

## بررسی عملکرد انواع سیستم‌های عایق‌بندی در مخازن ذخیره پیشرانده‌های کرایوژنیک

علی صابری مقدم<sup>۱\*</sup>، زهرا قاسمی<sup>۲</sup>، فرزانه جعفری<sup>۳</sup>

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

\*Email: ali\_saberimoghaddam@yahoo.com

(تاریخ وصول: ۹۳/۸/۴، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۹)

### چکیده

طراحی مخازن مورد استفاده برای ذخیره پیشرانده‌های کرایوژنیک هیدروژن مایع و اکسیژن مایع با توجه به دمای جوش پایین این سیالات در مقایسه با سایر مخازن نگهداری دارای تفاوت‌های بسیاری است. در این مقاله مهم‌ترین سیستم‌های عایق‌بندی مخازن ذخیره سیالات کرایوژنیک از جمله عایق خلأ، عایق خلأ همراه با پودر، عایق خلأ همراه با سپرهای تابشی، عایق‌های چند لایه و مخازن عایق شده با پوسته سرد مورد ارزیابی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که بسته به نوع کاربرد و ظرفیت مخازن ذخیره، نوع عایق بندی مناسب می‌تواند متفاوت باشد. مناسب‌ترین نوع عایق بندی مخازنی که به منظور ذخیره هیدروژن مایع در واحدهای مقیاس کوچک بکار می‌روند، عایق خلأ همراه با پوسته سرد و مناسب‌ترین عایق برای مخازنی که پایین بودن وزن آنها دارای اهمیت است، عایق‌های چند لایه یا سوپر عایق‌ها می‌باشند. همچنین برای مخازن ذخیره اکسیژن مایع با حجم زیاد، استفاده از عایق خلأ مناسب‌ترین گزینه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مخازن کرایوژنیک، عایق بندی، نرخ تبخیر، هیدروژن مایع و اکسیژن مایع.

### ۱- مقدمه

کسب فناوری‌های مرتبط با سیستم مایع سازی هیدروژن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از مهم‌ترین این فناوری‌ها، سیستم ذخیره سازی هیدروژن مایع و اکسیژن مایع می‌باشد [۴ و ۵]. از آن جا که هیدروژن مایع (دمای جوش  $253^{\circ}\text{C}$  - [۶]) و اکسیژن مایع (دمای جوش  $182^{\circ}\text{C}$  - [۶]) در دماهای بسیار پایینی نگهداری می‌شوند، لذا

هیدروژن مایع در ترکیب با اکسیژن مایع، بالاترین ایمپالس ویژه را برای سیستم پیشرانش فراهم می‌سازد. با توجه به گسترش استفاده از این نوع پیشرانده در پرتاب موشک‌های ماهواره‌بر و با توجه به روند رو به گسترش صنعت فضایی کشور، نیاز به تولید این سوخت پربازده به خوبی احساس می‌شود [۱-۳]. در این میان تحقیق و توسعه در زمینه

۱- دانشیار

۲ و ۳- کارشناسی ارشد

می‌باشد [۱۸]. بدیهی است هر چه دمای ماده‌ی نگهداری شونده کم‌تر باشد به تبع آن سیستم عایق‌بندی با عملکرد بالاتری مورد نیاز است [۱۹ و ۲۰]. مکانیزم‌های اصلی انتقال حرارت در دمای پایین نیز مانند شرایط معمول به سه شکل هدایتی، جابجایی و تشعشعی وجود دارد [۲۱]. به منظور درک بهتری از میزان تأثیر هر یک از این مکانیزم‌های انتقال حرارت، در جدول (۱) شار حرارتی وارد شده به یک مخزن ذخیره هیدروژن مایع به حجم تقریبی ۱۰ لیتر که فاقد هر گونه سیستم عایق‌بندی است، به تفکیک هر یک از مکانیزم‌ها، آورده شده است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود در شرایطی که سیستم هیچ عایق‌بندی ندارد، انتقال حرارت جابجایی نقش عمده‌ای در تبخیر مایع کرایوژنیک ایفا می‌نماید، پس از آن نیز انتقال حرارت‌های هدایتی و تشعشعی در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت هدف از عایق‌بندی مخازن کرایوژنیک حداقل کردن مکانیزم‌های انتقال حرارت است [۲۲ و ۲۳]. انتقال حرارت از طرف جابجایی و هدایتی را با ایجاد شرایط خلأ به میزان زیادی می‌توان کنترل نمود [۲۴]. در ادامه تأثیر سیستم‌های عایق‌بندی مختلف در کاهش هر یک از این مکانیزم‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

**جدول ۱-** میزان شار انتقال حرارت وارد شده به مخزن ۱۰ لیتری هیدروژن مایع بدون عایق.

شار انتقال حرارت جابجایی (W/m <sup>2</sup> )	شار انتقال حرارت هدایتی (W/m <sup>2</sup> )	شار انتقال حرارت تشعشعی (W/m <sup>2</sup> )
۸۱/۱	۱۳/۹	۲/۸۲

## ۲-۱- عایق خلأ

در فضای محصور بین دو جداره ساخته شده از شیشه، فلزات و یا مواد کامپوزیتی، پمپ خلأ با مکش گازهای موجود، فضای خلأ مناسبی به عنوان عایق بوجود می‌آورد (بدیهی است که فضای خلأ مورد نظر، فضای محصور بین دو دیواره با دماهای متفاوت می‌باشد). درجه خلأ در آن فضا تأثیر مستقیم بر کیفیت کلی عایق دارد. با استفاده از عایق خلأ بالا می‌توان انتقال حرارت‌های جابجایی و هدایتی از طریق گاز محبوس در فضای بین دو جداره را به حداقل مقدار ممکن رساند [۲۴]. با توجه به این واقعیت که بوجود آوردن شرایط خلأ مطلق غیرممکن است، لذا ذرات گاز باقیمانده در فضای خلأ خود باعث نوعی انتقال حرارت هدایتی می‌شوند که نرخ این انتقال حرارت هدایتی از طریق گازهای باقیمانده را می‌توان با استفاده از وزن مولکولی، گرمای ویژه و فشار گاز باقیمانده طبق رابطه (۱) تعیین نمود [۶]:

جهت ذخیره سازی آن‌ها پس از تولید، به مخازن ویژه‌ای که دارای عایق‌بندی خاص باشند، نیاز است [۷]. به طور کلی به موادی که دارای نقطه جوش کمتر از ۱۰۰°C- هستند، مواد کرایوژنیک گفته می‌شود. مخازن نگهداری سیالات کرایوژنیک با توجه به کاربرد و مدت زمان لازم برای نگهداری در اشکال مختلفی ساخته می‌شوند [۶ و ۷]. تحلیل انتقال حرارت وارده به این مخازن و کم کردن هر چه بیشتر آن از اهمیت بسزایی برخوردار است. هر چه نرخ تبخیر سیال کرایوژنیک کمتر باشد، مخزن طراحی شده کارایی بالاتری خواهد داشت [۸ و ۹]. از این رو مهم‌ترین عامل در طراحی مخازن اکسیژن و هیدروژن مایع، طراحی سیستم عایق‌بندی آن‌ها می‌باشد. به طور کلی انتقال حرارت به سطح داخلی مخازن کرایوژنیک، از طریق سه مکانیزم هدایت، جابجایی و تشعشع صورت می‌پذیرد. به منظور کم کردن هر چه بیشتر انتقال حرارت هدایتی و جابجایی، این مخازن به شکل دو جداره ساخته می‌شوند و برای کم کردن انتقال حرارت تشعشعی نیز معمولاً از سپرهای تابشی استفاده می‌کنند. جداره‌ی داخلی این مخازن دربرگیرنده‌ی سیال کرایوژنیک است و بوسیله‌ی یک مخزن خارجی یا ژاکت خلأ<sup>۱</sup> که برای بهبود خواص عایق‌بندی، خلأ بالایی دارد احاطه شده است. این طرح کلی برای نخستین بار توسط جیمز دوئر<sup>۲</sup> در سال ۱۸۹۸ جهت ذخیره سازی هیدروژن مایع ابداع شد [۱۰]. به همین دلیل به مخازن کرایوژنیک کم حجم به افتخار این دانشمند، دوئر نیز گفته می‌شود [۱۱-۱۴].

