mpa، از طرف دیگر سیلیکا سل (۴ درصد وزنی) و اکسید منیزیم (۰/۶ درصد وزنی) به دوغاب اضافه می‌شود. ریخته‌گری در قالب پلیمری انجام شد و با بررسی خواص قطعات نهایی، بهینه دمای پخت به دست آمد.

### ۲-۶-۳- اثر تغییر درصد جامد روی فوم تهیه شده

به منظور بررسی اثر درصد جامد، دوغاب‌های پایدار با ۷۲، ۷۵، ۷۸ و ۸۰ درصد وزنی تهیه شد و به سیستم وارد شد. فشار هوای ورودی ۰/۳ Mpa و نمونه‌ها در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد زینتر شد. در نهایت خواص فیزیکی فوم‌های ساخته شده بررسی گردید.

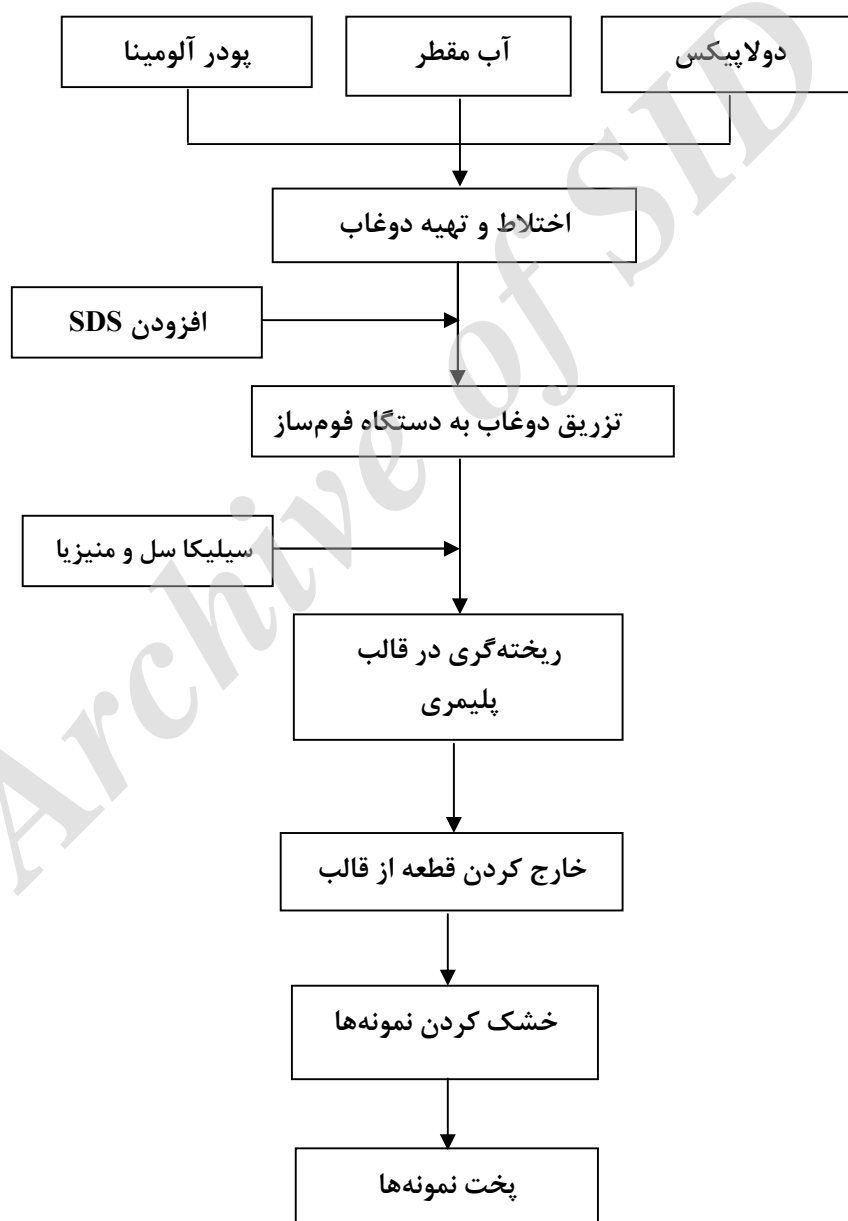
### ۲-۷- خشک کردن قطعات

پس از گذشت حدود ۲ ساعت، قطعات خام از درون قالب خارج گردید. قطعات پس از خروج از قالب کاملاً تر بوده و در مرحله خشک می‌بایست تمام آب موجود در بدنه خارج شود. جهت خشک شدن تدریجی و جلوگیری از بروز هرگونه عیب و ترک، ابتدا نمونه‌ها به مدت یک هفته در دمای محیط قرار گرفتند و

سپس به مدت ۵ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در خشک کن قرار داده شده و به طور کامل خشک شدند.

## ۲-۸. پخت نمونه‌ها

زینتر نمونه‌ها در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۲ ساعت انجام گرفت. سرعت گرمایش ۳ درجه در دقیقه بود و شکل ۲-۴ شمایی از کل فرآیند ریخته‌گری مورد استفاده در این پژوهش آورده شده است.



شکل ۲-۴- فرآیند ساخت قطعه فوم آلومینایی

## ۷-۲- آنالیزهای انجام شده بر روی بدنه‌های نهایی

### ۷-۲-۱- محاسبه چگالی و درصد تخلخل قطعات

برای محاسبه چگالی کلی نمونه‌ها از رابطه ۲-۵ بر حسب  $\text{g/cm}^3$  استفاده شد. بدین صورت که وزن

قطعات اندازه‌گیری و بر حجم آن که با استفاده از ابعاد نمونه به دست آمد، تقسیم شد.

$$\rho_b = \frac{\text{جرم ماده خشک}}{\text{حجم کلی}} = \frac{D}{V}$$

درصد تخلخل کل با استفاده از رابطه ۲-۶ محاسبه شد.

(۲-۶)

$$P = 1 - \rho_r$$

که در آن  $\rho_r$  دانسیته نسبی بوده و توسط رابطه ۲-۷ محاسبه می‌گردد.

(۲-۷)

$$\rho_r = \frac{\rho_b}{\rho_{th}} \times 100$$

$\rho_{th}$  در رابطه فوق دانسیته تئوری می‌باشد.

### ۷-۲-۲- بررسی ریزساختار و مورفولوژی تخلخل با استفاده از میکروسکوپ الکترونی

#### رویشی

برای بررسی ریز ساختار نمونه‌های خام، از میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) مدل (Stereo)

(leica/cambridg Scan360) و پس از پوشش‌دهی طلا استفاده شد. سطح و سطح مقطع بدون عملیات مانت

و پولیش و بر روی سطح شکست بررسی شدند.

### ۷-۲-۳- اندازه‌گیری استحکام فشاری

برای بررسی استحکام بدنه‌های متخلخل از تست استحکام فشاری استفاده شد. بدین منظور نمونه‌های

مکعبی با اندازه ۱۰ میلی‌متر تهیه شد. اندازه‌گیری استحکام توسط دستگاه پرس ۳۵ تن ساخت تجهیز سرام

که مشخصات load cell آن Bong shin, Model:DBBP-200 بود، انجام گرفت. سرعت بارگذاری m/s

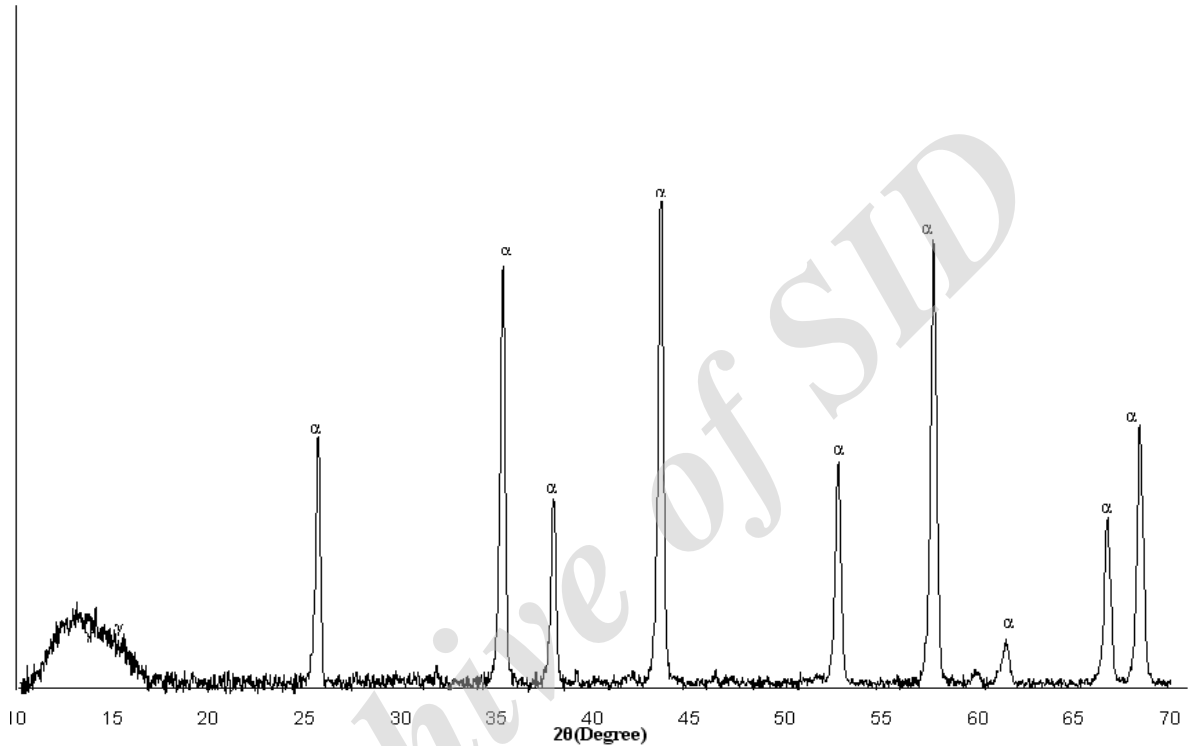
۰٫۰۰۰۴ بود.

## ۸-۲- آنالیزهای مربوط به نمونه مرجع

بر روی نمونه های فوم آلومینای خارجی به عنوان نمونه مرجع تست هایی از جمله XRD ، XRF و

دانسیته بالک (B.D) انجام شد. که نتایج آنها در زیر آورده شده است. نمونه های مرجه ساخت شرکت

Goodfellow می باشد.



(XRD)

: -

XRF : -

Typical analysis (%):	
$\text{Al}_2\text{O}_3$	≈ 99.6
$\text{SiO}_2$	0.1
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.1
$\text{CaO}$	0.03
$\text{Na}_2\text{O total}$	0.3



فصل سوم : نتایج و مباحث

Archive of SID

### ۳-۱- دستیابی به فرمولاسیون دوغاب با خواص بهینه

جهت یافتن دوغاب با خواص مناسب جهت ساخت قطعات فوم آلومینا، مراحل زیر بایستی انجام شود:

- انجام تست رسوب

- انجام آزمایش‌های رئولوژی

ابتدا به بررسی ویژگی‌های دوغاب در حضور پراکنده‌ساز پرداخته می‌شود؛

### ۳-۱-۱- بررسی پایداری دوغاب آلومینا

از آنجایی که ساخت قطعه فوم آلومینایی با خواص مطلوب مستلزم ایجاد یک سوسپانسیون پایدار با

میزان جامد بالا و حداقل ویسکوزیته است، لذا بایستی مقدار بهینه عامل پراکنده‌ساز تعیین گردد.

