

طراحی و ساخت سیستم محافظت در مقابل پدیده ورود مایع مبرد به کمپرسور در کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت دستگاه‌های تهویه مطبوع

کورس نکوفر^{۱*}، سینا فروتن^۲ و سید آرش سید شمس طالقانی^۳

۱- دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی چالوس، ایران

۲- واحد الکترونیک، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران

۳- پژوهشکده علوم هوایی، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰

چکیده

یکی از پدیده‌های مخرب که موجب شکست و آسیب‌های شدید مکانیکی به کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت می‌شود پدیده برگشت مایع مبرد به ساکشن کمپرسور است. این تحقیق متمرکز بر طراحی و ساخت دستگاهی در جهت محافظت از کمپرسور در برابر این پدیده است. این سیستم بر پایه پردازش الکترونیکی پارامترهای مؤثر شامل فشار عملیاتی، دمای عملیاتی، دمای سوپر‌هیت، درجه سوپر هیت و نوع گاز مبرد است. در ادامه، سیستم محافظ براساس فرمول‌های ترمودینامیکی مربوطه پردازش را انجام می‌دهد و براساس نتیجه پردازش فرمان مناسب را صادر می‌کند. تحقیقات معتبر مختلف برتری روش پردازش الکترونیکی را بر پردازش مکانیکی اثبات می‌کند. نمونه موردی کمپرسور جابه‌جایی مثبت چیلر تراکمی به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب و سیستم مورد تحقیق با موفقیت نصب و آزمایش گردید. استفاده از سیستم پردازش الکترونیکی به‌جای سیستم تشخیص مکانیکی و قابلیت اعتمادپذیری بالای این سیستم و همچنین به‌روزرسانی کمپرسورهای قدیمی نصب‌شده در صنعت، جنبه جدید و نوآورانه تحقیق است. نتایج ارزیابی اقتصادی و پایش عملکردی طی یک دوره یک‌ساله نشان داد با صرف هزینه اندک معادل با هزینه یک‌بار تعمیرات ناشی از پدیده برگشت جریان مایع، می‌توان مانع از بروز این پدیده و هزینه‌های تعمیرات در این حوزه شد.

کلمات کلیدی: مایع مبرد، کمپرسور جابه‌جایی مثبت، تهویه مطبوع، تبرید تراکمی، میکروکنترلر

مقدمه

و به‌اصطلاح اهل فن، کمپرسور قلب سیستم سرمایه‌گذاری تراکمی است. سازوکار فشار افزایی این نوع کمپرسورها بر پایه تراکم‌پذیری گازها بوده و از طریق کاهش حجم و متراکم کردن گاز مبرد، فشار افزایش می‌یابد.

کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت به‌عنوان مهم‌ترین تجهیز در سیکل سرمایه‌گذاری تراکمی مطرح هستند

خرابی و عمل نکردن این شیرها وجود دارد و همچنین، نیازمند سرویس‌های دوره‌ای ویژه هستند. (د) در شرایط تحریم‌های اعمال شده بر جمهوری اسلامی ایران تهیه قطعات یدکی مرغوب مورد نیاز جهت کمپرسورها از خارج کشور مستلزم فرآیند دور زدن تحریم‌ها بوده که علاوه بر هزینه‌های بالا بعضاً مستلزم صرف زمان قابل ملاحظه هم هست. (ه) حل مشکلات صنعتی کشور با روش‌های مبتنی بر تولید دانش بومی و جلوگیری از خروج ارز و پایداری در ارائه خدمات نیز می‌تواند بر اهمیت این موضوع بیافزاید.

لیه‌ها و هوانگ و همکاران در مقاله‌ای که ارائه دادند، دریافته‌اند که ناپایداری در چرخه تبرید، موجب سخت شدن کنترل سیستم شده و راندمان سیستم را کاهش می‌دهد. در مقاله‌ایشان، پایداری شیر انبساط چرخه تبرید در یک تبخیرکننده خشک در نزدیکی "درجه فوق گرم صفر" مورد مطالعه قرار گرفت. در گام اول، برای اندازه‌گیری "درجه سوپریت صفر"، یک سنسور ویژه طراحی شد که می‌تواند حالت‌های جریان مبرد را تشخیص دهد. بنابراین، مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگر حرارتی می‌توانند به‌عنوان سیگنال بازخورد برای سیستم EVDE استفاده شوند. در گام دوم، آن‌ها ثابت کردند که یک جریان مخلوط مایع اشباع و بخار وجود دارد که از ورودی تبخیرکننده عبور می‌کند و در فاز گذار است و وقتی که فرکانس ۷۰ Hz و مقدار باز شدن دریچه انبساط برابر ۲۷٪ بود، الگوی جریان دائماً بین دو فاز تغییر می‌کند که منجر به نوسان دوره‌ای سیستم می‌شود (برای مثال: دمای تبخیر، دمای مکش و دمای تخلیه دائماً در حال تغییر هستند). علاوه بر این، افزایش سرعت جریان مبرد باعث کاهش نوسانات دوره‌ای می‌شود و هنگامی که فرکانس کمپرسور ۷۰ Hz و باز شدن دریچه انبساط کمتر از ۲۲٪ بود، جریان در خروجی

قابل پیش‌بینی است که ورود سیال به‌صورت مایع به کمپرسور به‌دلیل تراکم‌ناپذیر بودن مایعات موجب آسیب‌دیدگی کمپرسور و شکست‌های مکانیکی^۱ می‌شود. به این پدیده برگشت مایع مبرد^۲ گفته می‌شود. این پدیده هنگامی رخ می‌دهد که مبرد در تبخیرکننده گرمای لازم را جهت تبدیل شدن به بخار جذب نکرده و به‌صورت مایع اشباع همراه بخار اشباع وارد کمپرسور شود. این پدیده معمولاً در فصل‌هایی که هوا خنک‌تر است بیشتر اتفاق می‌افتد و پدیده‌ای مخرب و شایع در بهره‌برداری از چیلرهای تراکمی است.

اهمیت و ضرورت این موضوع از دو منظر اقتصادی و فنی قابل ارزیابی است و این اهمیت وقتی پررنگ‌تر می‌شود که با سیستم‌های سرمایه‌گذاری تراکمی با ظرفیت‌های بالا و در مقیاس صنعتی مواجه باشیم. طراحی و ساخت سیستم محافظت از کمپرسور در مقابل پدیده برگشت مایع مبرد، با توجه به دلایل ذکر شده زیر از نظر فنی دارای توجیه و از نظر اقتصادی به‌صرفه است:

الف) تهیه کمپرسور جدید خصوصاً در ظرفیت‌های بالا مستلزم هزینه‌های هنگفت از طرف بهره‌بردار است.

ب) کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات از اهداف هر بهره‌بردار است که هزینه‌های نگهداری و تعمیرات کمپرسور شامل هزینه‌های بهره‌بردار جهت تهیه اقلام یدکی، پرداخت دستمزد استادکاران، هزینه‌های بارگیری/حمل/تخلیه، هزینه‌های ناشی از ضرر توقف تولید/خدمات هست.

ج) با توجه به اینکه تمام سیستم‌های تهویه مطبوع تراکمی با ظرفیت بالای کشور ساخت خارج و در سال‌های گذشته مورد نصب و بهره‌برداری قرار گرفته‌اند، اکثراً در برابر پدیده برگشت مایع مبرد یا فاقد سیستم حفاظتی هستند یا دارای سیستم حفاظتی مکانیکی (شیرهای انبساط ترموستاتیک) هستند که در شیرهای انبساط ترموستاتیک هم به‌واسطه ماهیت حفاظت مکانیکی همواره احتمال

1. Mechanical Failures

2. Flood Back

برای ساکنین ساختمان و خرابی مکانیکی کمپرسورها می‌شود. تشخیص خطا و تشخیص جریان برگشتی مایع در مرحله اولیه برای دستگاه‌هایی با مبرد جریان متغیر (VRF) ضروری است. این مطالعه مدل‌های درخت‌واره‌های تصمیم‌گیری را برای شناسایی و تشخیص عیب پدیده مایع به کمپرسورهای اسکرال در یک سیستم VRF پیشنهاد می‌کند. در آن تحقیق ابتدا انتخاب ویژگی از طریق تحلیل همبستگی برای حذف متغیرهای غیرضروری انجام شد. سپس، الگوریتم درخت تصمیم (CART) برای تهیه مدل‌های درخت‌واره تصمیم‌گیری برای تشخیص عیب برگشت جریان مایع استفاده شد. در نهایت، دو عیب که باعث برگشت مایع می‌شوند مورد بررسی قرار گرفتند و یک مدل Cart برای تشخیص عواملی که باعث آن دو عیب می‌شود مورد بهره‌برداری قرار گرفت. مدل درخت‌واره تصمیم‌گیری (CART) عملکرد مطلوبی در پیش‌بینی و جلوگیری از پدیده برگشت جریان مایع نشان داد و قوانین استخراج شده از دو مدل داده محور در توافق با حوزه دانش شناخته شده بودند [۳].