در این مقاله شیوه‌های مختلف عایق‌بندی مخازن ذخیره سازی سیالات کرایوژنیک، بویژه برای هیدروژن مایع و اکسیژن مایع، معرفی شده و عملکرد حرارتی آنها در شرایط مختلف تجزیه و تحلیل می‌گردد.

## ۲-۲- انواع روش‌های عایق‌بندی در مخازن کرایوژنیک و تجزیه و تحلیل عملکرد آن‌ها

طبقه بندی مخازن کرایوژنیک می‌تواند بر اساس فاکتورهای مختلفی از جمله کاربرد، شکل ظاهری، سیستم عایق‌بندی و غیره صورت گیرد. با این وجود به دلیل اهمیت انتقال حرارت از مخازن کرایوژنیک، این مخازن عموماً با توجه به نوع عایق‌بندیشان طبقه‌بندی می‌شوند. بر این اساس مخازن کرایوژنیک به صورت مخازن با دو ژاکت<sup>۳</sup>، مخازن با عایق چند لایه<sup>۴</sup>، عایق پودری<sup>۵</sup> و مخازن با پوسته‌ی سرد<sup>۶</sup> طبقه بندی می‌شوند [۱۷-۱۵]. انتقال حرارت در قسمت‌هایی از مخزن مانند اتصالات، سیستم‌های لوله کشی، نگهدارنده‌ها و غیره قابل توجه است، لذا استفاده از عایق‌بندی مناسب در این قسمت‌ها نیز ضروری

- 1-Vacuum Jacket
- 2 -James Dewar
- 3-Double Jacketed Vessel
- 4-Multilayer Insulation
- 5-Powder Insulation
- 6-Vapor Cooled Sheild

رابطه (۱) برای انتقال حرارت هدایتی برقرار باشد، باید تحلیل زیر صورت گیرد.

در فضای محصور بین دو دیواره عدد گراشوف<sup>۲</sup> و پرانتل<sup>۳</sup> به ترتیب با روابط (۲) و (۳) تعریف می‌شوند:

$$Gr = \frac{g\beta\Delta T\delta^3}{\nu^2} \quad (2)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3)$$

در رابطه (۲)،  $g$  شتاب گرانش،  $\beta$  معکوس دمای میانگین بر حسب  $\frac{1}{K}$ ،  $\Delta T$  اختلاف دمای دو دیواره،  $\delta$  فاصله محصور شده بین دو دیواره و  $\nu$  ویسکوزیته سینماتیک هوای محصور شده می‌باشد. در رابطه (۳) نیز  $\alpha$  ضریب ویژه هدایت گرمایی می‌باشد. در فضای محصور بین دو دیواره زمانی که  $Gr \times Pr < 2000$  باشد، هدایت در لایه سیال برقرار است. این رابطه بدین معناست که در صورت برقرار بودن این شرایط، سرعت جریان آزاد مولکولی بسیار کوچک است و می‌توان از انتقال حرارت به شکل جابجایی آزاد صرف نظر نمود [۲۵]. کاهش عدد گراشوف به وسیله کم کردن فشار سیال (چگالی) یا با کاهش فضای محصور  $\delta$  بدست می‌آید. وقتی از واژه‌ی چگالی کم استفاده می‌شود، منظور شرایطی است که مسافت آزاد طی شده توسط مولکول ( $\lambda$ )، در مقایسه با مسیر انتقال حرارت (فاصله بین دیواره‌ها) خیلی کوچک نیست. مسافت آزاد مولکولی فاصله‌ای است که مولکول به طور متوسط بین برخورد هایش طی می‌نماید. فاصله آزاد طی شده توسط مولکول با رابطه (۴) بیان می‌شود [۲۵]:

$$\lambda = 8.6 \times 10^3 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (4)$$

در این رابطه  $\lambda$  مسافت آزاد طی شده توسط مولکول بر حسب سانتی‌متر،  $\eta$  ویسکوزیته گاز موجود در فضا بر حسب پواز،  $P$  فشار بر حسب میکرومتر جیوه،  $T$  دمای مطلق بر حسب کلوین و  $M$  وزن مولکولی گاز می‌باشد.

محققان بر اساس تئوری جنبشی گازها و مطابقت با داده‌های تجربی به این نتیجه رسیده‌اند که در شرایطی که مسافت آزاد طی شده مولکول کمتر از فاصله بین دیواره‌ها باشد، فشار زیاد است و در این صورت انتقال حرارت هدایتی گاز مستقل از فشار گاز می‌باشد. شکل (۱) تغییرات شار حرارتی با تغییرات فشار و اهمیت مسافت آزاد طی شده توسط مولکول نسبت به فاصله بین دیواره‌ها را نشان می‌دهد.

$$Q = \frac{A_1}{2} \left( \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_2 + \left(\frac{T_1}{T_2}\right)(1 - \alpha_2)\alpha_1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \left( \frac{R}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{P}{\sqrt{TM}} \right) (T_2 - T_1) \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $A_1$  سطح پوسته داخلی،  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  به ترتیب ضرایب تطابق سطوح داخلی و خارجی،  $\gamma$  نسبت  $\frac{c_p}{c_v}$  گاز موجود در فضای بین دو جداره،  $T$  دمای میانگین سطوح گرم و سرد،  $M$  جرم مولکولی گاز موجود در فضای بین دو جداره و  $T_1$  و  $T_2$  نیز به ترتیب دمای سطوح داخلی و خارجی می‌باشند. جدول (۲)، مقادیر ضرایب تطابق برای گازهای مختلف را نشان می‌دهد. ضرایب تطابق گازهای معمولی در محدوده‌ی دمای اتاق و کمتر از آن معمولاً بین ۰/۷ تا ۱ متغیر هستند [۶]. گازهای سبک مانند هیدروژن و هلیوم معمولاً ضرایب تطابق کمتری دارند [۶]. به منظور درک بهتر از تأثیر این پارامتر، میزان انتقال حرارت هدایت از طریق گازهای باقیمانده برای یک مخزن ۱۰ لیتری هیدروژن مایع، هنگامی که فضای بین دو جداره پیش از خلأ با گازهای مختلف شستشو داده شده باشد، در جدول (۳) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

جدول ۲- ضرایب تطابق گازهای مختلف بر حسب دما [۶].

دما (K)	هلیوم	هیدروژن	نئون	هوا
۳۰۰	۰/۳۹	۰/۲۹	۰/۶۶	۰/۸ - ۰/۹
۷۸	۰/۴۲	۰/۵۳	۰/۸۳	۱
۲۰	۰/۵۹	۰/۹۷	۱	۱

جدول ۳- مقایسه انتقال حرارت از طریق گازهای باقیمانده در یک مخزن

۱۰ لیتری هیدروژن مایع برای گازهای باقیمانده مختلف در فضای خلأ.

گازهای باقیمانده	هلیوم	هیدروژن	نئون	هوا
$Q_c(W)$	۰/۰۲	۰/۰۳۲	۰/۰۴۴	۰/۰۵

همان‌طور که داده‌های جدول (۳) نشان می‌دهند، در حالی که گاز باقیمانده در فضای خلأ هلیوم باشد، نسبت به زمانی که گاز باقیمانده موجود در فضای بین دو جداره هوا، هیدروژن یا نئون باشد، حرارت هدایتی کمتری منتقل می‌شود. این در حالی است که ضریب هدایت حرارتی هلیوم نسبت به هوا در تمام محدوده‌های دمایی بالاتر است [۱۰]. به عبارت دیگر در شرایط خلأ بالا مکانیزم انتقال حرارت هدایتی نسبت به شرایط اتمسفری متفاوت می‌شود. به منظور تعیین میزان کمی خلأ بالا جهت ایجاد شرایطی که در آن

برابر با ۰/۴۹ سانتی‌متر خواهد بود. این بدین معنی است که در فشارهای کمتر از ۱۰ میکرومتر جیوه اگر فاصله بین دیواره‌ها کمتر از ۰/۴۹ سانتی‌متر باشد نرخ انتقال حرارت متناسب با فشار گاز می‌شود و به عبارتی هدایت گاز باقیمانده مطرح می‌شود (رابطه (۱)) و در صورتی که فاصله بین دیواره‌ها بیشتر از ۰/۴۹ سانتی‌متر شود در فشار ۱۰ میکرومتر جیوه محیط پیوسته شده و انتقال حرارت مستقل از فشار می‌شود و به عبارت دیگر انتقال حرارت هدایتی مطرح می‌شود.

