

علمی- تخصصی

استخراج اصول طراحی مخازن ذخیره دوجداره فلزی- فلزی (اتیلن / اتان) با تمرکز بر انتخاب یا پیشنهاد سوپر عایق پر لیت میانی دوجداره

سید حسن میرطلائی^{۱*}، سعید دیناروند^۲، علیرضا بهنامفر^۳، امید خدمتگذار^۴

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

۳و۴- دانش آموخته کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۳۰)

چکیده

در این تحقیق به استخراج اصول طراحی مخازن ذخیره دوجداره فلزی- فلزی (اتیلن / اتان) با تمرکز بر انتخاب یا پیشنهاد سوپر عایق پایه پر لیت میانی دوجداره پرداخته می‌شود. ارائه نتایج حاصل از تحقیق پیرامون شرکت‌های صاحب تکنولوژی طراحی و ساخت مخازن ذخیره گاز مایع در دنیا، استخراج مفاهیم مقدماتی و مطالعه اصول عمومی و در دسترس طراحی مخازن دوجداره فلزی - فلزی و ارائه محاسبات نمونه برای تشریح کاربرد قوانین طراحی مخازن و کدهای نرم افزاری مرتبط با انجام این محاسبات دو بخش اول این تحقیق را تشکیل می‌دهند. سپس اصول طراحی و ساخت مخازن بتونی و مقایسه از دیدگاه کلان مخازن فلزی و بتونی ارائه خواهد شد. در ادامه مفاهیم اساسی در عایق‌بندی مخازن ذخیره گاز مایع تشریح می‌گردد. همچنین با انجام محاسبات طراحی عایق، به تعیین ضخامت بهینه‌ی عایق پرداخته شده و کدهای نرم‌افزاری مرتبط تدوین و ارائه می‌گردد. در فاز نهایی این تحقیق به مطالعه و پیشنهاد جایگزین برای سیستم عایق بندی پرداخته می‌شوند و به منظور اثبات مناسب بودن عایق‌های جایگزین معرفی شده تحلیلی حرارتی - اقتصادی با دیدگاه بهینه‌سازی و مشتمل بر آنالیز حساسیت ارائه خواهد شد. نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که گرچه سامانه‌ی عایق‌بندی پیشنهادی به عنوان جایگزین به اندکی هزینه‌ی اولیه‌ی بیشتر برای اجرا نیاز دارد اما در کمتر از یکسال به نقطه‌ی شکست سرمایه‌گذاری می‌رسد و با توجه به دوام بسیار بیشتری که نسبت به سامانه‌ی عایق‌بندی متداول دارد، بسیار موثرتر و از نظر اقتصادی بسیار باصرفه‌تر خواهد بود.

کلید واژه‌ها: مخازن ذخیره فلزی- فلزی دوجداره، اصول طراحی، طراحی بهینه سامانه‌ی عایق‌بندی، میکرواسفیرهای شیشه‌ای.

۱. مقدمه

به‌وسیله‌ی پر لیت عایق بندی می‌شوند. مخزن داخلی به صورت سقف-باز طراحی می‌شود تا بتواند حجم ناخالص محصول مایع را درون خود نگهداری کند. این درپوش عایق بندی شده، به‌صورت معلق توسط دیواره‌ی مخزن بیرونی حمل می‌شود و سطح فوقانی مخزن داخلی را پوشش می‌دهد. گردش گازهای تولید شده از سیال در بین دو جداره‌ی مخزن از طریق درپوش معلق قابل انجام است. همچنین طراحی جداره‌ی بیرونی به گونه‌ای است که عایق بین دو جداره واقع می‌شود و در مواقع ضروری و یا در صورت نشت سیال از مخزن داخلی، امکان نگهداری سیال را ندارد. فونداسیون مخزن بالاتر از سطح زمین بنا می‌گردد و مجهز

مخازن ذخیره‌ی دوجداره شامل یک مخزن جدار فلزی استوانه‌ای داخلی به عنوان مخزن اولیه و همچنین مخزن جدار فلزی بیرونی هستند که این دو مخزن از نظر سازه‌ای از یکدیگر مستقل بوده اما بر روی یک پایه نصب می‌شوند. مخزن ذخیره دارای کف مسطح و جداره‌ی استوانه‌ای فولادی است که برای ذخیره‌ی گازها به صورت مایع و در دمای پایین طراحی می‌شود. سقف مجموعه معلق بوده و دو جداره‌ی داخلی و بیرونی مخزن

^۱ نویسنده پاسخگو: mirtalaie@pmc.iaun.ac.ir

۲۷۰۰۰ میلیمتر	قطر داخلی مخزن درونی
۳۹۰۰۰ میلیمتر	قطر داخلی مخزن بیرونی
۳۱۲۶۰ میلیمتر	ارتفاع
-۰/۰۵ mbarg ۰/۹۶۳ mbar	فشار طراحی مخزن درونی / بیرونی
۱۱۲- درجه سانتیگراد	دمای طراحی
۰/۰۹ barg ۱/۱۰ bar	فشار کاری
۱۰۶/۷- درجه سانتیگراد	دمای کاری
۵۷۱ Kg/m ³	چگالی سیال (مایع)
مخزن درونی ۰ میلیمتر مخزن بیرونی ۰ میلیمتر سقف ۳ میلیمتر	خوردگی مجاز
گنبدی شکل	نوع سقف
حداکثر ۰/۰۴۲ %wt	نرخ تبخیر سیال
سقف معلق: Mineral wool با پوشش Alu کف: cellular glass مخزن بیرونی: پرلیت	عایق
ASTM A353	جنس ورق مخزن درونی و کف آن
A283-c	جنس ورق مخزن بیرونی و کف آن
AL / A238-c	جنس ورق سقف معلق و سقف کلی
A36	قاب بندی سقف



شکل (۱). نمایی از محیط نرم افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی جداره ی مخزن به روش ترسیمی

شرکت‌های بزرگ سازنده‌ی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع فرآیندهای طراحی، ساخت، نصب، نگهداری و تعمیرات این مخازن را در انحصار خود نگه داشته‌اند و صناعی که از خدمات آنها استفاده می‌کنند وابستگی کامل به این سازندگان خواهند داشت. در کشور ایران نیز به علت گستردگی صنایع نفت و گاز استفاده از چنین مخازنی بسیار زیاد بوده و بالطبع در موارد ذکر شده

به سیستم تعلیق ضد زلزله و تهویه‌ی هوا است. در جدول (۱) مشخصات و اطلاعات طراحی مخزن ذخیره‌ی اتیلن که برای مجتمع پتروشیمی فیروزآباد (کنگان) طراحی شده است و از نمونه‌های مورد مطالعه در پژوهش پیشنهادی است ارائه می‌گردد. همچنین نمایی واقعی از مخازن مورد مطالعه در شکل (۱) ارائه گردیده است.

