

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<sup>۱</sup>، علیرضا بهنامفر<sup>۲</sup>، امید خدمتگذار<sup>۳</sup>

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

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

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۳)

### چکیده

در این تحقیق به استخراج اصول طراحی مخازن ذخیره‌ی 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 ذخیره‌ی 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 ذخیره‌ی 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 سامانه 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 سامانه عایق‌بندی متداول دارد، بسیار موثرتر و از نظر اقتصادی بسیار باصرفه‌تر خواهد بود.

**کلید واژه‌ها:** مخازن ذخیره فلزی - فلزی دوجداره، اصول طراحی، طراحی بهینه سامانه 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

۳۷۰۰۰ 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 <sup>3</sup>	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 تیخیر 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 فوق‌الذکر در دنیا و جمع‌آوری 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 دوجداره فلزی - فلزی و دوجداره فلزی - بتنی در مقیاس کلان پرداخته خواهد شد. در گام بعد مطالعه‌ی سوپراعیق‌های پایه پرلیت قابل استفاده بین دو جداره 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 دوجداره فلزی - فلزی مشتمل بر عایق‌های سقف و کف و تحلیل دقیق عایق سوپرمتریال پرلیتی بین دوجداره ارائه خواهد گردید. اهداف این مطالعه عبارتند از:

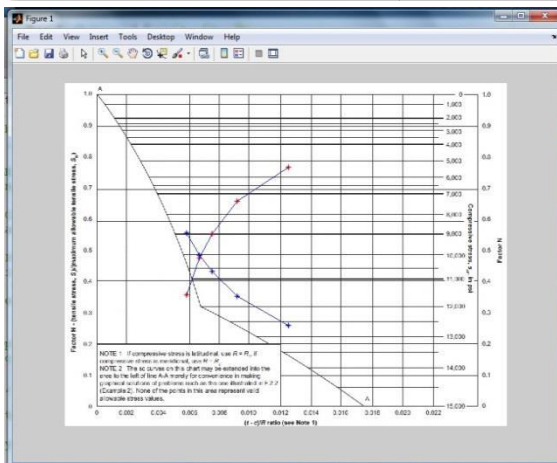
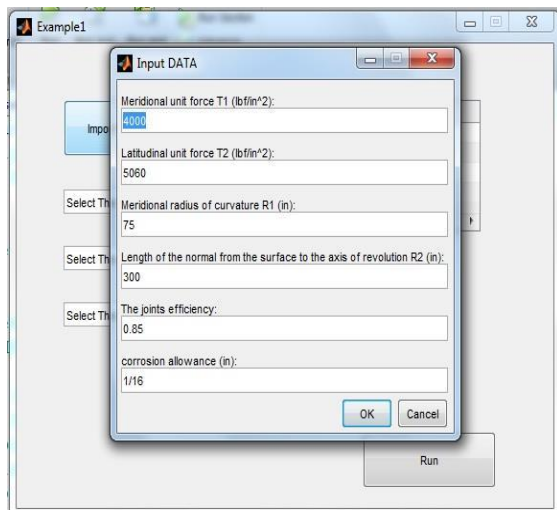
مطالعه‌ی عملکرد و تحقیق پیرامون شرکت‌های طراح و سازنده‌ی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع  
مطالعه‌ی عمومی طراحی مخازن دوجداره فلزی - فلزی و دوجداره فلزی - بتنی بررسی نرم افزارهای مربوطه  
مقایسه کلی مخازن دوجداره فلزی-فلزی و دوجداره فلزی - بتنی  
مطالعه روش‌های عایق‌بندی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع  
ارائه روند کلی طراحی مخازن دوجداره 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 [۲]

مشخصه	واحد
محل نصب مخزن	کنگان، ایران
ماده‌ی مورد ذخیره	اتیلن
نوع مخزن	مخزن داخلی و بیرونی از جنس فولاد ضد زنگ
کد مورد استفاده برای طراحی	API 625 و API 620
نوع فونداسیون	Elevated Slap
سیستم گرمایش از کف	ندارد
سیستم تعلیق ضد زلزله	دارد
ظرفیت کاری خالص	۳۲۰۰۰۰ متر مکعب

قرار می‌دهند. این دستاورد اولین نوآوری و خروجی تحقیق حاضر بود. نمایی از محیط کاربری نرم افزار 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 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 نرم افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی جداره‌ی مخزن به روش ترسیم

