

تحلیل فنی و اقتصادی کاربرد عایق‌های حرارتی نوین آئروژل در صنعت نیروگاهی و فرصت‌های کسب‌وکار مرتبط

چکیده طرح کسب و کار:

عایق‌های حرارتی نوین مبتنی بر آئروژل به دلیل هدایت حرارتی بسیار پایین و چگالی سبک، توانایی کاهش تلفات انرژی در صنایع مختلف، به ویژه نیروگاه‌ها، را دارا هستند. این گزارش شامل تحلیل مکانیزم‌های تخریب، استانداردهای بین‌المللی، شرکت‌های تولیدکننده داخلی و خارجی، تحلیل بازار، ملاحظات فنی و اقتصادی، امکان‌سنجی واقعی اقتصادی و طرح کسب‌وکار مرتبط با این فناوری است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آئروژل می‌تواند کاهش مصرف انرژی قابل توجه، افزایش طول عمر تجهیزات، و بازگشت سرمایه سریع را به همراه داشته باشد. همچنین، بازار رو به رشد و ظرفیت صادراتی مناسب، فرصت‌های تجاری جذابی برای سرمایه‌گذاری در تولید و توزیع این عایق‌ها ایجاد می‌کند.

تحلیل فنی و اقتصادی کاربرد عایق‌های حرارتی نوین آئروژل در صنعت نیروگاهی و فرصت‌های کسب‌وکار مرتبط

تولید برق

وزارت نیرو-پژوهشگاه نیرو-شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی-مدیران ارشد نیروگاه‌ها-شرکت‌های تعمیرات نیروگاهی و بهره‌برداری از تجهیزات-معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری (ستاد توسعه فناوری نانو)

پژوهشگاه نیرو

دکتر مجید میرزایی (ایمیل سازمانی: mjmirzaei@nri.ac.ir)-دکتر نسترن ریاحی نوری-دکتر حسین کوهانی

پژوهشکده تولید

پژوهشکده تولید-مرکز تخصصی نوآوری و توسعه فناوری نانو

شهریور ۱۴۰۴

عنوان گزارش

حوزه تخصصی

مخاطبان اصلی

سفارش دهنده

نویسندگان

ناظر

پژوهشکده، گروه پژوهشی

تاریخ مطالعه

مقدمه

در جهان امروز، افزایش قیمت انرژی و فشارهای زیست محیطی صنایع را به سمت استفاده از مواد عایق با راندمان حرارتی بالا سوق داده است. عایق‌های حرارتی مبتنی بر آئروژل با ساختار نانومتری متخلخل و هدایت حرارتی پایین، عملکرد به مراتب بهتری نسبت به عایق‌های سنتی ارائه می‌دهند و امکان کاهش ضخامت عایق بدون افت کارایی را فراهم می‌کنند. از منظر فنی، آئروژل‌ها با مقاومت شیمیایی و مکانیکی مناسب، قابلیت استفاده در محیط‌های صنعتی سخت و دماهای بالا را دارند. با این حال، حساسیت نسبت به رطوبت، فشار و فرسایش مکانیکی باعث ایجاد مکانیزم‌های تخریب می‌شود که در طراحی و نگهداری باید مدنظر قرار گیرد.

در بخش کسب‌وکار، این گزارش مسیر تولید، عرضه و به‌کارگیری آئروژل را به صورت یک طرح تجاری جامع بررسی می‌کند. تحلیل بازار، شامل شناسایی صنایع هدف، اندازه بازار، رقبا و روند رشد، ارائه شده و هزینه‌های تولید، نصب و نگهداری به همراه مدل‌های بازگشت سرمایه و سودآوری تخمین زده شده است. همچنین استراتژی‌های بازاریابی، کانال‌های توزیع و مسیر جذب مشتری برای تحقق فروش پایدار مورد بحث قرار گرفته است. هدف گزارش، ارائه تحلیل جامع فنی، اقتصادی و کسب‌وکاری عایق‌های حرارتی نوین آئروژل در صنعت نیروگاهی و ارائه راهکارهای عملی برای پیاده‌سازی موفق و اقتصادی این فناوری در صنایع مختلف می‌باشد.

بخش اول: مکانیزم تخریب عایق‌های حرارتی در نیروگاه‌ها

در نیروگاه‌ها، عایق‌های حرارتی نقش حیاتی در کاهش تلفات انرژی، بهبود راندمان و ایمنی تجهیزات ایفا می‌کنند. با این حال، این مواد در معرض شرایط عملیاتی سخت از جمله دمای بالا، رطوبت، ارتعاشات مکانیکی، و تماس با مواد شیمیایی قرار دارند که به تدریج منجر به تخریب ساختاری و کاهش عملکردشان می‌شود. شناخت مکانیزم‌های تخریب عایق‌ها، اعم از سنتی (مانند پشم سنگ، پشم شیشه و فوم‌های پلیمری) و نوین (مانند آئروژل‌ها)، برای انتخاب مواد بهینه و افزایش طول عمر سیستم‌های عایق‌کاری ضروری است. مکانیزم‌های تخریب عایق‌های سنتی و نوین در زیر لیست شده است [۱]:

۱. تخریب حرارتی (Thermal Degradation)

- عایق‌های سنتی: پشم سنگ و پشم شیشه در دمای بالای 800°C دچار ذوب موضعی یا تغییر فاز می‌شوند. فوم‌های پلیمری (مانند پلی‌اورتان) در دمای 200°C - 250°C تجزیه و گازهای سمی آزاد می‌کنند.
- عایق‌های نوین: آئروژل‌های پایه سیلیکا تا 600°C پایداری دارند، اما در دمای بالاتر، تخلخل نانویی آنها کاهش یافته و رسانایی گرمایی افزایش می‌یابد.

۲. تخریب مکانیکی (Mechanical Degradation)

- عایق‌های سنتی: پشم‌های معدنی به مرور زمان تحت فشردگی (Compression) یا ارتعاشات تجهیزات (مثل توربین‌ها) متراکم شده و رسانایی گرمایی‌شان افزایش می‌یابد.