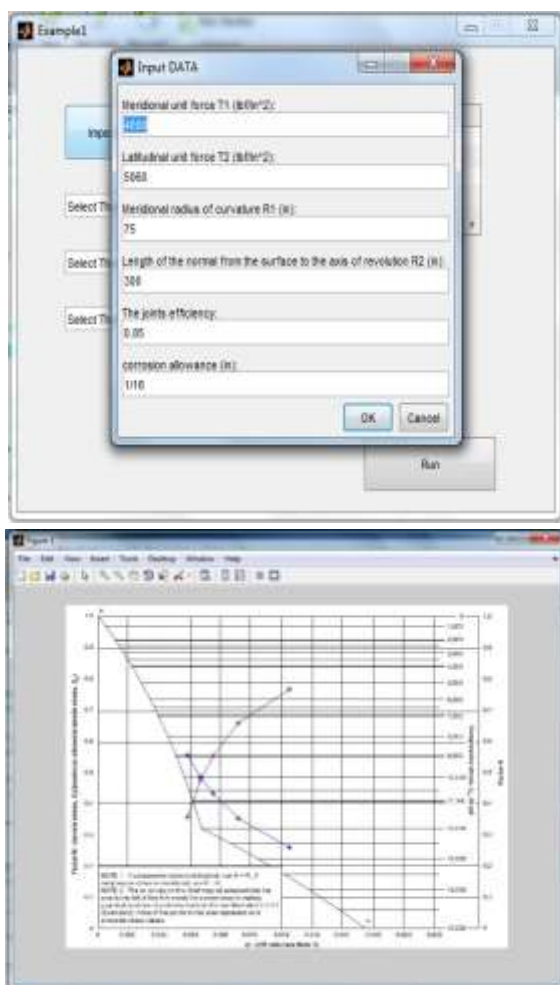
در این پژوهش در ابتدا به تحقیق پیرامون شرکت‌های معتبر سازنده‌ی مخازن فوق الذکر در دنیا و جمع آوری اطلاعات مورد نیاز در این خصوص پرداخته می‌شود. سپس اصول طراحی و مهندسی مخازن دوجداره‌ی فلزی - فلزی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و نرم افزارهای مربوطه معرفی شده و محاسبات نمونه ارائه خواهند شد. در ادامه به مقایسه‌ی موارد کاربرد، عملکرد و هزینه‌ی اجرای مخازن دوجداره‌ی فلزی - فلزی و دوجداره‌ی فلزی - بتنی در مقیاس کلان پرداخته خواهد شد. در گام بعد مطالعه‌ی سوپرایق‌های پایه پرلیت قابل استفاده بین دو جداره‌ی فلزی برای ایجاد اختلاف دمای فرضی بین محیط بیرون و فضای داخل مخزن انجام خواهد شد و با تحقیق و مطالعه، سعی در معرفی جایگزین مناسب برای عایق‌های کف و سقف معلق فلزی خواهد شد. در پایان نیز با جمع‌بندی، روند کلی طراحی مخازن دوجداره‌ی فلزی - فلزی مشتمل بر عایق‌های سقف و کف و تحلیل دقیق عایق سوپرمتریال پرلیتی بین دوجداره ارائه خواهد گردید. اهداف این مطالعه عبارتند از:

مطالعه‌ی عملکرد و تحقیق پیرامون شرکت‌های طراح و سازنده‌ی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع
مطالعه‌ی عمومی طراحی مخازن دوجداره‌ی فلزی - فلزی و دوجداره‌ی فلزی - بتنی بررسی نرم افزارهای مربوطه
مقایسه کلی مخازن دوجداره‌ی فلزی-فلزی و دوجداره‌ی فلزی - بتنی
مطالعه روش‌های عایق‌بندی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع
ارائه روند کلی طراحی مخازن دوجداره‌ی فلزی - فلزی
تحلیل دقیق عایق‌های بین دوجداره، سقف و کف این مخازن
پیشنهاد جایگزین در خصوص عایق‌های کف و سقف معلق فلزی.

جدول (۱). مشخصات مخزن ذخیره‌ی اتیلن

واحد	مشخصه
کنگان، ایران	محل نصب مخزن
اتیلن	ماده‌ی مورد ذخیره
مخزن داخلی و بیرونی از جنس فولاد ضد زنگ	نوع مخزن
API 625 و API 620	کد مورد استفاده برای طراحی
Elevated Slap	نوع فونداسیون
ندارد	سیستم گرمایش از کف
دارد	سیستم تعلیق ضد زلزله
۳۲۰۰۰ متر مکعب	ظرفیت کاری خالص

مبنای مفاهیم ذکر شده در استاندارد API-650 معرفی و کدهای نرم‌افزاری ویژه‌ای برای اجرای آنها تدوین گردید که برای این کدها نیز قابلیت اجرایی و رابط کاربری گرافیکی ایجاد شد، که نمایی از آن در شکل (۳) ارائه شده است. در این فاز همچنین با استفاده از مفاهیم استاندارد BS 7777 [۳]، مبانی طراحی و ساخت مخازن بتونی مسلح و پیش‌ساخته، همچنین اصول طراحی پایه‌ها، عایق، آستر و پوشش و نصب این مخازن استخراج و ارائه گردید.



شکل (۲). نمایی از محیط نرم‌افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی جداره‌ی مخزن به روش ترسیمی

به علاوه موارد کاربرد، ویژگی‌ها، عملکرد و هزینه‌ی اجرای مخازن فلزی و بتونی از دیدگاه کلان مقایسه شدند و نرم‌افزار تانک به عنوان تنها نرم‌افزار تخصصی طراحی مخازن معرفی گردید. البته لازم به ذکر است که این نرم‌افزار بر مبنای استاندارد API-650 [۴] پایه‌گذاری شده است که به جز دو روش فوق‌الذکر برای تعیین ضخامت جداره‌ی مخازن، در زمینه‌ی

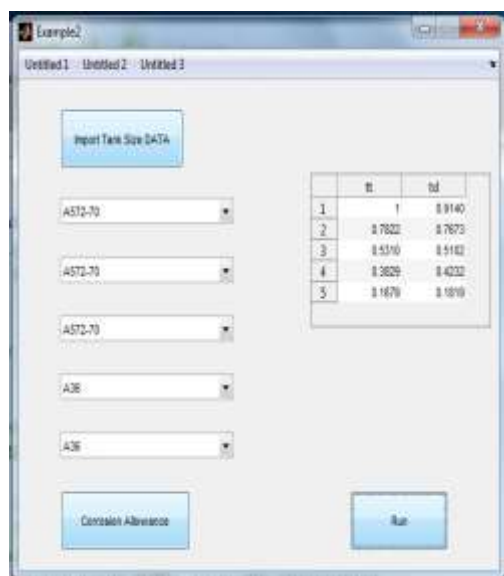
وابستگی زیادی به کشورهای بیگانه وجود خواهد داشت. از سوی دیگر گردش مالی شرکت‌های استفاده‌کننده از این مخازن بسیار وابسته به صحت عملکرد آنها می‌باشد. همچنین برخی شرکت‌های سازنده‌ی چنین مخازنی خدمات خود را متأثر از روابط سیاسی و شرایط تحریمی می‌نمایند و از در اختیار قرار دادن خدمات مربوط به طراحی و اجرا و نگهداری چنین تاسیساتی در شرایط خاص سیاسی امتناع می‌ورزند. از این‌رو بومی‌سازی کامل فرآیند طراحی و ساخت مخازن ذخیره‌ی گاز مایع که نیازمند مطالعه و پژوهش دقیق بر اصول طراحی مهندسی آنها است، امری ضروری به نظر می‌رسد.

۲. روش تحقیق

متن این تحقیق با تاکید بر استخراج اصول طراحی مخازن ذخیره‌ی دوجداره فلزی- فلزی حاوی اتیلن یا اتان بر انتخاب و پیشنهاد جایگزین برای سوپر عایق پایه پرلیت مابین دوجداره تمرکز داشت.