ژو ژنژین و همکاران در تحقیقی یک سیستم تشخیص عیب برگشت جریان مبرد را برای سیستم تهویه مطبوع بررسی کردند و متوجه شدند که بازگشت مایع مبرد به درون کمپرسور نه تنها می‌تواند عملکرد سیستم‌های VRF را کاهش دهد بلکه ممکن است حتی باعث ایجاد خرابی مکانیکی شود. بنابراین، ضروری است که این پدیده به صورت آنلاین مورد پایش و شناسایی قرار گیرد. آن‌ها در این پژوهش یک روش تشخیص و رفع عیب جهت پدیده بازگشت مایع به کمپرسور در سیستم‌های تهویه مطبوع VRF براساس شبکه عصبی (BPNN) ارائه دادند که خلأ دانش در این حوزه را پر می‌کند. در مرحله اول، سنسورهای موجود در سیستم VRF داده‌ها را هر سه ثانیه ذخیره می‌کنند تا مجموعه داده‌های خام را تشکیل دهند.

تبخیرکننده به جریان بخار بیش از حد گرم شده (سوپر هیت) تبدیل می‌شود. هنگامی که باز شدن دریچه انبساط بیش از ۲۳٪ بود، جریان به جریان بخار اشباع تبدیل می‌شود. دو الگوی جریان به‌طور متناوب ایجاد می‌شوند که منجر به نوسان دمایی مکش می‌شود. نتایج نشان داد که چرخه تبرید EVDE می‌تواند به‌طور پایدار در نزدیکی "درجه سوپر هیت صفر" کنترل شود. همچنین، می‌تواند کارآیی تبخیرکننده و ایمنی کمپرسور را به سمت بهینه‌سازی هدایت کند [۱]. گوانان لی و همکاران طی تحقیقی مقاله‌ای ارائه دادند که در این مقاله یک روش تشخیص عیب مبتنی بر درخت‌واره بهبود یافته تصمیم‌گیری برای دستگاه‌هایی با جریان متغیر مبرد (VRF) ارائه شده است. روش پیشنهادی روشی سه مرحله‌ای است که ترکیبی از مدل درخت‌واره تصمیم‌گیری با سنسورهای عیب‌یاب مجازی FI است. در گام اول، سنسورهای تشخیص عیب براساس تئوری سنسورهای مجازی توسعه داده شدند تا بتوانند در سیستم‌های VRF عیوبی مثل رسوب گرفتگی، شارژ بیش از حد گاز، کم شارژ شدن و ... را تشخیص دهند. در گام دوم، سنسورهای تشخیص عیب به‌عنوان متغیرهای ورودی اضافی به کار می‌روند تا تصمیم‌گیری پیش‌گویانه مبتنی بر درخت‌واره تصمیم‌گیری (CART) صورت پذیرد. اعتبارسنجی با استفاده از دو مجموعه داده مختلف، مجموعه داده‌های آزمایش تجربی و مجموعه داده‌های تست آنلاین انجام می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که این روش به‌درستی سه عیب یعنی رسوب گرفتگی، شارژ بیش از حد گاز، کم شارژ شدن را کاملاً تشخیص می‌دهد. نتایج مقایسه‌ای نشان می‌دهد که روش پیشنهادی عملکرد تشخیص خطای بهتری را برای مجموعه داده‌های آزمایشی و برخط دارد [۲]. جیانگیو وانگ و همکاران طی تحقیق دریافتند که برگشت مایع مبرد به درون کمپرسور سیستم‌های تهویه مطبوع منجر به عواقب منفی مانند مصرف انرژی اضافی، احساس عدم راحتی

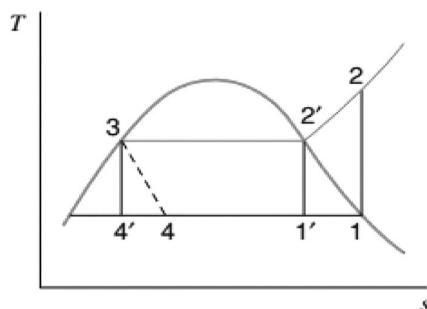
انرژی کمتری نسبت به دو روش دیگر نشان داد [۵]. این مقاله می‌کوشد که دو هدف کاربردی را دنبال نماید: الف) طراحی و ساخت سیستم محافظت از کمپرسورهای جابه‌جایی مثبت در برابر ورود مایع مبرد جهت سیستم‌های سرمایش تراکمی نصب‌شده که تمهیداتی جهت جلوگیری از این پدیده ندارند. ب) محافظت از سیستم‌های سرمایش تراکمی که مجهز به تجهیزات مکانیکی جلوگیری کننده از برگشت مایع مبرد هستند زیرا در تحقیقات مختلف برتری روش پردازش الکترونیکی بر حفاظت مکانیکی اثبات شده و احتمال خطا در سیستم‌های حفاظت کاملاً مکانیکی همواره وجود دارد. از این‌رو، در بخش بعدی روش‌شناسی تحقیق ارائه می‌شود و سپس در بخش سوم، نتایج مقاله مورد بحث قرار گرفته و نهایتاً در بخش آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادهای مرتبط ارائه می‌شود.

روش اجرای تحقیق

معرفی سیکل تبرید چیلرهای تراکمی

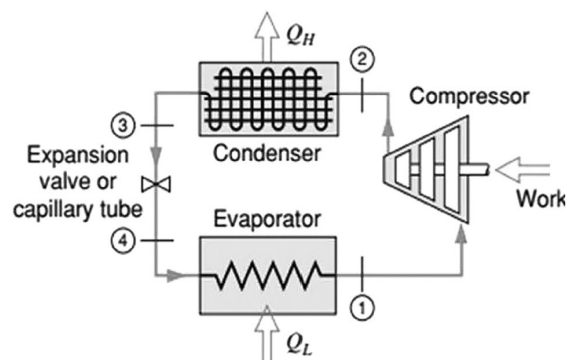
سیکل ایده‌آل تبرید تراکمی بخار

همان‌طور که در اشکال ۱ و ۲ مشخص است، سیکل ایده‌آل تراکمی بخار در نقطه ۱، بخار اشباع در فشار پایین وارد کمپرسور می‌شود و طی فرآیند ۱-۲ که یک فرآیند ایزنتروپیک (آنتروپی ثابت) است، با صرف کار مورد نیاز، دما و فشار مبرد افزایش می‌یابد تا به بخار سوپرهیت تبدیل شود.



شکل ۲ نمودار T-S سیکل تبرید تراکمی بخار ایده‌آل

در مرحله دوم، پس از پیش پردازش مجموعه داده‌های خام، از تجزیه و تحلیل همبستگی برای فیلتر کردن متغیرهای داده استفاده می‌شود. در مرحله سوم، مدل BPNN با استفاده از الگوریتم شبکه عصبی انتشار مجدد ایجاد می‌شود. برای تأیید اعتبار مدل از مجموعه داده‌های به‌دست آمده از آزمایش استفاده شد. از مجموعه داده‌های آنلاین به‌دست آمده برای تست قابلیت اعتماد به سیستم تشخیص عیب استفاده شد و نتایج آن نیز با مدل CART مقایسه و تحلیل شد. این نتیجه نشان می‌دهد که روش BPNN دارای قابلیت اطمینان بالا است و دقت تشخیص عیب آنلاین آن حداکثر ۹۹/۴۸٪ است. مقایسه نتایج حاصل از روش‌های BPNN و CART نشان می‌دهد که روش BPNN بر روش CART برتری دارد [۴]. اورهان اکرن و همکاران در مورد روش‌های مختلف کنترل شیرهای انبساط الکترونیکی در کمپرسورهای با سرعت متغیر تحقیق کردند. آن‌ها یک چیلر با کمپرسور اسکرال و شیر انبساط مجهز به استپ موتور تحت بررسی قرار دارند. دو روش مختلف برای کنترل شیر انبساط و کنترل دور کمپرسور اعمال شد. یکی کنترل هر قسمت به‌صورت جداگانه درحالی‌که قسمت دیگر روی یک مقدار ثابت تنظیم شده است و روش دیگر کنترل هر دو قسمت هم‌زمان. از سه روش منطق فازی، شبکه عصبی ANN و روش PID جهت کنترل استفاده شد که روش شبکه مصنوعی عصبی مصرف



شکل ۱ شماتیک سیکل تبرید تراکمی بخار ایده‌آل

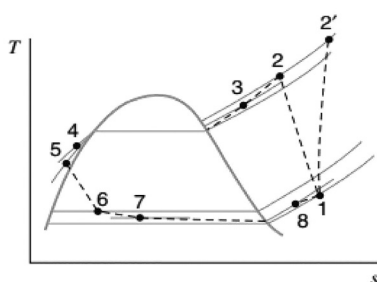
تبرید تراکمی بخار و شکل ۴ بیانگر نمودار T-S در این خصوص است [۶].

۲-۱ و ۱-۲ بخار سوپر هیت خروجی از تبخیرکننده طی فرآیند تراکم آیزنتروپیک فشار و دمای آن افزایش پیدا می‌کند لذا در کمپرسور امکان دارد از محیط پیرامون گرما دریافت کند و آنتروپی آن افزایش و فرآیند ۲-۱ را طی کند، یا به محیط پیرامون گرما دهد و آنتروپی آن کاهش و فرآیند ۲-۱ را روی نمودار طی کند.

۳-۲: از خروجی کمپرسور تا ورودی به کندانسور، گاز سوپر هیت با عبور از لوله‌کشی دچار افت فشار اصطکاکی می‌شود و فشار به صورت جزئی کاهش می‌یابد.

۳-۴: عبور سیال مبرد از لوله‌کشی کندانسور با فشار ثابت نبوده و به دلیل اصطکاک و تغییر جهت جریان فشار در نقطه ۴ کمتر از فشار در نقطه ۳ است. طراحی کندانسور به گونه‌ای است که سرد کردن مبرد تا دمایی کمتر از دمای اشباع ادامه یابد. این طراحی موجب افزایش ظرفیت سرمایش سیکل می‌گردد. همان‌طور که از نمودار پیداست مبرد در نقطه ۴ به صورت مایع فرو سرد است.