### ۳-۱-۱-۱- بررسی اثر pH بر پایداری دوغاب‌های بدون پراکنده‌ساز

pH محیط پراکندگی تاثیر زیادی بر روی پایداری دوغاب دارد. زیرا یون‌های هیدروژن و هیدروکسیل

قابلیت جذب بالایی بر روی ذرات آلومینا داشته و شعاع کوچک آنها، شرایط نزدیک شدن به سطح و در

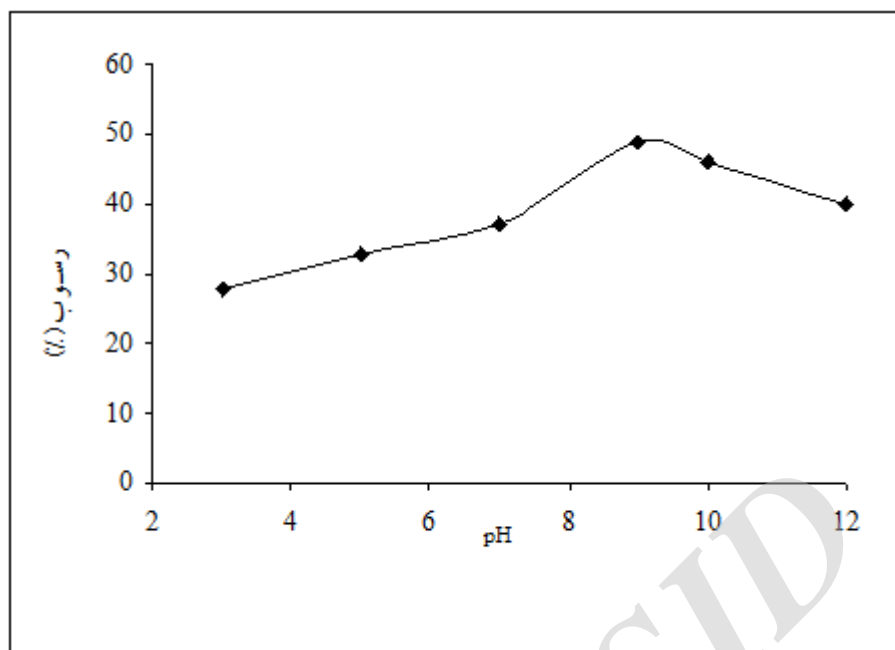
نتیجه اتصال آنها به سطح را فراهم می‌سازد. به منظور تهیه دوغاب با pH اسیدی از اسید نیتریک و pH بازی

از هیدروکسید سدیم استفاده شد. در شکل ۳-۱ تغییرات درصد رسوب بعد از ۲۴ ساعت بر حسب pH

دوغاب‌ها نشان داده شده است. مشاهده شد در محیط اسیدی میزان رسوب کمتر بوده به عبارت دیگر

احتمال تشکیل آگلومره در محیط اسیدی کمتر است و دوغاب تهیه شده در محیط اسیدی از پایداری

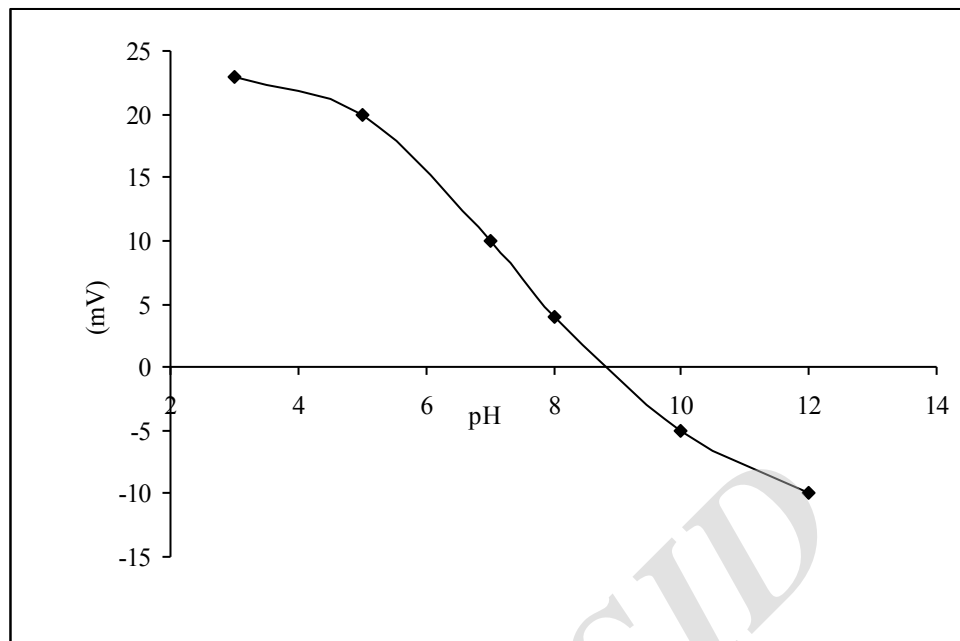
بالتری برخوردار می‌باشد.



شکل ۳-۱- تغییرات درصد رسوب بر حسب pH در دوغابهای بدون پراکنده ساز

در دوغاب با pH اسیدی ذرات تمایل به جذب یونهای  $H^+$  از محیط دارند. بنابراین بار سطحی ذرات مثبت است. در نقطه IEP<sup>۱</sup> (pH= ۹) میزان بار بر روی سطح ذرات آلومینا صفر است. در این نقطه هیچ دافعه‌ای بین ذرات وجود نداشته و جاذبه وان دروالس موجب چسبیدن ذرات به یکدیگر می‌شود. با دور شدن از این نقطه، پتانسیل زتا افزایش یافته و در نتیجه سد انرژی لازم جهت فلوکولاسیون بیشتر می‌شود، بنابراین دوغاب‌های تهیه شده در pH اسیدی از پایداری بیشتری برخوردار هستند.

<sup>۱</sup> -Iso electric point



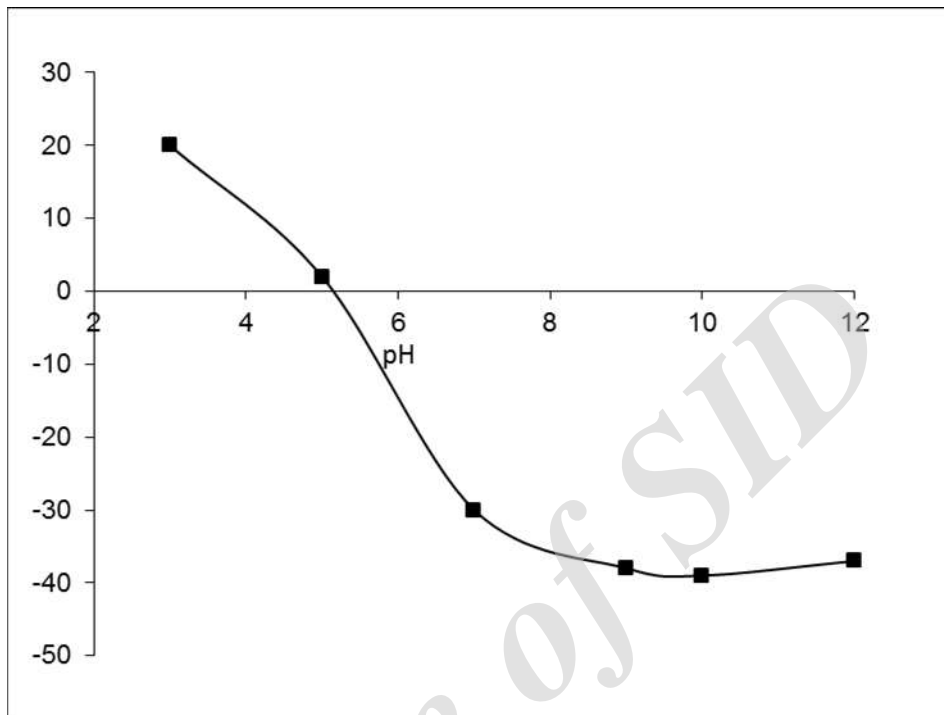
شکل ۳-۲- نمودار تغییرات پتانسیل زتا بر حسب pH برای دوغاب‌های بدون پراکنده‌ساز

### ۳-۱-۱-۲- بررسی اثر همزمان پراکنده‌ساز و pH بر پایداری دوغاب‌ها

اگر چه به طور کلی اثر pH در پراکنده‌سازی ذرات آلومینا قابل توجه است ولی سرعت رسوب کردن دوغاب در اثر نیروی وزن در نتیجه آگلومراسیون، تا حدی بالا است. بنابراین برای بهبود پایداری دوغاب می‌بایست از پراکنده‌ساز استفاده کرد. که جهت بهبود پایداری دوغاب از دولاپیکس CE64 به عنوان پراکنده‌ساز استفاده شد. دولاپیکس CE64 یک ترکیب پلی‌اکریلیکی بوده و به وسیله مکانیزم الکترواستاتیکی سبب پایداری ذرات دوغاب می‌شود. لازم به ذکر است که جذب دولاپیکس CE64 بر سطح ذرات آلومینا موجب افزایش بار الکتریکی سطح ذرات آلومینا می‌شود.

پتانسیل زتای دوغاب‌های حاوی ۰٫۵٪ دولاپیکس در pH های مختلف در شکل ۳-۲ نشان داده شده است. با مقایسه شکل‌های ۱-۳ و ۲-۳ مشاهده می‌شود دولاپیکس باعث انتقال IEP از pH حدود ۹ به ۴ می‌شود. این بدان معناست که در حدود pH=۴ هیچ باری بر روی سطح ذرات وجود ندارد و ذرات در اثر نیروی جاذبه وان‌دروالس به یکدیگر می‌چسبند. مشاهده می‌شود با افزایش pH، پتانسیل زتا به دلیل غلبه بار سطحی ایجاد شده توسط پراکنده‌ساز افزایش می‌یابد. در pH=۷ پتانسیل زتا به ۳۱- می‌رسد که نشان از

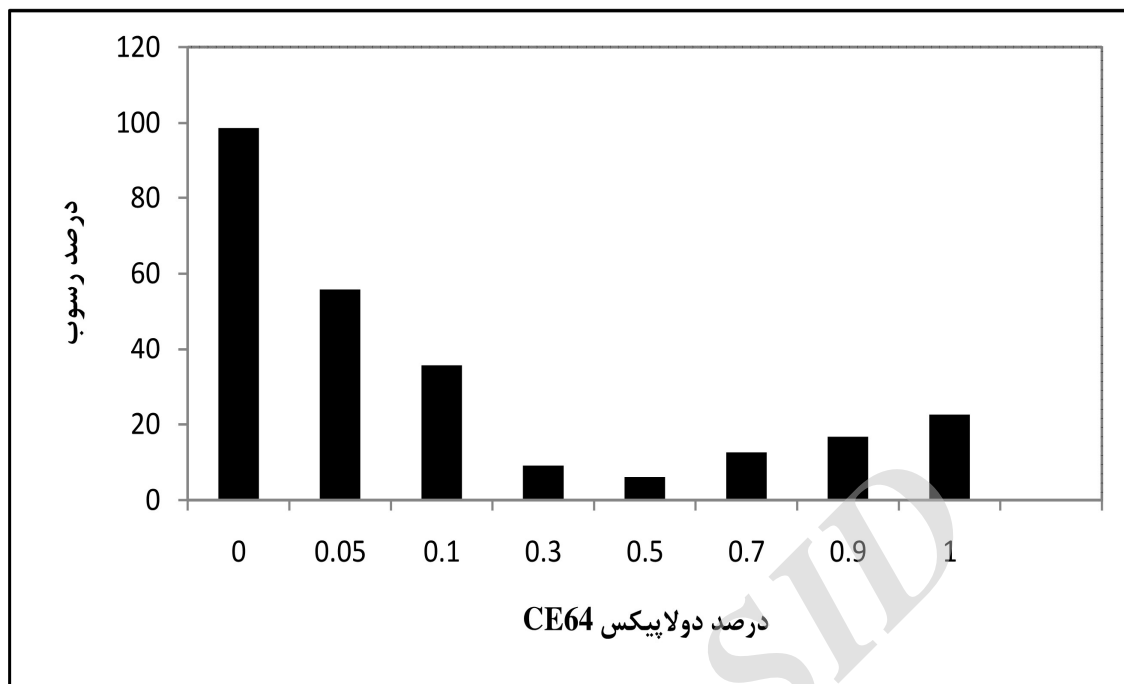
مناسب بودن این pH جهت ادامه کار دارد. در واقع از آنجایی که بالا بردن pH موجب خوردگی لوله فومساز خواهد شد، pH=7 به عنوان pH مناسب جهت ادامه کار انتخاب شد.



شکل ۳-۳- نمودار تغییرات پتانسیل زتا بر حسب pH برای دوغاب‌های با پراکنده‌ساز

### ۳-۱-۱-۲- اثر میزان پراکنده ساز بر پایداری دوغاب آلومینا

جهت بررسی نحوه تاثیر میزان دولاپیکس روی پایداری دوغاب، افزایش تدریجی دولاپیکس به ازای میزان جامد دوغاب مد نظر قرار گرفت. دوغاب‌های تهیه شده دارای ۷۰ درصد وزنی پودر آلومینا بودند. در شکل ۳-۲ اثر افزودن دولاپیکس بر درصد رسوب پس از ۲۴ ساعت نشان داده شده است. کمترین مقدار رسوب بیانگر حالت نسبتاً پایدار می‌باشد.



شکل ۲-۴: درصد رسوب در دوغاب برحسب درصد‌های مختلف دولاپیکس پس از ۲۴ ساعت

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود، دوغاب با مقدار دولاپیکس  $0.3$  تا  $0.5$  درصد کمترین میزان رسوب را دارا می‌باشد. در دوغاب‌هایی با میزان دولاپیکس زیر درصد بهینه، ذرات به صورت کامل توسط پراکنده‌ساز پوشش‌دهی نمی‌شوند و بنابراین نیروهای جاذبه و اندروالس غلبه کرده و دوغاب فلوکوله می‌شود و میزان رسوب بیشتری تشکیل می‌شود. در دوغاب‌هایی با درصد دولاپیکس بیش از  $0.5$  درصد، میزان اضافی پراکنده‌ساز که جذب سطح ذرات نشده وارد فاز مایع شده، به عنوان الکترولیت عمل کرده و باعث کاهش لایه مضاعف الکتریکی شده و آگلومراسیون اتفاق می‌افتد. به عبارتی می‌توان نتیجه گرفت دوغاب با درصد دولاپیکس بین  $0.3$  تا  $0.5$  درصد بیشترین میزان پتانسیل زتا را دارد که این امر کاهش احتمال آگلومراسیون و رسوب را در بر دارد. به این ترتیب می‌توان نتیجه گرفت دوغاب با مقدار دولاپیکس بین  $0.3$  تا  $0.5$  درصد، حالت بهینه برای دارا است.