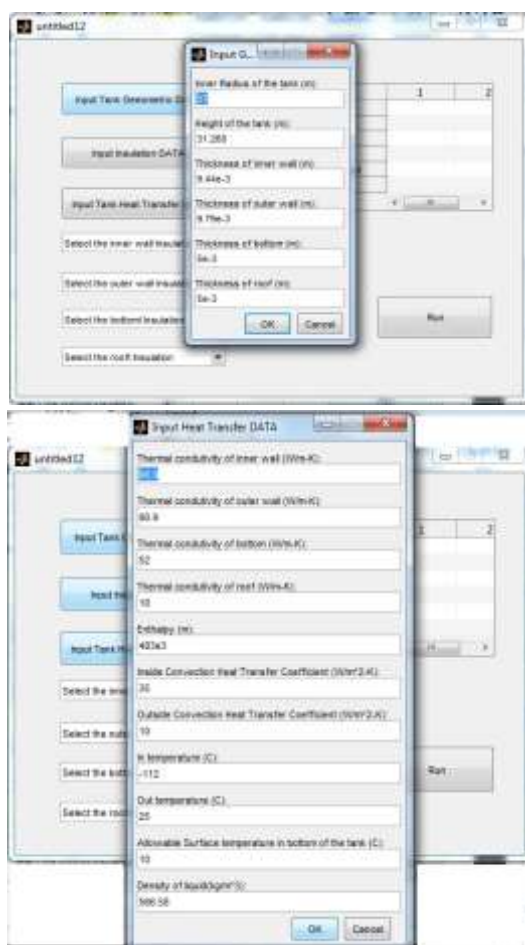
بعد از معرفی و بیان مسئله، در فاز اول پژوهش به تحقیق پیرامون شرکت‌های صاحب فناوری در زمینه‌ی طراحی و ساخت مخازن ذخیره‌ی گاز مایع در دنیا پرداخته شد. سپس در فاز دوم پژوهش بر مبنای دو استاندارد معتبر در زمینه‌ی طراحی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع برودتی یعنی API 620 [۱] و همچنین API 625 [۲] مفاهیم پایه‌ای و اصول طراحی بخش‌های مختلف این مخازن استخراج و جمع‌بندی گردید. همچنین محاسبات نمونه برای تشریح کاربرد این قوانین در طراحی مخازن ارائه شد. از آنجا که هیچ نرم‌افزاری مختص طراحی این مخازن موجود نیست و این محاسبات عمدتاً به صورت دستی و یا با استفاده از روش‌های گرافیکی انجام می‌گردد، کدهای نرم‌افزاری مختلفی به طور ویژه و با تمرکز بر انجام محاسبات طراحی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع دوجداره‌ی برودتی منطبق با این دو استاندارد و به منظور تسهیل انجام این محاسبات در نرم‌افزار متلب تدوین و سپس فایل اجرایی آنها با قابلیت کاربری گرافیکی تهیه گردید. این فایل‌های اجرایی قابلیت‌های فراوانی از جمله سرعت و دقت بالا و کاربری بسیار آسان داشته، فرآیند محاسباتی دشوار طراحی مخازن مورد بررسی را که عمدتاً مبتنی بر سعی و خطا است، به راحتی اجرا نموده و نتایج حاصل را در اختیار طراح قرار می‌دهند. این دستاورد اولین نوآوری و خروجی تحقیق حاضر بود. نمایی از محیط کاربری نرم‌افزار تدوین شده در این خصوص در شکل (۲) ارائه گردیده است.

همچنین به منظور تعیین ضخامت ورق جداره‌ی مخزن در کرس‌های مختلف دو روش ۱ فوت و نقطه‌ی طراحی متغیر بر



شکل (۳). نمایی از محیط نرم افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی جداره ی مخزن به روش نقطه ی طراحی متغیر

طراحی مخازن دوجداره ی کرایوژنیک کاربردی ندارد. در ادامه و در فاز دیگری از این پژوهش به منظور مطالعه ی سیستم عایق-بندی مخازن دو جداره فلزی برای ذخیره ی گاز مایع در ابتدا به معرفی پرلیت، تشریح موارد کاربرد آن در سیستم های عایق بندی، مزایا و معایب آن و همچنین بررسی اثر چگالی و اندازه ی ذرات بر انتقال حرارت پرلیت پرداخته شد تا معایب موجود در سیستم عایق بندی متداول در مخازن مورد بررسی تبیین و ضرورت تحقیق در این فاز مشخص گردد. به علاوه با به کارگیری مفاهیم مرتبط با عایق بندی مخازن مورد بررسی که در دو استاندارد API 625 [۲] و EN 14620-4 [۵] ارائه گردیده است، انواع مواد مورد استفاده در عایق کاری و همچنین چیدمان و شیوه ی عایق بندی در انواع مختلف مخزن ذخیره ی گاز مایع برودتی تشریح گردید



شناخته شده‌اند، اما استفاده‌ی واقعی از آنها در مخازن ذخیره- سازی برودتی در مقیاس کامل تاکنون اثبات نشده است. مزایای عملکرد و هزینه‌ی چرخه‌ی زندگی که قبلاً پیش بینی شده بود اکنون اثبات شده است. اغلب مخازن ذخیره‌سازی برودتی حجیم با عایق چندلایه یا پرلیت عایق‌بندی می‌شوند. عایق میکرواسفیر، متشکل از حباب‌های شیشه‌ی توخالی است که ویژگی‌های مطلوبی را که سایر عایق‌ها به صورت جداگانه دارند، در یک ماده- ی واحد ترکیب می‌کند. این ماده دارای مقاومت لهیدگی بالا و چگالی کم بوده، غیر قابل احتراق است و در خلا نرم عملکرد خوبی دارد. در مقاله‌ی [۸] نوعی عایق مبتنی بر میکرواسفیر برای مخازن برودتی برای به حداقل رساندن تلفات ناشی از جوشش پیرشرانه‌های ذخیره شده در فرودگاه‌ها و تأسیسات گاز مایع تجاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. عایق‌های مبتنی بر میکرواسفیر همچنین می‌توانند سیستم‌های توزیع برودتی کم مصرف و مقرون به صرفه برای تأسیسات دولتی و تجاری را امکان‌پذیر سازند. در مطالعه‌ی آلن و همکاران [۹] آخرین به روزرسانی از کارهای منتشر شده‌ی قبلی برای توسعه‌ی میکرواسفیرها به عنوان یک گزینه‌ی مناسب برای رویکردهای فعلی عایق‌بندی ارائه شده است. اکثر مخازن ذخیره‌سازی برودتی حجیم با عایق چندلایه یا پرلیت (شیشه آتشفشانی منبسط شده) عایق‌بندی شده‌اند. روند بسته‌بندی مخازن داخلی با عایق چندلایه پرهزینه و زمان‌بر است. عملکرد حرارتی واقعی نیز تا حد زیادی به کیفیت ساخت و سطح خلاء که در حین کار حفظ می‌شود، بستگی دارد. اغلب سطح خلا به حدی افت پیدا می‌کند که عملکرد بالقوه عایق چندلایه از بین می‌رود و حتی می‌تواند از مخزن برودتی عایق‌بندی شده با پرلیت بدتر باشد. اگرچه استفاده از آن به عنوان عایق تخلیه شده به صورت حجیم ارزان است، اما پرلیت در طی سیکل حرارتی فشرده و بین محفظه‌ی داخلی و خارجی جانشانی می‌شود. این تراکم باعث افزایش نشت گرما به محفظه‌ی داخلی شده و می‌تواند به لوله‌کشی داخلی آسیب رسانده و باعث ایجاد شرایط بحرانی شود. ویژگی‌های ذاتی عایق میکرواسفیر مانند مقاومت لهیدگی بالا و توانایی جریان برای جلوگیری از بروز مشکل تراکم و آسیب احتمالی ساختاری است. گرچه هزینه‌ی میکرواسفیرها بیشتر از عایق پرلیت است، کاهش تعمیر و نگهداری و تلفات ناشی از جوشش به راحتی می‌تواند سرمایه‌گذاری اولیه توسط تولیدکننده را توجیه کند و توسط کاربر نهایی ارزیابی شود. از آنجا که میکرواسفیرهای شیشه‌ای توخالی فقط با یکدیگر تماس نقطه‌ای دارند و دیواره‌های نازک شیشه‌ای رسانایی گرمایی کمی دارند، رسانایی جامد به حداقل می‌رسد. اگرچه مزایای اصلی دیگری نیز برای میکرواسفیرها نسبت به پودر پرلیت وجود دارد، اما توجیه اساسی برای



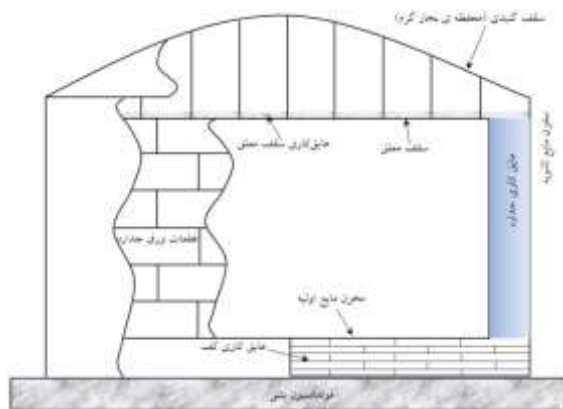
شکل (۴). نمایی از محیط نرم افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی بهینه‌ی سیستم عایق‌بندی مخزن