۴-۵: افت فشار ناشی از اصطکاک لوله ارتباطی بین کندانسور تا شیر فشارشکن/لوله مویین و همچنین، از دست دادن گرما به محیط در لوله‌کشی این مسیر موجب کاهش دما و تا حدودی کاهش فشار از نقطه ۴ به نقطه ۵ می‌گردد. به اختلاف دمای بین نقطه ۵ که نقطه ورود به شیر فشارشکن/لوله مویین است با دمای اشباع در همین فشار درجه فوق سرد گفته می‌شود.

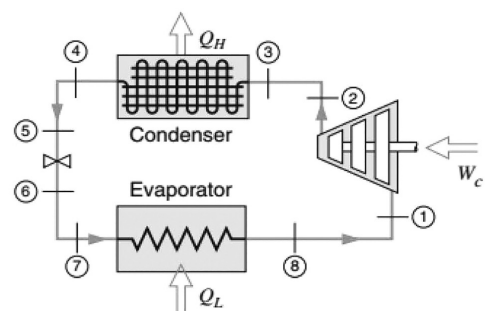


شکل ۴ نمودار T-S سیکل تبرید تراکمی بخار واقعی

سپس طی فرآیند ۲-۳، بخار سوپر هیت از کندانسور عبور کرده و به صورت فشار ثابت گرمای خود را با محیط گرم مبادله و دمای آن کاهش می‌یابد و به مایع اشباع تبدیل می‌شود. در مرحله ۳-۴ مایع اشباع که فشار بالایی دارد با گذر از شیر فشارشکن یا لوله مویین به صورت آنتروپی ثابت دچار کاهش فشار و کاهش دما می‌گردد و به مخلوط مایع و بخار اشباع در فشار پایین تبدیل می‌شود، اما معمولاً فرآیند در شیر انبساط یا لوله مویین به صورت آیزنتروپیک طی نمی‌شود و با افت فشار اصطکاکی و دینامیکی و انتقال گرما روبرو بوده لذا به صورت ۳-۴ طی می‌شود. سپس طی فرآیند ۴-۱، مخلوط مایع و بخار اشباع از تبخیرکننده عبور کرده و به صورت فشار ثابت گرمای خود را با محیط مبادله و دمای آن افزایش می‌یابد و کاملاً به بخار اشباع تبدیل می‌شود [۶].

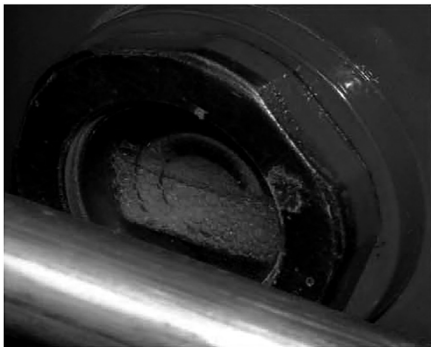
سیکل واقعی تبرید تراکمی بخار و انحراف از سیکل ایده‌آل

دو دلیل اصلی وجود دارد که باعث انحراف سیکل واقعی از سیکل ایده‌آل می‌شود. دلیل اول افت فشار در لوله‌کشی، شیرآلات و تجهیزات است که این نوع افت فشار خود دو دلیل دارد اول اصطکاک بین سیال و سیستم و دوم، افت فشارهای دینامیکی ناشی از تغییر جهت و رژیم جریان است. دلیل دوم انحراف سیکل ایده‌آل از سیکل واقعی وجود انتقال گرما بین سیال و محیط پیرامون است. در مجموع، این دو دلیل باعث بازگشت ناپذیری فرآیند می‌گردند. شکل ۳ نمایشگر شماتیک سیکل واقعی



شکل ۳ شماتیک سیکل تبرید تراکمی بخار واقعی

اینکه مبرد با چه درجه‌ای از کیفیت وارد کمپرسور شود آسیبی که به کمپرسور می‌رسد متفاوت خواهد بود. لذا، معمولاً برگشت مایع مبرد از دریچه دید روغن کمپرسور به‌صورت کف کردن روغن (فوم روغن) مطابق شکل ۵ مشاهده می‌شود [۷].



شکل ۵ فوم روغن قابل مشاهده از شیشه نمایشگر محفظه روغن

اگر ذرات مایع وارد محفظه سیلندر شوند روانکاری بین سیلندر و پیستون را از بین می‌برند و باعث خراشیدگی و گرمای بیش از اندازه در سیلندر می‌گردند و همچنین، ذرات ریز فلز ایجاد شده در محفظه موتور پخش می‌شوند. مادامی که مایع مبرد با روغن مخلوط می‌گردد باعث رقیق شدن روغن می‌شود که این رقیق شدن باعث کاهش کیفیت روانکاری می‌شود. هنگامی مخلوط روغن و مبرد به دیواره سیلندر و پیستون و یا یاتاقان‌ها می‌رسد به‌دلیل گرمای ناشی از اصطکاک مبرد بخار می‌شود و فشار بخار مبرد مانع رسیدن روغن به سطوح مورد نیاز می‌شود. گاهی یاتاقان اصلی به‌قدری تحت تأثیر این پدیده قرار می‌گیرد که چرخانه و ایستانه باهم تماس پیدا می‌کنند و می‌سوزند. همچنین، خشک شدن یاتاقان ژورنال واقع در بین دسته پیستون و میل‌لنگ باعث می‌شود بر اثر گرما این دو بهم جوش بخورند که در شکل ۶ این موضوع نمایش داده شده است [۷]. از بین رفتن روانکاری باعث فشار بین میل‌لنگ و دسته پیستون می‌شود.

۵-۶: مبرد سابکول با عبور از شیر فشارشکن / لوله مویین با کاهش فشار و دما روبرو می‌شود و از مایع سابکول به مایع اشباع تبدیل می‌گردد. البته این فرآیند در عمل به‌صورت آنتروپی ثابت اتفاق نمی‌افتد.

۶-۷: مایع اشباع با گذر از تبخیرکننده دچار افت فشار جزئی ناشی از اصطکاک و افت فشار دینامیکی می‌گردد.

۷-۸: مایع اشباع در تبخیرکننده و در فشار ثابت گرمای محیط سرد را جذب می‌کند و کاملاً به بخار اشباع تبدیل می‌گردد. قابل ذکر است طراحی تبخیرکننده به‌گونه‌ای است روند دریافت گرما ادامه پیدا کرده و مایع اشباع چند درجه گرم‌تر شده و به بخار سوپر هیت تبدیل می‌شود. سپس، تبخیرکننده را ترک می‌کند. به اختلاف دما در نقطه ۸ با دما اشباع در همان فشار درجه سوپر هیت می‌گویند.

۸-۱: بخار سوپر هیت خروجی از تبخیرکننده با عبور از لوله‌کشی مربوطه وارد کمپرسور می‌گردد که در طی این مسیر دچار افت فشار جزئی ناشی از اصطکاک و افت فشار دینامیکی می‌گردد. با ورود مبرد به کمپرسور سیکل کامل می‌شود [۶].

دلایل عمده خرابی کمپرسور سیستم‌های سرمایش

شرکت معتبر ساخت صنایع سرمایشی دانفوس موارد زیر را به‌عنوان دلایل عمده خرابی کمپرسورها دلیل ذکر می‌کند [۷]:

برگشت مایع مبرد^۱

با توجه به شکل ۴ طی فرآیند ۷-۸ در صورتی که مبرد گرمای کافی را از محیط سرد جذب نکند به‌صورت مایع اشباع از تبخیرکننده خارج می‌شود. لذا در نقطه ۸، مایع اشباع خواهیم داشت و مبرد به‌صورت مایع اشباع به کمپرسور وارد می‌شود. ورود مایع اشباع به کمپرسور منجر به آسیب مکانیکی زیادی به این تجهیز می‌گردد. ورود مبرد به‌صورت مخلوط اشباع به‌همراه قطرات مایع مبرد به مکش کمپرسور را برگشت مایع مبرد گویند. وابسته به



شکل ۶ جوش خوردن دسته پیستون به یاتاقان ژورنال میل لنگ بر اثر ایجاد فوم روغن

حافظه کافی در میکروکنترلر دارد که منجر به پیچیده‌تر شدن برنامه‌نویسی و بیشتر شدن زمان پردازش می‌شود. چارتر و سادافی جهت پیش‌بینی خواص ترمودینامیکی گاز R22 در حالت اشباع رابطه ۱ را ارائه دادند که از این رابطه جهت فرمول نویسی کنترلر این پروژه استفاده شد [۹].

$$T=A+B.P+C.P^2+D.P^3+E.P^4 \quad (1)$$

در این رابطه T دما برحسب کلوین و P فشار مطلق برحسب MPa است و ثابت‌های این معادله مقادیر زیر هستند.

$$A= 211.086313649$$

$$B= 226.041423825$$

$$C= -272.618317551$$

$$D= 168.780972264$$

$$E= -38.0262189209$$

مطابق اعلام چارتر و سادافی این رابطه در بازه دمایی ۴۸/۸۵ تا ۵۳/۱۵ °C مقدار دمایی اشباع را محاسبه می‌کند و نسبت به مقدار واقعی در بیشترین حالت ۱/۲٪ خطا دارد که این مقدار خطا با توجه به ماهیت پروژه قابل چشم‌پوشی است.