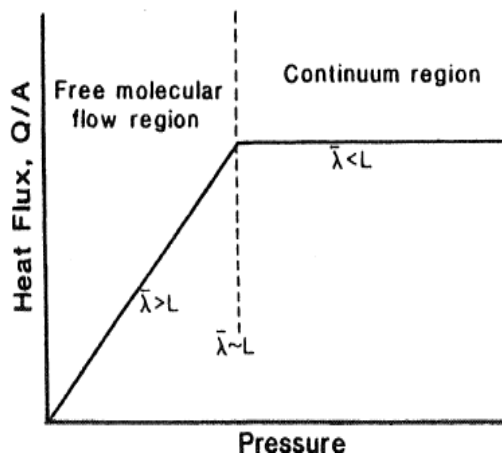
هنگامی که دیواره‌های داخلی فضای خلأ خیلی سرد شوند و به دمای کرایونیک برسند، مولکول‌های گاز باقیمانده در فضای خلأ که دارای دمای انجماد بالاتر از دمای دیواره هستند، به طور قابل توجهی به دیواره می‌چسبند و در نهایت سبب می‌شوند خلأ در آن فضا باقی بماند [۲۵]. عایق خلأ برای نگهداری هیدروژن و اکسیژن مایع در مخازن در مقیاس بزرگ نسبت به سایر روش‌ها ارجحیت دارد. استفاده از خلأ برای تمام سیستم‌های عایق‌بندی کرایونیک به ویژه در ذخیره‌های کوتاه مدت ضروری نمی‌باشد، در این شرایط برای مثال فوم‌های منبسط شده (پلی یورتان، پلی استایرن، لاستیک، سیلیکا و شیشه)، فایبرگلاس، پوشش‌های ترکیبی و در بعضی موارد چوب‌ها (بالسا، درخت کاج و صنوبر، افرا) می‌توانند حتی بدون وجود سیستم خلأ، سیستم عایق‌بندی خوبی باشند. شیرها و اجزای زیادی در سیستم‌های کرایونیک به این روش عایق بندی می‌شوند [۲۶ و ۲۷].

## ۲-۲- سیستم‌های عایق بندی جهت کاهش انتقال حرارت تشعشی

سهم تشعشع در حرارت جریان یافته در دمای کرایونیک و در هنگام استفاده از خلأ چشمگیر است [۲۱]. جریان گرمایی تشعشع بین سطوح دو جسم متحدالمرکز بدون هیچ ماده‌ی مداخله کننده‌ای از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$Q_r = 0.53 \times 10^{-8} \left( \frac{W}{k.ft^2} \right) \times \frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2} (1 - e_2) e_1} \times (T_2^4 - T_1^4) A_1 \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $Q_r$  نرخ حرارت تشعشی منتقل شده بر حسب وات،  $e_1$  و  $e_2$  به ترتیب ضرایب نشر سطوح داخلی و خارجی که مقدار آن بر حسب جنس و دمای سطح متغیر است،  $T_1$  و  $T_2$  به ترتیب دمای سطوح داخلی و خارجی بر حسب کلویین و  $A_1$  مساحت مخزن داخلی بر حسب فوت مربع می‌باشد [۵۶]. به منظور کم کردن هر چه بیشتر انتقال حرارت از طریق این مکانیسم، طبق رابطه (۵) می‌توان از پوشش‌هایی با نشر پایین استفاده کرد که وقتی بر دیواره‌های مخزن خلأ قرار می‌گیرند، نشت حرارتی به مخزن بواسطه‌ی تشعشع را کاهش می‌دهند [۲۱].



شکل ۱- تغییرات انتقال حرارت هدایتی با خلأ برای منطقه جریان مولکولی آزاد [۶].

در شکل (۱)،  $L$  فاصله بین دیواره‌ها و  $\lambda$  مسافت آزاد طی شده توسط مولکول می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، فشار مرزی جایی است که مسافت آزاد طی شده توسط مولکول برابر با فاصله بین دیواره‌ها باشد. به عبارتی در فشارهای بالاتر از این فشار مرزی که در آن مسافت آزاد طی شده توسط مولکول کمتر از فاصله بین دیواره‌ها باشد، محیط پیوسته در نظر گرفته شده و انتقال حرارت هدایتی مطرح می‌شود. همچنین به طور عکس در فشارهای کمتر از این فشار مرزی که در آن مسافت آزاد طی شده توسط مولکول بیشتر از فاصله بین دیواره‌ها باشد، انتقال حرارت هدایتی گاز باقیمانده مطرح می‌شود. این نتیجه با تئوری جنبشی گازها بدین صورت توضیح داده می‌شود که در فشارهای پایین، برخورد مولکول‌های گاز با دیواره بیشتر از برخوردشان با یکدیگر می‌باشد. بنابراین، هر مولکولی مانند وسیله‌ای است که بدون وقفه از سطح گرم به سمت سطح سرد حرکت کرده و انرژی را منتقل می‌نماید. این ناحیه که در آن فشار کم و مسافت آزاد طی شده مولکولی زیاد است به عایق خلأ بالا موسوم است. تحت این شرایط نرخ انتقال حرارت تابع فاصله بین صفحات نمی‌باشد. به طور نمونه، در خلأ  $10^{-4}$  تور<sup>۱</sup> مولکول‌های گاز نمی‌توانند محیط پیوسته‌ای بیشتر از رژیم جریان مولکولی بوجود آورند، در نتیجه جریان گرما در طول فضا کاهش می‌یابد [۲۵]. به عنوان مثال می‌توان مخزن نگهداری هیدروژن مایع که با پوسته نیتروژن مایع خنک می‌شود را در نظر گرفت. دمای دیواره داخلی ۲۰ و دیواره خارجی ۷۷ کلویین می‌باشد لذا دمای نیتروژن محصور شده بین دیواره‌ها ۴۸ کلویین در نظر گرفته می‌شود. نیتروژن گازی محصور شده جرم مولکولی برابر ۲۸ دارد. به عنوان مثال هنگامی که فشار بین دیواره‌ها ۱۰۰ میلی متر جیوه باشد، میزان  $\lambda$  برابر با ۵/۵ سانتیمتر و هنگامی که فشار بین دو جداره ۱۰ میکرومتر جیوه باشد، میزان  $\lambda$

نیترورژن مایع با جذب حرارت تشعشی منتقل شده از محیط، مانع از رسیدن آن به هیدروژن مایع موجود در مخزن اصلی می‌شوند. در ادامه هر یک از این سیستم‌های عایق‌بندی که جهت کاهش انتقال حرارت تشعشی بکار می‌روند، به همراه مکانیزم اثر آنها، شرح داده می‌شوند.

#### الف - عایق پودری

این روش عایق‌بندی بر اساس پر کردن فضای عایق خلأ با پودری سبک و ریز<sup>۱</sup> می‌باشد. در صورت استفاده از مواد پودری که دانه‌های بسیار ریزی دارند، مثل پرلیت، سیلیس (SiO<sub>2</sub>) و غیره، انتقال حرارت تشعشی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۲۸ و ۲۹]. روش ذکر شده از نظر طراحی مکانیکی، پیچیدگی زیادی ندارد و اگر ضخامت فضای عایق کافی باشد، پر کردن با پودر تا حد زیادی انتقال حرارت تشعشی را کاهش می‌دهد. به علاوه، وقتی از پودر استفاده می‌شود، خلأ مورد نیاز گاز نسبتاً کم است [۳۰-۳۲]. همانطور که ذکر شد، این لایه پودری طبق رابطه (۶) می‌تواند مانند نقش بی‌نهایت صفحه منعکس کننده را ایفا نماید (n در رابطه (۶) به سمت بی‌نهایت میل می‌کند) و بدین ترتیب میزان انتقال حرارت تشعشی را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد.