. لازم به ذکر است که مراجع معتبر در این زمینه عمدتاً به ذکر مفاهیم پایه‌ای و اصول طراحی سیستم‌های عایق‌بندی بسنده کرده‌اند و به ذکر جزئیات محاسباتی و طراحی بهینه‌ی عایق نپرداخته‌اند از این رو و با توجه به خلاء موجود در مراجع حاضر در زمینه‌ی طراحی سیستم‌های عایق‌بندی، در این فاز از پژوهش با ارائه‌ی تحلیل محاسباتی دقیقی از سیستم عایق‌بندی مخازن مورد بررسی که مبتنی بر تحلیل همزمان اقتصادی و انتقال حرارتی بود، به تعیین ضخامت بهینه برای عایق در بخش‌های مختلف مخزن پرداخته شد و کدی نرم‌افزاری با قابلیت اجرایی و رابط کاربری گرافیکی در این خصوص تدوین و ارائه گردید. با استفاده از این کد به سادگی و بر اساس چیدمان عایق مورد نظر طراح، ضخامت بهینه‌ی عایق در بخش‌های مختلف مخزن تعیین می‌گردد. نمایی از محیط کاربری نرم افزار تدوین شده در این خصوص در شکل (۴) ارائه گردیده است. این بخش نیز یکی دیگر از جنبه‌های نوآورانه در تحقیق حاضر به شمار می‌آید. در فاز نهایی این تحقیق با توجه به مشکلات تشریح شده در فاز قبلی و موجود در سیستم عایق‌کاری متداول جداره‌ی مخازن مورد بررسی که عمدتاً مبتنی بر پرلیت هستند و به منظور یافتن جایگزین برای آنها، میکرواسفیرهای شیشه‌ای معرفی می‌شوند.

میکرواسفیرهای شیشه‌ای کره‌های میکروسکوپی شیشه‌ای هستند که برای کاربردهای بسیار گسترده در تحقیقات، پزشکی، کالاهای مصرفی و صنایع مختلف تولید می‌شوند. قطر میکرواسفیرهای شیشه‌ای معمولاً بین ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر است، اگرچه اندازه‌ها می‌توانند از ۱۰۰ نانومتر تا ۵ میلی‌متر قطر داشته باشند. میکرواسفیرهای شیشه‌ای توخالی، که بعضاً میکرو بالون یا حباب شیشه‌ای نامیده می‌شوند، دارای قطرهایی از ۱۰ تا ۳۰۰ میکرومتر هستند [۶]. این میکرو بالون‌ها دارای وزن سبک، رسانایی گرمایی کم و مقاومت در برابر تنش فشاری هستند [۷]. در حالی که میکرواسفیرها به عنوان ماده عایق موثر برای دهه‌ها

عایق کاری دارد. مابین دو جداری مخزن نیز عایق کاری شده است. نمای شماتیک و جزئیات عایق بندی این نوع مخزن در شکل (۵) نمایش داده شده است. پایه ی مخزن از جنس بتون بوده و برای جلوگیری از یخ زدگی بتون و آسیب احتمالی به آن از یک سیستم گرمایشی درون آن استفاده می شود تا دمای آن در ۱۰ درجه ی سانتیگراد حفظ شود. همچنین نرخ جوشش مخزن کمتر از 0.04% در نظر گرفته می شود. نشت گرما به مخزن بر اساس حداکثر دمای روز در محیط استفاده از مخزن و دمای طراحی مخزن ۱۱۲- درجه ی سانتیگراد (برای اتیلن) محاسبه می شود. در طراحی جداری مخزن، ضخامت ورق در جداری های

داخلی و خارجی برای بخش های (Course) مختلف متفاوت با یکدیگر در نظر گرفته می شود و از پایین به بالا ضخامت کاهش می یابد. از این رو به منظور ساده سازی محاسبات از مقادیر ضخامت ورق در بخش های مختلف میانگین گرفته شده و جداری های داخلی و خارجی مخزن یکنواخت و به ترتیب برابر با $t_{wi} = 9.44 \text{ mm}$ و $t_{wo} = 9.79 \text{ mm}$ فرض می شود. همچنین قطر داخلی مخزن برابر با $r_i = 37,000 \text{ mm}$ و ارتفاع دیواره ی آن برابر با $H = 31,260 \text{ mm}$ است.



شکل (۵). جزئیات فنی عایق بندی در مخزن ذخیره ی گاز مایع مورد مطالعه

به منظور تعیین جایگزین برای عایق های مورد استفاده در بخش های مختلف مخزن کفایت تا دو نمونه عایق بندی برای مخزن در نظر گرفته شود و برای هر کدام تحلیل ترکیبی انتقال حرارت و اقتصادی انجام گردد. از مقایسه ی نتایج می توان به موثر بودن عایق های جایگزین معرفی شده پی برد. در سامانه ی عایق-بندی متداول همانگونه که قبلاً نیز ذکر گردید برای عایق بندی کف مخزن از شیشه ی سلولی و برای سقف معلق فلزی از پشم معدنی و برای جداره از پودر پرلیت منبسط شده استفاده می شود.

عایق بندی مخازن با آنها بهبود عملکرد حرارتی است. مشخصات مکانیکی میکرواسفیرها نیز عملکرد گرمایی سازگارتر را تضمین می کنند. عملکرد کلی گرمایی بالاتر به معنای کاهش تلفات ناشی از جوشش است. علاوه بر این، مخازن ذخیره با سیستم عایق میکرواسفیر در معرض آسیب مکانیکی کمتر ناشی از تراکم بوجود آمده از چرخه های حرارتی هستند [۱۰]. این ویژگی کلیدی امکان انعطاف پذیری عملیاتی بیشتر و قرار گرفتن در معرض خطرات ایمنی کمتری را فراهم می کند. برای مخازن ثابت، هزینه ی اضافی مرتبط با عایق میکرواسفیر به سرعت با کاهش اتلاف سیال پروتتی ذخیره شده ناشی از جوشش جبران می شود. میکرواسفیرها و پرلیت به ترتیب تقریباً 0.53 دلار و 0.09 دلار در هر لیتر هزینه دارند.

به علاوه با هدف جایگزینی عایق کف مخازن مورد مطالعه که از جنس شیشه ی سلولی هستند نیز خواص بتون پرلیتی مطالعه و این ماده بر اساس اصول طراحی عایق که قبلاً بررسی شده بود، به عنوان جایگزین عایق کف پیشنهاد می گردد. به منظور اثبات بهینه بودن پیشنهادات مطروحه برای جایگزینی سیستم عایق-بندی، در این فاز نیز مشابه فاز قبل و بر اساس اصول استنتاج شده در آن فاز، تحلیلی حرارتی - اقتصادی ارائه شد که در آن به مقایسه ی دو سیستم عایق بندی متداول و پیشنهادی پرداخته شد که در ادامه بطور خلاصه به برخی جزئیات آن پرداخته خواهد شد.