نتایج و تحلیل

تجزیه و تحلیل این تحقیق به سه زیربخش تقسیم می‌شود:

که منجر به شکستن دسته پیستون و پرتاب شدن قطعات بزرگ شکسته شده به درون محفظه موتور می‌شود و نهایتاً موجب سوختن موتور می‌گردد.

ضربه زنی مایع^۱

در صورتی که پدیده‌های برگشت مایع مبرد و یا فلاد استارت^۲ به صورت شدید رخ دهد به آن ضربه‌زنی مایع گفته می‌شود که به معنی ورود مقدار زیادی مایع به کمپرسور است و علاوه بر آسیب‌های ناشی از برگشت مایع مبرد که پیش‌تر ذکر شد، آسیب شدید به شیر مکش، آسیب شدید به شیر تخلیه، خم شدن و از فرم خارج شدن ورق‌های شیر مکش و شیر تخلیه، شکستن میل‌لنگ و شکستن دسته پیستون می‌تواند رخ دهد [۷].

فلاد استارت

گاهی اوقات در حالتی که سیکل تبرید خاموش است مایع مبرد در محل محفظه میل‌لنگ تجمع می‌کند و با روشن کردن کمپرسور از مخلوط شدن روغن و مبرد، فوم روغن تشکیل شده و عوارضی مشابه برگشت مایع مبرد و ضربه‌زنی ایجاد می‌کند که به این پدیده، فلاد استارت می‌گویند.

معرفی رابطه فشار و دمایی اشباع

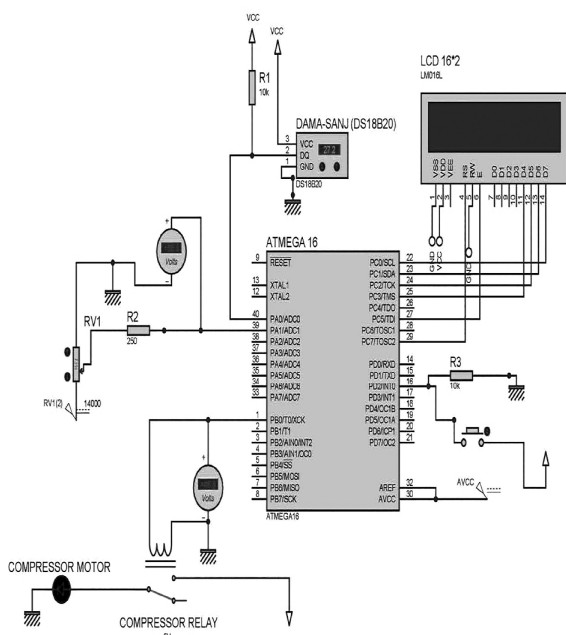
بوگرناک و زونتاک در کتاب مفاهیم بنیادی ترمودینامیک جداولی که معرف رابطه فشار اشباع و دمایی اشباع گاز R22 باشد را در قالب جداول خواص ترمودینامیکی ارائه داده‌اند. ولی جهت برنامه‌نویسی میکروکنترلر وارد کردن کامل جدول نیاز به فضای

1. Liquid Slugging

2. Flooded Start

روشن می‌کند. علت اینکه شروع به کار مجدد سیکل متوقف بر اجازه کاربر نهاده شده این است که اگر متوقف شدن سیکل چندین بار پشت سر هم اتفاق بیافتد کاربر از راه‌اندازی مجدد خودداری نموده و درصدد رفع عیب برحسب مورد برآید. درواقع، ۱۵ min وقفه فرصت دادن به مایع مبرد جهت مبادله گرما و تبدیل شدن به بخار است. کدنویسی کنترلر

برای این تحقیق از میکروکنترلرهای AVR، میکروکنترلر ATMEGA16 انتخاب شد و کد نویسی این کنترلر براساس زبان بیسیک و نرم‌افزار کد نویسی BASCOM صورت پذیرفت. به‌منظور اطمینان از صحت عملکرد میکروکنترلر در مدار، پیش از ساخت نمونه واقعی ابتدا مدار در نرم‌افزار شبیه‌سازی پروتئوس شروع می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است به درگاه ورودی و خروجی B0 علاوه‌بر رله، یک نمایشگر ولتاژ وصل شده است تا در هنگام اجرای شبیه‌سازی کاربر متوجه مقدار ولتاژ اعمال شده توسط میکروکنترلر شود.

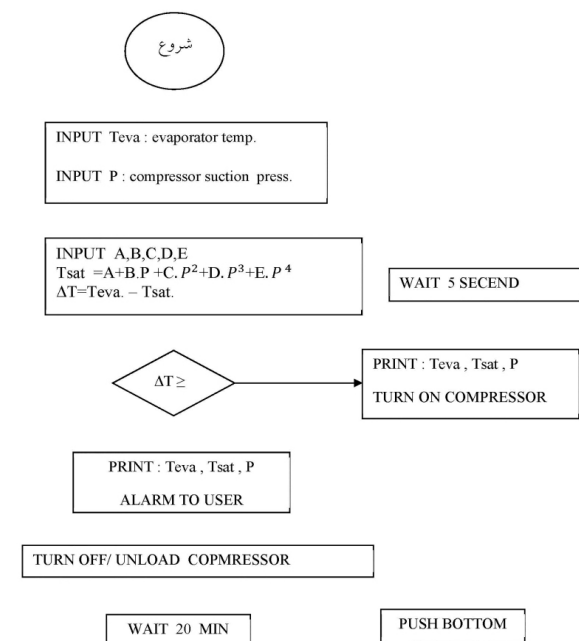


شکل ۸ نقشه مدار (شبیه‌سازی در نرم‌افزار پروتئوس)

۱- نرم‌افزار و کد نویسی: در این بخش فلوجارت و کدنویسی به‌همراه توضیحات تکمیلی ارائه شده است. ۲- سخت‌افزار، آزمایش و راه‌اندازی: در این بخش کلیه سخت‌افزارها به کار رفته به‌همراه مزایا و محدودیت‌ها معرفی می‌گردد. همچنین، توضیحات مربوط به آزمایش و راه‌اندازی ذکر شده است. ۳- بررسی فنی/اقتصادی: در این بخش به بررسی جنبه‌های اقتصادی پروژه پرداخته می‌شود.

نرم‌افزار و کدنویسی

همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است کنترلر به جهت پایداری بیشتر هر ۵ s وضعیت درجه سوپرهیت دستگاه را چک می‌کند و در صورتی که دستگاه مقدار سوپرهیت لازم را نداشته باشد به کاربر هشدار داده و در کمپرسورهایی که شیر بی بار کننده دارند کمپرسور را بی بار و در کمپرسورهایی که شیر بی بار کننده ندارند، کمپرسور را خاموش می‌کند. بعد از بی‌بار/خاموش کردن کمپرسور ۲۰ min وقفه اتفاق می‌افتد و سپس در صورتی که کاربر اجازه دهد (کلید مربوطه را فشار دهد) مدار پایش از نو شروع به کار می‌کند و اگر که مقدار سوپرهیت از مقدار تعریف شده بیشتر بود کمپرسور را



شکل ۷ روندنما و منطق تصمیم‌گیری

در این پروژه از مدل ATMEGA-16 استفاده شد که با دستور regfile در برنامه‌نویسی قید شده است. براساس توصیه ورق داده میکروکنترلر ATMEGA-16 مقدار کریستال متناسب در دستور crystal ذکر شده است.

۳- تعریف LCD کاراکتری از نوع ۱۶*۲ و تست نرم‌افزاری آن:

```
Config Lcdpin = Pin , Rs = Portc.7 , E = Portc.5 , Db4
= Portc.3 , Db5 = Portc.2 , Db6 = Portc.1 , Db7 =
Portc.0
```

```
Config Lcd = 16 * 2
```

```
Cursor Off
```

```
LCD "LCD TEST DONE"
```

```
WAITMS 500
```

```
Cls
```

به‌منظور نمایش خروجی پردازش نیاز است که نمایشگر در برنامه‌نویسی میکروکنترلر تعریف شود. لذا با اختصاص درگاه ورودی و خروجی C میکروکنترلر به نمایشگر، پین‌های نمایشگر به درگاه ورودی و خروجی‌های C7, C5, C3, C2, C1, C0 وصل شد. همچنین با توجه به اینکه خود نمایشگر ممکن است در طول مدت بهره‌برداری دچار عیب شود یک دستور تست نمایشگر پیش از اجرای برنامه اجرا می‌شود تا در صورتی که نمایشگر معیوب است بهره‌بردار به‌راحتی متوجه شود.

۴- تعریف سنسور دما:

```
Config 1wire = Porta.0
```

```
Dim Temperature As String * 6
```

```
Dim Buffer As Integer
```

```
RECHECK:
```

```
1wreset
```

```
1wwrite &HCC
```

```
1wwrite &H44
```

```
Waitms 100
```

```
1wreset
```

```
1wwrite &HCC
```

همچنین با توجه به اینکه نرم‌افزار پروتئوس سنسور فشار ویکا را در کتابخانه خود به‌صورت تعریف شده ندارد می‌بایست با استفاده از المان‌های موجود در نرم‌افزار، این سنسور شبیه‌سازی الکتریکی شود. با توجه به اینکه سنسور فشار ویکا در فشارهای مختلف جریانی بین ۴ تا ۲۰ mA تولید می‌کند با عبور دادن این جریان از یک مقاومت متغیر پالس فرستاده شده از شدت جریان به ولتاژ تبدیل می‌گردد که برای میکروکنترلر قابل اندازه‌گیری است. لذا از یک منبع ولتاژ به‌همراه یک مقاومت متغیر و یک نمایشگر ولتاژ جهت شبیه‌سازی سنسور فشار استفاده شده است.