### ۳-۱-۲- بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی

در فرایندهای شکل‌دهی قطعات سرامیکی شامل ریخته‌گری دوغابی، ریخته‌گری نواری و سانتریفیوژ نیاز به دوغابی با خواص رئولوژی مناسب وجود دارد. در این طرح نیز از آنجا که دوغاب بایستی از یک نازل عبور

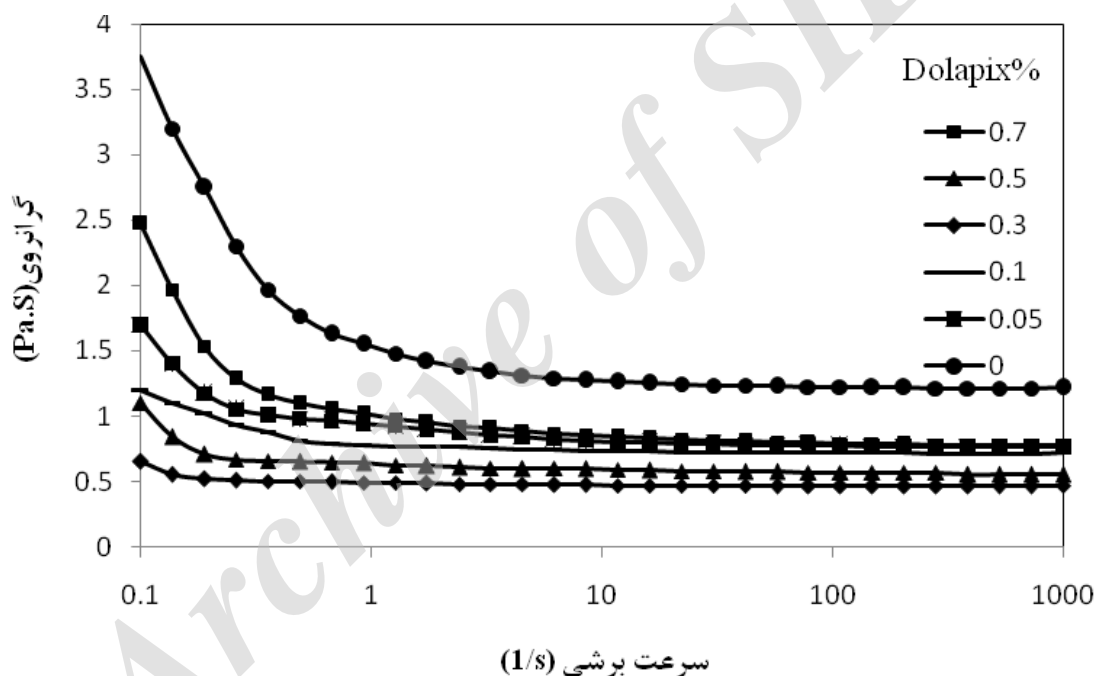
کند بررسی رفتار رئولوژی آن بسیار مهم است. به طوری که رفتار رئولوژی بر خواص نهایی قطعه ساخته شده تاثیر خواهد گذاشت. به منظور بررسی رفتار رئولوژی دوغاب‌ها از منحنی‌های گرانروی بر حسب سرعت برشی در محدوده سرعت‌های برشی  $S^{-1}$  ۱۰۰۰-۰٫۱ استفاده شد. نیروی جاذبه بین ذرات آلومینا در محیط آبی موجب به هم چسبیدن ذرات آلومینا و تشکیل ساختارهایی درون دوغاب شده که با افزایش سرعت برشی این ساختارها از بین رفته و گرانروی کاهش می‌یابد. تا جایی که سرعت برشی به حدی می‌رسد که دیگر هیچ ساختاری درون دوغاب نمی‌تواند تشکیل شود و دوغاب رفتار نیوتنی نشان می‌دهد.

### ۳-۱-۲-۱- تاثیر میزان پراکنده ساز بر رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی

جهت بررسی درصد بهینه دولاپیکس، اثر افزایش تدریجی دولاپیکس بر گرانروی مورد بررسی قرار گرفت. منحنی‌های گرانروی بر حسب سرعت برشی برای دوغاب‌های با درصدهای متفاوت دولاپیکس در شکل ۳-۵ آورده شده است. تمامی دوغاب‌ها دارای ۷۰ درصد وزنی آلومینا بودند. نتایج نشان می‌دهد که دوغاب با میزان مطلوب دولاپیکس به دست آمده از تست رسوب‌گذاری کمترین ویسکوزیته و تنش برشی را نیز دارا است.

همان‌طور که در شکل‌های ۳-۵ مشاهده می‌شود دوغاب بدون پراکنده‌ساز دارای گرانروی بسیار بالایی است، اما افزودن ۰٫۰۵ درصد پراکنده‌ساز ویسکوزیته دوغاب را به شدت کاهش می‌دهد که این تغییر نشان‌دهنده اثر مثبت پراکنده‌ساز بر پایداری دوغاب می‌باشد. با افزایش درصد دولاپیکس تا ۰٫۳ درصد وزنی آلومینا به تدریج گرانروی کاهش می‌یابد و در مقادیر بیش از ۰٫۳ درصد مجدداً گرانروی افزایش می‌یابد. در ادامه به تحلیل رفتار رئولوژی دوغاب با تغییر در میزان پراکنده‌ساز می‌پردازیم. در واقع با توجه به نتایج آزمون رئومتری می‌توان نتیجه گرفت، تغییر رفتار رئولوژی از شبه پلاستیک به نیوتنی با افزایش میزان دولاپیکس مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت در درصد پراکنده‌ساز بهینه (۰٫۳ درصد) ذرات نسبت به یکدیگر جاذبه‌ای ندارند و احتمال آگلومراسیون در دوغاب بسیار کم است. دوغاب با میزان دولاپیکس کمتر از بهینه، میزان پراکنده‌ساز برای پوشش‌دهی سطح ذرات کافی نبوده و جاذبه بین ذرات موجب تشکیل آگلومره درون دوغاب می‌شود. در این حالت مقداری از آب سیستم درون آگلومره‌ها حبس

شده و گرانیروی بالا می‌رود. چنان چه از میزان پراکنده‌ساز بیشتر از بهینه استفاده شود، دولاپیکس اضافی به عنوان الکترولیت عمل کرده و ضخامت لایه مضاعف الکتریکی کاهش می‌یابد. در این صورت نیز نیروی جاذبه بین ذره‌ای موجب تشکیل ساختارهایی درون دوغاب می‌شود. و در واقع نیروی برشی بیشتری جهت حرکت دادن لایه های دوغاب بر روی یکدیگر نیاز است. بنابراین میزان بهینه دولاپیکس ۰٫۳ درصد می‌باشد که با نتیجه حاصل از تست رسوب نیز نسبتاً تطابق دارد. با توجه به تست‌های رئومتری انجام شده می‌توان نتیجه گرفت، در این درصد پراکنده‌ساز احتمال تشکیل آگلومره درون دوغاب بسیار کم است و بنابراین دوغاب پایدارترین حالت را دارا می‌باشد.



شکل ۳-۵- تاثیر میزان دولاپیکس بر رفتار رئولوژی دوغاب آلومینا

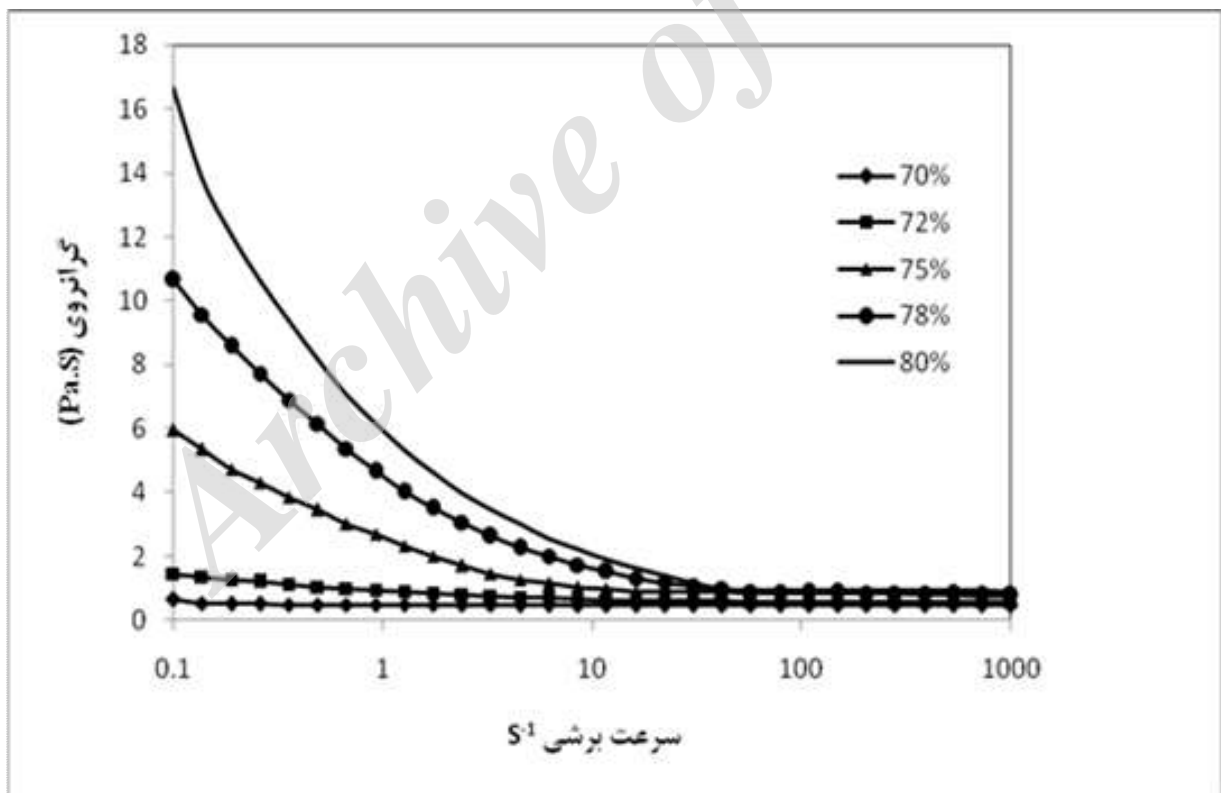
### ۳-۱-۲-۲- تاثیر درصد جامد بر رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینایی

نتایج رئولوژی به دست آمده از تغییر درصد جامد در دوغاب‌هایی با ۷۰، ۷۲، ۷۵، ۷۸ و ۸۰ درصد وزنی جامد در شکل ۳-۶ ارائه شده است. به دلیل اینکه میزان بهینه پراکنده‌ساز مستقل از درصد جامد بوده و برای دوغاب‌های غلیظ و رقیق یکسان است، کلیه دوغاب‌ها با ۰٫۳ درصد وزنی دولاپیکس ساخته شد.

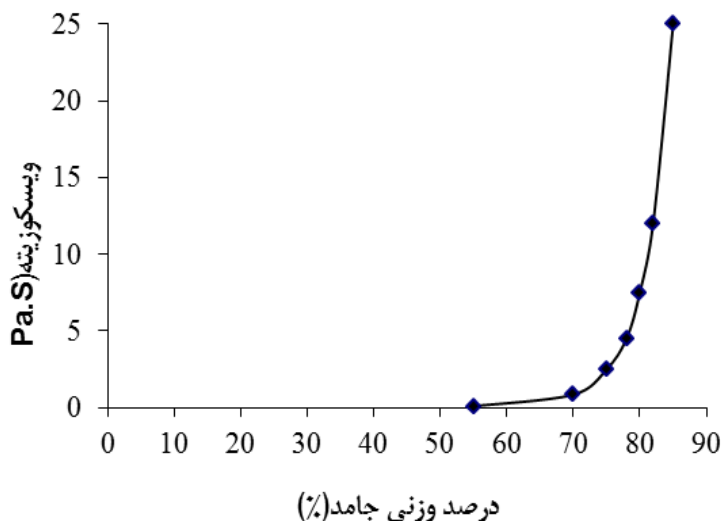
در شکل افزایش میزان ویسکوزیته و تغییر رفتار رئولوژی دوغاب از نیوتنی به شبه پلاستیک با افزایش



میزان جامد مشاهده می شود. با افزایش میزان جامد دوغاب، سیال کمتری جهت حرکت دادن ذرات بر روی یکدیگر وجود دارد که باعث افزایش گرانروی می شود. همچنین با افزایش غلظت دوغاب، برهم کنش و احتمال برخورد ذرات با یکدیگر افزایش می یابد و دوغاب مقاومت بیشتری در مقابل نیروی برشی از خود نشان می دهد. در سرعت های برشی پایین دوغابها رفتار شبه پلاستیک از خود نشان می دهند. با افزایش سرعت برشی، تغییر رفتار به نیوتنی مشاهده می شود و گرانروی به یک حد ثابتی می رسد. در فرآیند تولید فوم های سرامیکی، رفتار شبه پلاستیک دوغاب جهت تولید فوم، مطلوب است زیرا تحت برش و هنگام تبدیل دوغاب به فوم، گرانروی کاهش می یابد که این امر سبب تسهیل تولید حباب می شود و همچنین پس از حذف برش و در شرایط استاتیک، گرانروی افزایش می یابد که باعث تعویق خرابی فیلم های نازک حول حباب ها می شود.



