Construction Science and Technology
Volume 5, Issue 3

Derivation of the design fundamentals for double-wall metallic storage tanks (ethylene/ethane) focusing on the choice or proposal of perlite-based insulator between two walls

Sayed Hasan Mirtalaie [1], Saeed Dinarvand [2*], Alireza Behnamfar [3], Omid Khedmatgozar [4]

[1] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad , Iran
[2] Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University, Central Tehran Branch, Tehran, Iran
[3] Bsc of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hosein University
[4] Bsc of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hosein University

R T I C L E I N F O

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 2024 June 12

Accepted: 2024 September 20

* Correspondence Email Addres:

h_mirtalaie@yahoo.com

Keywords:

Double-walled metallic storage tanks,

Design principles,

Optimal Design of insulation system,

Glass microspheres

A B S T R A C T

In this research, the design principles of double-walled metal-metal (ethylene / ethane) storage tanks are extracted, focusing on the selection or proposal of super-insulation of double-walled middle perlite base. Presenting the results of research on companies with technology to design and manufacture liquefied gas storage tanks in the world, extracting basic concepts and studying the general and available principles of designing double-walled metal-metal tanks and providing sample calculations to explain the application of tank design rules and The software codes related to performing these calculations constitute the first two parts of this research. Then the principles of design and construction of concrete tanks and comparison from the macro perspective of metal and concrete tanks will be presented. The following are the basic concepts in liquefied petroleum gas storage tank insulation. Also, by performing insulation design calculations, the optimal insulation thickness is determined and related software codes are compiled and presented. In the final phase of this research, alternative studies for the insulation system will be studied and in order to prove the suitability of the introduced alternative insulations, thermal-economic analysis with an optimization perspective and including sensitivity analysis will be presented. The results of the analysis show that although the proposed insulation system as an alternative requires a little more initial cost to implement, in less than a year it reaches the point of investment failure and according to It will be much more durable and economically much more durable than conventional insulation systems.

Publisher: Imam Hussein University
© **Authors**
This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0).

«مجله علمی علوم و فنون سازندگی»

سال سوم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۳، صفحه ۲۹ الی ۴۰

علمی- تخصصی

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

سید حسن میرطلائی[1*]، سعید دیناروند[2]، علیرضا بهنامفر[3]، امید خدمتگذار[4]

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 ذخیره‌ی دوجداره فلزی- فلزی (اتیلن / اتان) با تمرکز بر انتخاب یا پیشنهاد سوپر عایق پایه پرلیت 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 می دهند. 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 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

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 به‌وسیله‌ی پرلیت 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

[1] نویسنده پاسخگو: mirtalaie@pmc.iaun.ac.ir

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 دوجداره فلزی - فلزی و دوجداره فلزی - بتنی در مقیاس کلان پرداخته خواهد شد. در گام بعد مطالعه‌ی سوپرعایق‌های 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

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 620 و API 625
نوع فونداسیون	Elevated Slap
سیستم گرمایش از کف	ندارد
سیستم تعلیق ضد زلزله	دارد
ظرفیت کاری خالص	۳۲۰۰۰۰ متر مکعب
قطر داخلی مخزن درونی	۳۷۰۰۰ میلیمتر
قطر داخلی مخزن بیرونی	۳۹۰۰۰ میلیمتر
ارتفاع	۳۱۲۶۰ میلیمتر
فشار طراحی مخزن درونی / بیرونی	-۰/۰۵ mbarg ۰/۹۶۳ mbar
دمای طراحی	۱۱۲- درجه سانتیگراد
فشار کاری	۰/۰۹ barg ۱/۱۰ bar
دمای کاری	۱۰۶/۷- درجه سانتیگراد
چگالی سیال (مایع)	۵۷۱ Kg/m3
خوردگی مجاز	مخزن درونی ۰ میلیمتر مخزن بیرونی ۰ میلیمتر سقف ۳ میلیمتر
نوع سقف	گنبدی شگل
نرخ تبخیر سیال	حداکثر ۰/۰۴۲ wt%
عایق	سقف معلق: Mineral wool با پوشش Alu کف: cellular glass مخزن بیرونی: پرلیت
جنس ورق مخزن درونی و کف آن	ASTM A353
جنس ورق مخزن بیرونی و کف آن	A283-c
جنس ورق سقف معلق و سقف کلی	AL / A238-c
قاب بندی سقف	A36