کدنویسی مطابق آنچه در زیر آمده است انجام و به میکروکنترلر منتقل گردید:

۱- متغیرهای مورد استفاده:

همان‌طور که ذکر شد محاسبه دمای اشباع توسط میکروکنترلر مستلزم برنامه‌نویسی همه جداول ترمودینامیکی گاز R-22 به اضافه فرمول‌های میان‌یابی مربوطه برای مقادیر بینابینی است که این امر به نوبه خود نیازمند میکروکنترلی با حافظه کافی برای این منظور است که مسلماً هزینه بیشتری را جهت تهیه میکروکنترلر مطالبه می‌کند. لذا با استفاده از فرمول، حجم محاسبات کاسته شده و میکروکنترلر ATMEGA-16 که در بازار ایران به فراوانی یافت می‌شود پاسخ‌گوی نیاز خواهد بود. به‌منظور استفاده از فرمول مذکور در کد نویسی نیازمند متغیری هستیم که تا ۱۰ رقم اعشار دقت داشته باشد. لذا، متغیر DOUBLE در برنامه‌نویسی استفاده شد. از متغیرهای SINGLE و INTEGER برای اعداد دیگر که نیازمند دقت تا ۱۰ رقم اعشار نیستند و از متغیر STRING برای حروف استفاده شد.

۲- تعریف میکروکنترلر و کریستال متناسب:

```
$regfile = "m16def.dat"
```

```
$crystal = 1000000
```

با توجه به حافظه مورد نیاز جهت برنامه‌نویسی

سیگنال خروجی فشارسنج از نوع آنالوگ است. لذا، از تبدیل آنالوگ به دیجیتال میکروکنترلر استفاده گردید. همچنین، از یک منبع ۵ V خارجی جهت ولتاژ رفرنس استفاده شد. درخصوص تبدیل آنالوگ به دیجیتال در بخش بعد به صورت مفصل و با ذکر فرمول‌های مربوطه بحث خواهد شد.

۶- تعریف فرمول جهت محاسبه درجه سوپر هیت:

```
DIM A AS DOUBLE
DIM B AS DOUBLE
DIM C AS DOUBLE
DIM D AS DOUBLE
DIM E AS DOUBLE
DIM T AS DOUBLE
DIM Tsat AS DOUBLE
DIM T1 AS DOUBLE ,T2 AS DOUBLE ,T3 AS
DOUBLE ,T4 AS DOUBLE, T5 AS DOUBLE
A=211.086313649
B=226.041423825
C=-272.618317551
D=168.780972264
E=-38.0262189209
T1=A
T2=B*P
T3=C*P : T3=T3*P
T4=D*P : T4=T4*P : T4=T4*P
T5=E*P : T5=T5*P : T5=T5*P : T5=T5*P
T=T1 : T=T+T2 : T=T+T3 : T=T+T4 : T=T+T5
Tsat=T-273.15
DIM tsat2 as single
tsat2=tsat
lcd "Tsat=";Tsat2
waitms 1000
cls
DIM deltaT AS single
deltaT=T22-Tsat2
cls
```

```
lwwrite &HBE
Buffer = lwwread(2)
Buffer = Buffer * 10 : Buffer = Buffer \ 16
Temperature = Str(buffer)
DIM Tin as DOUBLE
Tin =VAL (Temperature) : Tin=Tin*0.1
dim T22 as single
T22=Tin
cls
lcd "T-evap=";T22
waitms 500
cls
درگاه ورودی و خروجی A میکروکنترلر به سنسور دما
اختصاص داده شد و به دلیل اینکه سنسور دما دارای
میکروکنترلر داخلی است لذا سیگنال خروجی دما
به صورت دیجیتال بوده و نیاز به تبدیل آنالوگ به
دیجیتال ندارد و می‌بایست با ارتباط از نوع I2C
که مربوط به ارتباط بین دو میکروکنترلر است،
میکروکنترلر داخلی سنسور دما به میکروکنترلر
اصلی پروژه وصل شود.
۵- معرفی فشارسنج:
CONFIG ADC=single , PRESCALER=AUTO , REF-
ERENCE=AVCC
START ADC
DIM P0 AS WORD
DIM P1 AS single
DIM P as double
CLS
P0=GETADC(1)
P1=P0: p1=p1*0.00195838: P1=P1-0.403827:
P1=P1+0.1013
P=P1
cls
LCD "P=";P1
WAITMS 500
cls
```

```
CONFIG PORTD.2=INPUT
```

```
IF PIND.2=1 THEN
```

```
GOTO RECHECK
```

```
END IF
```

```
LOOP
```

این حلقه LOOP/DO به منظور اینکه ادامه اجرای سیکل متوقف بر اجازه کاربر باشد نوشته شده است. با توجه به اینکه خاموش/روشن شدن مکرر سیستم موجب آسیب به سیستم می‌گردد. لذا، هدف از تعریف دستور LOOP این است بهره‌بردار از تعداد توقف‌ها مطلع بوده و شروع به کار دوباره کمپرسور متوقف بر اجازه بهره‌بردار است. توصیه می‌گردد در صورتی در یک ساعت سه بار سیستم محافظ وارد عمل شد و کمپرسور را خاموش کرد از روشن کردن مجدد سیستم تهویه مطبوع خودداری گردد.

۹- خاتمه شرط و پایان برنامه

```
END IF
```

```
END
```

دستور END IF جهت اتمام شرط و دستور جهت اتمام برنامه به کار می‌رود.

تبدیل سیگنال آنالوگ مربوط به فشار به سیگنال دیجیتال

سیگنال خروجی از سنسور فشار از جنس جریان الکتریکی بوده و از مقدار $0/004$ تا $0/02$ A به صورت خطی تغییر می‌کند یعنی سنسور در فشار 16 barg 0 جریان $0/004$ A را تولید و در فشار 16 barg جریان $0/02$ A را ارسال می‌کند. با توجه به اینکه میکروکنترلر توانایی سنجش ولتاژ را دارد با عبور جریان تولید شده از یک مقاومت ثابت می‌توان با استفاده از قانون اهم ولتاژ را به میکروکنترلر اعمال کرد. با فرض اینکه در فشار 16 barg مقدار 5 V روی پایه میکروکنترلر ایجاد شود (5 V بیشترین ولتاژ قابل تحمل برای میکروکنترلر است)، مقاومت مورد نیاز از قانون اهم به صورت زیر به دست می‌آید.

```
lcd "DELTA T=";deltaT
```

```
waitms 500
```

```
cls
```

با به دست آوردن فشار خط و دمای خط حال نوبت به محاسبه درجه سوپر هیت می‌رسد درجه سوپر هیت مطابق توصیه کتابچه شرکت دانفوس بین 6 تا 8 °C است که در این پروژه 6 °C در نظر گرفته شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود به جهت نیاز به دقتی معادل 10 رقم اعشار همه متغیرها از نوع DOUBLE انتخاب گردیده‌اند.

۷- تعریف شرط منطقی و صدور فرمان متناسب با شرط:

```
config portb.0=output
```

```
IF deltaT>6 THEN
```

```
set portb.0
```

```
LCD «TURN ON COMPRESSOR»
```

```
waitms 1000
```

```
cls
```

```
GOTO RECHECK
```

```
ELSE
```

```
reset portb.0
```

```
CLS
```

```
lcd «TURN OFF COMPRESSOR»
```

```
waits 1200
```

```
cls
```

در این بخش نرم‌افزار شرط $\Delta T > 6^\circ C$ را بررسی می‌کند در صورتی که شرط برقرار باشد میکروکنترلر با دستور set به درگاه ورودی و خروجی $b.0$ ولتاژ 5 V را اعمال می‌کند که این ولتاژ به یک رله 5 V اعمال شده و کمپرسور روشن می‌گردد (یا روشن می‌ماند) در غیر این صورت میکروکنترلر با دستور reset به درگاه ورودی و خروجی $b.0$ ولتاژ 5 V را اعمال می‌کند که این ولتاژ رله 5 V اعمال شده کمپرسور خاموش می‌شود و به مدت 20 min در اجرای سیکل وقفه ایجاد می‌شود

۸- تعریف وقفه در اجرای سیکل تازمانی که کاربر اجازه راه‌اندازی دوباره سیکل را بدهد:

```
DO
```

```
LCD" PUSH BOTTON"
```

```
waitms 1000
```

```
CLS
```

از حذف X بین رابطه ۵ و ۳ ارتباط بین فشار مطلق و ولتاژ اعمال شده به پایه میکروکنترلر به دست می‌آید:

$$P_{\text{absolute}} \text{ (MPa)} = 4 V \text{ (v)} - 0.298675 \quad (۶)$$

به وسیله رابطه ۶ می‌توان سنسور فشار را شبیه‌سازی الکتریکی نمود. با توجه به اینکه نرم‌افزار پروتئوس سنسور فشار ویکا اکو-۱ را به صورت پیش فرض ندارد، لذا می‌توان به جای اینکه مستقیماً فشار را اعمال کنیم با استفاده از رابطه ۶ فشار را تبدیل به ولتاژ و سپس ولتاژ را به میکروکنترلر اعمال کنیم. همچنین برای اینکه از صحت محاسبات انجام شده در میکروکنترلر اطمینان حاصل شود، از رابطه مذکور استفاده می‌شود.