در فشارهای بالاتر، علاوه بر تأثیر هدایت حرارتی عایق پودری، هدایت حرارتی در گاز نیز وجود دارد. اگر ذرات پودر با همدیگر تماس پیدا نکنند هدایت گرمایی آن در مقایسه با حالت جامد به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. در فشارهای کمتر از ۱۰<sup>-۲</sup> تا ۱۰<sup>-۳</sup> تور، انتقال هدایت حرارتی از طریق گاز خیلی ناچیز است و انتقال حرارت شامل تشعشع گرمایی و هدایت حرارتی مؤثر از طریق پودر می‌باشد. در صورتی که تشعشع حرارتی مهم‌تر از هدایت حرارتی جامد از طریق پودر باشد، استفاده از پودر در فضای خلأ می‌تواند نشت حرارتی را کاهش دهد. با اضافه کردن ذرات فلزی بازتابنده<sup>۲</sup> مثل پودر آلومینیوم به عایق پودری، انتقال حرارت تشعشی می‌تواند کاهش بیشتری پیدا کند، حال آنکه هدایت گرمایی به علت بالارفتن ضریب هدایت حرارتی ناشی از حضور ذرات آلومینیوم افزایش می‌یابد. با ترکیب درستی از اندازه‌ی ذرات و اختلاط پودرها می‌توان به حداقل ضریب انتقال حرارت هدایتی رسید [۳۳].

نمونه‌ای از مخازن ذخیره کرایونیک با عایق پودری که توسط شرکت بیچ ایرکرافت<sup>۳</sup> با مشاوره‌ی آزمایشگاه علمی لس آلاموس<sup>۴</sup> و اداره ملی استاندارد امریکا<sup>۵</sup> طراحی شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. این مخزن که برای حمل و نقل جاده‌ای هیدروژن مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر روی تریلر نصب می‌شود [۳۴].

در جدول (۴) ضرایب نشر سطوحی از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و آلومینیوم در دماهای مختلف نشان داده شده است.

جدول ۴- ضرایب نشر دیواره‌های آلومینیومی و SS-304 در محدوده‌های دمایی مختلف [۶].

دما (K)	۳۰۰	۷۷	۲۰	۴/۲
فولاد زنگ نزن ۳۰۴	۰/۱۷	۰/۱۳	۰/۰۸۷	۰/۰۷۸
آلومینیوم	۰/۰۵	۰/۰۲۳	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸

با توجه به داده‌های جدول (۴)، میزان انتقال حرارت تشعشی برای یک مخزن ذخیره هیدروژن مایع ۱۰ لیتری، که یک بار در شرایطی که مخزن داخلی از جنس آلومینیوم و یک بار از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ ساخته شده باشد، در جدول (۵) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در جدول ملاحظه می‌گردد، انتقال حرارت تشعشی منتقل شده به مخزن آلومینیومی به دلیل کمتر بودن ضرایب نشر آلومینیوم نسبت به فولاد زنگ نزن به مراتب کمتر از فولاد زنگ نزن می‌باشد.

جدول ۵- انتقال حرارت تشعشی در مخزنی ۱۰ لیتری با دیواره‌هایی از جنس استیل و آلومینیوم.

ماده سازنده دیواره	فولاد زنگ نزن ۳۰۴	آلومینیوم
انتقال حرارت تشعشی (W)	۰/۰۲۷	۰/۰۰۵۳

انتقال حرارت تشعشی با استفاده از تعداد زیادی صفحه‌ی منعکس کننده با ضریب نشر پایین طبق رابطه (۶) کاهش می‌یابد [۳۶ و ۳۷].

$$I_n = \frac{Q_r}{n+1} = \frac{\sigma \cdot \epsilon_m}{(n+1)(T_1^4 - T_2^4)} \quad (6)$$

در رابطه (۶)، I نرخ انتقال حرارت تشعشی از n سطح با ضرایب نشر یکسان ( $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_m$ ) که بین سطوحی با دمای T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub> قرار دارند را نشان می‌دهد. عایق‌های پودری و چندلایه با این مکانیزم، انتقال حرارت تشعشی را کنترل می‌نمایند. عایق پوسته سرد و پوسته

۱- پرلیت، سیلیکا، آتروژل، کربن بلاک یا خاک با جداره‌ی سیلیکا

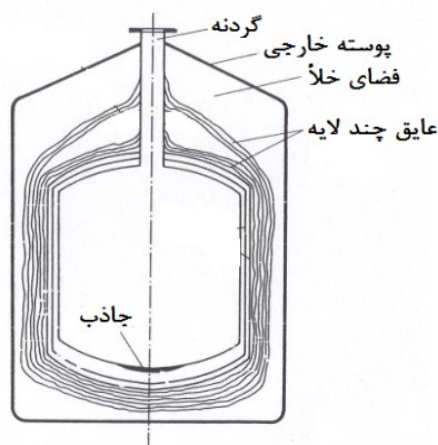
2- Reflective

3- Beech Aircraft Corporation

4- Los Alamos

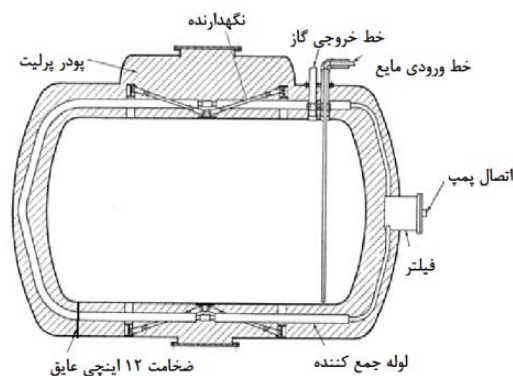
5- American National Standards Institute

چه بیشتر نشر حرارتی تعداد زیادی از این لایه‌های منعکس کننده اطراف مخزن داخلی به عنوان عایق مورد نیاز است. این لایه‌ها از فویل‌های پلاستیکی، مایلار<sup>۲</sup>، یا فویل‌های آلومینیومی خیلی نازک با لایه‌های میانی از جنس فایبرگلاس یا مواد مشابه تشکیل شده‌اند. مکانیزم کاهش انتقال حرارت تشعشی در این نوع سیستم عایق‌بندی نیز همانند عایق‌های پودری است که طبق رابطه (۶)، با افزایش تعداد لایه‌ها، میزان انعکاس گرمایی بیشتر شده و در نتیجه میزان انتقال حرارت تشعشی به مخزن نیز کاهش می‌یابد. عایق‌بندی چند لایه، بهترین نوع عایق‌بندی در دسترس از نظر کاهش تابش حرارتی در عین سبک بودن می‌باشد [۲۱ و ۴۲ و ۴۱]. گردنه نشان داده شده در شکل (۳)، عایق چند لایه و مخزن داخلی را به حالت معلق در پوسته‌ی خارجی نگاه می‌دارد [۲۱].



شکل ۳- شماتیک مخزن کرایونیک با عایق چند لایه [۲۱].

نصب عایق چند لایه به دقت بالایی نیاز دارد، مخصوصاً قرار گیری عایق در خطوط لوله و قسمت‌های فتر مانند مخازن که در صورت عدم دقت کافی مشکلات زیادی را بوجود می‌آورد. یکی از مشکلاتی که در نصب این عایق‌ها بوجود می‌آید، تماس سطوح گرم و سرد لایه‌های عایق و تبادل حرارتی هدایتی بین آن‌ها می‌باشد. علاوه بر این، رسیدن به خلأ مورد نظر که حدود  $10^{-4}$  تور است خیلی مشکل می‌باشد [۴۳]. از یک طرف پمپ کردن گازهای باقیمانده و بیرون راندن آن‌ها به علت فضای کم بین لایه‌ها مشکل است و از طرف دیگر، فاصله‌ی خلأ بین لایه‌ها به علت خارج شدن گاز آسیب می‌بیند. این مشکل به ویژه در فشارهای پایین، که نرخ زیادی از گازهای خارج شده در فضای لایه‌ها قرار می‌گیرد به وجود می‌آید. گاز باقیمانده‌ای که در فضای عایق بین لایه‌ها باقی می‌ماند فشاری بیشتر از خلأ بوجود آورده شده توسط پمپ خلأ دارد. در نتیجه این گاز باقیمانده در بین لایه‌ها، انتقال حرارت هدایتی را تشدید می‌نماید [۲۱ و ۴۴]. با توجه به موارد اشاره شده می‌توان نتیجه گرفت که به دلیل بالا بودن فناوری این سیستم عایق‌بندی، امکان استفاده از آن به راحتی فراهم نمی‌شود. با توجه به



شکل ۲- مخزن ذخیره هیدروژن مایع با عایق پودری [۳۴].