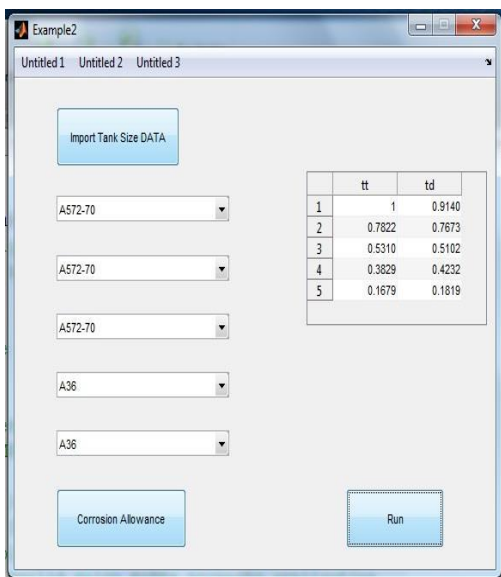
به علاوه موارد کاربرد، ویژگی‌ها، عملکرد و هزینه‌ی اجرای مخازن فلزی و بتونی از دیدگاه کلان مقایسه شدند و نرم‌افزار

وابستگی زیادی به کشورهای بیگانه وجود خواهد داشت. از سوی دیگر گردش مالی شرکت‌های استفاده کننده 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 بومی سازی 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 پیشنهاد جایگزین برای سوپر عایق پایه پرلیت مابین دوجداره تمرکز داشت.

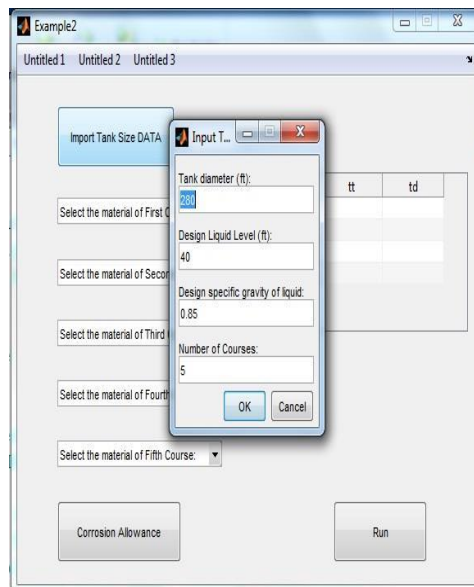
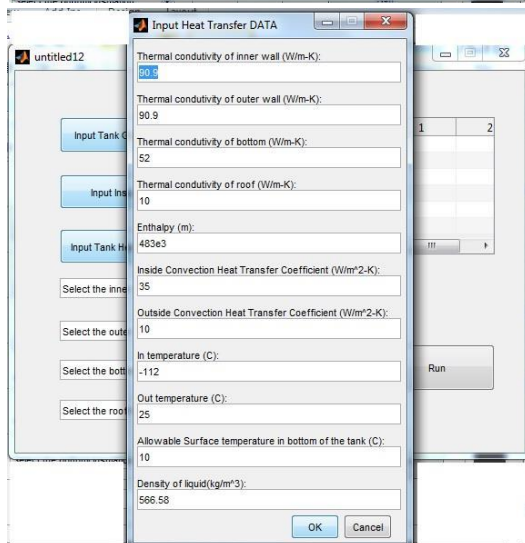
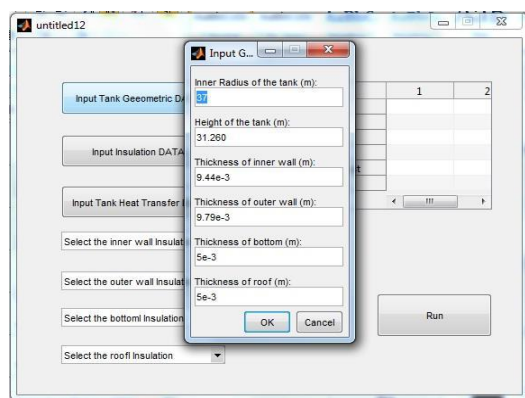
بعد از معرفی و بیان مسئله، در فاز اول پژوهش به تحقیق پیرامون شرکت‌های صاحب فناوری در زمینه‌ی طراحی و ساخت مخازن ذخیره‌ی گاز مایع در دنیا پرداخته شد. سپس در فاز دوم پژوهش بر مبنای دو استاندارد معتبر در زمینه‌ی طراحی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع برودتی یعنی API 620 [۱] و همچنین API-625 [۲] مفاهیم پایه‌ای و اصول 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