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 صنایعی 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

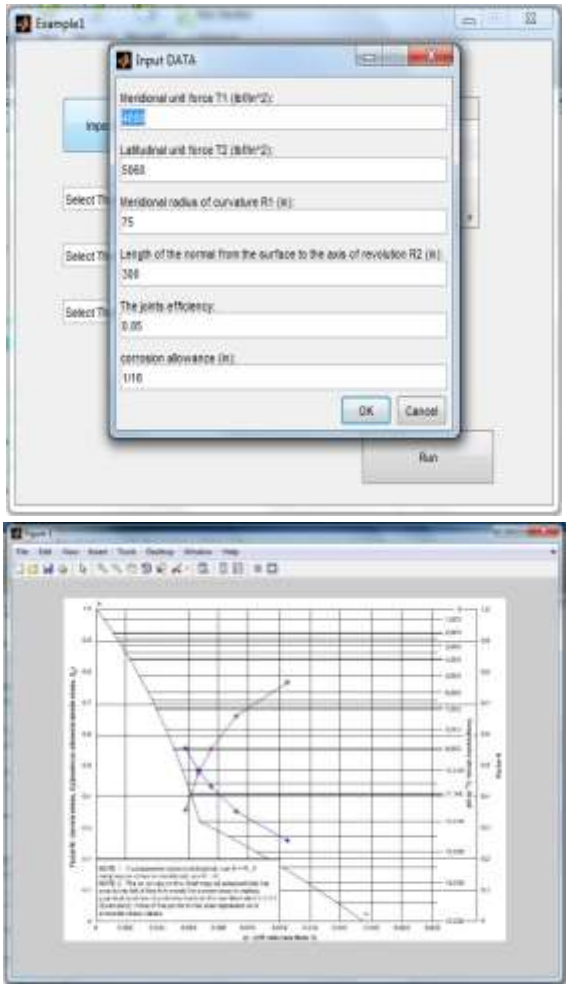
وابستگی زیادی به کشورهای بیگانه وجود خواهد داشت. از سوی دیگر گردش مالی شرکت‌های استفاده کننده از این مخازن بسیار وابسته به صحت عملکرد آنها می‌باشد. همچنین برخی شرکت‌های سازنده‌ی چنین مخازنی خدمات خود را متاثر از روابط سیاسی و شرایط تحریمی می‌نمایند و از در اختیار قرار دادن خدمات مربوط به طراحی و اجرا 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 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 عمدتا 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 عمدتا 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 نرم افزار تدوین شده در این خصوص در شکل(۲) ارائه گردیده است.

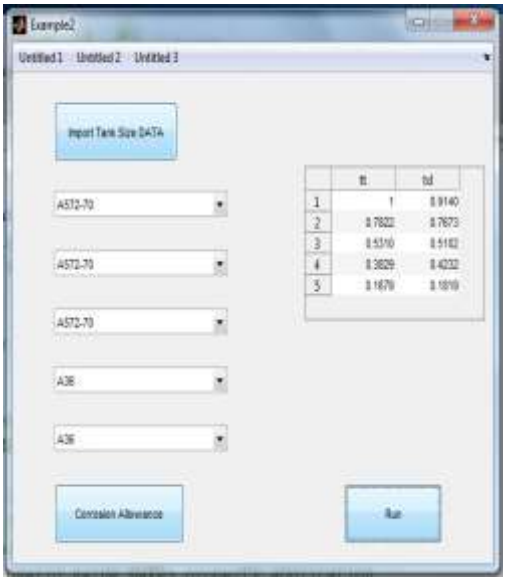
همچنین به منظور تعیین ضخامت ورق جداره‌ی مخزن در کرس‌های مختلف دو روش ۱ فوت و نقطه‌ی طراحی متغیر بر مبنای مفاهیم ذکر شده در استاندارد API-650 معرفی و کدهای نرم‌افزاری ویژه‌ای برای اجرای آنها تدوین گردید که برای این کدها نیز قابلیت اجرایی و رابط کاربری گرافیکی ایجاد شد، که نمایی از آن در شکل(۳) ارائه شده 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.