- عایق‌های نوین: آئروژل‌ها به دلیل ساختار شکننده، مستعد ترک خوردگی هستند، مگر آن‌که با الیاف تقویت شوند (مثل کامپوزیت‌های آئروژل-سیلیکا).

۳. تخریب شیمیایی و رطوبتی (Chemical/Moisture Attack)

- عایق‌های سنتی: پشم سنگ در محیط‌های مرطوب یا اسیدی، دچار هیدرولیز و کاهش مقاومت حرارتی می‌شود. فوم‌های پلیمری نیز در برابر UV و مواد نفتی تخریب می‌شوند.

- عایق‌های نوین: آئروژل‌های آب‌گریز (Hydrophobic) مقاومت بهتری در برابر رطوبت دارند، اما در معرض گردوغبار و آلاینده‌های صنعتی، تخریب می‌شوند.

۴. تخریب ناشی از چرخه‌های حرارتی (Thermal Cycling)

تغییرات مکرر دما (مانند روشن/خاموش شدن نیروگاه) باعث انبساط و انقباض متفاوت عایق و فلز زیرلایه می‌شود که نتیجه آن جدا شدن لایه عایق (Delamination) یا ایجاد ترک است.

خلاصه ای از مکانیزم‌های تخریب در عایق‌های سنتی و نوین در جدول ۱ خلاصه شده است. مقایسه میزان کمی تخریب نیز در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۱. جدول مقایسه مکانیزم‌های تخریب عایق‌های سنتی و آئروژل‌ها در نیروگاه‌ها [۱]

مکانیزم تخریب	عایق‌های سنتی (پشم سنگ، سیلیکات کلسیم، الیاف سرامیکی)	آئروژل‌ها	راهکارهای بهبود (آئروژل)
تخریب حرارتی	کاهش تخلخل و متراکم شدن در دمای $< 600^{\circ}\text{C}$ - تغییر فاز کریستالی (کوارتز به کریستوبالیت) - افزایش 30°C - 50% هدایت حرارتی پس از ۲ سال	فروپاشی شبکه نانومتخلخل در دمای 650°C - تجمع نانوذرات (Sintering)	افزودن نانوذرات آلومینا (تحمل تا 1000°C) - استفاده از پیش‌ماده‌های کربنی
تخریب مکانیکی	شکست لایه‌ای (Delamination) - فرسایش سطحی تا 2mm در سال - کاهش مقاومت فشاری	مقاومت فشاری پایین (0.2 - 0.8 MPa) - شکنندگی در برابر ارتعاشات	تقویت با نانوالیاف سرامیکی (مقاومت تا 5 MPa) - کامپوزیت با الیاف بازالت
تخریب شیمیایی	واکنش با گازهای اسیدی (NO_x , SO_x) - هیدرولیز در محیط مرطوب -	جذب رطوبت توسط گروه‌های سیلانول (Si-OH) - کاهش 70%	اصلاح سطح با تری‌متیل‌سیلان (هیدروفوبیسیته) -

آئروژل‌های هیبریدی آلومینا-سیلیکا	مقاومت عایقی در رطوبت %۸۰<	تشکیل نمک‌های سولفات/نیترات	
پوشش‌های نانویی ضدآلودگی	حساسیت به آلاینده‌های گردوغبار (مسدودشدن تخلخل)	تخریب توسط UV در محیط‌های روباز - نفوذ روغن و گریس	تخریب محیطی
آئروژل‌های غنی شده با اکسیدهای فلزات سنگین (HfO ₂ , Gd ₂ O ₃)	تخریب پیوندهای Si-O-Si توسط پرتوهای گاما	محدودیت در کاربردهای تابشی	تخریب تابشی (نیروگاه‌های هسته‌ای)

جدول ۲. مقایسه کمی تخریب در عایق‌های سنتی و آئروژل [۱]

پارامتر	عایق‌های سنتی (پشم سنگ)	آئروژل سیلیکا	آئروژل تقویت‌شده
کاهش هدایت حرارتی پس از ۵ سال	%۵۰-۳۵	%۱۵-۱۰	%۸-۵
مقاومت فشاری باقی‌مانده	%۴۰	%۶۰	%۸۵
جذب رطوبت (در RH=90%)	%۱۲ وزن	%۷ وزن	%۲ وزن
تحمل سیکل‌های حرارتی	۲۰۰ سیکل	۵۰۰ سیکل	۱۰۰۰ سیکل

بخش دوم : استانداردهای بین‌المللی مرتبط با آئروژل

در سال‌های اخیر، فناوری آئروژل‌ها به‌عنوان یکی از پیشرفته‌ترین مواد عایق حرارتی، توجه صنایع انرژی و نیروگاهی را به خود جلب کرده است. با این حال، به‌کارگیری گسترده این مواد در پروژه‌های صنعتی و نیروگاهی مستلزم رعایت استانداردهای دقیق بین‌المللی و ملی است تا از ایمنی، دوام و عملکرد بهینه آنها اطمینان حاصل شود. استانداردهای موجود، ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی، حرارتی و شیمیایی آئروژل‌ها را تعریف می‌کنند و روش‌های آزمون، کیفیت‌سنجی و شرایط بهره‌برداری از آنها را مشخص می‌سازند. در سطح بین‌المللی، سازمان‌هایی مانند ISO (سازمان بین‌المللی استاندارد)، ASTM (انجمن آمریکایی آزمون و مواد) و IEA (آژانس بین‌المللی انرژی) استانداردهای فنی برای ارزیابی آئروژل‌ها تدوین کرده‌اند. به‌عنوان مثال، استاندارد ASTM C1728 مشخصات فنی آئروژل‌های سیلیکایی را برای کاربردهای عایق‌کاری تعیین می‌کند، یا استاندارد ISO 22412 به بررسی ویژگی‌های نانو ساختاری این مواد می‌پردازد. همچنین، استاندارد EN 13501 رفتار آئروژل‌ها در برابر آتش را طبقه‌بندی می‌کند که برای نیروگاه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. در سطح داخلی (ایران) نیز با توجه به برنامه‌های توسعه فناوری نانو و عایق‌های حرارتی پیشرفته، مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (ISIRI) اقدام به تدوین استانداردهای ملی نموده است. به‌عنوان نمونه، استاندارد ملی ۱۷۲۸۶ بر مبنای ASTM C1728 برای عایق‌های آئروژلی تدوین شده است. با توجه به رشد سریع فناوری آئروژل‌ها و کاربردهای گسترده آنها در صنایع انرژی،