در این بخش از تحقیق یک مخزن ذخیره سازی گاز طبیعی مایع "مهار کامل" معمولی مورد بررسی قرار می گیرد تا با تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، نرخ جوشش و اقتصادی به تعیین عایق جایگزین برای عایق جداره، کف و سقف مخازن ذخیره ی گاز مایع پرداخته شود که در آنها به طور متداول به ترتیب از پرلیت (Perlite)، شیشه ی سلولی (Cellular Glass) و پشم معدنی (Mineral Wool) استفاده می شود. همچنین ضخامت بهینه ی عایق های جایگزین و میزان ارزش افزوده و صرفه جویی اقتصادی تعیین خواهد شد. مخزن مورد بررسی در پروژه ی حاضر از نوع فلزی - فلزی می باشد. این نوع مخزن در بخش "مفاهیم اساسی در عایق بندی مخازن ذخیره ی گاز مایع"، بر اساس استاندارد EEUA 147 2016 در کلاس (1) A، نوع ۴ نامیده شد و مخزنی از نوع مهار کامل است که محفظه های داخلی و بیرونی و کف آن فلزی و از جنس فولاد نیکی ۹ درصد و سقف آن از آلیاژ آلومینیوم ساخته شده و محفظه ی بیرونی آن و یا متعلقات خارجی آن توان تحمل بارهای ناگهانی خارجی را دارند. در زیر ورق کف مخزن از عایق مقاوم برای تحمل وزن مخزن و مایع ذخیره شده استفاده می شود. بالای ورق عرشه ی معلق نیز نیاز به

که در آن $C_{ins/v}$ بیانگر هزینه‌ی عایق بر حسب واحد حجم آن و V_{ins} معرف حجم عایق در هر بخش است. اندیس‌های w ، b و r به ترتیب معرف جداره (wall)، کف (bottom) و سقف (roof) مخزن هستند. حجم عایق هر یک از این بخش‌ها عبارتند از:

$$V_{insw} = \pi[(r_i + t_{wi} + t_{insw})^2 - (r_i + t_{wi})^2]H \quad (۲)$$

$$V_{insb} = \pi r_i^2 t_{insb} \quad (۳)$$

$$V_{insr} = \pi r_i^2 t_{insr} \quad (۴)$$

که در آن r_i شعاع داخلی جداره‌ی مخزن و t_{wi} ضخامت ورق جداره‌ی داخلی مخزن است. همچنین t_{insw} ضخامت عایق بین دو جداره، t_{insb} ضخامت عایق مورد استفاده در کف مخزن و t_{insr} ضخامت عایق مورد استفاده در سقف مخزن و H بیانگر ارتفاع مخزن است. هزینه‌ی ناشی از اتلاف انرژی نیز برابر است با:

$$C_{en} = \frac{Q_{Total}}{\Delta H} L_{Total} C_{Unit} \quad (۵)$$

که در آن Q_{Total} معرف شار انتقال حرارت کل (مجموع شار انتقال حرارت از کلیه‌ی سطوح عایق شده)، ΔH بیانگر گرمای نهان تبخیر سیال ذخیره شده، L_{Total} طول عمر پوشش است که بر حسب ثانیه بیان می‌شود و C_{Unit} هزینه‌ی واحد ۱ کیلوگرم از مایع ذخیره شده درون مخزن است. شار انتقال حرارت کل شامل مجموع شار انتقال حرارت در دیواره (Q_w)، کف (Q_b) و سقف (Q_r) مخزن است که عایق کاری شده است و به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_{Total} = Q_w + Q_b + Q_r \quad (۶)$$

در این رابطه شار گرما از دیواره‌ی جانبی مخزن را می‌توان به شکل زیر محاسبه کرد:

$$Q_w = \frac{T_o - T_i}{R_w} \quad (۷)$$

که در آن T_i نماد دمای سیال ذخیره شده داخل مخزن، T_o دمای محیط خارجی مخزن و R_w مقاومت گرمایی جداره‌ی مخزن است که برابر است با:

$$R_w = \frac{1}{2\pi H} \left[\frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_i + t_{wi}}{r_i}\right)}{k_{wi}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i + t_{wi} + t_{insw}}{r_i + t_{wi}}\right)}{k_{insw}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i + t_{wi} + t_{insw} + t_{wo}}{r_i + t_{wi} + t_{insw}}\right)}{k_{wo}} + \frac{1}{(r_i + t_{wi} + t_{insw} + t_{wo})h_o} \right] \quad (۸)$$

که در آن h_i ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیال درون

از جمله مهمترین معایب این نوع عایق‌بندی می‌توان به فشرده شدن عایق پرلیت اشاره کرد که به علت افت توانایی سیستم عایق‌بندی در جلوگیری از انتقال حرارت، نیاز به تعویض و نوسازی آن در کوتاه مدت را ضروری می‌نماید. این تعویض نیازمند صرف زمان و هزینه‌ی بسیار بالا و خارج کردن مخزن از پروسه‌ی کاری است که خسارات اقتصادی بسپاز زیادی در پی خواهد داشت. همچنین تخریب و خارج کردن پرلیت متراکم شده و فرسوده از بین دو جداره‌ی مخزن نیز مستلزم صرف زمان و انرژی زیادی خواهد بود.

با توجه به تحقیقات انجام شده در فازهای قبلی این تحقیق، در این فاز به امکان سنجی استفاده از میکرواسفیرهای شیشه‌ای به عنوان عایق جایگزین برای سقف و جداره‌ی مخزن پرداخته می‌شود. همچنین در کف مخزن به منظور تحمل بارهای ناشی از وزن مخزن و مایع ذخیره شده از بتون پرلیتی به عنوان جایگزین استفاده خواهد شد. با این چیدمان در سیستم عایق‌بندی به تحلیل مشابه آنچه برای سیستم عایق‌بندی متداول انجام شد، پرداخته و نتایج مقایسه می‌شوند. خواص عایق‌های متداول با اقتباس از استاندارد 147 EEUA و همچنین خواص عایق‌های جایگزین در بخش‌های مرتبط با معرفی آنها تعیین گردیده است. در ادامه به بررسی حرارتی و اقتصادی مخزن معرفی شده با استفاده از دو نوع عایق‌بندی متداول و معرفی شده برای جایگزینی پرداخته خواهد شد. مخزن مورد مطالعه یک ظرف استوانه‌ای دو جداره با کف مسطح دایره‌ای، ساخته شده از فولاد ضد زنگ است. فضای بین دو دیوار با عایق پر شده است. اگر لایه‌ی عایق کاملاً به دیواره‌ها بچسبد، شعاع بیرونی جداره‌ی داخلی با شعاع داخلی عایق جداره برابر است. همچنین شعاع داخلی جداره‌ی بیرونی با شعاع بیرونی عایق جداره برابر خواهد بود. تحلیل معادلات هزینه - انرژی این امکان را می‌دهد که از منظر اقتصادی بتوان به مقایسه‌ی هزینه - منفعت در دو سیستم عایق‌بندی مورد مطالعه پرداخت. مجموع هزینه‌ی کل (C_T) شامل هزینه‌ی عایق کاری (C_{ins}) و هزینه‌های ناشی از اتلاف انرژی (C_{en}) است.

هزینه کل عایق کاری وابسته به هندسه‌ی مخزن است. با توجه به اینکه در حالت کلی و متداول از سه جنس مختلف برای عایق کاری در جداره، کف و سقف مخزن استفاده می‌شود، محاسبات هر بخش بطور مستقل انجام می‌شود و نتایج با هم جمع می‌شوند تا هزینه‌ی کلی عایق کاری به دست آید. هزینه‌ی کلی عایق کاری به شکل زیر قابل محاسبه است:

$$C_{ins} = C_{ins/v_w} V_{insw} + C_{ins/v_b} V_{insb} + C_{ins/v_r} V_{insr} \quad (۹)$$