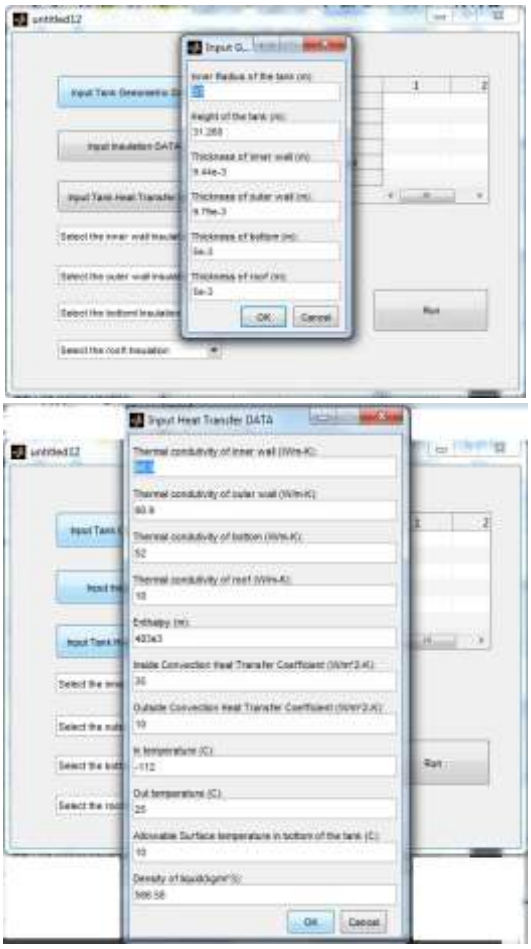
شکل(۲). نمایی از محیط نرم افزاری تدوین شده برای انجام محاسبات طراحی جداره ی مخزن به روش ترسیمی

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

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



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



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

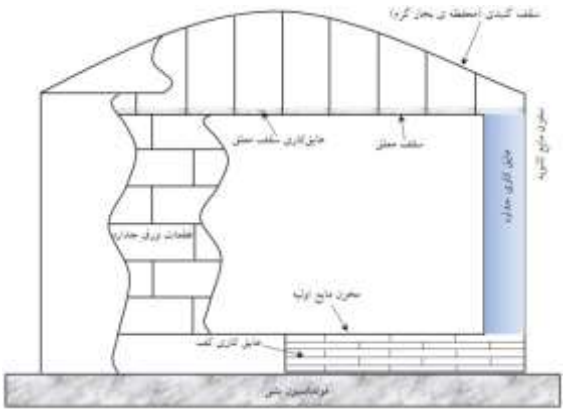
. لازم به ذکر است که مراجع معتبر در این زمینه عمدتا بـه ذکـر مفاهیم پایه‌ای و اصول طراحی سیستم‌هـای عـایق‌بنـدی بسـنده کرده‌اند و به ذکر جزئیـات محاسـباتی و طراحـی بهینـه‌ی عـایق نپرداخته‌اند از این رو و با توجه به خلاء موجود در مراجع حاضـر در زمینه‌ی طراحی سیستم‌های عایق‌بندی، در این فاز از پژوهش با ارائه‌ی تحلیل محاسباتی دقیقی از سیستم عایق‌بنـدی مخـازن مورد بررسی که مبتنـی بـر تحلیـل همزمـان اقتصـادی و انتقـال حرارتی بود، به تعیین ضخامت بهینه برای عـایق در بخـش‌هـای مختلف مخزن پرداخته شد و کدی نرم‌افزاری با قابلیت اجرایـی و رابط کاربری گرافیکی در این خصوص تـدوین و ارائـه گردیـد. بـا استفاده از این کد به سادگی و بر اساس چیدمان عایق مورد نظـر طراح، ضخامت بهینه‌ی عایق در بخش‌های مختلف مخزن تعیـین می‌گردد. نمایی از محیط کاربری نرم افـزار تـدوین شـده در ایـن خصوص در شکل(۴) ارائه گردیده است. این بخش نیز یکی دیگر از جنبه‌های نوآورانه در تحقیق حاضر بـه شـمار مـی‌آیـد. در فـاز نهایی این تحقیق با توجه به مشکلات تشریح شده در فاز قبلـی و موجود در سیستم عـایق‌کـاری متـداول جـداره‌ی مخـازن مـورد بررسی که عمدتا مبتنی بـر پرلیـت هسـتند و بـه منظـور یـافتن جایگزین برای آنها، میکرواسفیرهای شیشه‌ای معرفی می‌شوند.