شکل ۳-۶: تاثیر تغییر درصد جامد بر رفتار رئولوژی دوغابها



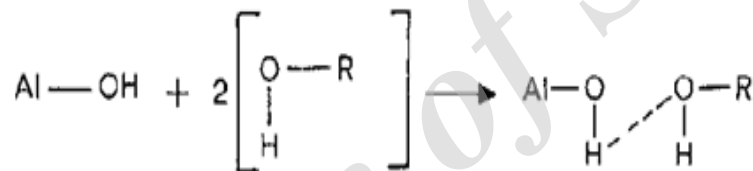
شکل ۳-۷- نمودار تغییرات ویسکوزیته بر حسب درصد جامد در سرعت برشی  $1S^{-1}$  برای دوغاب آلومینا

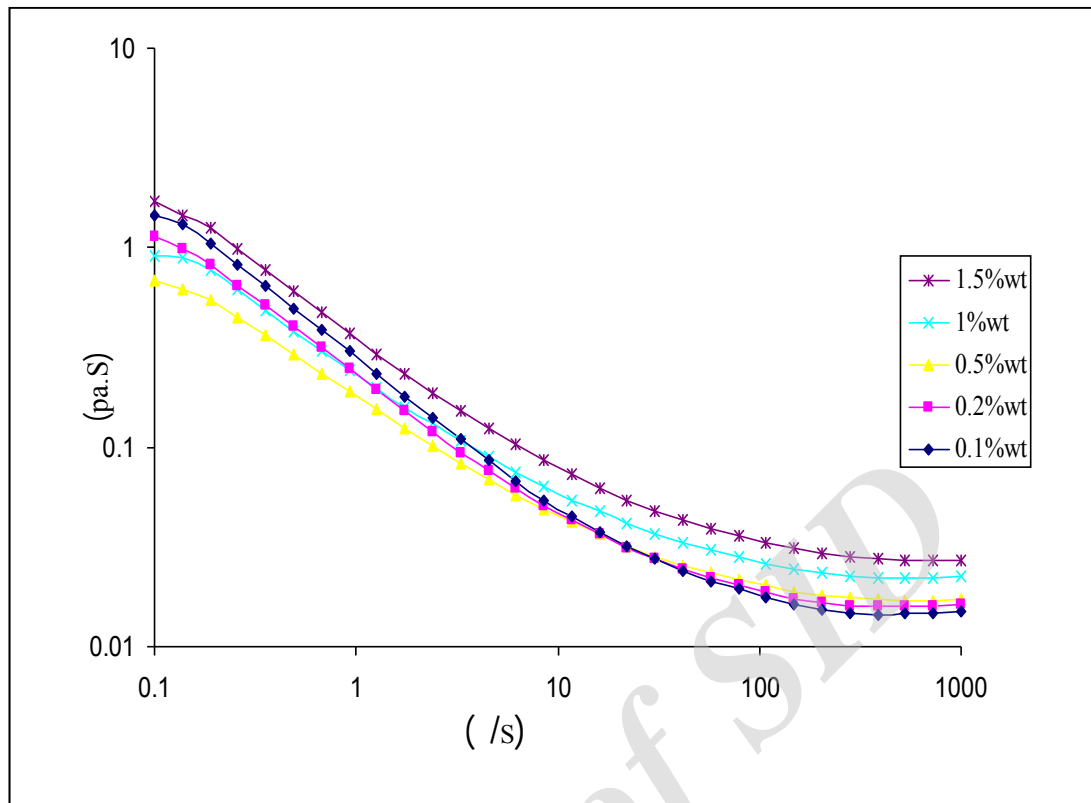
یک دوغاب مناسب برای ریخته‌گری بایستی در سرعت برشی  $1S^{-1}$ ، دارای ویسکوزیته در محدوده  $3Pa.S$  - ۱ باشد [۱]. در شکل ۳-۷ نمودار تغییرات ویسکوزیته بر حسب درصد جامد در سرعت برشی  $1S^{-1}$  برای دوغاب آلومینایی مشاهده می‌شود که بر اساس آن درصد جامد بیشینه برای دوغاب ۸۰٪ بود. در دوغاب با درصد بالاتر از بیشینه افزایش در ویسکوزیته مشاهده شد به این دلیل که ذرات به اندازه‌ای به یکدیگر نزدیک می‌شوند که لایه دابل الکتریکی آنها همپوشانی کرده و جاذبه وان‌دروالس بین ذرات عمل کرده و مقاومت دوغاب در برابر نیروی برشی ناگهان افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت دوغاب با درصد جامد ۷۸- ۷۲ درصد مناسب برای ساخت فوم می‌باشد.

### ۳-۱-۲-۳- تاثیر افزایش بایندر رفتار رئولوژی دوغاب‌های آلومینا

بایندها ملکول‌های پلیمری هستند که بین ذرات نفوذ کرده و شبکه‌ای ایجاد می‌کنند که ذرات را نزدیک یکدیگر نگه می‌دارند بدون آنکه آنها با هم در تماس قرار گیرند. در این طرح نیز جهت افزایش استحکام خام قطعات فوم ساخته شده، لازم است از یک بایندر مناسب استفاده شود. در واقع از آنجا قطعات متخلخل، شکننده بوده و استحکام خام پایینی دارند، استفاده از بایندر لازم است.

PVA یک پلیمر غیر یونی است که از طریق مکانیزم پایدارسازی استریک می‌تواند به پایداری دوغاب آلومینایی کمک کند ولی در اینجا بیشتر نقش بایندر را بازی می‌کند. البته جذب آن بر روی ذرات آلومینا ضعیف است [۳۸]. بر اساس شکل ۳-۸ تا ۰٫۵٪ وزنی چسب بر روی ذرات جذب شده و به صورت یک مانع استریکی عمل می‌کند و از آگلومره شدن ذرات جلوگیری می‌کند. به همین دلیل با افزایش PVA تا ۰٫۵٪ وزنی ویسکوزیته به تدریج کاهش یافته ولی با افزایش PVA پدیده فلوکولاسیون اتفاق می‌افتد به این دلیل که PVA دیگر نمی‌تواند جذب سطح شود بنابراین غلظت آن در نزدیکی ذرات بالا رفته و تخلیه فلوکولاسیون اتفاق می‌افتد و ویسکوزیته افزایش می‌یابد. PVA از طریق پیوند هیدروژنی بر روی سطح ذرات آلومینا جذب می‌شود. نحوه جذب آن بر سطح ذرات در زیر نشان داده شده است [۶۱].





شکل ۳-۸- تاثیر افزودن PVA بر رفتار رئولوژی آلومینا

### ۳-۱-۲-۴- آزمایش Oscillation

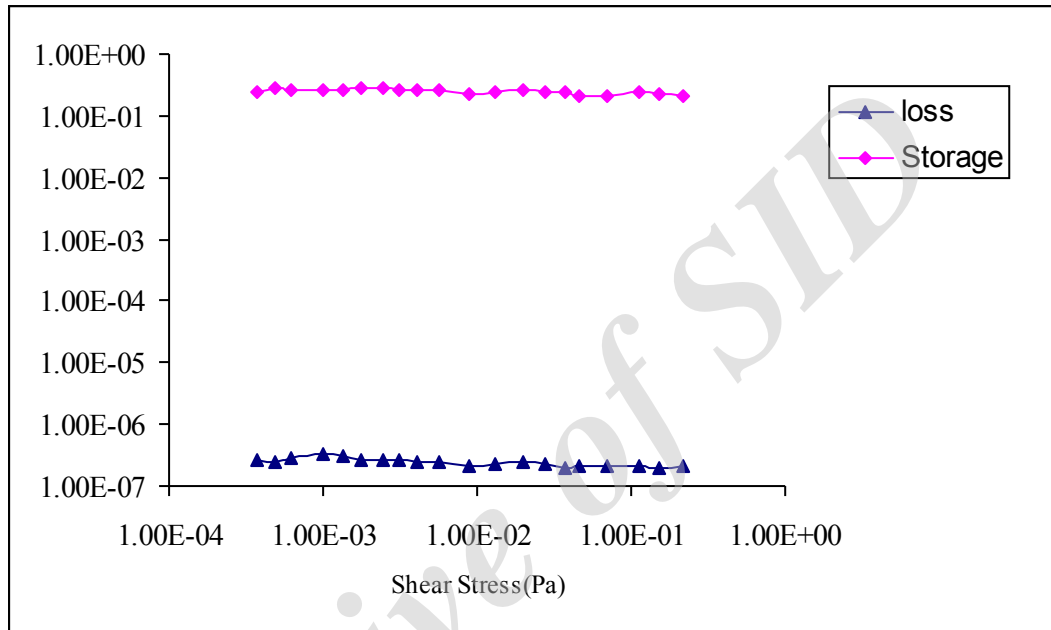
آزمایش به وسیله ویسکومتر چرخشی قادر به بررسی رفتار الاستیک نیست در نتیجه جهت بررسی رفتار دوغابها از آزمایش Oscillation استفاده شد. در یک اندازه گیری رئولوژیکی دینامیکی یک اعوجاج سینوسی به ماده اعمال می شود که معمولاً به صورت تنش است پاسخ سینوسی حاصله بررسی می شود. در این آزمون، دو داده مستقل به دست می آید.

(۱)  $G'$  (مدول ذخیره) که نمایانگر رفتار الاستیک مواد است. (۲)  $G''$  (مدول تلف شده) که مشخص کننده رفتار ویسکوز مواد است. در تنش های کم جایی که  $G'$  مستقل از تنش است دوغاب مثل جامدات عمل کرده و بیشتر رفتار الاستیک از خود نشان می دهد و بزرگی تنش در انتهای این منطقه تنش بحرانی نامیده می شود. بالای ساختارها شکسته و یک تغییر از الاستیک به ویسکوز مشاهده می شود.

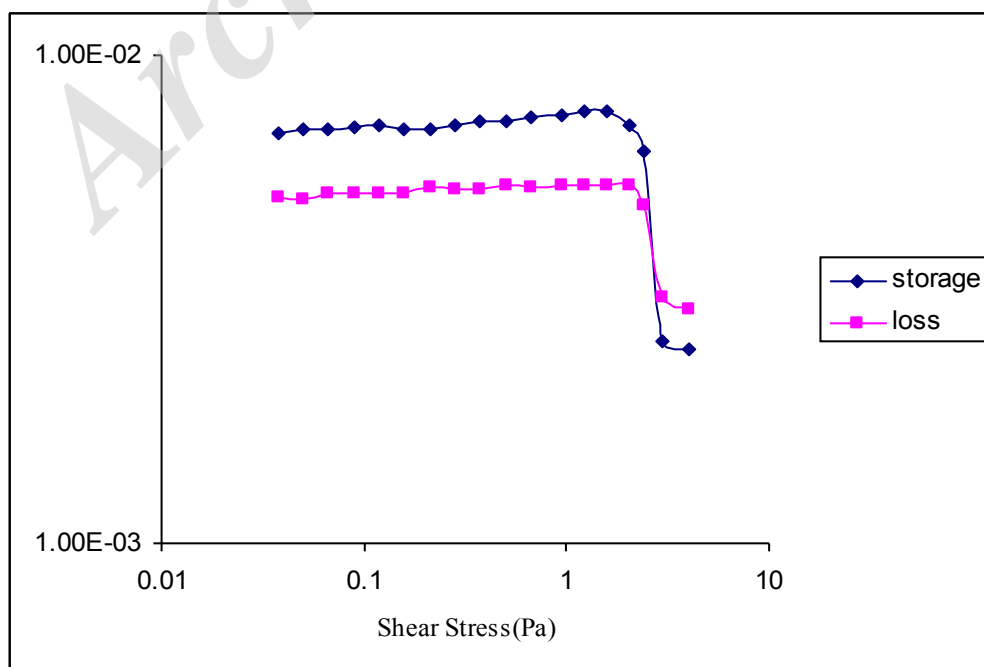
تست Oscillation بر روی سه دوغاب با مشخصات زیر انجام شد.

جدول ۲-۲: مشخصات دوغاب‌های تحت آزمون **Ossilation**

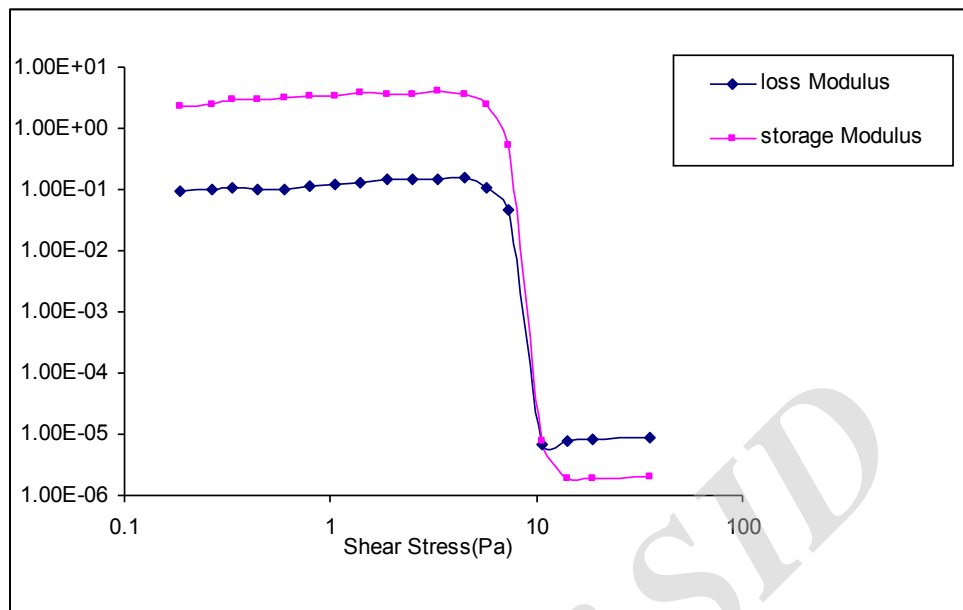
کد دوغاب	درصد جامد	درصد دولاپیکس (بر اساس وزن آلومینا)
D50	۵۰	۱/۳٪
PD50	۵۰	۰/۵٪
D70	۷۰	۱/۳٪



شکل ۳-۹- تست Oscillation انجام شده بر روی دوغاب D50



شکل ۳-۱۰- تست Oscillation انجام شده بر روی دوغاب D70



شکل ۳-۱۱- تست Oscillation انجام شده بر روی دوغاب PD50

وقتی تنش به تنش بحرانی برسد تمام ساختارها از هم گسسته شده و تغییر از رفتار الاستیک به ویسکوز در دوغاب ایجاد می‌شود. به عبارتی جریان در سیستم آغاز می‌گردد. در دوغاب D50 تنش بحرانی مشاهده نشد. اختلاف  $G'$  و  $G''$  نسبت به دو دوغاب دیگر بیشتر بود. به نظر می‌رسد جذب کافی دیسپرزنت بر سطح ذرات و غلبه نیروی دافعه بر جاذبه بین ذرات مانع از تشکیل ساختار درون دوغاب شد در تمامی تنش-های برشی دوغاب رفتار ویسکوز نشان می‌دهد.