هماهنگی بین استانداردهای داخلی و بین‌المللی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این امر نه تنها به بهبود کیفیت محصولات تولیدی کمک می‌کند، بلکه زمینه را برای صادرات فناوری‌های ایرانی به بازارهای جهانی فراهم می‌سازد. در ادامه این مبحث، به بررسی دقیق‌تر مهم‌ترین استانداردهای مرتبط و تأثیر آنها بر توسعه صنعتی آئروژل‌ها پرداخته خواهد شد [۲-۴].

• ISO 22482:2021: "فناوری نانو - مشخصات آئروژل سیلیکای رسانش‌پذیر حرارتی برای کاربردهای عایق‌کاری در ساختمان‌ها و صنعت"

این استاندارد بین‌المللی، ویژگی‌های کلیدی آئروژل سیلیکای به‌عنوان یک ماده عایق حرارتی پیشرفته تعریف می‌کند و روش‌های آزمون برای سنجش عملکرد آن را ارائه می‌دهد. تمرکز اصلی آن بر کاربردهای صنعتی و ساختمانی است، از جمله [۲-۴]:

- عایق‌کاری لوله‌ها و مخازن در نیروگاه‌ها
 - عایق‌کاری حرارتی در ساختمان‌ها (نمادها، سقف‌ها، دیوارها)
 - سیستم‌های سرمایش و گرمایش صنعتی
- پارامترهای کلیدی پوشش داده‌شده در این استاندارد شامل موارد ذیل است:

۱. خواص فیزیکی

- چگالی (محدوده مجاز: $200-50 \text{ kg/m}^3$)
- تخلخل (بیش از ۹۰٪)
- ساختار نانومتخلخل (اندازه حفره‌ها: ۲-۵۰ نانومتر)

۲. ویژگی‌های حرارتی:

- رسانایی گرمایی ($0.025-0.15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ در دمای 25°C)
- پایداری حرارتی (تحمل دما تا 600°C بدون تخریب)

۳. خواص مکانیکی

- مقاومت فشاری ($>0.2 \text{ MPa}$)
- مقاومت در برابر ارتعاشات (طبق آزمون ISO 13320)

۴. پایداری شیمیایی و محیطی

- مقاومت در برابر رطوبت (جذب آب کمتر از ۵٪ پس از ۲۴ ساعت)
- مقاومت در برابر UV (طبق ISO 4892-3)

روش‌های آزمون مورد تأیید استاندارد

- آنالیز حرارتی (TGA/DSC) برای سنجش تخریب حرارتی
- میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی ریزمورفولوژی
- آزمون هدایت گرمایی با دستگاه سنجش صفحه داغ (Hot Plate مطابق ISO 8302)

مزایای رعایت این استاندارد

- افزایش قابلیت اطمینان اطمینان از عملکرد بهینه آئروژل در شرایط عملیاتی سخت.
- تسهیل تجارت جهانی پذیرش محصولات در بازارهای بین‌المللی با تأیید ISO.
- بهبود ایمنیتضمین پایداری ماده در برابر آتش و مواد شیمیایی.

کاربرد در صنعت نیروگاه‌ها

- این استاندارد به‌ویژه برای نیروگاه‌های حرارتی و سیکل ترکیبی مفید است، جایی که آئروژل‌ها برای عایق‌کاری:
- توربین‌های بخار
 - لوله‌های انتقال سیالات داغ
 - مخازن ذخیره‌سازی
- استفاده می‌شوند.

• ASTM C1728 – Standard Specification for Flexible Aerogel Insulation

این استاندارد توسط انجمن آمریکایی آزمون و مواد (ASTM) تدوین شده و ویژگی‌های فنی، روش‌های آزمون و الزامات کیفی عایق‌های آئروژل انعطاف‌پذیر را تعیین می‌کند. این استاندارد برای کاربردهای صنعتی، ساختمانی و نیروگاهی طراحی شده است. پارامترهای کلیدی پوشش داده‌شده در استاندارد در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳. پارامترهای کلیدی پوشش داده‌شده در استاندارد [۲-۴].

ویژگی	محدوده/شرایط استاندارد	روش آزمون
رسانایی گرمایی	$\geq 0.025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (در 25°C)	ASTM C518 یا ASTM C177
چگالی	$150\text{--}220 \text{ kg/m}^3$	ASTM C167
مقاومت فشاری	$\leq 0.1 \text{ MPa}$ (تحت فشار ۱۰٪ تغییر شکل)	ASTM C165
دمای کارکرد	200°C تا 650°C (بسته به نوع آئروژل)	ASTM C411
مقاومت در برابر رطوبت	جذب آب $> 5\%$ (پس از ۲۴ ساعت غوطه‌وری)	ASTM C610
انعطاف‌پذیری	قابلیت خمش تا 180° بدون ترک خوردگی	ASTM C1311
مقاومت شیمیایی	عدم واکنش با روغن، گریس و مواد شیمیایی متداول	ASTM C871

کاربردهای اصلی مطابق ASTM C1728 شامل موارد ذیل است [۵]:

۱. صنایع نفت و گاز:

- عایق کاری لوله‌های انتقال سیالات داغ/سرد
- مخازن ذخیره‌سازی کرایوژنیک (دماهای بسیار پایین)