میکرواسفیرهای شیشه‌ای کره‌هـای میکروسـکوپی شیشـه‌ای هستند که برای کاربردهای بسیار گسترده در تحقیقات، پزشـکی، کالاهـای مصـرفی و صـنایع مختلـف تولیـد مـی‌شـوند. قطـر میکرواسفیرهای شیشه‌ای معمولاً بین ۱ تا ۱۰۰۰ میکرومتر است، اگرچه اندازه‌ها می‌توانند از ۱۰۰ نانومتر تا ۵ میلیمتر قطر داشـته باشند. میکرواسفیرهای شیشه‌ای توخالی، که بعضا میکرو بالون یا حباب شیشه‌ای نامیده می‌شوند، دارای قطرهـایی از ۱۰ تـا ۳۰۰ میکرومتر هسـتند [۶]. ایـن میکـرو بـالون‌هـا دارای وزن سـبک، رسانایی گرمایی کم و مقاومت در برابر تنش فشاری هسـتند [۷]. در حالی که میکرواسفیرها به عنوان ماده عایق موثر برای دهه‌هـا شناخته شده‌اند، اما استفاده‌ی واقعی از آنهـا در مخـازن ذخیـره-سازی برودتی در مقیاس کامل تاکنون اثبات نشده است. مزایـای عملکرد و هزینه‌ی چرخه‌ی زندگی که قبلاً پیش بینی شـده بـود اکنون اثبات شده است. اغلب مخازن ذخیره‌سازی برودتی حجـیم با عایق چندلایه یا پرلیت عایق‌بندی می‌شوند. عایق میکرواسفیر، متشکل از حباب‌های شیشـه‌ی توخـالی اسـت کـه ویژگـی‌هـای مطلوبی را که سایر عایق‌ها به صورت جداگانه دارند، در یک ماده-ی واحد ترکیب می‌کند. این ماده دارای مقاومـت لهیـدگی بـالا و چگالی کم بوده، غیر قابل احتراق اسـت و در خـلا نـرم عملکـرد خوبی دارد. در مقاله‌ی [۸] نوعی عـایق مبتنـی بـر میکرواسـفیر برای مخازن برودتی بـرای بـه حـداقل رسـاندن تلفـات ناشـی از جوشش پیشرانه‌های ذخیره شده در فرودگاه‌ها و تأسیسـات گـاز مایع تجاری مورد ارزیابی قرار گرفته است. عایق‌هـای مبتنـی بـر میکرواسفیر همچنین می‌توانند سیستم‌هـای توزیـع برودتـی کـم مصرف و مقرون بـه صـرفه بـرای تأسیسـات دولتـی و تجـاری را امکان‌پذیر سازند. در مطالعه‌ی آلـن و همکـاران [۹] آخـرین بـه روزرسـانی ازکارهـای منتشـر شـده‌ی قبلـی بـرای توسـعه‌ی میکرواسفیرها به عنوان یک گزینه‌ی مناسـب بـرای رویکردهـای فعلی عایق‌بندی ارائه شده است. اکثر مخازن ذخیره‌سازی برودتی حجیم با عایق چندلایه یا پرلیت (شیشه آتشفشانی منبسط شده) عایق بندی شده‌اند. رونـد بسـته‌بنـدی مخـازن داخلـی بـا عـایق چندلایه پرهزینه و زمان‌بر است. عملکرد حرارتی واقعی نیز تا حد زیادی به کیفیت ساخت و سطح خـلاء کـه در حـین کـار حفـظ می‌شود، بستگی دارد. اغلب سطح خلا به حدی افت پیدا می‌کنـد 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، امـا پرلیت در طی سیکل حرارتی فشرده و بـین محفظـه‌ی داخلـی و خارجی جانشانی می¬شود. این تراکم باعث افزایش نشت گرما به محفظه‌ی داخلی شده و می‌توانـد بـه لولـه‌کشـی داخلـی آسـیب رسانده و باعث ایجاد شرایط بحرانی شود. ویژگی‌های ذاتی عـایق میکرواسفیر مانند مقاومت لهیدگی بـالا و توانـایی جریـان بـرای جلوگیری از بروز مشکل تراکم و آسیب احتمالی ساختاری اسـت. گرچه هزینه‌ی میکرواسفیرها بیشتر از عایق پرلیت است، کـاهش تعمیر و نگهداری و تلفات ناشی از جوشش بـه راحتـی مـی‌توانـد سرمایه‌گذاری اولیه توسط تولید کننـده را توجیـه کنـد و توسـط کاربر نهایی ارزیابی شود. از آنجا کـه میکرواسـفیرهای شیشـه‌ای توخالی فقط با یکدیگر تماس نقطه‌ای دارند و دیـواره‌هـای نـازک شیشه‌ای رسانایی گرمایی کمی دارند، رسانایی جامد بـه حـداقل می‌رسد. اگرچه مزایای اصـلی دیگـری نیـز بـرای میکرواسـفیرها نسـبت بـه پـودر پرلیـت وجـود دارد، امـا توجیـه اساسـی بـرای