در درصد‌های جامد بالای ذرات تقابل بین ذرات را بیشتر کرده و باعث تشکیل سریع‌تر ساختارهایی درون دوغاب می‌گردد. در دوغاب PD50 حجم قابل توجهی از آب درون ساختارهای تشکیل شده قرار گرفته و میزان آب جهت سیالیت سیستم کاهش می‌یابد.

بهترین نمونه جهت تشکیل فوم آلومینایی، دوغابی است که بر روی سطح ذرات دیسپرزنت به طور کامل جذب شده باشد و هیچگونه ساختاری در داخل دوغاب تشکیل نشده باشد.

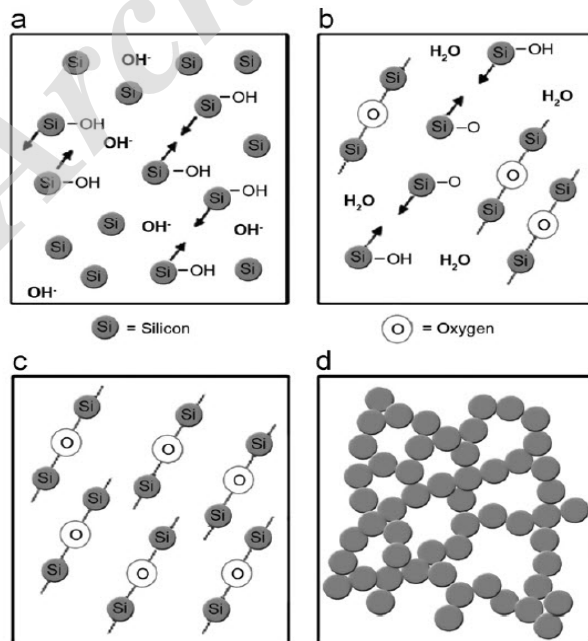
### ۲-۳- دستیابی به فوم آلومینا با خواص بهینه

در این قسمت از طرح دوغاب پایدار شده حاوی سورفکتانت وارد سامانه فوم ساز شد و با تزریق هوا، دوغاب هوادار گردید. سپس با استفاده از سیلیکا سل و اکسید منیزیم این دوغاب هوادار به ژل مرطوب تبدیل شده و سپس خشک و پخت گردید.

در این بخش از طرح عوامل موثر بر خواص قطعه نهایی بررسی شد. در نهایت قطعه‌ای مورد نظر است که در حین داشتن چگالی پایین، از استحکام مناسبی نیز برخوردار باشد.

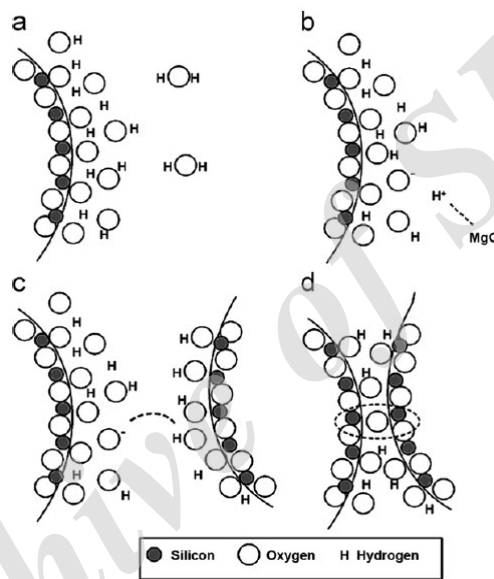
### ۱-۲-۳- فرآیند ژلاسیون و تشکیل فوم مرطوب

جهت تبدیل دوغاب هوادار آلومینا به ژل مرطوب از سیلیکای کلوئیدی استفاده شد. ساختار داخلی ذرات سیلیکای کلوئیدی از شبکه‌های سیلوکسان (-Si-O-Si-) تشکیل می‌گردد، در حالیکه لایه سطحی با بسیاری از گروه‌های سیلانول (-SiOH) و نیز گروه‌های هیدروکسیل (-OH) پوشیده می‌گردد. زمانی که گروه‌های سیلوکسان در سطح ذرات نانومتری با مصرف گروه‌های سیلانول از طریق واکنش زیر تشکیل می‌گردند فرآیند ژلاسیون انجام می‌گردد. [۶۶].



شکل ۳-۱۲- مکانیزم ژلاسیون سیلیس کلئیدی

پودر منیزیای زینتر شده اغلب به عنوان یک افزودنی گیرش‌دهنده در منابع مطالعاتی استفاده شده است [۶۷]. منیزیا معمولاً با تشکیل هیدروکسید منیزیم واکنش‌های آنیونی انجام می‌دهد و با خروج یون‌های هیدروژن از گروه‌های Si-OH باعث تشکیل باندهای سیلوکسان بیشتر و افزایش سرعت ژلاسیون سیلیکای کلئیدی می‌گردد. در اینجا از ۴ درصد وزنی سیلیکای کلئیدی و ۰٫۶ درصد وزنی منیزیا به دوغاب اضافه شد که در نهایت نمونه‌های ساخته شده از استحکام خام مناسبی برخوردار بود.



شکل ۳-۱۳- شماتیک مکانیزم ژلاسیون (a). سطح ذرات سیلیس کلئیدی (b). افزایش MgO (c). تشکیل باند سیلوکسان (c). تشکیل پیوند سیلوکسان (d). پیوندهای سیلوکسان

### ۳-۲-۲- تاثیر دمای پخت بر خواص نمونه های فومی

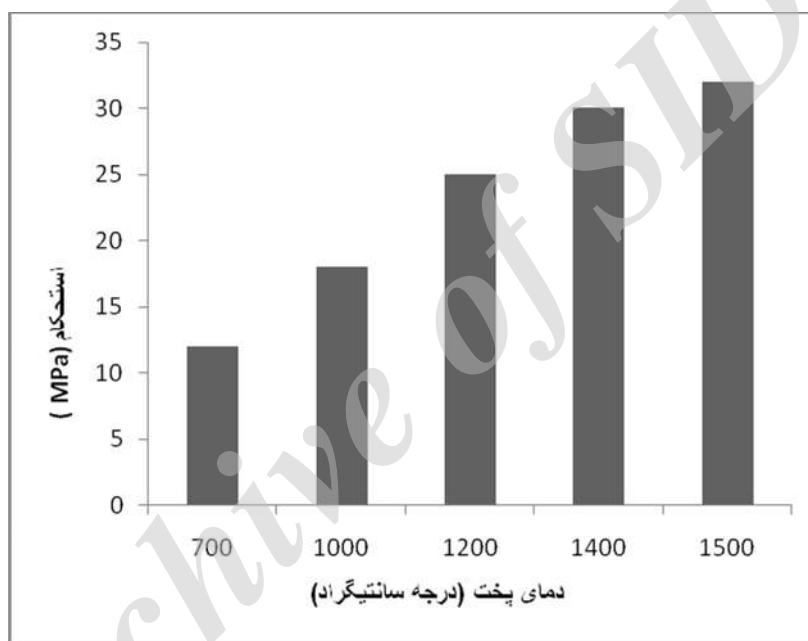
تأثیر دمای زینترینگ بر دانسیته و تخلخل و نیز استحکام مکانیکی نمونه‌های ساخته شده در شکل ۳-

۱۴ نشان داده شده است.

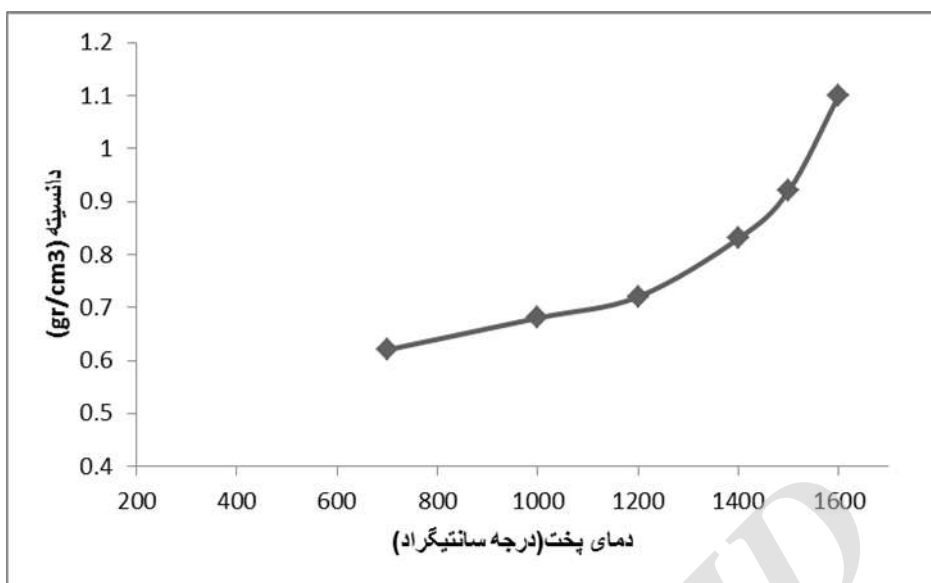
مقدار بالای استحکام در ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد که سیلیکای کلئیدی می‌تواند دمای زینترینگ را کاهش دهد و باعث ایجاد اتصال در دماهای پایین گردد. این امر اصولاً به نانو مقیاس بودن ذرات سیلیکای کلئیدی ارتباط داده می‌شود که می‌تواند باعث افزایش قابلیت زینتر پذیری این نوع سیستم فوم گردد.



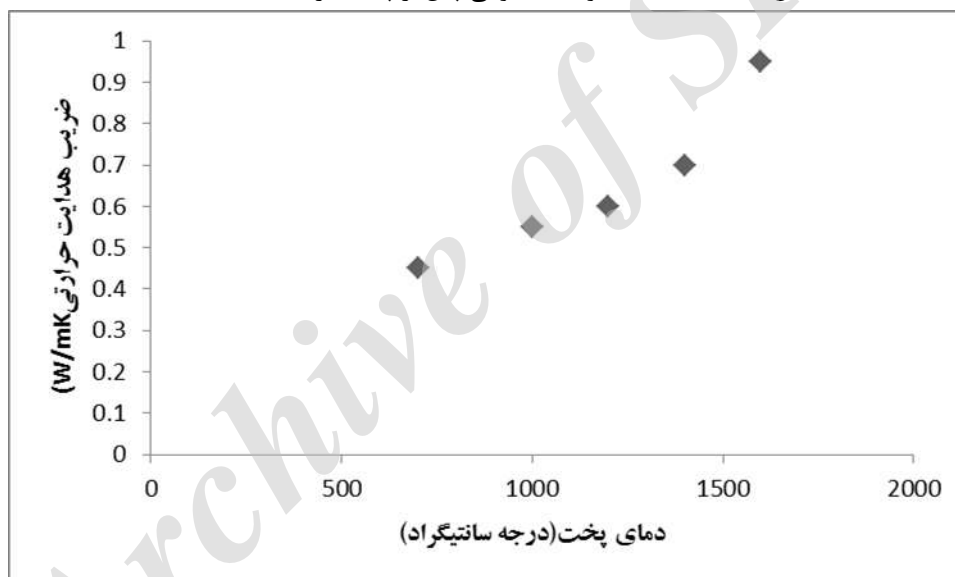
شکل ۳-۱۵ تغییرات مقادیر دانسیته بالک نمونه‌های فومی را پس از پخت در دماهای مختلف نشان می‌دهد. با وجود اینکه مقادیر استحکام با افزایش دما افزایش می‌یابد، اما مقادیر تخلخل و دانسیته تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت می‌ماند. در حقیقت از آنجا که گیرش سیلیکای کلوئیدی از نوع هیدرولیک نیست، مقادیر تخلخل و دانسیته در حدود اعداد گزارش شده ثابت می‌ماند و به تغییرات دمای پخت حساس نیست. با این وجود با افزایش دمای پخت بیش از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش در مقادیر دانسیته و کاهش تخلخل روی می‌دهد که نشان‌دهنده پیشرفت فرآیند زینتر می‌باشد.