$$\begin{aligned}
& + C_{ins/v_r} \pi r_i^2 t_{ins_r} + \frac{L_{Total} C_{Unit}}{\Delta H} \left[\right. \\
& 2\pi H (T_o - T_i) / \left[\frac{1}{k_{ins_w}} \ln \left(\frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}}{r_i + t_{w_i}} \right) \right. \\
& \left. + \frac{\ln \left(\frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}}{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}} \right)}{k_{w_o}} + \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln \left(\frac{r_i + t_{w_i}}{r_i} \right)}{k_{w_i}} \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}) h_o} \right] \right] \\
& + \pi r_i^2 \left[(T_{cs} - T_i) / \left[\frac{1}{h_i} + \frac{t_b}{k_b} + \frac{t_{ins_b}}{k_{ins_b}} + \frac{1}{h_o} \right] + (T_o \right. \\
& \left. - T_i) / \left[\frac{1}{h_i} + \frac{t_r}{k_r} + \frac{t_{ins_r}}{k_{ins_r}} + \frac{1}{h_o} \right] \right] \left. \right] \\
& \text{همچنین نرخ جوشش با جایگزینی به صورت زیر به دست می‌آید:} \\
& BOR = \frac{8640000}{\rho \pi H R_i^2 \Delta H} [2\pi H (T_o - T_i) \\
& / \left[\frac{1}{k_{ins_w}} \ln \left(\frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}}{r_i + t_{w_i}} \right) + \frac{1}{r_i h_i} \right. \\
& \left. + \frac{\ln \left(\frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}}{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}} \right)}{k_{w_o}} + \frac{1}{k_{w_i}} \ln \left(\frac{r_i + t_{w_i}}{r_i} \right) \right. \\
& \left. \left. + \frac{1}{(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}) h_o} \right] \right] \quad (۱۵) \\
& + \pi r_i^2 \left[(T_{cs} - T_i) / \left[\frac{1}{h_i} + \frac{t_b}{k_b} + \frac{t_{ins_b}}{k_{ins_b}} + \frac{1}{h_o} \right] + (T_o \right. \\
& \left. - T_i) / \left[\frac{1}{h_i} + \frac{t_r}{k_r} + \frac{t_{ins_r}}{k_{ins_r}} + \frac{1}{h_o} \right] \right] \left. \right]
\end{aligned}$$

به منظور تعیین ضخامت بهینه در هر نوع از چیدمان عایق (متداول و پیشنهادی) و بهینه‌سازی هزینه‌ها در هر مورد کافیت تابع هزینه کل بر حسب ضخامت لایه‌های عایق کمینه شود. به علاوه لازم است تا به حداکثر نرخ جوشش به دست آمده نیز توجه شود زیرا همانگونه که قبلاً نیز ذکر شد نرخ جوشش در مخازن ذخیره‌ی گاز طبیعی مایع محدودیت دارد و جزء پارامترهای طراحی است. با توجه به تعداد بالای عبارت‌های ظاهر شده در تابع هزینه کل و همچنین توجه به این مطلب که تابع هزینه کل یک تابع چند متغیره از سه متغیر مستقل t_{ins_r} ، t_{ins_b} و t_{ins_w} است، به منظور کمینه‌سازی آن از توابع کتابخانه‌ای آماده‌ی موجود در نرم‌افزارهای محاسباتی ریاضی

مخزن، k_{w_i} و k_{w_o} به ترتیب ضریب انتقال حرارت هدایتی در ورق‌های جداره‌ی درونی و بیرونی مخزن، k_{ins_w} ضرایب انتقال حرارت هدایتی در عایق بین دو جداره‌ی مخزن و h_o ضریب انتقال حرارت جابجایی در جو خارج از مخزن است. همچنین t_{w_o} ضخامت ورق جداره‌ی خارجی مخزن است. شار گرما از کف مخزن را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$Q_b = \frac{T_{cs} - T_i}{R_b} \quad (۹)$$

که در آن T_{cs} دمای مجاز در کف مخزن برای جلوگیری از یخ‌زدگی بتون کف و آسیب به آن است و R_b مقاومت گرمایی کف مخزن و برابر است با:

$$R_b = \frac{1}{\pi r_i^2} \left[\frac{1}{h_i} + \frac{t_b}{k_b} + \frac{t_{ins_b}}{k_{ins_b}} + \frac{1}{h_o} \right] \quad (۱۰)$$

که در آن t_b ضخامت ورق مورد استفاده در کف مخزن، k_{ins_b} ضریب انتقال حرارت هدایتی در ورق کف مخزن، k_{ins_b} ضریب انتقال حرارت هدایتی در عایق کف مخزن است و سایر پارامترها نیز قبلاً تعریف شده‌اند. همچنین شار گرما از سقف مخزن را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$Q_r = \frac{T_o - T_i}{R_r} \quad (۱۱)$$

که در آن R_r مقاومت گرمایی سقف مخزن است و برابر است با:

$$R_r = \frac{1}{\pi r_i^2} \left[\frac{1}{h_i} + \frac{t_r}{k_r} + \frac{t_{ins_r}}{k_{ins_r}} + \frac{1}{h_o} \right] \quad (۱۲)$$

که در آن t_r ضخامت ورق مورد استفاده در سقف مخزن، k_{ins_r} ضریب انتقال حرارت هدایتی در ورق سقف مخزن، k_{ins_r} ضریب انتقال حرارت هدایتی در عایق سقف مخزن است و دیگر پارامترها نیز قبلاً تعریف شده‌اند. هزینه‌ی کل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_T = C_{in} + C_{en} \quad (۱۳)$$

با جایگذاری از روابط قبلی برای هر یک از هزینه‌ها در رابطه‌ی فوق می‌توان هزینه‌ی کلی را به صورت تابعی از ضخامت عایق‌های دیواره، عایق کف و عایق سقف مخزن بیان کرد که نتیجه‌ی آن به شکل زیر است:

$$\begin{aligned}
C_T = & C_{ins/v_w} [\pi [(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w})^2 \\
& - (r_i + t_{w_i})^2 H] + C_{ins/v_b} (\pi r_i^2 t_{ins_b})
\end{aligned} \quad (۱۴)$$


```
[x,fval]=fmincon(TotalCost,[0.1,0.1,0.1],[[],[],[],[]],
[0;0;0],[3;3;3],@cond)
```

در این تعریف مقادیر منطقی جواب برای هر سه متغیر برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده‌اند و حد پایین متغیرها یعنی کمترین میزان ضخامت برابر با صفر و بیشترین مقدار آنها برابر با ۳ m فرض شده‌اند. سایر قیود با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش معرفی تابع، تهی در نظر گرفته شده‌اند. در پایان تعریف تابع نیز قیود مورد استفاده در تابعی با نام @cond معرفی شده‌اند که محتوای آن به شرح زیر است:

```
function [c,ceq] = cond(x)
global Cinsvwi Cinsvb Cinsvr kinswi
kinswo kinsb kinsr kwi kwo kb kr Ri
twi two tb tr H DH hi ho Ti To Tcs rho
ceq = -0.04+8640000*(2*(To-
Ti)*pi*H/(1/(Ri*hi)+log((Ri+twi)/Ri)
)/kwi+log((Ri+twi+x(3))/(Ri+twi))/k
inswi+log((Ri+twi+x(3)+two)/(Ri+twi
+x(3)))/kwo+1/((Ri+twi+x(3)+two)*ho
)))+(Tcs-Ti)*pi*Ri^2/(1/hi+tb/kb
+x(1)/kinsb+1/ho)+(To-Ti)*pi*Ri^2/
(1/hi+tr/kr+x(2)/kinsr+1/ho))/rho/p
i/H/Ri^2/DH;
c=0;
```

در این تابع پس از فراخوانی متغیرهای global، قید برابری غیر خطی حاکم بر مسئله که مساوی بودن نرخ جوشش (BOR) با مقدار مجاز ۰/۰۴ است، با متغیر ceq تعریف شده است. در اینجا به منظور همگن‌سازی قید غیرخطی حاکم بر مسئله به جای عبارت $BOR = 0.04$ از معادل آن به شکل $BOR - 0.04 = 0$ استفاده شده است. همچنین چون قید نابرابری غیرخطی در مسئله وجود ندارد مقدار c در تعریف تابع برابر با صفر لحاظ شده است (c=0). با اجرای این کد نتایج حاصل از بهینه‌سازی به دست می‌آید که در ادامه ارائه خواهد شد.

۳. نتایج و بحث

به‌منظور تعیین میزان صرفه‌ی اقتصادی استفاده از عایق جایگزین پیشنهادی، لازم است تا به کمک کد نرم‌افزاری نوشته شده، ضخامت بهینه‌ی عایق‌های کف، سقف و جداره‌ی مخزن برای هر دو دسته مواد عایق (متداول و پیشنهادی) تعیین گردد. با استفاده از مقادیر عددی فوق‌الذکر نتایج مطابق با مندرجات جدول (۲) بدست آمد.