عایق‌بندی 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 انعطاف‌پذیری 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 قبلا 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، تحلیلی حرارتی - اقتصادی ارائه شد که در آن به مقایسه‌ی دو سیستم عایق‌بندی 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 صرفه‌جویی 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 ذخیره ی 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 نیکلی 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 عایق‌کاری دارد. مابین دو جداره‌ی مخزن نیز عایق‌کاری شده است. نمای شماتیک و جزئیات عایق‌بندی 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 $t_{w_i} = 9.44\ mm$ و $t_{w_o} = 9.79\ mm$ فرض می‌شود. همچنین قطر داخلی مخزن برابر با $r_i = 37{,}000\ mm$ و ارتفاع دیواره‌ی آن برابر با $H = 31{,}260\ mm$ است.



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

به منظور تعیین جایگزین برای عایق‌های مورد استفاده در بخش‌های مختلف مخزن کافیست تا دو نمونه عایق‌بندی 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 سامانه‌ی عایق-بندی متداول همانگونه که قبلا نیز ذکر گردید برای عایق‌بندی کف مخزن از شیشه‌ی سلولی و برای سقف معلق فلزی از پشم معدنی و برای جداره از پودر پرلیت منبسط شده استفاده می‌شود.

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 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 پریلیتی 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 EEUA 147 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 ونتایج با هم جمع می‌شوند تا هزینه‌ی کلی عایق‌کاری به‌دست آید. هزینه‌ی کلی عایق‌کاری به شکل زیر قابل محاسبه است:

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

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:

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

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

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

که در آن r_i 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)، 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 عایق‌کاری 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

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:

$$Q_b = \frac{T_{cs} - T_i}{R_b} \tag{۹}$$

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:

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

که در آن t_b ضخامت ورق مورد استفاده در کف مخزن، k_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 قبلا تعریف شده‌اند. همچنین شار گرما از سقف مخزن را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$Q_r = \frac{T_o - T_i}{R_r} \tag{۱۱}$$

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

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

که در آن t_r ضخامت ورق مورد استفاده در سقف مخزن، k_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 قبلا تعریف شده‌اند. هزینه‌ی کل به صورت زیر بیان می‌شود:

$$C_T = C_{in} + C_{en} \tag{۱۳}$$

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:

$$C_T = C_{ins/v_w}[\pi[(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w})^2 - (r_i + t_{w_i})^2 H] + C_{ins/v_b}(\pi r_i^2 t_{ins_b}) + C_{ins/v_r}\pi r_i^2 t_{ins_r} + \frac{L_{Total}\, C_{Unit}}{\Delta H}[2\pi H(T_o - T_i)/\left[\frac{1}{k_{ins_w}}\ln\left(\frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}}{r_i + t_{w_i}}\right) + \frac{\ln\left(\frac{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o}}{r_i + t_{w_i} + t_{ins_w}}\right)}{k_{w_o}} + \frac{1}{r_i h_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_i + t_{w_i}}{r_i}\right)}{k_{w_i}} + \frac{1}{(r_i + t_{w_i} + t_{ins_w} + t_{w_o})h_o}\right] + \pi r_i^2\left[(T_{cs} - T_i)/[\frac{1}{h_i} + \frac{t_b}{k_b} + \frac{t_{ins_b}}{k_{ins_b}} + \frac{1}{h_o}] + (T_o - T_i)/[\frac{1}{h_i} + \frac{t_r}{k_r} + \frac{t_{ins_r}}{k_{ins_r}} + \frac{1}{h_o}]\right]\right] \tag{۱۴}$$

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

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

به منظور تعیین ضخامت بهینه در هر نوع از چیدمان عایق (متداول و پیشنهادی) و بهینه‌سازی هزینه‌ها در هر مورد کافیست تابع هزینه‌ی 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 قبلا 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 هزینه‌ی کل و همچنین توجه به این مطلب که تابع هزینه‌ی کل یک تابع چند متغیره از سه متغیر مستقل t_{ins_w}، t_{ins_b} و t_{ins_r} است، به منظور کمینه‌سازی آن از توابع کتابخانه‌ای آماده‌ی موجود در نرم‌افزارهای محاسباتی ریاضی

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 دقیقا 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+t
wi+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_b}، t_{ins_r} 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 کمینه سازی آن با کمک تابع fmincon پرداخته می‌شود. با توجه به توضیحات فوق از دستور زیر استفاده می‌شود:

```
[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 بیهنه‌سازی 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)
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 عایق‌کاری 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

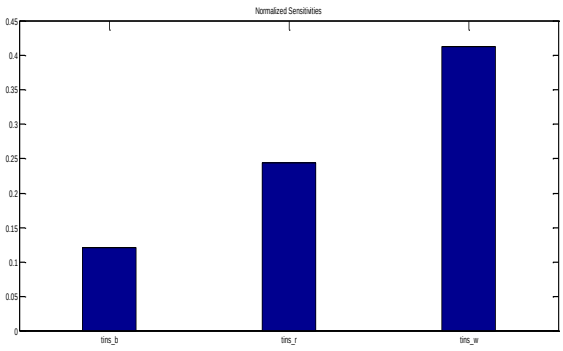
سیتسم عایق‌بندی مورد استفاده	$C_{in}(10^6\ \$)$
متداول	۱/۲۹۰۶
پیشنهادی	۱/۳۱۶۵

همانگونه که از نتایج ذکر شده در این جدول مشهود است هزینه‌ی اولیه‌ی مورد نیاز برای عایق‌کاری مخزن در روش پشنهادی به میزان ۲۵۸۸۰ دلار بیشتر از هزینه‌ی لازم برای عایق‌کاری 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 عایق‌کاری 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 عایق‌کاری، 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 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 تقریبا یک سوم 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:

$$NS = \begin{Bmatrix} 0.12 \\ 0.24 \\ 0.41 \end{Bmatrix} \qquad (۱۶)$$

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 عایق‌کاری 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 عایق-بندی کف مخزن استفاده از این ماده پیشنهاد گردید. سپس به منظور امکان‌سنجی جایگزینی این عایق با سیستم عایق‌کاری 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 عایق‌کاری متداول شامل شیشه‌ی سلولی برای کف، پشم معدنی ورقه‌ای برای سقف و پرلیت منبسط شده برای جداره و سیستم عایق‌کاری 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 هزنیه‌های لازم برای عایق‌کاری 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 عایق‌کاری مبتنی بر میکرواسفیرهای شیشه‌ای کمی بیشتر از هزینه‌ی لازم برای اجرای سیستم عایق‌کاری متداول و متبنی بر پرلیت است اما چون هزنیه‌ی ناشی از اتلاف گاز مایع ذخیره شده در اثر جوشش در سیستم عایق‌کاری پیشنهادی کمتر از سیستم متداول است، این هزینه در کمتر از یک سال جبران خواهد شد و پس از سیستم عایق‌کاری 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 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 عایق‌کاری 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 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. 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

Systrems," 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.