شکل ۳-۱۴- استحکام فشاری سرد (CCS) نمونه‌های فومی پس از پخت در دماهای مختلف



شکل ۳-۱۵ دانسیته نمونه‌های فومی پس از پخت در دماهای مختلف



شکل ۳-۱۶- تغییرات ضریب هدایت حرارتی نمونه های فومی پس از پخت در دماهای مختلف

شکل ۳-۱۵ تغییرات مقادیر دانسیته بالک و تخلخل ظاهری نمونه‌های فوم را پس از پخت در دماهای مختلف نشان می‌دهد. با وجود این که مقادیر استحکام با افزایش دما افزایش می‌یابد، اما مقادیر تخلخل و دانسیته تا دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تقریباً ثابت می‌ماند. در حقیقت از آنجا که گیرش سیلیکای کلونیدی از نوع هیدرولیک نیست، مقادیر تخلخل و دانسیته در حدود اعداد گزارش شده ثابت می‌ماند و به تغییرات دمای پخت حساس نیست. با این وجود با افزایش دمای پخت بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، افزایش در مقادیر دانسیته و کاهش تخلخل روی می‌دهد که نشان دهنده پیشرفت فرایند زینتر می‌باشد. از

آنجا که نمونه نهایی با وجود دانسیته پایین بایستی از استحکام مناسبی برخوردار باشد، بهینه دمای پخت برای نمونه‌ها ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و در بررسی دیگر پارامترها پخت نمونه‌ها در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد صورت پذیرفت.

در شکل ۳-۱۶ تغییرات ضریب هدایت حرارتی نمونه‌ها پس از پخت در دماهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، میزان تخلخل تا حد زیادی کاهش یافته و هدایت حرارتی نمونه‌های فومی افزایش می‌یابد.

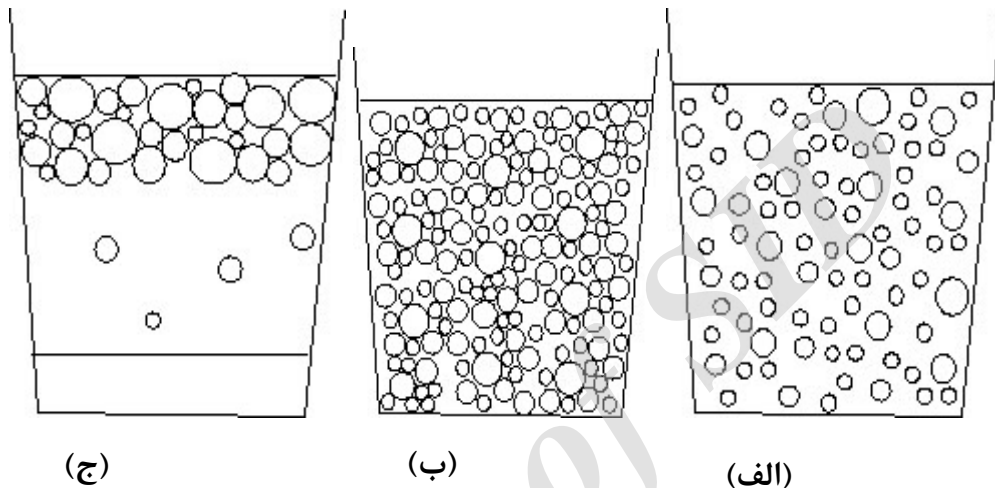
### ۳-۲-۳- تأثیر میزان سورفکتانت بر خواص فوم نسوز ساخته شده

در این طرح از SDS (سدیم دودسیل سولفات) به عنوان عامل سورفکتانت استفاده شد. ساخت نمونه‌های فومی با سه درصد مختلف SDS صورت پذیرفت. نمونه‌ها در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد پخت شدند و ریز ساختار آنها بررسی شد.

برای این سه درصد متفاوت SDS که در شکل ۳-۱۶ ذکر شده است، به وسیله مقادیر ۰/۰۲ و ۰/۰۳۵ درصد می‌توان در نهایت به فوم جامد پایدار دست یافت اما برای نمونه دارای ۰/۰۵ درصد SDS، فوم ریخته‌گری شده دچار خرابی شد و قابلیت اندازه‌گیری استحکام برای نمونه ساخته شده وجود نداشت. همان‌طور که در شکل ۳-۱۸ نشان داده شده است میزان بهینه SDS، ۰/۰۳۵ درصد تعیین شد. در مقادیر کمتر از مقدار بهینه همان‌طور که شرح داده شد، به دلیل آنکه دیفرانسیل ناشی از کشش سطحی کم است، تخلخل‌ها به خوبی شکل نگرفته و مشاهده می‌شود میزان دانسیته نمونه نهایی بالا می‌باشد. در مورد نمونه با ۰/۰۵ درصد SDS اختلاف دانسیته مقطع بالایی و پایینی نمونه بالا بوده و در نهایت نمونه مناسب با این درصد سورفکتانت حاصل نشد. نمونه با ۰/۰۳۵ درصد SDS علاوه بر توزیع تخلخل مناسب، دانسیته آن پایین‌تر از  $1 \text{ gr/cm}^3$  می‌باشد.

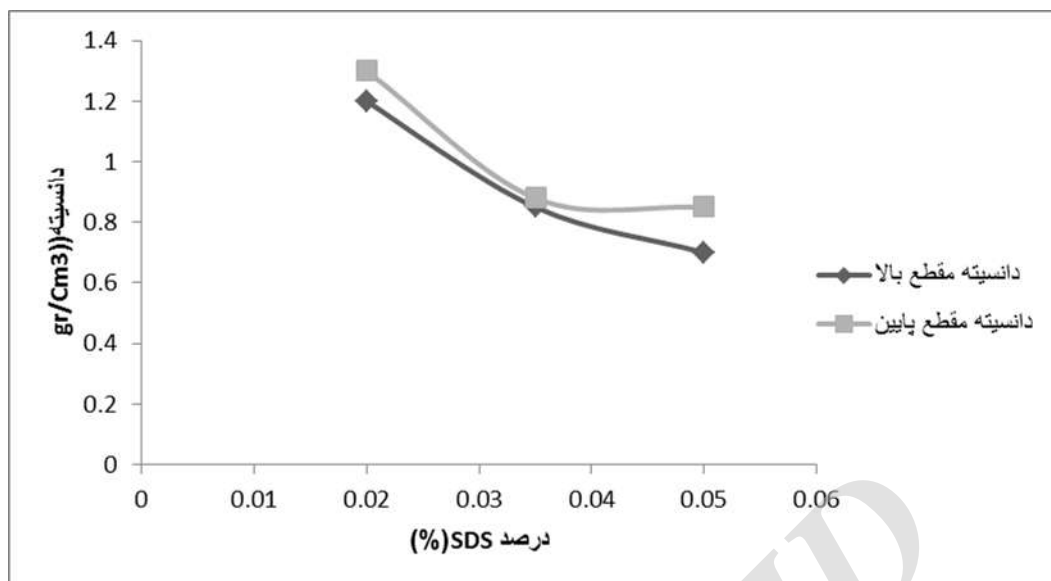
قابلیت عامل حباب‌زا در تولید مقادیر زیادی فوم به تاثیر SDS به عنوان سورفکتانت بر کاهش کشش سطحی محلول بستگی دارد. همچنین مولکول‌های SDS از داخل دوغاب به سمت سطوح جدید تولید شده

حرکت می‌نمایند تا از نازک شدن بیشتر دیواره‌ها ممانعت به عمل آورند. زمانی که اغلب مولکول‌های سورفکتانت به فصل مشترک گاز- مایع چسبیدند، پایدارسازی دیواره‌های جدید میسر نخواهد بود و یک فوم پایدار ایجاد می‌شود [۳].



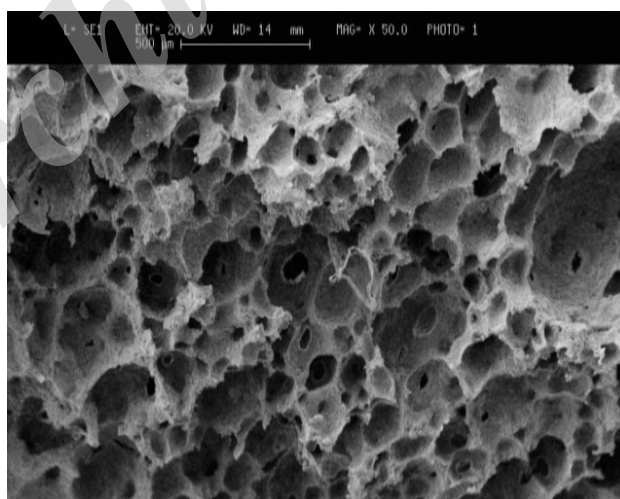
شکل ۳-۱۶ : نقش درصدهای مختلف الف) ۰.۰۱٪، ب) ۰.۰۳۵٪، ج) ۰.۰۵٪ درصد وزنی SDS در ساختار نهایی فوم تولید شده

باید در نظر داشت تنها در محدوده خاصی جذب SDS روی سطح ذرات بهینه بوده و می‌توان در نهایت آن را ریخته‌گری کرده و به فوم جامد دست یافت. به عبارت دیگر در درصدهای کم SDS، دیفرانسیل ناشی از کشش سطحی در فیلم تشکیل شده کم بوده و فیلم به طرز ضعیفی پایدار خواهد بود و از طرف دیگر در غلظت‌های بالای SDS جذب سطحی از بالک یا فاز زیرین سطحی بسیار سریع‌تر از حرکت موج سطحی (که در آن سطح متحرک در امتداد مایع زیرین کشیده می‌شود) خواهد بود و بنابراین فیلم پس از دفرمگی خود را ترمیم نخواهد کرد [۹].

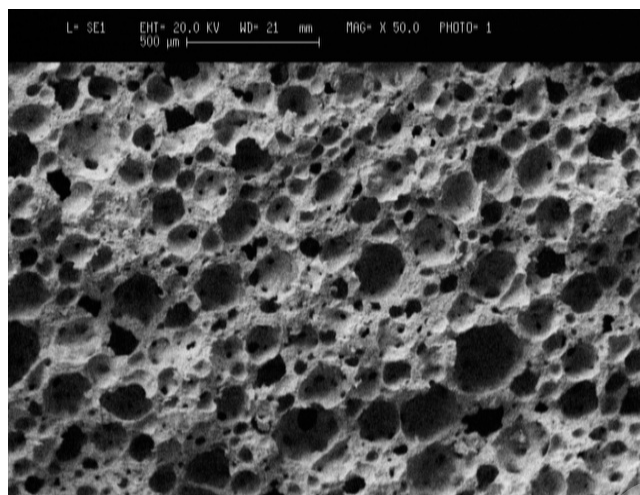


شکل ۳-۱۷. نمودار دانسیته بر حسب میزان SDS

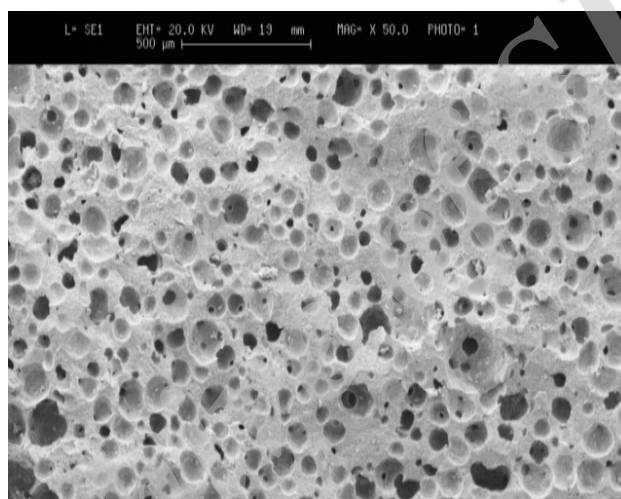
شکل‌های ۳-۱۸، ۳-۱۹ و ۳-۲۰ تصاویر SEM مقطع بالایی هریک از این سه حالت را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، توزیع تخلخل در نمونه با ۰/۰۵ درصد گسترده‌تر است ولی در نمونه با ۰/۳۵ درصد SDS یکنواختی بیشتری در اندازه حفرات مشاهده می‌شود. در نمونه با ۰/۱ درصد SDS کاهش میزان تخلخل را به دلیل عدم تشکیل لایه سورفکتانت در اطراف ذرات مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۱۸. تصویر SEM مقطع بالایی نمونه با ۰/۰۵ درصد SDS