جدول (۲). ضخامت بهینه تعیین شده برای سیستم عایق‌بندی

مانند متلب استفاده می‌شود. البته شرط حداکثر نرخ جوشش مجاز برابر با ۰/۰۴ نیز در این کمینه‌سازی لحاظ می‌گردد. از این رو ادامه‌ی حل بصورت عددی و با کدنویسی در نرم‌افزار متلب انجام خواهد شد. در این فرآیند از تابع کتابخانه‌ای بهینه‌ساز (کمینه‌ساز) موجود در نرم‌افزار متلب با نام fmincon استفاده خواهد شد. در این بخش به تشریح گام به گام مراحل کدنویسی برای بهینه‌سازی مسئله‌ی مورد بررسی پرداخته می‌شود:

در کد اصلی در ابتدا متغیرهای گلوبال که هم در کد اصلی و هم در تابع نوشته شده مورد استفاده هستند، به شکل زیر تعریف می‌شوند:

```
clc
clear all
global Cinsvwi Cinsvb Cinsvr kinswi
kinsb kinsr kwi kwo kb kr Ri twi
two tb tr H DH hi ho Ti To Tcs rho
به منظور ساده‌سازی کدنویسی، نام این متغیرها دقیقاً مشابه متغیرهای استفاده شده در استنتاج معادلات حاکمه که در بخش قبل تشریح شد، انتخاب شده‌اند.
```

با توجه به مراجع مورد استفاده مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده به شکل زیر در کدنویسی تعیین می‌شوند:

```
Cinsvwi=0.4*1000;Cinsvb=60;
Cinsvr=0.4*1000;kinsw=22e-3;
kinsb=0.04;kinsr=22e-3;kwi=90.9;
kwo=90.9;kb=52;kr=10;Ri=37; ho=10;
twi=9.44e-3;two=9.79e-3;tb=5e-3;
tr=5e-3;H=31.260;DH=483e3;hi=35;
Ti=-112;To=25;Tcs=10;rho=566.58;
Cunit=1.01;Ltotal=1*365*24*3600;
در ادامه تابع هزینه‌ی کل که باید مینیمم‌سازی شود به شکل
```

زیر تعریف می‌شود:

```
TotalCost=@(x)Cinsvw*pi*H*(Ri+twi+x(3))^2-(Ri+twi)^2+Cinsvb*pi*Ri^2*x(1)+Cinsvr*pi*Ri^2*x(2)+(2*(To-Ti)*pi*H/(1/(Ri*hi)+log((Ri+twi)/Ri)/kwi+log((Ri+twi+x(3))/(Ri+twi))/kinswi+log((Ri+twi+x(3)+two)/(Ri+twi+x(3)))/kwo+1/((Ri+twi+x(3)+two)*ho)))+(Tcs-Ti)*pi*Ri^2/(1/hi+tb/kb+x(1)/kinsb+1/ho)+(To-Ti)*pi*Ri^2/(1/hi+tr/kr+x(2)/kinsr+1/ho))*Ltotal*Cunit/DH;
```

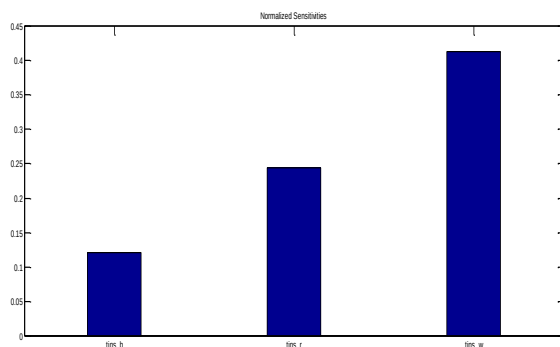
در این تعریف متغیرهای مسئله که شامل t_{insr} ، t_{insb} و t_{insw} هستند به ترتیب با نام‌های $x(1)$ ، $x(2)$ و $x(3)$ جایگزین شده‌اند. پس از تعریف تابع هزینه‌ی کل به کمینه‌سازی آن با کمک تابع fmincon پرداخته می‌شود. با توجه به توضیحات فوق از دستور زیر استفاده می‌شود:

بیشتر عایق میکرواسفیر شیشه‌ای و عدم وقوع مشکلات ناشی از تراکم پرلیت در این نوع عایق، محقق را بیشتر از قبل مطمئن می‌سازد که سیستم عایق‌بندی پیشنهادی جایگزینی بسیار مناسب برای روش سنتی و متداول عایق‌بندی مخزن با استفاده از پرلیت است. نکته‌ی بسیار مهم دیگر که از نتایج بدست آمده قابل استنتاج است آن است که چون ضخامت بهینه در عایق جداری مخزن در روش عایق‌بندی پیشنهادی تقریباً یک سوم ضخامت عایق در روش متداول است، قطر جداری بیرونی مخزن نیز در روش پیشنهادی کاهش محسوسی نسبت به روش متداول خواهد داشت که منتج به صرفه‌جویی بسیار زیادی در هزینه‌های لازم برای ساخت جداری مخزن خواهد شد، زیرا در قطر کمتر ورق فولادی کمتر و هزینه‌های حمل و نصب و جوشکاری نیز کمتر خواهد شد. همچنین به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف طراحی شامل ضخامت عایق کف، سقف و دیواره‌ی مخزن بر تابع هدف یعنی هزینه‌ی کل از آنالیز حساسیت استفاده می‌شود. برای انجام محاسبات عددی مرتبط با آنالیز حساسیت از کدنویسی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است و ضرایب حساسیت نرمال شده برابر با مقادیر زیر بدست آمده‌اند:

$$NS = \begin{Bmatrix} 0.12 \\ 0.24 \\ 0.41 \end{Bmatrix} \quad (16)$$

که بصورت نمودار میله‌ای در شکل (۶) ارائه شده‌اند. همان‌گونه که از نتایج بدست آمده مشهود است ضخامت عایق کف کمترین تاثیر را بر مقدار هزینه‌ی کل دارد، پس از آن ضخامت عایق سقف تاثیری به میزان دو برابر عایق کف بر میزان هزینه‌ی کل موثر است.

ضخامت عایق جداری مخزن بیشترین تاثیر را بر مقدار هزینه‌ی کل دارد که بیش از سه برابر تاثیر ضخامت عایق کف و کمی کمتر از دو برابر تاثیر ضخامت عایق سقف بر هزینه‌ی کل است.



شکل (۶). نمودار میله‌ای حساسیت نرمال شده

بخش	عایق مورد استفاده	ضخامت بهینه (mm)
کف	شیشه‌ی سلولی (متداول)	۲۳۸
	بتون پرلیتی	۷۹۳
سقف	پشم معدنی ورقه‌ای (متداول)	۴۴۵
	میکرواسفیر شیشه‌ای 3M نوع K1	۲۴۰
جداره	پرلیت منبسط شده (متداول)	۶۸۰
	میکرواسفیر شیشه‌ای 3M نوع K1	۲۳۹

با استفاده از این مقادیر ضخامت عایق در بخش‌های مختلف در هر دو نوع سیستم عایق‌بندی، به محاسبه‌ی هزینه‌ی لازم برای عایق‌بندی و همچنین هزینه‌ی ناشی از اتلاف گاز مایع ذخیره شده در هر دو حالت پرداخته می‌شود. این هزینه‌ها در محاسبات قبل به ترتیب با نماد C_{in} و C_{en} مشخص شده‌اند. نتایج بطور خلاصه در جدول (۳) ارائه شده است. لازم به ذکر است که هزینه‌ی لازم برای عایق کاری فقط یک بار در طول عمر عایق مورد نیاز خواهد بود و تا پایان عمر عایق و زمان نیاز به تعویض عایق تکرار نخواهد شد اما هزینه‌ی مربوط به اتلاف محتوای مخزن در یک بازه‌ی زمانی خاص قابل محاسبه است. هزینه‌های ذکر شده در این جدول برای مدت زمان یک سال کار مداوم مخزن محاسبه شده است.