حجم داخلی مخزن نشان داده شده در شکل (۲) ۶۰۰۰ لیتر است. در مصارف عادی، ۵۴۰۰ لیتر از حجم مخزن را مایع و ۶۰۰ لیتر فضای باقیمانده را بخار اشغال می‌کند. ضخامت عایق پرلیت این مخزن تقریباً ۱۲ اینچ است. برای رسیدن به یک خلأ قابل قبول در مخازن بزرگ عایق‌بندی شده با عایق پودری، خود ذرات پودر در برابر پمپ شدن مقاومت ایجاد می‌کنند، لذا فیلتری باید مورد استفاده قرار گیرد که پودر را از پمپ خلأ دور نماید. در شکل (۲) این فیلتر نیز نشان داده شده است. لوله جمع‌کننده<sup>۱</sup> که در شکل (۲) نشان داده شده است نیز زمان لازم برای ایجاد خلأ را با کاهش فاصله‌ای که گاز باید از مابین پودرها طی کند کم می‌نماید. عایق‌بندی مورد استفاده در این مخزن سبب شده تا نرخ اتلاف هیدروژن مایع در اثر تبخیر تقریباً ۱/۵ درصد ظرفیت مخزن در هر ۲۴ ساعت باشد [۳۴ و ۳۵]. مشکل عایق پودری این است که این مواد در اثر ارتعاشات و انقباض و انبساط‌های گرمایی ته‌نشین می‌شوند که منجر به هدایت جامد بیش از حد انتظار در یک ناحیه و حفرات به جامانده بیش از حد انتظار در ناحیه دیگر می‌شود [۶]. از این رو، این نوع عایق‌بندی پس از مدتی کارایی اولیه خود را از دست داده و باید به طور دوره‌ای تحت بازرسی و تعمیر قرار گیرد.

### ب- عایق چند لایه با خلأ بالا

طبق قانون کیرشهف<sup>۲</sup> نشر کم مطابق با جذب کم و جذب کم مطابق با انعکاس بیشتر است. هرچه انعکاس بیشتر باشد میزان انتقال حرارت تشعشی رسیده به مخزن کمتر می‌شود. از این رو، فویل‌های فلزی و یا نیمه فلزی برای استفاده به عنوان سطوح انعکاس دهنده مناسب می‌باشند. میزان انعکاس فویل‌های فلزی در کم کردن نشر حرارتی اهمیت زیادی دارد. برای رسیدن به انعکاس مناسب، فلز باید ضخامتی حدود ۰/۸ میکرومتر داشته باشد [۲۹ و ۳۸-۴۰]. شکل (۳) نمایی از یک مخزن کرایونیک با عایق چندلایه را نشان می‌دهد. برای کم شدن هر

3-Mylar

1-Collection Pipe  
2- Kirchhoff

تشعشع بالا که از نظر هندسی مشابه سطح مخزن نگهداری مایع کرایوژنیک می‌باشد. این پوسته بین دیواره‌ی داخلی و خارجی در فضای عایق معلق می‌باشد. پوسته معلق مانند یک سپر تشعشعی عمل کرده و انتقال حرارت تشعشعی را کاهش می‌دهد. اگر سپر معلق همان ضریب انعکاس دیواره‌های مرزها را دارا باشد، انتقال حرارت تشعشعی به مایع ذخیره شده حدوداً نصف می‌شود. در صورت استفاده از سپر معلق به تجهیزات اضافی برای اتصال سپر به مخزن احتیاجی نیست، در نتیجه مسیرهای انتقال حرارت کمتر می‌شوند. با آن‌که استفاده از سپرهای اضافی انتقال حرارت تشعشعی را بیشتر کاهش می‌دهند، اما از طرف دیگر با افزایش سپرها، طراحی نگهدارنده‌های مکانیکی که سپرها را بدون نشت حرارتی در جایشان نگاه دارند، کار دشواری است. به عبارتی سوراخ‌هایی<sup>۴</sup> که برای جا دادن لوله‌ها و نگهدارنده‌ها برای مخزن داخلی احتیاج است به مقدار زیادی تأثیر این نوع سپرهای چند لایه را کاهش می‌دهد [۳۴ و ۴۸].

#### د- عایق کاری با پوسته‌ی نیتروژن مایع

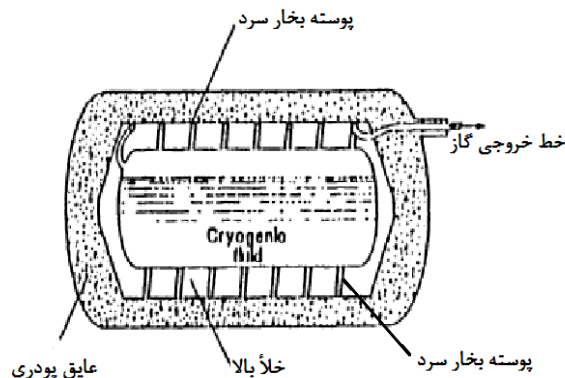
یکی از مؤثرترین سیستم‌های عایق کاری برای مخازن نگهداری هیدروژن مایع، وجود پوسته‌ای است که با نیتروژن مایع خنک می‌شود. با قرار دادن پوسته‌ی نیتروژن مایع در مخزن نگهداری هیدروژن مایع که با خلأ نیز عایق‌بندی شده است، دیواره‌ی عایق تا ۷۷ کلون خنک می‌شود و به این ترتیب مانع از رسیدن انتقال حرارت تشعشعی از محیط به مخزن اصلی می‌گردد. تقریباً تمام حرارت ساطع شده از سطح با دمای اتاق منجر به تبخیر نسبی نیتروژن مایع ارزان قیمت می‌شود [۴۸]. مخازنی از این نوع معمولاً در اندازه‌هایی بین ۱۵ تا ۱۰۰ لیتر ساخته می‌شوند [۴۹]. شکل ۵ نمونه‌ای از مخزن تجاری با عایق پوسته نیتروژن مایع را نشان می‌دهد. با استفاده از پوسته‌ی نیتروژن مایع، نرخ تبخیر هیدروژن مایع ذخیره شده نسبت به سایر روش‌های عایق بندی خیلی کمتر می‌شود. در مخازن با مقیاس بزرگ هیدروژن مایع کمتر از ۱ درصد ظرفیت در روز می‌باشد [۳۴ و ۵۰]. اگر در طراحی این مخازن دقت بیشتری به عمل آید قابل انتقال نیز هستند. دوئر با پوسته‌ی نیتروژن مایع عملکرد بسیار بالایی دارد. با این حال امروزه این‌گونه مخازن به طور گسترده با دوئرهای عایق شده چند لایه در حال تعویض هستند، زیرا در هنگام استفاده از پوسته‌ی نیتروژن مایع نیاز به پر کردن مرتب پوسته با نیتروژن مایع است و علاوه بر این، مخازن با پوسته‌ی نیتروژن مایع سنگین‌تر از مخازن چند لایه هستند [۳۴].

جزئیات بیشتر این‌گونه مخازن در شکل (۵) نشان داده شده است. این مخزن همان‌طور که گفته شد، برای کم کردن هر چه بیشتر نشت حرارتی هدایت و جابجایی دارای دو لایه خلأ است و در آن از یک

بررسی‌های صورت گرفته تولید این عایق‌ها در انحصار چند شرکت معتبر و بزرگ فعال در زمینه سیستم‌های کرایوژنیک از جمله لینده<sup>۱</sup> و ایر پروداکتس<sup>۲</sup> و ... می‌باشد [۲۰].

#### ج- پوسته سرد کرایوژنیک

یکی از راه‌های کاهش انتقال حرارت تشعشعی در مخازن کرایوژنیک (بویژه هیدروژن مایع)، استفاده از بخار حاصل از تبخیر مایع موجود در مخزن است که در لوله‌هایی اطراف مخزن داخلی جریان می‌یابد. چنین سیستم عایق بندی به پوسته‌ی بخار سرد موسوم است [۴۵ و ۴۶]. همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود برخی از مخازن تجاری پودری همراه با قسمتی از بخارات سرد فرآر که از لوله‌هایی بین دیواره‌های داخلی و خارجی عبور می‌نماید انتقال حرارت تشعشعی را کنترل می‌نمایند [۱۶ و ۴۷]. مکانیزم کاهش انتقال حرارت تشعشعی در این سیستم‌ها به این صورت است که مخزن داخلی که در دمای کرایوژنیک قرار دارد، به جای آنکه با دمای محیط انتقال حرارت تشعشعی انجام دهد با یک پوسته با دمایی پایین‌تر از دمای محیط تبادل حرارت می‌کند. همین کاهش گرادیان دمایی، سبب شود که طبق رابطه (۵) میزان انتقال حرارت تشعشعی به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش یابد.