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

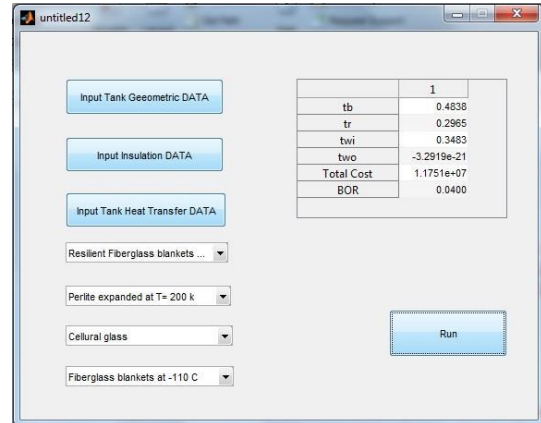
تانک به عنوان تنها نرم افزار تخصصی طراحی مخازن معرفی گردید. البته لازم به ذکر است که این نرم افزار بر مبنای استاندارد API-650 [۴] پایه گذاری شده است که به جز دو روش فوق الذکر برای تعیین ضخامت جداره ی مخازن، در زمینه ی طراحی مخازن دوجداره ی کرایوژنیک کاربردی ندارد. در ادامه و در فاز دیگری از این پژوهش 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 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 پشیرانه‌های 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) عایق بندی 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 خلاء 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 جانمایی 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



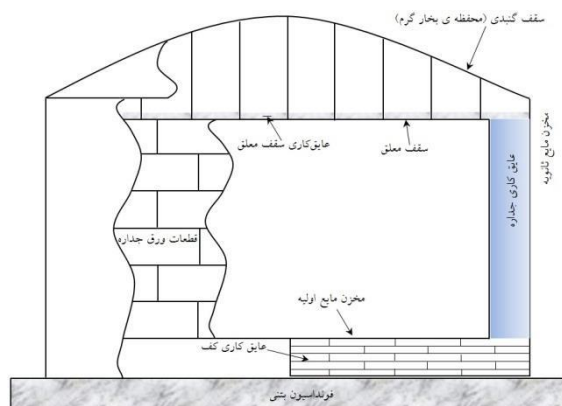
شکل (۴). نمایی از محیط نرم افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی بهینه‌ی سیستم عایق‌بندی مخزن

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 عایق کاری 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 جداره‌ی مخزن نیز عایق کاری شده است. نمای شماتیک و جزئیات عایق بندی این نوع مخزن در شکل (۵) نمایش داده شده است. پایه‌ی مخزن از جنس بتون بوده و برای جلوگیری از یخ زدگی بتون و آسیب احتمالی به آن از یک سیستم گرمایشی درون آن استفاده می‌شود تا دمای آن در ۱۰ درجه‌ی سانتیگراد حفظ شود. همچنین نرخ جوشش مخزن کمتر از ۰/۰۴٪ در نظر گرفته می‌شود. نشت گرما به مخزن بر اساس حداکثر دمای روز در محیط استفاده از مخزن و دمای طراحی مخزن ۱۱۲- درجه‌ی سانتیگراد (برای اتیلن) محاسبه می‌شود. در طراحی جداره‌ی مخزن، ضخامت ورق در جداره‌های

داخلی و خارجی برای بخش‌های (Course) مختلف متفاوت با یکدیگر در نظر گرفته می‌شود و از پایین به بالا ضخامت کاهش می‌یابد. از این‌رو به منظور ساده‌سازی محاسبات از مقادیر ضخامت ورق در بخش‌های مختلف میانگین گرفته شده و جداره‌های داخلی و خارجی مخزن یکنواخت و به ترتیب برابر با  $t_{w_i} = 9.44 \text{ mm}$  و  $t_{w_o} = 9.79 \text{ mm}$  فرض می‌شود. همچنین قطر داخلی مخزن برابر با  $r_i = 37,000 \text{ mm}$  و ارتفاع دیواره‌ی آن برابر با  $H = 31,260 \text{ mm}$  است.



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

به منظور تعیین جایگزین برای عایق‌های مورد استفاده در بخش‌های 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 مقایسه‌ی نتایج می‌توان به موثر بودن عایق‌های جایگزین معرفی شده پی برد. در سامانه عایق بندی متداول همانگونه که قبلاً نیز ذکر گردید برای عایق بندی کف مخزن از شیشه‌ی سلولی و برای سقف معلق فلزی از پشم معدنی و برای جداره از پودر پرلیت منبسط شده استفاده می‌شود.