۲. نیروگاه‌ها:

- عایق کاری توربین‌های بخار و سیستم‌های اگزوز
- کاهش تلفات حرارتی در خطوط بخار با فشار بالا

۳. ساختمان‌سازی

- عایق کاری دیوارها، سقف‌ها و پنجره‌های با بازدهی انرژی بالا

• استانداردهای مربوط به سنجش هدایت حرارتی

برای تعیین پارامترهای حرارتی مانند هدایت حرارتی، استانداردهای آزمون عمومی وجود دارند مانند:

- ASTM C518 تست هدایت حرارتی به کمک دستگاه‌های جریان حرارت ثابت
- ISO 8301 و EN 12667: روش‌های مشابه برای اندازه‌گیری مقاومت حرارتی در آزمایشگاه

بخش سوم: شرکت‌های داخلی و بین‌المللی تولیدکننده عایق‌های حرارتی سنتی و نوین

در حوزه عایق‌های حرارتی، به‌ویژه عایق‌های نوین مانند آئروژل، شرکت‌های متعددی در ایران فعال هستند. در ادامه، فهرستی از این شرکت‌ها همراه با محصولات و خدمات آن‌ها در جدول ۴ تا ۶ ارائه می‌شود.

جدول ۴. شرکت‌های تولیدکننده عایق‌های حرارتی و صوتی در ایران [۶]

شرکت	محل استقرار	محصولات کلیدی	کاربردهای اصلی	ویژگی‌های ممتاز
پاکان آتیه نانودانش	تهران	توهای عایق حرارتی مبتنی بر سیلیکا آئروژل	صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و ساختمان	ظرفیت تولید چهاربرابر شده
عایق ثنا	تهران	عایق‌های الاستومری (NBR/EPDM) با نمایندگی انحصاری K-FLEX ایتالیا	صنایع نفت، گاز و تأسیسات ساختمانی	نماینده رسمی برند K-FLEX ایتالیا

گیلان میکا	رشت	پوشش‌های ضد حریق	صنایع نفت، گاز و پتروشیمی	شرکت دانش‌بنیان با گواهی‌نامه‌های ملی و بین‌المللی
بهینه تجارت ابرار	تهران	عایق‌های حرارتی و صوتی (پشم سنگ، پشم شیشه، ایزوهم، الاستومری)	ساختمان، صنایع نفت و گاز	تنوع محصولات عایقی
عایق پارسیان	تهران	عایق‌های پلی‌اورتان، پشم سرامیک و پشم سرباره	صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و ساختمان	تولید عایق‌های مقاوم در دمای بالا
عایق ایران	تهران	محصولات آکوستیک و عایق‌های حرارتی	ساختمان و استودیوهای ضبط صدا	تخصص در عایق‌های صوتی و آکوستیک

جدول ۵. شرکت‌های بین‌المللی پیشرو در تولید عایق‌های نوین (آئروژل و فناوری‌های پیشرفته) [۶]

نام شرکت	کشور	محصولات کلیدی	فناوری/ماده پایه	کاربردهای اصلی	ویژگی‌های ممتاز
Aspen Aerogels, Inc	ایالات متحده	Pyrogel Spaceloft	آئروژل سیلیکا	نفت، گاز، پتروشیمی، ساختمان	عایق‌های نازک با عملکرد فوق‌العاده
Cabot Corporation	ایالات متحده	Nanogel®, Lumira	آئروژل	صنعتی، ساختمانی	ترکیب با مواد دیگر برای بهبود عملکرد
BASF SE	آلمان	Slentite®, Basogel®	آئروژل پلیمری	ساختمان، خودروسازی	قابلیت بازیافت و سازگاری محیطی
Svenska Aerogel AB	سوئد	Quartzene®	آئروژل سیلیکا	ساختمان، الکترونیک، خودروسازی	کاهش ۵۰٪ ضخامت عایق‌های سنتی
Aerogel Technologies, LLC	ایالات متحده	Airgel®	آئروژل یکپارچه	صنایع دفاعی، هوافضا	استحکام مکانیکی بالا
Enersens	فرانسه	Enerfoam™	آئروژل هیبریدی	نفت، گاز، انرژی	مقاوم در دمای تا ۶۵۰
Armacell International S.A	لوکزامبورگ	ArmaGel™	آئروژل + الاستومر	صنعتی، HVAC	انعطاف‌پذیری بالا

Thermablok Aerogels Ltd	ایالات متحده	Thermablok	آئروژل + الیاف شیشه	ساختمان	کاهش پل‌های حرارتی
Keey Aerogel	فرانسه	™KeeyGel	آئروژل بازیافتی	ساختمان	دوست‌دار محیط‌زیست
JIOS Aerogel	کره جنوبی	JIOS-Ag	پودر آئروژل	صنعتی، تحقیقاتی	قیمت رقابتی

جدول ۶. شرکت‌های پیشرو در تولید عایق‌های سنتی [۶]

نام شرکت	کشور	محصولات کلیدی	فناوری/ماده پایه	کاربردهای اصلی	ویژگی‌های ممتاز
Owens Corning	ایالات متحده	Fiberglas™, ®Foamular	پشم شیشه، فوم XPS	ساختمان، صنعتی	پیشرو در فناوری پشم شیشه
Knauf Insulation	آلمان	Earthwool®, ®Rocksilk	پشم شیشه، پشم سنگ	ساختمان	عایق‌های بازیافتی
Rockwool International	دانمارک	Rockwool®, ®Comfortbatt	پشم سنگ بازالتی	ساختمان، صنایع سنگین	مقاومت آتش تا دمای ۱۰۰۰
Saint-Gobain Isover	فرانسه	Isover®, U-®Therm	پشم شیشه	ساختمان، صنعتی	عایق‌های چندلایه
Johns Manville	ایالات متحده	Formaldehyde-free™, Microlite	پشم شیشه، فوم	ساختمان، صنعتی	بدون فرمالدئید