شکل ۴- مخزن نگهداری هیدروژن مایع با پوسته بخار سرد [۱۶].

نوع دیگری از این سیستم عایق‌بندی از عایق چند لایه با فویل‌هایی که هدایت حرارتی بالایی دارند تشکیل شده است که این لایه‌ها با استفاده از بخارهای سرد خارج شده از مخزن به طور مستقیم با تماس حرارتی در مکان‌های مناسب در خط خروجی سرد می‌شوند. این روش بیشترین میزان کاهش نرخ نشت حرارت را مخصوصاً در مخازن کوچک‌تر که ظرفیتی حدود ۱۰۰ لیتر دارند و برای نگهداری هیدروژن مایع استفاده می‌شوند، ایجاد می‌کند [۱۲]. در مواردی می‌توان با استفاده از یک پوسته شناور<sup>۳</sup> سرد شده هم انتقال حرارت تشعشعی را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. پوسته‌ی غوطه‌ور، سطحی است با

4-Openings&irregularities

1-Linde  
2-Airproducts  
3-Floating

پوشش داده می‌شود تا انتقال حرارت تشعشی را نیز کاهش دهد [۲۰].

ج- کندوی خلأ (خلأ لانه زنبوری)<sup>۳</sup>: مخازن کرایوژنیک هیدروژن مایع موشک آریان بوسیله‌ی ماده‌ی عایقی موسوم به کندوی خلأ که با ضخامتی در حدود ۲ سانتی‌متر از هم جدا می‌شوند، عایق‌بندی می‌گردند. این کندوها مقاومت استاتیکی و مکانیکی بالایی دارند و همچنین عملکرد بسیار خوبی در محدوده‌ی دمایی ۲۲ تا ۱۹۰ کلوین ایجاد می‌کنند [۶ و ۲۰].

د- عایق چندلایه: همانگونه که در بخش قبل نیز ذکر گردید، عایق‌های چند لایه بهترین نوع سیستم عایق‌بندی شناخته شده برای مخازن کرایوژنیک هستند که در عین سبک بودن، کارایی بالایی در کاهش انواع مکانیزم‌های انتقال حرارت دارند. از این نوع سیستم عایق بندی در نسل‌های جدید موشک‌های آریان و نیز در شاتل فضایی استفاده شده است [۲۰ و ۵۲].

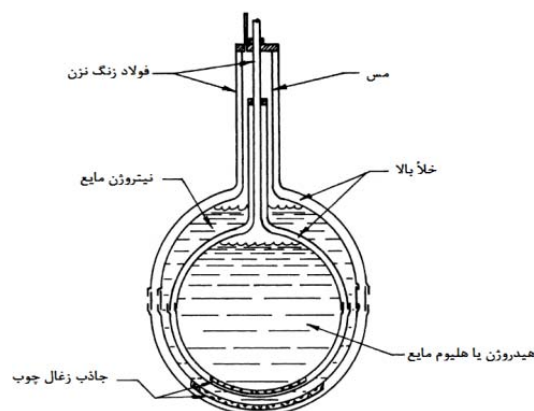
#### ۴- مقایسه سیستم‌های عایق بندی مختلف

به طور کلی میزان بازدهی و کارایی یک سیستم عایق‌بندی مناسب در کاربردهای کرایوژنیک را بر اساس میزان درصد تبخیر ماده کرایوژنیک ذخیره شده در روز تعیین می‌نمایند. بدیهی است که در یک حجم مخزن یکسان، هر قدر درصد تبخیر ماده کرایوژنیک کمتر باشد، میزان کارایی عایق کرایوژنیک در آن بالاتر می‌باشد. در جدول (۶) تأثیر دو سیستم عایق بندی چند لایه و پرلیت در شرایط مختلف خلأ بر نرخ تبخیر هیدروژن مایع مورد مقایسه قرار گرفته است. ستون دوم جدول، هدایت حرارتی عایق‌ها را نشان داده و ستون سوم شرایط عملیاتی مختلف فضای خلأ را نشان می‌دهد. ستون چهارم نیز میزان نشت حرارتی به مخزن با وجود عایق‌بندی ذکر شده و در شرایط خلأ مورد نظر را نشان می‌دهد.

جدول ۶- بررسی نشت حرارتی از عایق‌های مختلف برای سیستم نگهداری هیدروژن مایع [۵۰].

مواد	هدایت حرارتی mW/m.K	خلأ mtorr	نشت حرارتی (W)
پرلیت	۱	۱	۱
		۱۰	۱/۳۵
عایق چند لایه (MLI) (۳۰ لایه در هر اینچ)	۰/۱	۰/۱	۱/۲
		۱	۱/۵۶
		۱۰	۶

پوسته نیتروژن مایع نیز برای کم کردن تشعشع حرارتی استفاده می‌شود. برای جذب گازهای باقیمانده در لایه خلأ نیز، از جاذب‌های زغال چوب استفاده می‌شود که همان‌گونه که در شکل مشخص شده‌اند، در پایین قسمت‌های خلأ مخزن قرار گرفته‌اند [۵۱]. دیواره داخلی و خارجی مخزن همان‌طور که گفته شد از جنس فولاد زنگ نزن ساخته می‌شود. پوسته نیتروژن مایع نیز به منظور رساندن سرما به تمام نقاط دیواره از مس که هدایت حرارتی بالایی دارد ساخته می‌شود [۳۴ و ۴۸].



شکل ۵- نمونه‌ی تجاری از دوئری برای ذخیره یا حمل و نقل هلیوم یا هیدروژن مایع با پوسته‌ی نیتروژن مایع [۳۴].

#### ۳- سیستم‌های عایق بندی مورد استفاده در موشک‌ها

جهت جلوگیری از هدر رفت پشیرانه‌های کرایوژنیک در هنگام انتقال از مخازن ذخیره ثابت یا قابل حمل به مخازن موشک یا در هنگام صعود موشک و زمانی که در معرض تشعشع مستقیم نور خورشید قرار می‌گیرد، لازم است تا مخازن موشک و لوله‌های انتقال دهنده پشیرانه‌ها در موشک بوسیله یک عایق مناسب، عایق بندی گردند. عایق‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها باید ضمن به حداقل رساندن مکانیزم‌های انتقال حرارت بسیار سبک بوده و کارایی بالایی داشته باشند. مواد عایقی که در ادامه بیان می‌شود تا حدی این نیازهای پیچیده را برطرف می‌نمایند.

الف- فوم سلولی: این فوم‌ها با داشتن ویژگی‌هایی از قبیل چگالی کم (در حدود  $50 \text{ kg/m}^3$ ) و هدایت گرمایی پایین (در حدود  $0.03 \text{ W/m.K}$ ) در ۳۳ در دمای ۳۰۰ کلوین جهت عایق بندی مخازن کرایوژنیک موشک‌ها مناسب می‌باشد. از این نوع عایق برای عایق بندی مخزن اکسیژن مایع موشک آریان ۵<sup>۱</sup> استفاده شده است [۲۰].

ب- داکرون<sup>۲</sup>: این ماده عایق نوعی فیبر پلیمری تو خالی و سبک وزن با دانسیته‌ای در حدود  $6 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد. داکرون برای استفاده به عنوان عایق در مخازن کرایوژنیک موشک‌ها با فیلمی از آلومینیوم

3-Vacuum honeycomb

1-Ariane

2-Dacron



ادامه جدول ۷- مقایسه‌ی نشت حرارتی از عایق‌های مختلف برای مخزن کرایوژنیک کروی ۴۰۰۰ لیتری [۶].

عایق	درصد تبخیر هلیوم مایع به روز	درصد تبخیر مایع به روز
پرلیت+خلأ بالا+سپر بخارسرد	۰/۳۳ (دمای سپر=۸۶کلوین)	۰/۱۳ (دمای سپر=۱۲۹کلوین)
خلأ بالا+سپر نیتروژن مایع(۷۷K)	۰/۲۱	۰/۱۷

مخازنی که با نیتروژن مایع سرد می‌شوند و مخازن با عایق چند لایه‌ی بخار سرد با ظرفیت بالای بیست هزار لیتر برای حمل و نقل هیدروژن مایع از طریق کشتی استفاده می‌شوند. برای مثال مخازنی با این شکل با کشتی از نیوارلانز به کورو<sup>۳</sup> در گاینای<sup>۴</sup> فرانسه برای تأمین هیدروژن مایع پروژه‌ی آریا نفرستاده شده‌اند [۲۱].