جدول (۳). هزینه‌ی لازم برای عایق‌بندی و هزینه‌ی ناشی از اتلاف گاز مایع ذخیره شده در دو سیستم عایق‌بندی

سیستم عایق‌بندی مورد استفاده	$C_{in} (10^6 \$)$
متداول	۱/۲۹۰۶
پیشنهادی	۱/۳۱۶۵

همان‌گونه که از نتایج ذکر شده در این جدول مشهود است هزینه‌ی اولیه‌ی مورد نیاز برای عایق کاری مخزن در روش پیشنهادی به میزان ۲۵۸۸۰ دلار بیشتر از هزینه‌ی لازم برای عایق کاری به روش متداول است و این بدان معنی است که روش پیشنهادی هزینه‌ی اولیه‌ی بیشتری را می‌طلبد که البته در مقایسه با هزینه‌های مورد نیاز برای عایق کاری بسیار ناچیز است، اما بعد از گذشت یکسال هزینه‌ی ناشی از اتلاف مایع ذخیره شده در مخزنی که به روش پیشنهادی عایق‌بندی شده است به میزان ۲۷۹۷۰ دلار کمتر از مخزنی خواهد بود که به روش متداول عایق‌بندی شده است. از این رو نقطه‌ی شکست سرمایه‌گذاری در این جایگزینی در کمتر از یکسال رخ خواهد داد. به عبارت دیگر در کمتر از یکسال مازاد هزینه‌ی انجام شده برای عایق کاری، به علت کاهش هزینه‌های ناشی از تلف مایع ذخیره شده جبران خواهد شد و پس از این مدت، عایق‌بندی جایگزین سود دهی خواهد داشت. علاوه بر این مطلب، عمر

۴. نتیجه گیری

خصوصیات مهم میکرواسفیرهای شیشه‌ای مانند تراکم ناپذیری، مقاومت بالا و حفظ خصوصیات فیزیکی در طولانی مدت، نیازی به تعویض و جایگزینی آن مانند آنچه در پرلیت وجود دارد، نخواهد بود، در نتیجه هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات را نیز به شدت کاهش خواهد داد. این مسئله جایگزینی سیستم عایق کاری متداول را با آنچه در این تحقیق پیشنهاد شده است بیش از پیش توجیه می‌نماید. همچنین به‌منظور بررسی اثر ضخامت عایق کف، سقف و دیواره‌ی مخزن بر تابع هزینه‌ی کل از آنالیز حساسیت استفاده شد. نتایج نشان داد که ضخامت عایق کف کمترین تاثیر، پس از آن ضخامت عایق سقف و بالاتر از همه ضخامت عایق جداره‌ی مخزن بر مقدار هزینه‌ی تاثیر گذار هستند.

۵. مراجع

1. "API (American Petroleum Institute) 620: Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks," Washington, DC, 2018.
2. "API Standard 625: Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage," First Edition, 2018.
3. "BS 7777-3: Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service - Part 3: Recommendations for the design and construction of prestressed and reinforced concrete tanks and tank foundations, and for the design and installation of tank insulation, tank liners and tank coatings," 2000.
4. "API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage," Thirteenth Edition, 2020.
5. "BS EN 14620-4: Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and -165 °C - Part 4: Insulation components," 2006.
6. G. R. Cunnington and C. L. Tien, "Apparent Thermal Conductivity of Uncoated Microsphere Cryogenic Insulation," in *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 22, pp. 263-270, 1977.
7. J. E. Fesmire and S. D. Augustynowicz, "Thermal Performance Testing of Glass Microspheres Under Cryogenic Vacuum Conditions," *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 49, pp. 612-618, 2004.
8. R. G. Baumgartner, E. A. Myers, J. E. Fesmire, D. L. Morris and E. R. Sokalski, "Demonstration of Microsphere Insulation In Cryogenic Vessels," *AIP Conference Proceedings*, April 2006.
9. M. A. Allen, R. G. Baumgartner, J. E. Fesmire and S. D. Augustynowicz, "Advances in Microsphere Insulation

در این تحقیق با اشاره به مشکلات موجود در عایق کاری مخازن کرایوژنیک با استفاده از پرلیت مانند تراکم پرلیت بعد از مدتی قرار گرفتن در معرض چرخه‌های دمایی و کاهش توان سد حرارتی مخزن و الزام به تعویض و نوسازی آن که مستلزم توقف کار مخزن و صرف هزینه‌های گزاف است، نیاز به جایگزینی این نوع عایق بندی اثبات و تشریح گردید. در ادامه به مطالعه‌ی عایق‌های نوظهور که در مقیاس تجاری در این مخازن امکان استفاده از آنها وجود دارد پرداخته شد. با توجه به کاربرد مفید و موثر میکرواسفیرهای شیشه‌ای در برخی مخازن کرایوژنیک مقیاس کوچک مانند دوارها در سال‌های اخیر و با ارجاع به مقالات منتشر شده در این زمینه، ایده‌ی استفاده از آنها در مقیاس بسیار بزرگی همچون مخازن ذخیره‌ی گاز مایع طبیعی در این تحقیق شکل گرفت. در ابتدا با مطالعه‌ی خصوصیات فیزیکی این ماده تناسب و کاربری آن به ویژه در عایق بندی با اختلاف دمایی بالای دو سمت عایق تشریح و اثبات گردید. همچنین با توجه به میزان بالای تنش فشاری موجود در کف مخزن و با توجه به خصوصیات متناسب بتون پرلیتی، برای عایق بندی کف مخزن استفاده از این ماده پیشنهاد گردید. سپس به منظور امکان سنجی جایگزینی این عایق با سیستم عایق کاری مبتنی بر پرلیت در مخازن ذخیره‌ی گاز طبیعی مایع به یک تحلیل ترکیبی اقتصادی - حرارتی پرداخته شد. این تحلیل بطور جداگانه برای هر دو سیستم عایق کاری متداول شامل شیشه‌ی سلولی برای کف، پشم معدنی ورقه‌ای برای سقف و پرلیت منبسط شده برای جداره و سیستم عایق کاری پیشنهادی شامل بتون پرلیتی برای کف و میکرواسفیرهای شیشه‌ای برای سقف و جداره‌ی مخزن اجرا شد. یکی از نتایج این تحلیل تعیین ضخامت بهینه‌ی عایق‌ها در بخش‌های مختلف مخزن در هر دو نوع سیستم عایق بندی بود. با استفاده از این ضخامت‌های بهینه به تخمین هزینه‌های لازم برای عایق کاری و همچنین میزان خسارت مالی ناشی از اتلاف گاز مایع ذخیره شده در هر دو حالت عایق بندی پرداخته شد. نتیجه‌ی حاصل حاکی از آن بود که گرچه میزان هزینه‌ی اولیه‌ی لازم برای اجرای سیستم عایق کاری مبتنی بر میکرواسفیرهای شیشه‌ای کمی بیشتر از هزینه‌ی لازم برای اجرای سیستم عایق کاری متداول و متبنی بر پرلیت است اما چون هزینه‌ی ناشی از اتلاف گاز مایع ذخیره شده در اثر جوشش در سیستم عایق کاری پیشنهادی کمتر از سیستم متداول است، این هزینه در کمتر از یک سال جبران خواهد شد و پس از سیستم عایق کاری پیشنهادی سوددهی بیشتری نسبت به هم نوع مبتنی بر پرلیت خود خواهد داشت. علاوه بر این با توجه به

Systems,” *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 49, pp. 619-626, 2004.

10. J. E. Fesmire, D. L. Morris, S. D. Augustynowicz, Z. F. Nagy and S. J. Sojourner, “Vibration and Thermal Cycling Effects on Bulk-fill Insulation Materials for Cryogenic Tanks,” *Cryogenic Engineering Conference*, Keystone, August 2005.