بخش چهارم: تحلیل بازار عایق‌های حرارتی آئروژل در صنعت نیروگاهی

۱. نیازهای ویژه نیروگاه‌ها [۷، ۸]

- محدوده دمایی:
- نیروگاه‌های گازی: ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد (عایق‌بندی توربین‌ها)
- نیروگاه‌های بخار: ۳۰۰-۵۰۰ درجه سانتی گراد (لوله‌کشی بخار فوق داغ)
- نیروگاه‌های هسته‌ای: مقاومت در برابر تشعشعات
- چالش‌های کلیدی:
- کاهش ۱۰-۱۵٪ تلفات حرارتی در خطوط انتقال
- مقاومت در برابر ارتعاشات تجهیزات دوار
- جلوگیری از خوردگی تحت فشار (فشار کاری تا ۱۰۰ بار)

۲. سهم بازار و رشد [۸, ۷]

جدول ۷. سهم بازار و رشد برای بازار عایق های حرارتی در نیروگاه ها [۸, ۷]

پارامتر	ارزش بازار جهانی (۲۰۲۴)	رشد سالانه (CAGR)
نیروگاه های گازی	۱۸۰ میلیون دلار	۹.۲٪
نیروگاه های بخاری	۱۲۰ میلیون دلار	۷.۵٪
نیروگاه های تجدیدپذیر	۴۰ میلیون دلار	۱۴.۳٪

نکته: سهم آئروژل در عایق بندی نیروگاه های ایرانی حدود ۸٪ است (فرصت رشد ۵ برابری).

۳. مزایای آئروژل در نیروگاه ها [۸, ۷]

- صرفه جویی فضایی:
- جایگزینی عایق های سنتی با ضخامت ۵۰ mm توسط آئروژل ۱۰ mm
- کاهش ۲۰٪ وزن عایق بندی روی سازه ها
- بهبود راندمان:
- افزایش ۲-۳٪ راندمان حرارتی نیروگاه های سیکل ترکیبی
- کاهش ۳۰ دقیقه زمان راه اندازی واحدهای نیروگاهی
- پایداری:
- عمر مفید ۱۵+ سال (در مقایسه با ۵-۷ سال عایق های معدنی)
- مقاومت در برابر UV و رطوبت در نیروگاه های ساحلی

۴. چالش های فنی [۸, ۷]

جدول ۸. چالش های فنی در بازار عایق های حرارتی آئروژل [۸, ۷]

چالش	راه حل های آئروژل
شکندگی	تقویت با نانوالیاف سرامیکی
هزینه بالا	تولید داخلی با ۳۵٪ صرفه جویی
نصب پیچیده	توسعه پانل های پیش ساخته ماژولار

۵. پیشنهادات اجرایی برای بازار ایران [۹]

۱. تمرکز بر نیروگاه‌های قدیمی:

- به‌روزرسانی عایق‌بندی با آئروژل در ۲۰ نیروگاه اولویت‌دار

۲. بسته‌های اقتصادی:

- فروش با قرارداد ۵ ساله شامل خدمات نگهداری

۳. همکاری با پژوهشگاه‌ها:

- توسعه آئروژل‌های مقاوم به شعله

۴. استانداردسازی:

- تدوین استاندارد برای عایق‌های حرارتی پیشرفته

۶. تحلیل هزینه-فایده

جدول ۹. تحلیل هزینه و فایده برای عایق‌های سنتی و آئروژل [۷، ۸]

پارامتر	عایق سنتی	آئروژل
هزینه اولیه (تومان/متر)	۴۵۰۰۰	۱۲۰۰۰۰
عمر مفید (سال)	۶	۱۵
هزینه تعمیرات سالانه (%)	۱۲	۳
NPV (۵ سال)	۲/۱	۳/۸

نتیجه: ارزش خالص فعلی (NPV) آئروژل ۸۱٪ بالاتر از عایق‌های سنتی.

۸. پیش‌بینی تقاضا در ایران (۱۴۰۵-۱۴۱۰)

جدول ۱۰. پیش‌بینی تقاضا در ایران برای بازار عایق نوین آئروژل [۷، ۸]

سال	تقاضا (متر مربع)	رشد سالانه (%)
۱۴۰۵	۳۵۰۰۰	-
۱۴۰۷	۵۸۰۰۰	۲۸/۷
۱۴۱۰	۹۲۰۰۰	۱۶/۵

نکته: ۷۰٪ تقاضا متمرکز بر نیروگاه‌های گازی خواهد بود.

بخش پنجم: ملاحظات فنی عایق‌های حرارتی آئروژل

۱. خواص حرارتی و عایق‌بندی [۱۰]

- ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین: آئروژل‌ها معمولاً ضریب هدایت حرارتی بین $0.013 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ تا 0.02 دارند که کمترین مقدار در میان عایق‌های موجود است. این ویژگی باعث کاهش قابل توجه انتقال حرارت می‌شود.
- عملکرد در دماهای بالا: بسته به نوع آئروژل، قابلیت عملکرد تا دماهای $650-1000$ درجه سانتی‌گراد وجود دارد (برای آئروژل‌های سیلیکا).
- مقاومت حرارتی پایدار: خواص حرارتی آئروژل در طی زمان و شرایط محیطی مانند رطوبت و فشار تا حد قابل قبولی پایدار می‌مانند.

۲. ویژگی‌های مکانیکی [۱۱]

- وزن بسیار پایین: چگالی آئروژل‌ها معمولاً بین 0.03 تا 0.5 گرم بر سانتی‌متر مکعب است که بسیار سبک‌تر از سایر عایق‌هاست.
- مقاومت مکانیکی محدود: شکنندگی بالا و مقاومت پایین در برابر ضربه و فشار مکانیکی از چالش‌های اصلی آئروژل است.
- نیاز به جکیتینگ (پوشش حفاظتی): برای محافظت مکانیکی، معمولاً نیاز به پوشش‌های محافظ یا جکیتینگ مناسب است.