در مخازن بزرگتر که در مقیاس‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند انتقال حرارت به اندازه مخازن کوچک اهمیت ندارد. به همین دلیل می‌توان از عایق‌های دیگر مانند عایق پودری، که هم راحت‌تر و هم ارزان‌تر است، استفاده نمود [۵۶-۵۴]. تعداد زیادی از این مخازن در آمریکا موجود است. بزرگترین این مخازن که یک مخزن کروی با ظرفیت ۳۸۰۰ مترمکعب (تقریباً حاوی دویست و هفتاد هزار کیلوگرم هیدروژن مایع) و قطر خارجی ۲۰ متر است، در کیپ کندی<sup>۵</sup> قرار دارد. نرخ تبخیر این مخزن کمتر از ۰/۰۳ درصد در روز است. در آمریکا برای انتقال هیدروژن مایع از کامیون‌ها و تریلرهای تانکردار با ظرفیت سی هزار لیتر تا حداکثر هفتاد هزار لیتر از هیدروژن مایع با نرخ تبخیر ۰/۳ درصد تا ۰/۵ درصد در روز استفاده می‌شود. همچنین به منظور حمل و نقل هیدروژن مایع با ظرفیت یکصد و پنج هزار لیتر و رسیدن به نرخ تبخیر کمتر از ۰/۲ درصد در روز از ماشین‌های تانکردار که با خلأ پرلیت و عایق چند لایه عایق بندی شده‌اند استفاده می‌شود. با این کامیون‌های تانکردار، هیدروژن مایع از واحد صنعتی مایع سازی در کالیفرنیا و فلوریدا به کل آمریکا ارسال می‌گردد [۲۱]. همان‌طور که گفته شده در سیستم‌های ذخیره پیش‌رانه‌های فضایی برای کم کردن هر چه بیشتر نشت حرارتی از عایق‌هایی نظیر داکرون، فوم سلولی، کندوی زنبوری و عایق چندلایه می‌توان استفاده کرد.

همان‌طور که در جدول (۶) مشخص است با آن‌که عایق چند لایه در فشارهای بالا هدایت حرارتی کمتری نسبت به پرلیت دارد، اما عملکرد خوبی از خود نشان نمی‌دهد. به عنوان مثال در فشار خلأ ۱ میلی‌تور، پرلیت با وجود دارا بودن هدایت حرارتی بالاتر نسبت به عایق چند لایه، نشت حرارتی کمتری دارد. دلیل این رفتار را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که پرلیت تا حدی توانایی جذب گازهای موجود در فضای دیواره‌ها را داراست در نتیجه عایق پرلیت نسبت به عایق چندلایه می‌تواند شرایط خلأ بالاتری برای خود ایجاد نماید. با بهتر شدن شرایط خلأ امکان تماس حرارتی ذرات کمتر شده و به تبع آن نشت حرارتی حتی با وجود بالاتر بودن هدایت حرارتی کاهش می‌یابد. بنابراین با توجه به داده‌های موجود در جدول (۶)، می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از عایق پرلیت نسبت به حالتی که از عایق چندلایه استفاده می‌شود، به خلأ کمتری نیاز است [۵۰].

نرخ تبخیر هلیوم و هیدروژن مایع با توجه به عایق‌بندی‌های مختلف بر روی یک مخزن کروی با حجم ۴۰۰۰ لیتر در جدول (۷) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مخزن مورد نظر یک بار با هلیوم مایع و یک بار با هیدروژن مایع مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدیهی است که هر چه درصد تبخیر در روز کمتر باشد، نشان‌دهنده‌ی کارایی بالاتر عایق است. بر اساس جدول (۷) می‌توان نتیجه گرفت پوسته نیتروژن مایع در فضای خلأ نسبت به روش‌های دیگر درصد تبخیر کمتری دارد. بهترین نوع عایق‌بندی را بر اساس جدول (۷) پس از پوسته‌ی نیتروژن مایع، پوسته‌ی سرد و پس از آن عایق چند لایه دارا می‌باشند. شایان ذکر است که استفاده از عایق چند لایه در سطوح کوچک که فاصله بین دیواره‌ها خیلی کم است، به سبب امکان تماس حرارتی بین لایه‌ها و بالا رفتن هدایت حرارتی به مراتب دشوارتر از پوسته‌ی بخار سرد است [۵۳ و ۶۰]. از این رو این نوع عایق‌بندی دارای فناوری بالایی می‌باشد و ساخت آن نیازمند داشتن دانش و مهارت مربوطه است.

جدول ۷- مقایسه‌ی نشت حرارتی از عایق‌های مختلف برای مخزن کرایوژنیک کروی ۴۰۰۰ لیتری [۶].

عایق	درصد تبخیر هلیوم مایع به روز	درصد تبخیر هیدروژن مایع به روز
خلأ بالا	۴۹	۴
پرلیت	۷/۷	۰/۶۲
پرلیت با سپر+بخارسرد <sup>۱</sup>	۰/۷ (دمای سپر=۶۲کلوین)	۰/۲۴ (دمای سپر=۱۲۴کلوین)

2-New Orleans  
3-Kourou  
4-French Guiana  
5-Cape Kennedy

1-Vapor-Cooled Shield

## ۵- نتیجه‌گیری

حرارت تشعشعی، ابتدا پوسته نیتروژن مایع سپس پوسته‌ی سرد و پس از آن عایق چند لایه می‌باشد. در مخازن بزرگتر که در مقیاس‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند انتقال حرارت به اندازه مخازن کوچک اهمیت ندارد، به همین دلیل می‌توان از عایق‌های دیگر مانند عایق پودری، که هم راحت‌تر و هم ارزان‌تر هستند، استفاده نمود. جهت عایق‌بندی مخازن سوخت و اکسید کننده موجود در موشک‌های فضایی نیز می‌توان از عایق‌هایی نظیر داکرون، فوم سلولی، کندوی زنبوری و عایق‌های چندلایه، که در عین سبک‌تر بودن ضریب انتقال حرارت پایینی دارند، استفاده نمود

در این مقاله انواع سیستم‌های عایق‌بندی برای مخازن نگهداری سیالات کرایوژنیک خصوصاً هیدروژن مایع مورد بررسی قرار گرفت. انتخاب نوع عایق مناسب به شکل و حجم مخزن، زمان مورد نظر برای نگهداری، نوع سیال و شرایط استفاده از آن بستگی دارد. در تمام موارد ذکر شده به منظور کاهش انتقال حرارت جابجایی و هدایتی از خلأ کردن فضای بین جداره‌ها و به منظور کم کردن انتقال حرارت از مکانیسم‌های مختلف استفاده می‌شود. بهترین نوع عایق‌بندی در مخازن ثابت ذخیره‌سازی پیشرفته‌های کرایوژنیک جهت کاهش انتقال