عایق بندی مخازن با آنها بهبود عملکرد حرارتی است. مشخصات مکانیکی میکرواسفیرها نیز عملکرد گرمایی سازگارتر را تضمین می‌کنند. 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 چرخه‌های حرارتی هستند [۱۰]. این ویژگی کلیدی امکان انعطاف پذیری عملیاتی بیشتر و قرار گرفتن در معرض خطرات ایمنی کمتری را فراهم می‌کند. برای مخازن ثابت، هزینه‌ی اضافی مرتبط با عایق میکرواسفیر به سرعت با کاهش اتلاف سیال برودتی ذخیره شده ناشی از جوشش جبران می‌شود. میکرواسفیرها و پرلیت به ترتیب تقریباً ۰/۵۳ دلار و ۰/۰۹ دلار در هر لیتر هزینه دارند.

به علاوه با هدف جایگزینی عایق کف مخازن مورد مطالعه که از جنس شیشه‌ی 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 می‌گردد. 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، تحلیل حرارتی - اقتصادی ارائه شد که در آن به مقایسه‌ی 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 می‌گیرد تا با تجزیه و تحلیل انتقال حرارت، نرخ جوشش و اقتصادی به تعیین عایق جایگزین برای عایق جداره، کف و سقف مخازن ذخیره‌ی گاز مایع پرداخته شود که در آنها به طور متداول به ترتیب از پرلیت (Perlite)، شیشه‌ی سلولی (Cellular Glass) و پشم معدنی (Mineral Wool) استفاده می‌شود. همچنین ضخامت بهینه‌ی عایق‌های جایگزین و میزان ارزش افزوده و صرفه جویی اقتصادی تعیین خواهد شد. مخزن مورد بررسی در پروژه‌ی حاضر از نوع فلزی - فلزی می‌باشد. این نوع مخزن در بخش "مفاهیم اساسی در عایق بندی مخازن ذخیره‌ی گاز مایع"، بر اساس استاندارد EEUA 147 2016 در کلاس A (1)، نوع ۴ نامیده شد و مخزنی از نوع مهار کامل است که محفظه‌های داخلی و بیرونی و کف آن فلزی و از جنس فولاد نیکیلی ۹ درصد و سقف آن از آلیاژ آلومینیوم ساخته شده و محفظه‌ی 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 می‌شود. بالای ورق عرشه‌ی 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:

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

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

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

که در آن شعاع داخلی جداره‌ی مخزن و  $t_{w_i}$  ضخامت ورق جداره‌ی داخلی مخزن است. همچنین  $t_{ins_w}$  ضخامت عایق بین دو جداره،  $t_{ins_b}$  ضخامت عایق مورد استفاده در کف مخزن و  $t_{ins_r}$  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)،  $\Delta H$  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:

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

که در آن  $h_i$  ضریب انتقال حرارت جابجایی در سیال درون

از جمله مهمترین معایب این نوع عایق‌بندی می‌توان به فشردن 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 بسیار 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 عایق‌کاری ( $C_{ins}$ ) و هزینه‌های ناشی از اتلاف انرژی ( $C_{en}$ ) است.

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

$$C_{ins} = C_{ins/v_w} V_{ins_w} + C_{ins/v_b} V_{ins_b} + C_{ins/v_r} V_{ins_r} \quad (۱)$$

$$+ C_{ins/v_r} \pi r_i^2 t_{ins_r} + \frac{L_{Total} C_{Unit}}{\Delta H} \left[ 2\pi H(T_o - T_i) / \left[ \frac{1}{k_{ins_w}} \ln \left( \frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}}{r_i + t_{w_i}} \right) + \frac{\ln \left( \frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}}{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}} \right)}{k_{w_o}} + \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln \left( \frac{r_i + t_{w_i}}{r_i} \right)}{k_{w_i}} + \frac{1}{(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}) h_o} \right] + \pi r_i^2 \left[ (T_{cs} - T_i) / \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{t_b}{k_b} + \frac{t_{ins_b}}{k_{ins_b}} + \frac{1}{h_o} \right] + (T_o - T_i) / \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{t_r}{k_r} + \frac{t_{ins_r}}{k_{ins_r}} + \frac{1}{h_o} \right] \right] \right]$$