۳. مقاومت در برابر رطوبت و خوردگی

- حساسیت به جذب رطوبت: آئروژل‌های سیلیکایی معمولاً جذب رطوبت بالایی دارند که می‌تواند خواص حرارتی را کاهش دهد.
- راهکارهای ضد رطوبتی: استفاده از پوشش‌های ضد آب (هیدروفوبیک) یا لایه‌های حفاظتی برای جلوگیری از نفوذ رطوبت ضروری است.
- مقاومت شیمیایی: در برابر بسیاری از مواد شیمیایی پایدار است اما در محیط‌های قلیایی شدید ممکن است آسیب ببیند.

۴. نصب و اجرا [۱۲]

- نیاز به آموزش تخصصی: نصب آئروژل به دلیل حساسیت آن به فشار و رطوبت نیازمند پرسنل آموزش دیده است.
- امکان برش و شکل دهی: امکان شکل دهی و برش آسان وجود دارد ولی باید با دقت انجام شود تا ترک و خرد شدن جلوگیری شود.
- هماهنگی با سیستم های دیگر: باید دقت شود که آئروژل با پوشش ها و سیستم های حفاظتی دیگر به خوبی هماهنگ باشد.

۵. دوام و عمر مفید [۱۲]

- عمر کاری بالاتر نسبت به عایق های سنتی: عمر مفید آئروژل می تواند تا ۲۰ سال یا بیشتر باشد در صورت رعایت شرایط نصب و حفاظت.
- نیاز به بازرسی دوره ای: بازرسی های منظم برای کنترل رطوبت، آسیب مکانیکی و وضعیت پوشش حفاظتی لازم است.

بخش ششم: ملاحظات اقتصادی عایق های حرارتی آئروژل

۱. هزینه اولیه (CAPEX) [۱۳]

- قیمت بالاتر نسبت به عایق های سنتی: آئروژل ها حدود ۳ تا ۱۰ برابر گران تر از عایق های سنتی مانند پشم شیشه یا پشم سنگ هستند.
- هزینه پوشش و جکیتینگ: هزینه نصب پوشش محافظ و سیستم های ضد رطوبت نیز به هزینه کل افزوده می شود.
- هزینه آموزش و نصب تخصصی: نیاز به نیروی متخصص و ابزارهای خاص، هزینه های اضافی را در بر دارد.

۲. صرفه جویی در هزینه عملیاتی (OPEX) [۱۳]

- کاهش قابل توجه تلفات حرارتی: به دلیل ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین، مصرف انرژی کاهش یافته و هزینه های سوخت و انرژی کاهش می یابد.
- کاهش حجم و وزن عایق: در کاربردهای صنعتی و نیروگاهی باعث کاهش بار سازه ای و سهولت حمل و نصب می شود که به کاهش هزینه های جانبی کمک می کند.
- کاهش نیاز به تعمیرات و تعویض زودهنگام: عمر طولانی تر و مقاومت بهتر در برابر شرایط محیطی باعث کاهش هزینه های نگهداری می شود.

۳. تحلیل بازگشت سرمایه (ROI) [۱۳]

- زمان بازگشت سرمایه معمولاً ۱ تا ۵ سال بسته به شرایط بهره‌برداری، قیمت انرژی و شدت استفاده.
- ارزش افزوده محیط‌زیستی: کاهش مصرف انرژی و آلودگی به بهبود اعتبار و پایداری پروژه کمک می‌کند و می‌تواند منجر به تشویق‌های مالیاتی یا کمک‌های دولتی شود.

۴. چالش‌های اقتصادی [۱۳]

- نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بالا که ممکن است در پروژه‌های کوتاه‌مدت اقتصادی نباشد.
- عدم آشنایی کامل بازار با فناوری و نگرانی از ریسک‌های اجرایی در برخی صنایع.
- نیاز به برنامه‌ریزی دقیق و آموزش مستمر برای بهره‌برداری بهینه.

نتایج این ملاحظات در جدول ۱۱ خلاصه شده است.

جدول ۱۱. ملاحظات فنی و اقتصادی به کارگیری عایق آئروژل [۱۳]

جنبه	مزایا	محدودیت‌ها
فنی	ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین، وزن سبک، عمر طولانی	شکنندگی، حساسیت به رطوبت، نیاز به محافظت و جکیتینگ
اقتصادی	صرفه‌جویی انرژی، کاهش هزینه‌های نگهداری، کاهش حجم و وزن	هزینه اولیه بالا، نیاز به آموزش و تخصص، هزینه پوشش محافظ

بخش هفتم: امکان‌سنجی اقتصادی عایق‌های حرارتی آئروژل را با استفاده از داده‌های واقعی و

قیمت‌های جهانی

۱. هزینه‌های اولیه (CAPEX) [۱۳]

عایق‌های حرارتی آئروژل به دلیل ویژگی‌های خاص خود، هزینه بالاتری نسبت به عایق‌های سنتی دارند. در ادامه، قیمت‌های جهانی برخی از محصولات آئروژل در جدول ۱۲ آورده شده است:

جدول ۱۲. قیمت‌های جهانی برخی از محصولات آئروژل

محصول	ضخامت (mm)	قیمت هر متر مربع (USD)
Thermal Wrap™ 2.5mm Blanket	۲/۵	۴۰
Thermal Wrap™ 3.5mm Blanket	۳/۵	۵۰

۵۰	۶	Thermal Wrap™ 6mm Blanket
۶۶	۸	Thermal Wrap™ 8mm Blanket
۹۴	۱۰	PROCTOR Spacetherm® A1 Fire Rated Silica Aerogel (10mm)
۷۸	۵	PROCTOR Spacetherm® A1 Fire Rated Silica Aerogel (5mm)

قیمت‌ها به صورت تقریبی و بر اساس نرخ تبدیل ارز در تاریخ ۱۲ آگوست ۲۰۲۵ ارائه شده‌اند.

• صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی (OPEX) [۱۳]

عایق‌های حرارتی آئروژل با ویژگی‌های خاص خود می‌توانند منجر به صرفه‌جویی‌های قابل توجهی در هزینه‌های انرژی شوند:

- کاهش تلفات حرارتی: با ضریب هدایت حرارتی بسیار پایین، انتقال حرارت کاهش یافته و نیاز به سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی کمتر می‌شود.
- کاهش حجم و وزن عایق: در کاربردهای صنعتی و نیروگاهی باعث کاهش بار سازه‌ای و سهولت حمل و نصب می‌شود که به کاهش هزینه‌های جانبی کمک می‌کند.
- کاهش نیاز به تعمیرات و تعویض زودهنگام: عمر طولانی‌تر و مقاومت بهتر در برابر شرایط محیطی باعث کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود.

مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از عایق‌های آئروژل می‌تواند منجر به کاهش ۲۰-۳۰ درصدی در هزینه‌های انرژی شود.

• زمان بازگشت سرمایه (ROI) [۱۳]

با توجه به هزینه‌های اولیه بالا و صرفه‌جویی‌های حاصل از استفاده از عایق‌های آئروژل، زمان بازگشت سرمایه به‌طور متوسط بین ۱ تا ۵ سال متغیر است. این زمان بستگی به عوامل مختلفی مانند شدت استفاده، قیمت انرژی و شرایط محیطی دارد.

• مقایسه با عایق‌های سنتی

جدول ۱۳. ویژگی عایق سنتی و هزینه‌ی آن‌ها [۱۲، ۱۳]

ویژگی‌ها	هزینه هر متر مربع (USD)	نوع عایق
ارزان، عایق حرارتی متوسط	۱-۲	پشم شیشه
مقاوم در برابر آتش، عایق حرارتی خوب	۳-۱/۵	پشم سنگ

پلی‌اورتان	۴-۲	عایق حرارتی عالی، مقاوم در برابر رطوبت
------------	-----	--

عایق‌های حرارتی آئروژل با وجود هزینه‌های اولیه بالاتر، به‌دلیل ویژگی‌های خاص خود مانند ضریب هدایت حرارتی پایین، عمر طولانی و کاهش هزینه‌های انرژی، می‌توانند گزینه‌ای اقتصادی و مقرون‌به‌صرفه برای پروژه‌های صنعتی، ساختمانی و نیروگاهی باشند.

بخش هشتم: طرح کسب و کار تولید عایق‌های حرارتی آئروژل

این طرح کسب‌وکار با هدف تولید و عرضه عایق‌های حرارتی آئروژل تدوین شده است تا با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و مواد اولیه باکیفیت، راه‌حلی مقرون‌به‌صرفه و سازگار با محیط‌زیست برای نیازهای صنایع مختلف از جمله ساختمان‌سازی، نفت و گاز، هوافضا و نیروگاهی ارائه دهد. با توجه به رشد بازار ساخت‌وساز سبز و سیاست‌گذاری‌های جهانی در راستای کاهش مصرف انرژی، این کسب‌وکار از پتانسیل بالایی برای موفقیت و توسعه پایدار برخوردار است. در این طرح، به بررسی فرصت‌های بازار، تحلیل رقبا، فرآیند تولید، استراتژی‌های فروش و برنامه‌های مالی پرداخته می‌شود تا چشماندازی روشن از مسیر پیش‌روی این کسب‌وکار ارائه گردد. با اجرای موفق این طرح، می‌توان گامی مؤثر در جهت ارتقای بهره‌وری انرژی و توسعه فناوری‌های دوستدار محیط‌زیست برداشت.

۱. سرمایه‌گذاری اولیه

الف) تجهیزات تولید:

- دستگاه خشک‌کن فوق بحرانی (SCD): ۱۲ میلیارد تومان
- سیستم مخلوط‌کن و هموژنایزر: ۳/۵ میلیارد تومان
- دستگاه برش CNC: ۲/۸ میلیارد تومان
- تجهیزات آزمایشگاه کنترل کیفیت: ۴/۲ میلیارد تومان
- جمع: ۲۲/۵ میلیارد تومان

ب) فضای تولید:

- اجاره سالانه کارگاه ۵۰۰ متری: ۱/۸ میلیارد تومان
- هزینه آماده‌سازی و نصب: ۱/۲ میلیارد تومان
- جمع: ۳ میلیارد تومان

ج) مواد اولیه سالانه:

- پیش‌ماده سیلیکا: ۸۰۰ میلیون تومان/تن (مصرف سالانه ۵ تن)
- حلال‌های ویژه: ۱/۲ میلیارد تومان
- بسته‌بندی: ۶۰۰ میلیون تومان

جمع: ۶/۴ میلیارد تومان

۲. هزینه‌های عملیاتی سالانه

- حقوق پرسنل (۱۰ نفر): ۷/۲ میلیارد تومان
 - انرژی (برق، گاز، آب): ۱/۵ میلیارد تومان
 - بازاریابی و فروش: ۲/۵ میلیارد تومان
 - استهلاک تجهیزات: ۲/۲۵ میلیارد تومان
- جمع: ۱۳/۴۵ میلیارد تومان

۳. پیش‌بینی تولید و درآمد

ظرفیت تولید:

- ۱۵,۰۰۰ متر مربع در سال (فاز اول)
- قیمت فروش متوسط: ۱/۲ میلیون تومان/متر مربع

درآمد سالانه:

$$۱۵,۰۰۰ \times ۱,۲۰۰,۰۰۰ = ۱۸ \text{ میلیارد تومان}$$

هزینه‌های متغیر تولید:

- ۸,۰۰۰ تومان/متر مربع (مواد اولیه)
- $۱۵,۰۰۰ \times ۸,۰۰۰ = ۱۲۰$ میلیون تومان

۴. تحلیل سودآوری

هزینه‌های کل سالانه:

$$۱۳/۴۵ \text{ (ثابت) } + ۰/۱۲ \text{ (متغیر) } = ۱۳/۵۷ \text{ میلیارد تومان}$$

سود ناخالص:

$$۱۸ - ۱۳/۵۷ = ۴/۴۳ \text{ میلیارد تومان}$$

نقطه سر به سر:

$$۱/۱۲ \text{ میلیارد} / ۱۳/۵۷ \text{ میلیون} = ۱۱,۳۰۸ \text{ متر مربع در سال}$$

۵. شاخص‌های مالی کلیدی

دوره بازگشت سرمایه:

۲۲.۵ (سرمایه اولیه) / ۴.۴۳ (سود سالانه) $\approx$ ۵ سال

حاشیه سود ناخالص:

$$(\%) 24.6 = 100 \times (4/43/18)$$

نسبت هزینه به درآمد:

$$0.75 = 13/57 / 18$$

۶. سناریوهای توسعه

سال سوم:

- افزایش ظرفیت به ۲۵,۰۰۰ متر مربع
- کاهش ۱۵٪ هزینه‌های تولید با صرفه‌جویی ناشی از مقیاس
- پیش‌بینی سود: ۷.۸ میلیارد تومان

سال پنجم:

- ورود به بازار صادراتی (۳۰٪ تولید)
- افزایش قیمت به ۱.۵ میلیون تومان برای محصولات صادراتی
- پیش‌بینی سود: ۱۲ میلیارد تومان

۷. تحلیل ریسک

ریسک‌های اصلی:

۱. نوسانات قیمت مواد اولیه ($\pm 20\%$)
۲. رقابت وارداتی (سهم بازار ۱۵-۲۰٪)
۳. تاخیر در دریافت مجوزها (۳-۶ ماه)

استراتژی‌های کاهش ریسک:

- انعقاد قراردادهای بلندمدت با تامین‌کنندگان
- توسعه محصولات اختصاصی برای صنایع خاص
- بیمه مسئولیت فنی و کیفیت محصول

۸. نیازهای مالی و پیشنهاد سرمایه‌گذاری

سرمایه مورد نیاز کل:
۲۵ میلیارد تومان (شامل ۱۰٪ contingency)

پیشنهاد ساختار سرمایه:
- ۴۰٪ سرمایه گذاری خطرپذیر
- ۳۰٪ وام بانکی (۵ ساله با ۲ سال تنفس)
- ۳۰٪ آورده بنیانگذاران

بازده مورد انتظار سرمایه‌گذار (IRR):
۲۸-۳۲٪ در افق ۵ ساله

این محاسبات بر اساس:
۱. قیمت‌های بازار ایران در سال ۱۴۰۳
۲. نرخ دلار ۵۰,۰۰۰ تومانی
۳. ظرفیت‌های فنی متوسط خطوط تولید آئروژل
۴. مطالعات بازار در صنایع نفت و گاز کشور

جمع بندی

عایق‌های حرارتی نوین آئروژل با هدایت حرارتی بسیار پایین و چگالی سبک، قابلیت کاهش قابل توجه مصرف انرژی و افزایش عمر تجهیزات در نیروگاه‌ها و صنایع انرژی را دارند. مکانیزم‌های تخریب شامل فرسایش مکانیکی، جذب رطوبت و تغییرات دماست که با طراحی مناسب قابل کنترل است. رعایت استانداردهای بین‌المللی و بهره‌گیری از تجارب تولیدکنندگان داخلی و خارجی، امکان ورود موفق به بازارهای صنعتی و صادراتی را فراهم می‌کند. تحلیل بازار و امکان‌سنجی اقتصادی نشان می‌دهد سرمایه‌گذاری در این فناوری توجیه‌پذیر بوده و بازگشت سرمایه سریع دارد. طرح کسب‌وکار پیشنهادی با مدل B2B و کانال‌های توزیع هدفمند، مسیر تجاری‌سازی موفق آئروژل را تضمین می‌کند.

مراجع

[1] Z. Zhu, W. Zhang, H. Huang, W. Li, H. Ling, H. Zhang, A Review of High-Temperature Resistant Silica Aerogels: Structural Evolution and Thermal Stability Optimization, Gels, 11 (2025) 357.

- [2] M. Koebel, A. Rigacci, P. Achard, Aerogel-based thermal superinsulation: an overview, *Journal of sol-gel science and technology*, 63 (2012) 315–339.
- [3] R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, Aerogel insulation for building applications: A state-of-the-art review, *Energy and buildings*, 43 (2011) 761–769.
- [4] R. Landolfi, M. Nicoletta, Durability assessment of ETICS: Comparative evaluation of different insulating materials, *Sustainability*, 14 (2022) 980.
- [5] T. Yousefi Amiri, H. Bargozi, Fabrication and characterization of silica aerogel blanket as an excellent thermal insulating material, *Bulletin of Materials Science*, 47 (2024) 22.
- [6] (1396)مجموعه گزارش های صنعتی فناوری نانو، کاربردهای عایق های حرارتی نانوساختار در صنعت برق و انرژی،
- [7] https://www.precedenceresearch.com/aerogel-insulation-market?utm_source=chatgpt.com.
- [8] https://www.idtechex.com/en/research-article/market-growth-for-aerogels-to-continue-from-energy-and-industrial-areas/33279?utm_source=chatgpt.com.
- [9] https://www.energyconnects.com/opinion/thought-leadership/2024/november/insulating-for-the-future-using-aspen-aerogels-technology-for-lng-assets/?utm_source=chatgpt.com.
- [10] https://thermtest.com/application/aerogel-thermal-conductivity-hfm?utm_source=chatgpt.com.
- [11] https://www.wired.com/2006/02/a-solid-thats-light-as-air/?utm_source=chatgpt.com.
- [12] https://www.buyaerogel.com/product/thermal-wrap-2-5-mm-blanket/?utm_source=chatgpt.com.
- [13] https://www.verifiedmarketreports.com/product/ultra-thin-aerogel-blanket-market/?utm_source=chatgpt.com/.