سخت‌افزار، آزمایش و راه‌اندازی

میکروکنترلر ATmega ۱۶: از میکروکنترلر AVR به جهت فراوانی در بازار ایران، ظرفیت‌های برنامه‌نویسی متنوع، ظرفیت حافظه متنوع، سهولت در تهیه و قیمت مناسب و سهولت در برنامه‌نویسی و مونتاژ استفاده می‌گردد. همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است این میکروکنترلر دارای ۴ درگاه ورودی و خروجی بوده که در این پروژه از درگاه ورودی و خروجی A جهت اتصال دماسنج، فشارسنج و تبدیل آنالوگ به دیجیتال استفاده شده است.

$$V = I * R \quad (۲)$$

$$5 = 0.02 * R \Rightarrow R = 250 \Omega$$

حال با استفاده از مقاومت 250Ω و جریان 0.04 A که مربوط به فشار 0 barg است، کمینه ولتاژ نیز به دست می‌آید:

$$V = 0.004 * 250 \Rightarrow V = 1 \text{ V}$$

مبدل آنالوگ به دیجیتال به 5 V ولت عدد دیجیتال 1023 و به 0 V هم عدد دیجیتال 0 را اختصاص می‌دهد. با تناسب ساده می‌توان عدد دیجیتال جهت 1 V را به دست آورد:

$$5 \text{ (v)} / 1023 = 1 \text{ (v)} / X$$

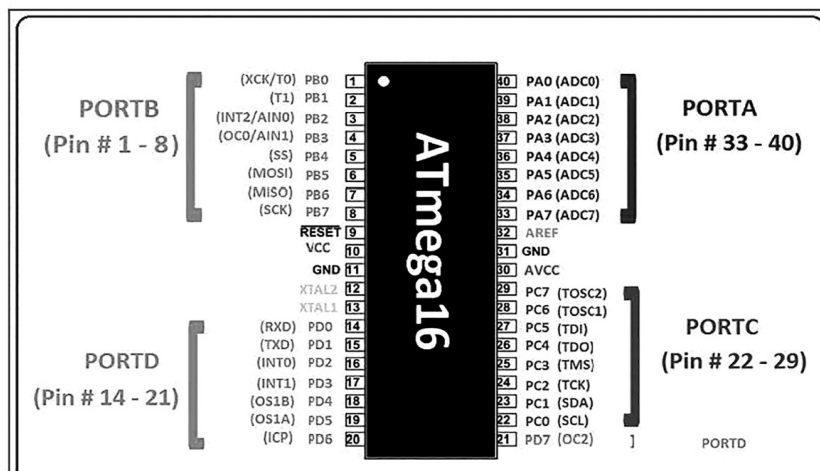
$$X = 204.6 \quad (۳)$$

با داشتن دو نقطه $(5 \text{ V}, 1023)$ و $(1 \text{ V}, 204.6)$ می‌توان رابطه خطی بین ولتاژ (V) و عدد دیجیتال $(X = 204.6 \text{ v})$ به دست آورد. با توجه به اینکه قبلاً 0 barg را متناظر با 1 V و 16 barg را هم متناظر با 5 V در نظر گرفته بودیم پس می‌توان رابطه خطی بین عدد دیجیتال و فشار را نیز از طریق دو نقطه $(16 \text{ barg}, 1023)$ و $(0 \text{ barg}, 204.6)$ به دست آورد. در رابطه زیر X عدد دیجیتال و P فشار بر حسب barg است.

$$P_{\text{gage}} \text{ (bar)} = 0.0195503421 X - 4 \quad (۴)$$

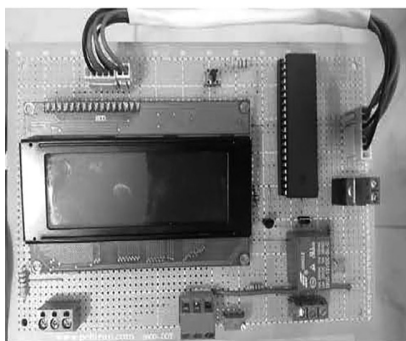
رابطه زیر X عدد دیجیتال و P فشار بر حسب MPa است.

$$P_{\text{absolute}} \text{ (MPa)} = 0.00195503421 X - 0.298675 \quad (۵)$$



شکل ۹ میکروکنترلر ATmega 16

- * کابل ضد آب و پرآب ضدزنگ
 - * ولتاژ تغذیه: $3/3$ تا $5/5$ V DC
 - * عدم نیاز به امان خارجی
 - * توانای تغذیه شدن با خطوط داده
 - * دما به صورت یک مقدار دیجیتال ۹ بیتی خوانده می شود.
 - * زمان تبدیل دما به یک عبارت دیجیتال 200 ms است.
 - * حداکثر زمان تبدیل و پاسخ گویی: 750 ms
 - * پروتکل ارتباطی 1-WIRE
 - * طول سیم واسط بین سنسور و میکرو می تواند تا حداکثر 7 m باشد.
 - ۳- تجهیزات الکترونیکی: دیگر تجهیزات الکترونیکی به کار رفته در ساخت مدار:
 - (a) نمایشگر LCD کاراکتری 2×16 جهت نمایش مقادیر محاسبه شده:
 - (b) رله 5 V: جهت قطع و وصل جریان کمپرسور که از پودمان رله 5 V و 10 A استفاده گردید
 - (c) برد سوراخ دار جهت مونتاژ در حالت آزمایشگاهی
 - (d) کلید شستی (PUSH BUTTON)
 - (e) منبع تغذیه 5 V
- شکل ۱۰** نمایشگر مدار دستگاه که به صورت کامل مونتاژ شده است



شکل ۱۰ سرهم کردن مدار دستگاه محافظت کننده

مورد مطالعاتی

مورد مطالعاتی این پروژه دستگاه چیلر تراکمی مدل کریر با ظرفیت 30 تن تبرید از نوع کندانسور هوا خنک بوده که در یک ساختمان اداری مورد

از درگاه ورودی و خروجی B جهت فرمان به رله و خاموش/ روشن کردن کمپرسور، و از درگاه ورودی و خروجی C جهت اتصال نمایشگر به میکروکنترلر استفاده شده است. از پین AVCC هم جهت ولتاژ رفرنس استفاده شده است. مهم ترین خصوصیات این میکرو با توجه به صفحه دیتا ارائه شده از طرف شرکت سازنده به شرح زیر است:

- * $4/5$ تا $5/5$ V برای میکروکنترلر Atmega16
- * 16 کیلوبایت حافظه فلش داخلی قابل برنامه ریزی که این حافظه می تواند تا 10000 بار نوشته و پاک شود (قابلیت آپلود برنامه نوشته شده بر روی سخت افزار تا 10000 بار)
- * 1 کیلوبایت حافظه SRAM
- * 512 بایت حافظه EEPROM این حافظه می تواند تا 1000000 بار نوشته و پاک شود
- فصل برنامه داخل حافظه eeprom و flash برای جلوگیری از خواندن آن (جهت حفاظت و کپی رایت)
- * هشت کانال مبدل آنالوگ به دیجیتال 10 بیتی (ADC)
- * دو تایمر/کانتر 8 بیتی (تایمر/ کانتر 0 و 2)
- * ماندگاری برنامه تا 20 سال در دمای 85°C درجه و 100 سال در دمای 25°C
- ۱- سنسور فشار WIKA مدل ECO-1:
 - در ادامه بخشی از مهم ترین خصوصیات این سنسور مطابق با ورق داده سازنده ذکر شده است.
 - * محدوده فشار کاری 0 تا 16 bar
 - * محدوده دمای کاری از 40°C تا 100°C
 - * خروجی به صورت جریان/ولتاژ
 - * جنس بدنه و قسمت های در تماس با سیال از فولاد ضدزنگ
- ۲- سنسور دما DS18B20:
 - در ادامه بخشی از مهم ترین خصوصیات این سنسور مطابق با ورق داده سازنده ذکر شده است.
 - * محدوده دمای قابل اندازه گیری: 55°C تا 125°C
 - * دقت اندازه گیری: $0/5$ درجه

هستند که زمینه‌ساز وقوع پدیده برگشت مایع مبرد به کمپرسور هستند. کنترل عوامل بالا برنده فشار تبخیرکننده و عوامل پایین آورنده دمای تبخیرکننده می‌تواند در پیش‌گیری از وقوع این پدیده مؤثر باشد.