همچنین نرخ جوشش با جایگزینی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$BOR = \frac{8640000}{\rho \pi H R_i^2 \Delta H} [2\pi H(T_o - T_i) / \left[ \frac{1}{k_{ins_w i}} \ln \left( \frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}}{r_i + t_{w_i}} \right) + \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln \left( \frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}}{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}} \right)}{k_{w_o}} + \frac{1}{k_{w_i}} \ln \left( \frac{r_i + t_{w_i}}{r_i} \right) + \frac{1}{(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}) h_o} \right] + \pi r_i^2 \left[ (T_{cs} - T_i) / \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{t_b}{k_b} + \frac{t_{ins_b}}{k_{ins_b}} + \frac{1}{h_o} \right] + (T_o - T_i) / \left[ \frac{1}{h_i} + \frac{t_r}{k_r} + \frac{t_{ins_r}}{k_{ins_r}} + \frac{1}{h_o} \right] \right] ] \quad (۱۵)$$

به منظور تعیین ضخامت بهینه در هر نوع از چیدمان عایق (متداول و پیشنه‌های) و بهینه‌سازی هزینه‌ها در هر مورد کفایت 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  $t_{ins_b}$ ،  $t_{ins_r}$  و  $t_{ins_w}$  است، به منظور کمینه‌سازی آن از توابع کتابخانه‌ای آماده‌ی موجود در نرم‌افزارهای محاسباتی ریاضی

مخزن،  $k_{w_o}$  و  $k_{w_i}$  به ترتیب ضریب انتقال حرارت هدایتی در ورق‌های جداری درونی و بیرونی و بیرونی مخزن،  $k_{ins_w}$  ضرایب انتقال حرارت هدایتی در عایق بین دو جداری مخزن و  $h_o$  ضریب انتقال حرارت جابجایی در جو خارج از مخزن است. همچنین  $t_{w_o}$  ضخامت ورق جداری 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:

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



```
[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 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

بخش	عایق مورد استفاده	ضخامت بهینه (mm)
-----	-------------------	------------------

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+tw
i+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;
```

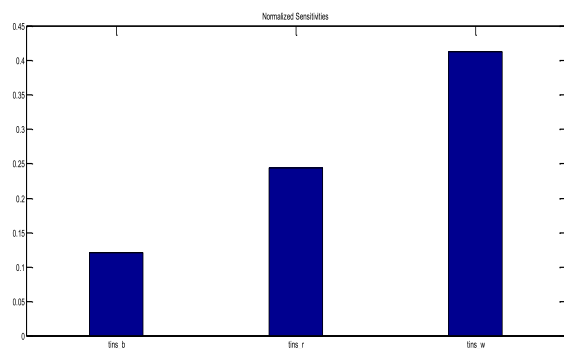
در این تعریف متغیرهای مسئله که شامل  $t_{ins_r}$ ،  $t_{ins_b}$  و  $t_{ins_w}$  هستند به ترتیب با نام‌های  $x(1)$ ،  $x(2)$  و  $x(3)$  جایگزین شده‌اند. پس از تعریف تابع هزینه‌ی کل به کمینه‌سازی آن با کمک تابع fmincon پرداخته می‌شود. با توجه به توضیحات فوق از دستور زیر استفاده می‌شود:

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 جداره‌ی مخزن در روش عایق‌بندی پیشنهادی تقریباً ۱/۳ ضخامت عایق در روش متداول است، قطر جداره‌ی 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 جداره‌ی 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:

$$NS = \begin{cases} 0.12 \\ 0.24 \\ 0.41 \end{cases} \quad (۱۶)$$

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 جداره‌ی 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

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با اشاره به مشکلات موجود در عایق کاری

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

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  $۲,۵۸۸ \times 10^4$  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 درمقایسه 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  $۲,۷۹۷ \times 10^4$  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 بیشتر عایق میکرواسفیر شیشه‌ای و عدم وقوع مشکلات ناشی از

به تعویض و جایگزینی آن مانند آنچه در پرلیت وجود دارد، نخواهد بود، در نتیجه هزینه 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 به منظور 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 تاثیرگذار 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. Cunningham 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 Systems," *Advances in Cryogenic Engineering*, vol. 49, pp. 619-626, 2004.

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 عایق‌بندی 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 عایق‌بندی 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 عایق‌بندی کف مخزن استفاده از این ماده پیشنهاد گردید. سپس به منظور امکان‌سنجی 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 عایق‌بندی 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 عایق‌بندی 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 مبتنی 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 خصوصیات مهم میکرواسفیرهای شیشه‌ای مانند تراکم ناپذیری، مقاومت بالا و حفظ خصوصیات فیزیکی در طولانی مدت، نیازی

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.