شکل ۳-۱۹. تصویر SEM مقطع بالایی نمونه با ۰/۳۵ درصد SDS



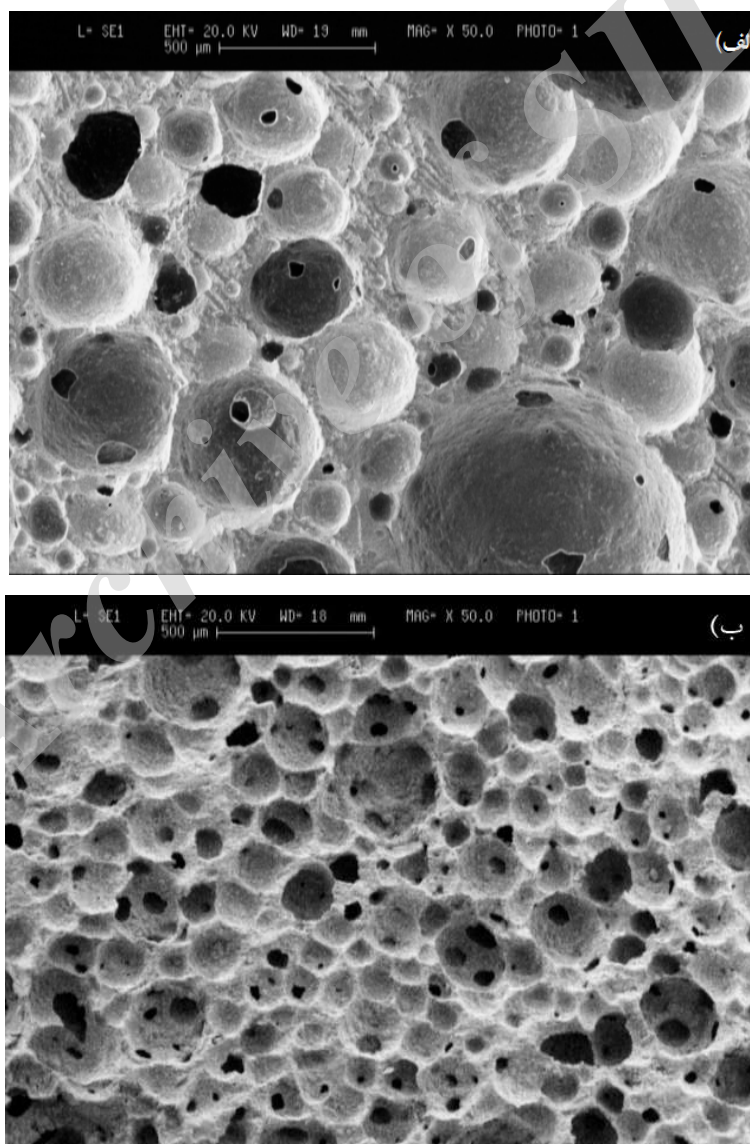
شکل ۳-۲۰. تصویر SEM مقطع بالایی نمونه با ۰/۰۱ درصد SDS

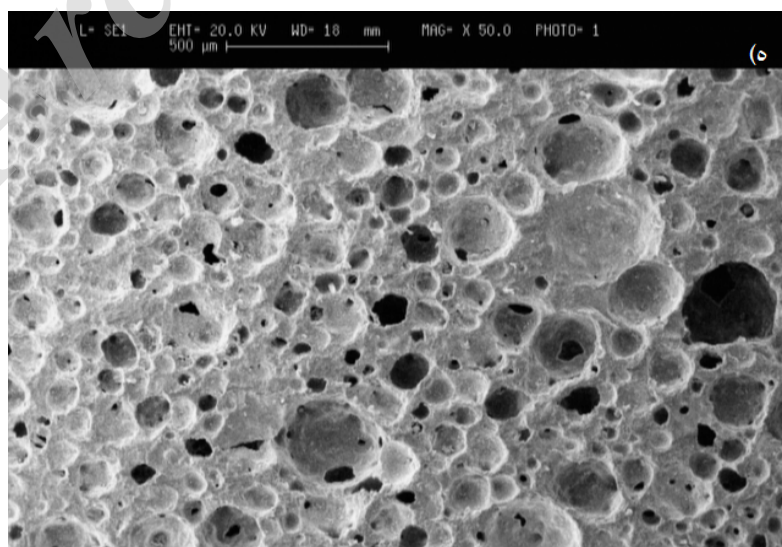
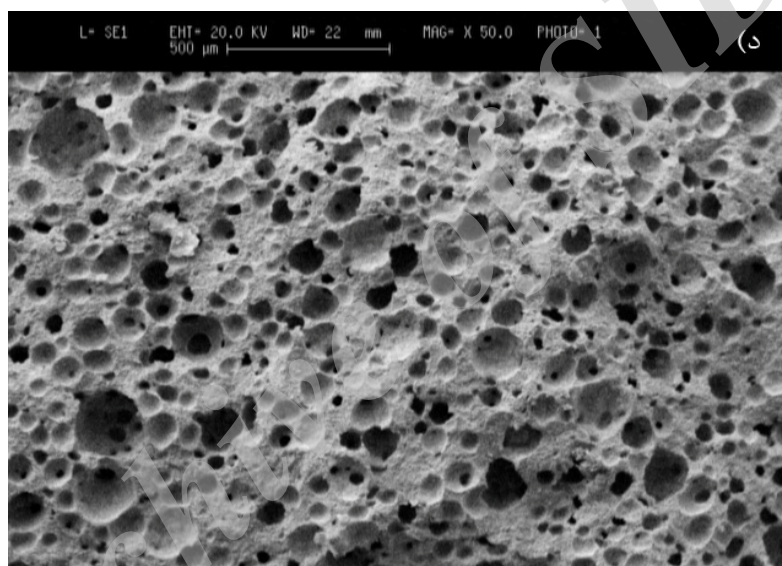
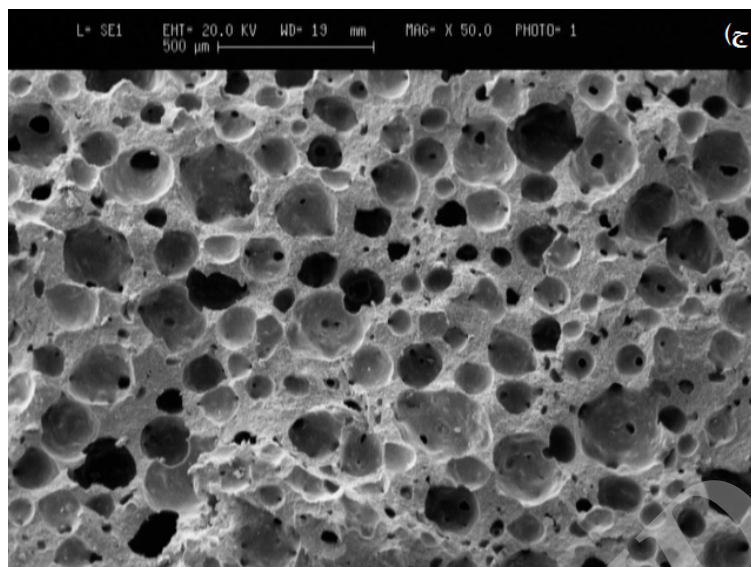
### ۳-۲-۵- تأثیر میزان درصد جامد بر خواص فوم نسوز ساخته شده

به منظور بررسی اثر درصد جامد، دوغاب‌هایی دارای ۷۲، ۷۵، ۷۸ و ۸۰ درصد وزنی تهیه شد و به محفظه دستگاه تزریق شد. خواص فیزیکی در نمودار شکل ۳-۲۱ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود با افزایش درصد جامد چگالی افزایش یافته و درصد تخلخل کاهش می‌یابد. کاهش درصد تخلخل را می‌توان به کاهش قابلیت حباب‌زایی با افزایش درصد جامد دانست. به دلیل این‌که ایجاد حباب در دوغاب توسط فاز مایع انجام می‌گیرد بنابراین با افزایش درصد جامد که به معنای کاهش فاز مایع در دوغاب است، درصد

حباب ایجاد شده و در نهایت درصد تخلخل در قطعه نهایی کاهش خواهد یافت و این امر سبب افزایش چگالی خواهد شد.

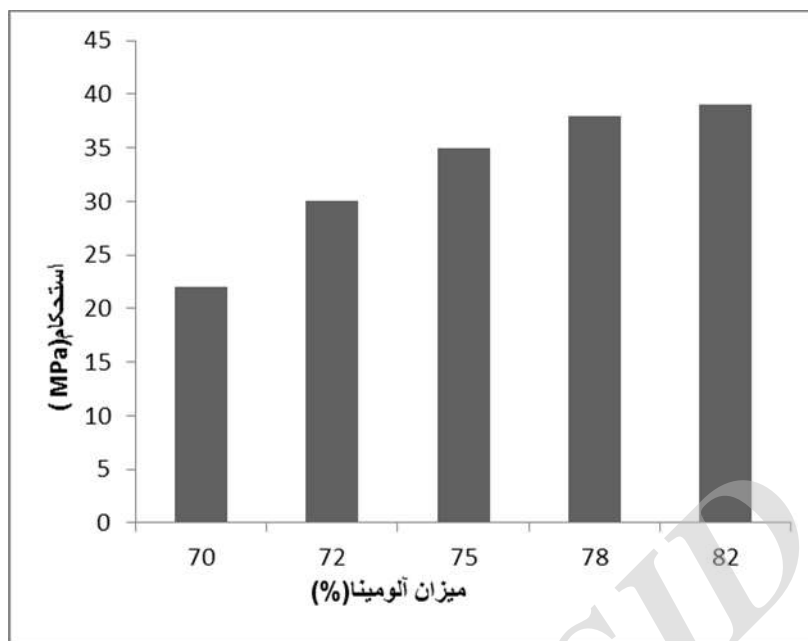
چگالی نقش بسیار مهمی در ریز ساختار قطعات زینتر شده نهایی ایفا می کند. شکل ۳- ۲۱ تصاویر SEM بدنه های زینتر شده با چگالی های متفاوت را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش چگالی، اندازه تخلخل ها کاهش می یابد.



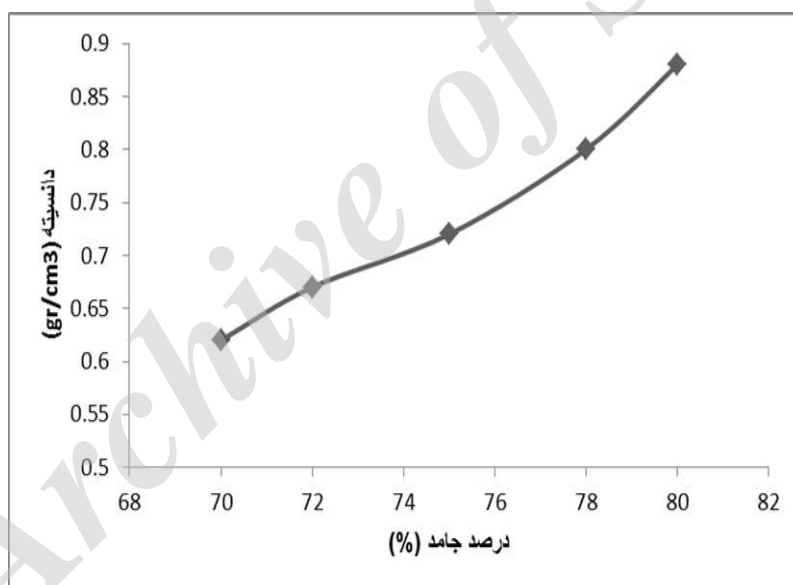


شکل ۳- ۲۱: تصاویر SEM بدنه‌های متخلخل با درصدهای جامد الف) ۷۰ (ب) ۷۲ (ج) ۷۵ (د) ۷۸ و ه) ۸۰ درصد وزنی آلومینا





شکل ۳-۲۲- تغییرات استحکام (CCS) با تغییر درصد جامد



شکل ۳-۲۳- تغییرات دانسیته با تغییر درصد جامد

با توجه به بررسی‌های بالا نمونه با ۷۸٪ جامد و میزان ۰/۰۳۵ درصد SDS و زینتر شده در دمای ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مناسب دارای خواص بهینه می‌باشد که علاوه با دانسیته پایین از استحکام مناسب نیز برخوردار است.

در نهایت مقایسه خواص نمونه بهینه شده و نمونه ساخته شد صورت پذیرفت که نشان از خواص مشابه قطعات به دست آمده دارد.

جدول ۲-۳: مقایسه خواص نمونه مرجع و نمونه بهینه شده

خواص	دانسیته (B.D) (gr/Cm <sup>3</sup> )	استحکام فشاری CCS (Mpa)	تخلخل (%)	هدایت حرارتی (W/mk)
نمونه مرجع	۰/۸۵	۳۵	۸۵	۰/۵۶
نمونه بهینه شده	۰/۹۲	۳۰	۷۸	۰/۷

#### نتیجه گیری:

- ۱- از دولاپیکس CE64 به عنوان پراکنده ساز برای پایدارسازی دوغاب ۷۰ درصد وزنی تهیه شده از پودر آلفا آلومینا استفاده شد و مشخص شد که با افزودن ۰/۳ درصد دولاپیکس می توان دوغاب پایداری تهیه کرد.
- ۲- نتایج آزمایش های مربوط به تعیین مقدار بهینه پراکنده ساز تطابق قابل توجهی با نتایج آزمایش رئومتری داشت.
- ۴- از SDS (دودسیل سولفات سدیم) به عنوان سورفکتانت و جهت تبدیل دوغاب به فوم استفاده شد و بهینه مقدار آن ۰/۰۳۵ درصد بر مبنای درصد وزنی پودر آلومینا محاسبه شد. اگرچه با افزایش درصد SDS، حجم فوم تولید شده بیشتر است اما قابل ریخته گری نیست و منجر به خرابی فوم می شود.
- ۵- با افزایش درصد جامد دوغاب و استفاده از بهینه درصد SDS برای تولید فوم، مقادیر چگالی و استحکام افزایش و میزان تخلخل و میانگین اندازه تخلخل ها کاهش می یابد.
- ۶- در این طرح از یک بایندر سیلیس کلئیدی (سیلیکا سل) به عنوان عامل اتصال استفاده شد و با استفاده از افزودنی اکسید منیزیم ژلاسیون اتفاق افتاد.
- ۷- با افزایش دمای پخت، به دلیل پیشرفت در فرایند زینترینگ دانسیته و استحکام به دلیل پیشرفت فرایند زینتر افزایش می یابد.