بهره‌برداری قرار می‌گیرد. اطلاعات سیکل ترمودینامیکی چیلر تراکمی در فشارهای تبخیرکننده ۴۰ psig تا ۸۰ psig در **جدول‌های ۱-۵** ارائه شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت و از جداول صفحه بعد مشخص است بالا رفتن فشار تبخیرکننده و پایین آمدن دمای تبخیرکننده عواملی

جدول ۱ فشار تبخیرکننده ۴۰ psig و پارامترهای مربوطه

ردیف	فشار تبخیرکننده (psig)	فشار تبخیرکننده (MPa)	ولتاژ خروجی فشارسنج (V)	دمای تبخیرکننده (°C)	دمای اشباع مطابق جدول ترمودینامیکی (°C)	دمای اشباع محاسبه‌شده میکرو (°C)	درجه سوپرهیت (°C)	وضعیت کمپرسور
۱	۴۰	۰/۳۷۷۱	۱/۶۹۲۸	۲۵	-۸/۳	-۷/۳	+۳۲/۳	روشن
۲	۴۰	۰/۳۷۷۱	۱/۶۹۲۸	۲۰	-۸/۳	-۷/۳	+۲۷/۳	روشن
۳	۴۰	۰/۳۷۷۱	۱/۶۹۲۸	۱۵	-۸/۳	-۷/۳	+۲۲/۳	روشن
۴	۴۰	۰/۳۷۷۱	۱/۶۹۲۸	۱۰	-۸/۳	-۷/۳	+۱۷/۳	روشن
۵	۴۰	۰/۳۷۷۱	۱/۶۹۲۸	۵	-۸/۳	-۷/۳	+۱۲/۳	روشن
۶	۴۰	۰/۳۷۷۱	۱/۶۹۲۸	-۲	-۸/۳	-۷/۳	+۴/۳	روشن

جدول ۲ فشار تبخیرکننده ۵۰ psig و پارامترهای مربوطه

ردیف	فشار تبخیرکننده psig	فشار تبخیرکننده	ولتاژ خروجی فشارسنج	دمای تبخیرکننده (°C)	دمای اشباع مطابق جدول ترمودینامیکی (°C)	دمای اشباع محاسبه‌شده میکرو (°C)	درجه سوپرهیت (°C)	وضعیت کمپرسور
۱	۵۰	۰/۴۴۶۱	۱/۸۶۵۲	۲۵	-۳/۳	-۲	+۲۷	روشن
۲	۵۰	۰/۴۴۶۱	۱/۸۶۵۲	۲۰	-۳/۳	-۲	+۲۲	روشن
۳	۵۰	۰/۴۴۶۱	۱/۸۶۵۲	۱۵	-۳/۳	-۲	+۱۷	روشن
۴	۵۰	۰/۴۴۶۱	۱/۸۶۵۲	۱۰	-۳/۳	-۲	+۱۲	روشن
۵	۵۰	۰/۴۴۶۱	۱/۸۶۵۲	۵	-۳/۳	-۲	+۷	روشن
۶	۵۰	۰/۴۴۶۱	۱/۸۶۵۲	۳	-۳/۳	-۲	+۵	روشن

جدول ۳ فشار تبخیرکننده ۶۰ psig و پارامترهای مربوطه

ردیف	فشار تبخیرکننده psig	فشار تبخیرکننده	ولتاژ خروجی فشارسنج	دمای تبخیرکننده (°C)	دمای اشباع مطابق جدول ترمودینامیکی (°C)	دمای اشباع محاسبه‌شده میکرو (°C)	درجه سوپرهیت (°C)	وضعیت کمپرسور
۱	۶۰	۰/۵۱۵۰	۲/۰۳۷۵۲	۲۵	۱	۲/۴	+۲۲/۶	روشن
۲	۶۰	۰/۵۱۵۰	۲/۰۳۷۵۲	۲۰	۱	۲/۴	+۱۷/۶	روشن
۳	۶۰	۰/۵۱۵۰	۲/۰۳۷۵۲	۱۵	۱	۲/۴	+۱۲/۶	روشن
۴	۶۰	۰/۵۱۵۰	۲/۰۳۷۵۲	۸/۳	۱	۲/۴	+۵/۸۸	خاموش
۵	۶۰	۰/۵۱۵۰	۲/۰۳۷۵۲	۵	۱	۲/۴	+۲/۶	خاموش

جدول ۴ فشار تبخیرکننده ۷۰ psig و پارامترهای مربوطه

ردیف	فشار تبخیرکننده psig	فشار تبخیرکننده	ولتاژ خروجی فشارسنج	دمای تبخیرکننده (°C)	دمای اشباع مطابق جدول ترمودینامیکی (°C)	دمای اشباع محاسبه شده میکرو (°C)	درجه سوپرهیت (°C)	وضعیت کمپرسور
۱	۷۰	۰/۵۸۴۰	۲/۲۰۹۹	۲۵	۵/۱	۶/۲	+۱۸/۸	روشن
۲	۷۰	۰/۵۸۴۰	۲/۲۰۹۹	۲۰	۵/۱	۶/۲	+۱۳/۸	روشن
۳	۷۰	۰/۵۸۴۰	۲/۲۰۹۹	۱۵	۵/۱	۶/۲	+۸/۸	روشن
۴	۷۰	۰/۵۸۴۰	۲/۲۰۹۹	۱۰	۵/۱	۶/۲	+۳/۸	خاموش
۵	۷۰	۰/۵۸۴۰	۲/۲۰۹۹	۵	۵/۱	۶/۲	-۱/۲	خاموش

جدول ۵ فشار تبخیرکننده ۸۰ psig و پارامترهای مربوطه

ردیف	فشار تبخیرکننده psig	فشار تبخیرکننده	ولتاژ خروجی فشارسنج	دمای تبخیرکننده (°C)	دمای اشباع مطابق جدول ترمودینامیکی (°C)	دمای اشباع محاسبه شده میکرو (°C)	درجه سوپرهیت (°C)	وضعیت کمپرسور
۱	۸۰	۰/۶۵۲۹	۲/۳۸۲۳	۲۵	۸/۵	۹/۳	+۱۵/۶	روشن
۲	۸۰	۰/۶۵۲۹	۲/۳۸۲۳	۲۰	۸/۵	۹/۳	+۱۰/۶	روشن
۳	۸۰	۰/۶۵۲۹	۲/۳۸۲۳	۱۵	۸/۵	۹/۳	+۵/۶	خاموش
۴	۸۰	۰/۶۵۲۹	۲/۳۸۲۳	۱۰	۸/۵	۹/۳	+۰/۶	خاموش
۵	۸۰	۰/۶۵۲۹	۲/۳۸۲۳	۵	۸/۵	۹/۳	-۴/۴	خاموش

بررسی فنی - اقتصادی

اقتصادی به صرفه تر می کنند. در واقع، سیستم محافظ موضوع پروژه علاوه بر محافظت در برابر پدیده برگشت جریان، قادر خواهد بود وظایف بیشتری را انجام دهد.

برآورد هزینه تعمیرات

با توجه به توضیحات ارائه شده سیستم محافظت کننده کمپرسور در برابر پدیده برگشت جریان مایع و پودمان های تکمیلی از نظر فنی بررسی گردید و مشخص شد استفاده از بسته کامل محافظت و پایش سیکل سرمایه تیرید تراکمی از نظر فنی، بهترین گزینه برای بهره بردار است.

همچنین با ارائه جدول های مقایسه ای (جدول ۷ و ۸) گزینه های مختلف پودمان های تکمیلی مورد بررسی اقتصادی قرار گرفت. لذا برای انجام یک بررسی همه جانبه اقتصادی نیاز است هزینه هایی که به دلیل پدیده برگشت جریان مایع به کمپرسور صرف تعمیرات کمپرسورها می کند مورد بررسی قرار گیرد.

در این بخش از منظر اقتصادی به تحقیق پرداخته می شود و هزینه های ساخت دستگاه و هزینه های تعمیرات ناشی از پدیده برگشت جریان مایع بررسی می شود. هزینه های ساخت دستگاه به صورت نمونه آزمایشگاهی و بدون پودمان های تکمیلی در جدول ۶ ذکر شده است. بدیهی است ساخت در تیراژ بالا و به صورت صنعتی هزینه های کمتری را شامل می شود. قابل ذکر است استعلام قیمت ها در تیر ۱۳۹۹ و براساس واحد پولی تومان صورت گرفته است.

بررسی فنی - اقتصادی ساخت دستگاه به همراه پودمان های تکمیلی

پودمان های تکمیلی، تجهیزات سخت افزاری و تمهیدات نرم افزاری هستند که به سیستم محافظت کننده ساخته شده در این پروژه اضافه می شوند و قابلیت های بیشتری برای این سیستم ایجاد می کنند و استفاده از سیستم محافظ را از نظر

جدول ۶ هزینه‌های ساخت نمونه آزمایشگاهی دستگاه محافظت در برابر برگشت جریان مایع

ردیف	شرح	قیمت در تیر ۹۹ (تومان)
۱	سنسور دما DS18B20- ضد آب- با کابل سیلیکونی	۶۰/۰۰۰
۲	سنسور فشار WIKA مدل ECO-1	۱/۵۰۰/۰۰۰
۳	میکروکنترلر ATMEGA16	۶۰/۰۰۰
۴	رله قطع و وصل جریان کمپرسور	۳۰۰/۰۰۰
۵	چاپ مدار PCB	۱۳۰/۰۰۰
۶	منبع تغذیه ۵ V	۷۰/۰۰۰
۷	نمایشگر LCD کاراکتری	۳۰/۰۰۰
۸	دیگر اجزای الکترونیکی مطابق نقشه	۱۰۰/۰۰۰
	هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و آموزش و سود بازرگانی	۲/۰۰۰/۰۰۰
	مجموع	۴/۲۵۰/۰۰۰