## مراجع

- [1] Bonadio, L. "Fuels-Hydrogen Storage Liquid."; Int J Hydrogen Energ, 2009, 421-439.
- [2] Aidelott, J. C. "Venting of Liquid Hydrogen Tankage."; National aeronautic and space, 1969, 34.
- [3] Mills, G. L.; Zeller, C. M. "The Performance of Gas Filled Multilayer Insulation."; Additional information on AIP Conf., Boulder, Colorado, 2008.
- [4] Notardonato, W. T. "Analysis and Testing of an Integrated Refrigeration and Storage System for Liquid Hydrogen Zero Boil-Off, Liquefaction, and Densification."; PhD. Thesis, University of Florida, 2006.
- [5] Lipman, T. P. "An Overview of Hydrogen Production And Storage System."; Clean energy states Alliance, 2011, 32.
- [6] Flynn, T. M. "Cryogenic Engineering."; Louisville, Colorado: CRYOCO, Inc., 2005.
- [7] Babac, G.; Sisman, A.; Cmen, T. "Two-Dimensional Thermal Analysis of Liquid Hydrogen Tank Insulation."; Int J Hydrogen Energ, 2009, 6357-6363.
- [8] Salvador, M.; Aceves Gene D. Berry, Joel Martinez- Frias. FranciscEspinosal- Loza, "Vehicular Storage of Hydrogen in Insulated Pressure Vessels."; Int J Hydrogen Energ, 2006, 2274-2283.
- [9] Laurence, O. Williams "A Storage Tank for Vehicular Storage of Liquid Hydrogen."; Int J Hydrogen Energ, 1980, 99-112.
- [10] Barron, R. "Cryogenic Systems."; New York: Louisiana Polytechnic Institute, 1966.
- [11] Toscano, W. M. R. F. C. "Cryogenic Processes and Equipment in Energy Systems."; The American Society of Mechanical Engineers, 1980.
- [12] Haselden, G. "Cryogenic Fundamentals."; The Department of Chemical Engineering of Leeds, England, 1971.
- [13] Krainz; Günter; Hödl; Peter; Hofmeister; Franz. "Automotive Production of Liquid Hydrogen Storage Systems."; Magna Steyr Fahrzeugtechnik ag&cokg, A-8041 Graz, Austria.
- [14] Kalanidhi, A.; "Boil-Off in Long-Term Stored Liquid Hydrogen."; Int J Hydrogen Energ, 1987, 3.
- [15] Yang, Li.; Rongshun Wang; Caili Wang; "Study on Effect of Liquid Level on the Heat Leak into Vertical Cryogenic Vessels."; Int J Hydrogen Energ, 2010, 367-372.
- [16] Kogan, A.; Fesmire, J.; Johnson, W.; Minnick, J. "Cryogenic Vacuum Insulation for Vessels and Piping."; NASA Kennedy Space Center, 2010.
- [17] Peschka, W. "The Status of Handling and Storage Techniques for Liquid Hydrogen in Motor Vehicles."; Int J Hydrogen Energ, 1987, 753-764.
- [18] Salvador; Aceves, M.; G. D. J. M.-F. E.-L., "Vehicular Storage of Hydrogen in Insulated Pressure Vessels."; Int J Hydrogen Energ, 2006, 2274-2283.
- [19] Johnston, H. L.; Hood, C. B.; Bigeleisen, Jr. J.; Powers, R. W.; Ziegler, J. B. "Performance of Heat Insulation Materials Down to 20K."; Advances in cryogenic engineering, Springer link, 1954, 212-216.
- [20] Mukhopadhyay, M. "Fundamentals of Cryogenic Engineering."; New Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010.
- [21] Eugene, A. Avallone "Standard Handbook for Mechanical Engineers."; McGraw Hill.
- [22] Chato, J.; Melissa Van Dyke, J.; Batty, C.; Schick, S. "Status and Design Concepts for the Hydrogen On-Orbit Storage and Supply Experiment."; AIP Conference Proceedings 420, 1998, 276.
- [23] Holman, J. P. "Heat Transfer."; McGraw-Hill, 1989, 676.
- [24] Incropera, F. P. D. D. P. "Introduction to Heat Transfer."
- [25] Peschka, W. "Liquid Hydrogen." Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 1992.
- [26] Vance, W. Robert "Cryogenic Technology."; John Wiley and Sons Inc., 1963, 239-250.
- [27] Padawer, G. E. "Advances in Cryogenic Engineering."; Springer link, 1995, 315-325.
- [28] Hasen, O. A. "Liquid Oxygen Trucks."; Advances in cryogenic engineering, 1956, 75-82.
- [29] Abe, A. N. I. T. "Studies of the Large-Scale Sea Transportation of Liquid Hydrogen."; Int J Hydrogen Energ, 1998, 115-121.
- [30] Reynolds, J. M. O. A. G. M. M. "Vacuum Powder Insulation."; Advances in cryogenic engineering, Springer link, 1954.
- [31] Birmingham, B. W.; Brown, E. H.; C. R. Class, 2 and Schmidt, A. F. "Vessels for the Storage and Transport of Liquid Hydrogen."; J Res Nat Bur Stand, 1957.
- [32] Reynolds, M. M.; Brown, J. D.; Fulk, M. M.; Curtis, G. W. "Vacuum Powder Insulation."; Springer link, 1960, 216-223.
- [33] Fulk, M. M.; Devereux, R. J.; Schrodt, J. E. "Heat Transport Through Powders."; Advances in cryogenic engineering, Springer link, 1960, 163-165.
- [34] Flynn, T. M. "Cryogenic Engineering."; Louisville, Colorado: CRYOCO, Inc., 2005.
- [35] Wade, A. Amos "Costs of Storing and Transporting Hydrogen."; National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [36] Lin, L.; Francis, M.; Gasparini "Construction and Performance of a Simple Multishielded Dewar."; Additional information on AIP Conf., 1982.
- [37] Domashenko, A.; Golovchenko, A.; Gorbatsky, Yu.; Nlidove, V.; Korodumov, B. "Production, Storage and Transportation of Liquid Hydrogen Experience of Infrastructure Development and Structure."; Int J Hydrogen Energ, 2002, 753-755.
- [38] Kropschot, R. H.; McClintock, R. M.; Van Gundy, D. A. "Mechanical Properties of Some Engineering Materials Between 20°K and 300°K."; Advances in cryogenic engineering, Springer link, 1956, 93-99.
- [39] Verfondern, K. "Safety Considerations on Liquid Hydrogen."; Reihe Energie&Umwelt/Energy & Environment, 2008.
- [40] Hilal, M. A.; McIntosh, G. E. "Cryogenic Design for Large Superconductive Energy Storage Magnets."; Springer link, 1995, 69-77.
- [41] Riesco, C. G. S. A. M. M. E. "Venting and High Vacuum Performance of Low Density Multilayer Insulation."; In AIP Conf. Proc. 1218, 2009.
- [42] Haberstroh, T. F. A. C. "Performance Measurements Multilayer Insulation at Variable Cold Temperature."; In AIP Conf. Proc. 1434, 2011, 1279-1284.
- [43] Sun, P. J.; Wu, J. Y.; Zhang, P.; Xu, L.; Jiang, M. L. "Experimental Study of the Influences of Degraded Vacuum on Multilayer Insulation Blanket."; Int J Hydrogen Energ, 2009, 719-726.
- [44] Nast, T. C.; Frank, D. J.; Feller, J.; "Multilayer Insulation Considerations for Large Propellant Tanks."; Cryogenics, 2014, 105-111.

- [45] Vance, R.W. "Cryogenic Technology, /Chapter7/Insulation Technology", John wiley & sons inc., 1963.
- [46] Hafmann, A. "Theory to Boil-Off Gas Cooled Shields for Cryogenic Storage Vessels."; Int J Hydrogen Energ, 2004, 159-165.
- [47] Tien, P. C. C. L. "Lateral Heat Transfer in Cryogenic Multilayer Insulation, Advances In Cryogenic Engineering."; Springer link, 1973.
- [48] Schoen, L. J.; Broida, H. P. "Glass Dewars for Optical and Other Studies at Low Temperatures."; Additional information on AIP Conf., 1962.
- [49] Fesmire, J. E.; Sass, J. P.; Nagy, Z.; Sojourner, S. J.; Morris, D. L. "Cost-Efficient Storage of Cryogenics."; Additional information on AIP Conf., 2008.
- [50] Keller, W. E. "Cryogenic Instrumentation at and Above Liquid Hydrogen Temperature."; Advances in cryogenic engineering, Springer link.
- [51] Londer, H.; Mynenib, G. R.; Adderley, P.; Bartlok, G.; Knappd, W.;Schleussner, D.; Ogrisa, E."New High Capacity Getter for Vacuum Insulated Mobile LH2 Storage Tank Systems."; Int J Hydrogen Energ, 2008, 431-434.
- [52] Plachta, D. W.; Guzik, M. C. "Cryogenic Boil-Off Reduction System"; Published by Elsevier Ltd., 2013.
- [53] Keller, W. E. "Cryogenic Instrumentation."; springer link, 294-299.
- [54] Hirscher, M.; "Handbook of Hydrogen Storage."; WILEY-VCH Verlag GmbH, 2010.
- [55] Sass, J. P.; Fesmire, J. E.; Nagy, Z. F.; Sojourner, S. J.; Morris, D. L. "Thermal Performance Comparison of Glass Microsphere and Perlite Insulation Systems for Liquid Hydrogen Storage Tanks."; Additional information on AIP Conf., 2008.
- [56]Bunger, U.; Owrent, G. "Development Potential for Small Mobile Storage Tanks with Vacuum Powder Insulation."; Int J Hydrogen Energ, 1998, 273-279.