Archive of SID

- [1] Hammel, E. C.; Ighodaro, O. L. R.; Okoli, O. I. Processing and properties of advanced porous ceramics: An application based review. *Ceramics International* **2014**, *40*, 15351-15370.
- [2] Qin, J.; Chen, Q.; Yang, C.; Huang, Y. Research process on property and application of metal porous materials. *Journal of Alloys and Compounds* **2016**, *654*, 39-44.
- [3] Guzman, I. Y. Certain Principles of Formation of Porous Ceramic Structures. Properties and Applications (A Review). *Glass and Ceramics* **2003**, *60*, 280-283.
- [4] Coronas, J.; Santamaría, J. Catalytic reactors based on porous ceramic membranes. *Catalysis Today* **1999**, *51*, 377-389.
- [5] Ishizaki, K.; Komarneni, S.; Nanko, M. *Porous materials : process technology and applications*; Kluwer Academic Publishers: Dordrecht; Boston, 1998.
- [6] Young, A. C.; Omatete, O. O.; Janney, M. A.; Menchhofer, P. A. Gelcasting of Alumina. *Journal of the American Ceramic Society* **1991**, *74*, 612-618.
- [7] *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*; Weinheim : Wiley-VCH, 2005.
- [8] Sepulveda, P. Gelcasting Foams for Porous Ceramics. *American Ceramic Society Bulletin* **1997**, *76*, 61-67.
- [9] Araki, K.; Halloran, J. W. Porous Ceramic Bodies with Interconnected Pore Channels by a Novel Freeze Casting Technique. *Journal of the American Ceramic Society* **2005**, *88*, 1108-1114.
- [10] Studart, A. R.; Gonzenbach, U. T.; Tervoort, E.; Gauckler, L. J. Processing Routes to Macroporous Ceramics: A Review. *Journal of the American Ceramic Society* **2006**, *89*, 1771-1789.
- [11] Trueba, M.; Trasatti, S. P.  $\gamma$ -Alumina as a Support for Catalysts: A Review of Fundamental Aspects. *European Journal of Inorganic Chemistry* **2005**, *2005*, 3393-3403.

- [12] Ruberto, C.;Yourdshahyan, Y.; Lundqvist, B. I. Surface properties of metastable alumina: A comparative study of  $\gamma$ - and  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Physical Review B***2003**, *67*, 195412.
- [13] Misra, C. *Industrial alumina chemicals*; American Chemical Society, 1986.
- [14] Gitzen, W. H. *Alumina as a ceramic material*; American Ceramic Society: Columbus, Ohio, 1970.
- [15] *Advanced Ceramics for Use in Highly Oxidizing and Corrosive Environment*; Key Engineering Materials, 2001.
- [16] Hart, L. D. *Alumina Chemicals : Science and Technology Handbook*; The American Ceramic Society: Westerville, Ohio, 1990.
- [17] Mishra, D.;Anand, S.;Panda, R. K.; Das, R. P. Statistical optimization of conditions for the hydrothermal precipitation of boehmite. *Hydrometallurgy***2000**, *58*, 169-174.
- [18] Li, H.;Addai-Mensah, J.;Thomas, J. C.; Gerson, A. R. The crystallization mechanism of Al (OH)<sub>3</sub> from sodium aluminate solutions. *Journal of Crystal Growth***2005**, *279*, 508-520.
- [19] Deng, Z. Y.;Fukasawa, T.;Ando, M.;Zhang, G. J.; Ohji, T. High-Surface-Area Alumina Ceramics Fabricated by the Decomposition of Al (OH)<sub>3</sub>. *Journal of the American Ceramic Society***2001**, *84*, 485-491.
- [20] Mooi, J. Method of producing boehmite having crystal size in excess of 100 a. Google Patents, 1965.
- [21] Suchanek, W. L. Hydrothermal Synthesis of Alpha Alumina ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Powders: Study of the Processing Variables and Growth Mechanisms. *Journal of the American Ceramic Society***2010**, *93*, 399-412.
- [22] Díaz, L.; Torrecillas, R. Phase development and high temperature deformation in high alumina refractory castables with dolomite additions. *Journal of the European Ceramic Society***2007**, *27*, 67-72.
- [23] Sadik, C.;El Amrani, I.-E.; Albizane, A. Recent advances in silica-alumina refractory: A review. *Journal of Asian Ceramic Societies***2014**, *2*, 83-96.

- [24] Díaz, L.;Torrecillas, R.;De Aza, A.; Peña, P. Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables. *Journal of the European Ceramic Society***2007**, *27*, 4623-4631.
- [25] Kakroudi, M. G.;Huger, M.;Gault, C.; Chotard, T. Damage evaluation of two alumina refractory castables. *Journal of the European Ceramic Society***2009**, *29*, 22.۲۲۱۸-۱۱
- [26] Dudczig, S.;Veres, D.;Aneziris, C. G.;Skiera, E.; Steinbrech, R. W. Nano-and micrometre additions of SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> in fine grained alumina refractory ceramics for improved thermal shock performance. *Ceramics International***2012**, *38* , ۲۰۱۹-۲۰۱۱
- [27] Otraj, S.; Daghighi, A. Microstructure and phase evolution of alumina–spinel self-flowing refractory castables containing nano-alumina particles. *Ceramics International***2011**, *37*, 1003-1009.
- [28] Shi, L.;Xu, Y.;Li, K.;Yao, Z.; Wu, S. Effect of additives on structure and corrosion resistance of ceramic coatings on Mg–Li alloy by micro-arc oxidation. *Current Applied Physics***2010**, *10*, 719-723.
- [29] Isobe, T.;Kameshima, Y.;Nakajima, A.;Okada, K.; Hotta, Y. Gas permeability and mechanical properties of porous alumina ceramics with unidirectionally aligned pores. *Journal of the European Ceramic Society***2007**, *27*, 53-59.
- [30] Jayaseelan, D. D.;Kondo, N.;Brito, M. E.; Ohji, T. High-Strength Porous Alumina Ceramics by the Pulse Electric Current Sintering Technique. *Journal of the American Ceramic Society***2002**, *85*, 267-269.
- [31] Qin, W.;Lei, B.;Peng, C.; Wu, J. Corrosion resistance of ultra-high purity porous alumina ceramic support. *Materials Letters***2015**, *144*, 74-77.
- [32] Tallon, C.;Chuanuwatanakul, C.;Dunstan, D. E.; Franks, G. V. Mechanical strength and damage tolerance of highly porous alumina ceramics produced from sintered particle stabilized foams. *Ceramics International***2016**, *42*, 8478-8487.
- [33] Sciamanna, V.;Nait-Ali, B.; Gonon, M. Mechanical properties and thermal conductivity of porous alumina ceramics obtained from particle stabilized foams. *Ceramics International***2015**, *41*, 2599-2606.

- [34] Li, X.;Wu, P.; Zhu, D. Properties of porous alumina ceramics prepared by technique combining cold-drying and sintering. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials***2013**, *41*, 437-441.
- [35] Lo, Y.;Wei, W.; Hsueh, C. Low thermal conductivity of porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> foams for SOFC insulation. *Materials Chemistry and Physics***2011**, *129*, 326-330.
- [36] Zhao, C. Review on thermal transport in high porosity cellular metal foams with open cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer***2012**, *55*, 3618-3632.
- [37] Dunaeva, M. Production and service of lightweight refractory aluminosilicate concretes. *Refractories and Industrial Ceramics***2006**, *47*, 199-200.
- [38] ZHANG, L.;DU, J.;GAN, G.; YAN, J. Study on Preparation of Porous Alumina Insulation Materials by Gel-foaming [J]. *Hot Working Technology***2011**, *22*, 029.
- [39] El-Shiekh, T. M.; Elsayed, A. Proper selection of thermal insulation materials. *Journal of Automation Mobile Robotics and Intelligent Systems***2009**, *3*, 42-46.
- [40] Queiroga, J. A.;Campos, K. S.;e Silva, G. F. L.;Souza, D. F.;Nunes, E. H.; Vasconcelos, W. L. Post mortem study of refractorylining used in FCC units. *Engineering Failure Analysis***2013**, *34*, 290-299.
- [41] Crowley, M. Refractory applications in refineries and circulating fluid bed combustors. Ed. CA Schacht, *Refractories Handbook*, Marcel Dekker, Inc. New York, *EUA***2004**, 395-414.
- [42] Korkhaus, J. Failure mechanisms and material degradation processes at high temperatures in ammonia synthesis. *Corrosion engineering, science and technology***2005**, *40*, 204-210.
- [43] Denisov, D.; Zhidkov, A. Furnaces with a refractory-concrete lining .*Chemical and Petroleum Engineering***2006**, *42*, 255-259.
- [44] Yoon, H. Optimizing Flare Operation Through Proper Design. *Chemical Engineering***2015**, *122*, 70.
- [45] Gauckler, L.;Waeber, M.;Conti, C.; Jacob-Duliere, M. Ceramic foam for molten metal filtration. *JOM***1985**, *37*, 47-50.

- [46] Shivkumar, S.; Wang, L.; Apelian, D. Molten metal processing of advanced cast aluminum alloys. *JOM* **1991**, *43*, 26-32.
- [47] Li, K. Preparation of Ceramic Membranes. In *Ceramic Membranes for Separation and Reaction*. John Wiley & Sons ,Ltd, 2007; pp 21-57.
- [48] Konegger, T.; Felzmann, R.; Achleitner, B.; Brouczek, D. Mullite-based cellular ceramics obtained by a combination of direct foaming and reaction bonding. *Ceramics International* **2015**, *41*, 8630-8636.
- [49] Gregorová, E.; Pabst, W.; Uhlířová, T.; Nečina, V.; Veselý, M.; Sedlářová, I. Processing, microstructure and elastic properties of mullite-based ceramic foams prepared by direct foaming with wheat flour. *Journal of the European Ceramic Society* **2016**, *36*, 109-120.
- [50] Huang, K.; Li, Y.; Zhao, Y.; Li, S.; Li, Y.; Sang, S. Effects of foaming temperature on the preparation and microstructure of alumina foams. *Materials Letters* **2016**, *165*, 19-21.
- [51] Xu, C.; Wang, S.; Flodström, K.; Mao, X.; Guo, J. Cellular silica-based ceramics prepared by direct foaming at high temperature. *Ceramics International* **2010**, *36*, 923-927.
- [52] Li, F.; Kang, Z.; Huang, X.; Wang, X.-G.; Zhang, G.-J. Preparation of zirconium carbide foam by direct foaming method. *Journal of the European Ceramic Society* **2014**, *34*, 3513-3520.
- [53] Zhang, L.-y.; Zhou, D.-l.; Chen, Y.; Liang, B.; Zhou, J.-b. Preparation of high open porosity ceramic foams via direct foaming molded and dried at room temperature. *Journal of the European Ceramic Society* **2014**, *34*, 2443-2452.
- [54] McCauley, R. A. *Rheology*; Verlag Schmid GmbH: Freiburg, 1983.
- [55] Ferreira, J. M. F. Role of the clogging effect in the slip casting process. *Journal of the European Ceramic Society* **1998**, *18*, 1161-1169.
- [56] Hackley, V. A.; Ferraris, C. F. Special Publication 946, National Institute of Standards and Technology. U.S. Department of Commerce, 2001.
- [57] Bengisu, M. *Engineering Ceramics*; Springer, 2001.
- [58] Moore, F. *Rheology of Ceramic Systems*; Elsevier, 1965.



- [59] Zhang, G.; Wang, Y.; Ma, J. Bingham plastic fluid flow model for ceramic tape casting. *Materials Science and Engineering: A* **2002**, *337*, 274-280.
- [60] Liu, F.-J.; Chou, K.-S. Determining critical ceramic powder volume concentration from viscosity measurements. *Ceramics International* **2000**, *26*, 159-164.
- [61] Reed, J. S. *Introduction to the Principles of Ceramic Processing*; John Wiley & Sons: New York, 1988.
- [62] Rajatanavin, P. Solid-stabilised foams produced using a mixed surfactant system. Swinburne University of Technology, Australia, 2005.
- [63] Koehler, S. A.; Hilgenfeldt, S.; Weeks, E. R.; Stone, H. A. Foam drainage on the microscale II. Imaging flow through single Plateau borders. *Journal of Colloid and Interface Science* **2004**, *276*, 439-449.
- [64] Britan, A.; Liverts, M.; Ben-Dor, G.; Koehler, S. A.; Bennani, N. The effect of fine particles on the drainage and coarsening of foam. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2009**, *344*, 15-23.
- [65] Xu, Q.; Nakajima, M.; Ichikawa, S.; Nakamura, N.; Roy, P.; Okadome, H.; Shiina, T. Effects of surfactant and electrolyte concentrations on bubble formation and stabilization. *Journal of Colloid and Interface Science* **2009**, *332*, 208-214.
- [66] Iler R. K, *The Chemistry of Silica, solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry*, John Wiley and sons., 1979.
- [67] Fabian Luthardt, Jorg Adler, and Alexander Michaelis, Characteristics of a Continuous Direct Foaming Technique, *International Journal of Applied Ceramic Technology.*, 2015, *12*, 133-138.
- [68] Dipl.-Ing. Fabian Luthardt, Dipl.-Krist. Jorg Adler, A CERAMIC FOAMING TECHNOLOGY FOR HIGH-TEMPERATURE INSULATION MATERIALS Fraunhofer IKTS Annual Report 2012/13.