جدول ۷ هزینه‌های ساخت دستگاه+ محاسبه‌گر توان و جریان الکتریکی

ردیف	شرح	قیمت در تیر ۹۹ (تومان)
۱	سنسور دما DS18B20- ضد آب- با کابل سیلیکونی	۶۰/۰۰۰
۲	سنسور فشار WIKA مدل ECO-1	۱/۵۰۰/۰۰۰
۳	پودمان محاسبه‌گر توان مصرفی	۲۰۰/۰۰۰
۴	سنسور جریان متناوب (حداکثر ۶۰ A)	۱۵۰/۰۰۰
۵	میکروکنترلر ATMEGA16	۶۰/۰۰۰
۶	رله قطع و وصل جریان کمپرسور	۳۰۰/۰۰۰
۷	چاپ مدار PCB	۱۳۰/۰۰۰
۸	منبع تغذیه ۵ V	۷۰/۰۰۰
۹	نمایشگر LCD کاراکتری	۳۰/۰۰۰
۱۰	دیگر اجزای الکترونیکی مطابق نقشه	۱۵۰/۰۰۰
۱۱	هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و آموزش و سود بازرگانی	۲/۰۰۰/۰۰۰
	مجموع	۴/۴۵۰/۰۰۰

جدول ۸ هزینه‌های ساخت بسته کامل محافظت و پایش سیکل سرمایه‌گذاری تراکمی

ردیف	شرح	قیمت در تیر ۹۹ (تومان)
۱	سنسور دما DS18B20- ضد آب- با کابل سیلیکونی	۱۲۰/۰۰۰
۲	سنسور فشار WIKA مدل ECO-1	۳/۵۰۰/۰۰۰
۳	پودمان محاسبه‌گر توان مصرفی	۲۰۰/۰۰۰
۴	سنسور جریان متناوب (حداکثر ۶۰ A)	۱۵۰/۰۰۰
۵	میکروکنترلر ATMEGA16	۶۰/۰۰۰
۶	رله قطع و وصل جریان کمپرسور	۳۰۰/۰۰۰
۷	چاپ مدار PCB	۱۳۰/۰۰۰
۸	منبع تغذیه ۵ V	۷۰/۰۰۰
۹	نمایشگر LCD کاراکتری	۳۰/۰۰۰
۱۰	دیگر اجزای الکترونیکی مطابق نقشه	۱۵۰/۰۰۰
۱۱	هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و آموزش و سود بازرگانی	۲/۷۹۰/۰۰۰
	مجموع	۷/۵۰۰/۰۰۰

شده برای تعمیر یک کمپرسور ۳۰ تن تبرید که فقط دچار عیوب مکانیکی شده مبلغ ۸/۰۰۰/۰۰۰ تومان است و در صورتی که علاوه بر عیوب مکانیکی، موتور الکتریکی کمپرسور هم آسیب ببینند مبلغ ۱۱/۰۰۰/۰۰۰ تومان هزینه تعمیرات خواهد بود.

هزینه تعمیرات برای چیلرهای با ظرفیت ۴۰ تن ۱۰ الی ۲۰٪ از مبلغ ذکر شده بیشتر خواهد بود. جدول ۹ با فرض اینکه پدیده برگشت مایع فقط در کولرهای با ظرفیت ۳۰ تن اتفاق بیافتد و آسیب به موتور الکتریکی در سال فقط یک بار رخ بدهد، برآوردی حداقلی از هزینه‌های تعمیرات سالانه ناشی از وقوع پدیده یاد شده را نمایش می‌دهد. قیمت‌ها به واحد پولی تومان و مربوط به تیرماه سال ۱۳۹۹ هست. با توجه به جداول بالا، استفاده از سیستم محافظت در برابر برگشت مایع مبرد به همراه همه پودمان‌های تکمیلی از نظر اقتصادی کاملاً به صرفه و بعد از یک سال کلیه هزینه‌های انجام شده از محل صرفه‌جویی در هزینه‌های تعمیرات بازگشت می‌شود.

با بررسی هزینه‌های تعمیرات و هزینه تهیه سیستم محافظت‌کننده در کنار هم می‌توان پی برد که آیا از نظر اقتصادی خرید بسته کامل محافظت و پایش سیکل سرمایه‌گذاری به سود بهره‌بردار است یا خیر. نمونه موردی دارای ۳۶ دستگاه چیلر تراکمی به ظرفیت‌های ۳۰ تن تبرید و ۴۰ تن تبرید است. این تعداد دستگاه با آرایش ۱+۱ نصب و به کار می‌روند به این معنی که ۱۸ چیلر در حال سرویس و ۱۸ چیلر به صورت آماده‌به‌کار هستند تا در صورت نیاز تعمیراتی جایگزین چیلرهای در حال سرویس شوند.

بررسی تاریخچه درخواست‌های مربوط به تعمیرات چیلرهای تراکمی نشان می‌دهد به‌طور متوسط هر سال تعداد ۴ مرتبه کمپرسورهای تراکمی به دلیل پدیده برگشت جریان مایع دچار آسیب دیدگی و نیازمند تعمیرات می‌شوند. هزینه تعمیرات شامل هزینه‌های تهیه قطعات یدکی، دستمزد تعمیرکاران متخصص، هزینه‌های بارگیری/حمل/تخلیه، ایاب و ذهاب، مالیات و کسورات قانونی هست. مجموع هزینه‌های یاد

جدول ۹ برآورد حداقلی از هزینه‌های تعمیرات ناشی از پدیده برگشت جریان مایع

ردیف	شرح	تعداد تکرار در یک سال	قیمت واحد (تومان)	قیمت کل (تومان)
۱	آسیب مکانیکی به کمپرسور در چیلرهای با ظرفیت ۳۰ تن	۳	۸/۰۰۰/۰۰۰	۲۴/۰۰۰/۰۰۰
۲	آسیب مکانیکی به همراه آسیب به الکتروموتور کمپرسور	۱	۱۱/۰۰۰/۰۰۰	۱۱/۰۰۰/۰۰۰
	مجموع هزینه تعمیرات سالانه (تومان)			۳۵/۰۰۰/۰۰۰

نتیجه‌گیری

- ۱- سیستم محافظت‌کننده در برابر پدیده برگشت مایع مبرد با موفقیت بر روی کمپرسور مورد مطالعه نصب، راه‌اندازی و آزمایش گردید.
- ۲- ساخت دستگاه تشخیص عیب سیکل سرمایش
- ۳- با اضافه کردن پودمان اندازه‌گیری توان مصرفی می‌توان هر سیستم سرمایشی (تبرید یا تهویه مطبوع) را با رعایت شرایط منحصربه‌فرد آن سیستم، از نظر مصرف انرژی بهینه‌سازی و پایش نمود.
- ۴- با دانستن مقدار دقیق فشار، دما و حجم مبردی که پیش از روشن شدن کمپرسور در محفظه کمپرسور وجود دارد می‌توان فاز مبرد را محاسبه و به‌دست آورد. دانستن فاز مبرد موجود در کمپرسور قبل از شروع به کار آن به جهت جلوگیری از پدیده FLOODED START بسیار مورد اهمیت است.
- ۵- با محافظت کمپرسور در برابر برگشت جریان

- مایع، پدیده ضربه چکشی مایع^۱ هم به‌تبع آن کنترل می‌گردد.
- ۶- با توجه به بررسی فنی-اقتصادی یاد شده می‌بایست برای هر کمپرسور علاوه بر سیستم محافظت در برابر برگشت مایع مبرد، پودمان شدت جریان الکتریکی، پودمان محاسبه‌گر توان مصرفی، دماسنج کندانسور و فشارسنج کندانسور و محاسبه درجه سابلول همگی باهم و به‌صورت یک مجموعه کامل نصب و راه‌اندازی شوند تا از این طریق بتوان به‌صورت جامع سکیل را مورد پایش و عیب‌یابی قرار داد.
- ۷- نصب سیستم محافظت در برابر برگشت مایع مبرد به‌همراه همه پودمان‌های تکمیلی بر سیکل‌های تبرید با کمپرسور هرمتیک (بسته) از نظر اقتصادی بسیار توجیه‌پذیر است.

مراجع

- [1]. Huang L, Leren T, Cheng T, Yue C, Zheng Z, Wang G, Tao H (2019) Experimental research on instability of expansion valve-dry evaporator refrigeration system, *Applied Thermal Engineering*, 162: 14-275.
- [2]. Li G, Chen H, Hu Y, Wang J, Guo Y, Liu J, Li, J (2018) An improved decision tree-based fault diagnosis method for practical variable refrigerant flow system using virtual sensor-based fault indicators, *Applied Thermal Engineering*, 129: 1292-1303.
- [3]. Wang J, Li G, Chen H, Liu J, Guo Y, Hu Y, Li, J (2017) Liquid floodback detection for scroll compressor in a VRF system under heating mode, *Applied Thermal Engineering*, 114: 921-930.
- [4]. Zhenxin Z, Jiangyu W, Huanxin C, Wentian W, Chengliang X (2020) An online compressor liquid floodback fault diagnosis method for variable refrigerant flow air conditioning system. *International Journal of Refrigeration*, 111: 9-19.
- [5]. Ekren O, Sahin S, Isler Y (2010) Comparison of different controllers for variable speed compressor and electronic expansion valve. *International Journal of Refrigeration*, 33: 1161-1168.
- [6]. Borgnakke C, E.sonntag R (2013) *Fundamentals of thermodynamics*, 8 ed., 9, university of michigan: John Wiley and Sons.
- [7]. Moore G k (2017) *Why compressors fail : part 1 - refrigerant flood back*, 1, bedford: Danfoss ltd.
- [8]. Hundy G F, Trott A R, Welch T C (2016) *Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps* (5 ed., Vol. 9). Elsevier.
- [9]. Charters W S, Sadafi H A (1987) Saturation property equations for R22, *International Journal of Refrigeration*, 10, 2: 103-104.