



مدلسازی ترمودینامیکی و بررسی عملکرد تاثیر اکونومايزر در افزايش راندمان چيلرهای تراکمی هوا خنک

احمد رضا ملاکاظمی¹، جاماسب پیرکندی^{2*}، مهدی هاشم آبادی³، سید محمد نوید طباطبائی زاده⁴

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

2- استاد، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

3- دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

4- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی سیستم های انرژی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی 3159916111، jpirkandi@mut.ac.ir

چکیده

از زمان اختراع سیستم های تبرید، استانداردهای زندگی انسان به سرعت افزایش یافته است. دستگاه های تهویه مطبوع، صرف نظر از شرایط بیرونی، آسایش مردم را فراهم کرده اند و یخچال ها کیفیت مواد غذایی انسان ها را به طور قابل توجهی افزایش داده اند. از آنجایی که سیستم های تبرید با بهره وری انرژی بالا برای همان میزان ظرفیت سرمایش یا گرمایش به انرژی کمتری نیاز دارد، تقاضای برق را کاهش می دهد. بنابراین بهبود عملکرد سیستم تبرید می تواند رویکردی معتبر برای حفظ محیط زیست باشد. در این پژوهش عملکرد ترمودینامیکی چیلر تراکمی هواخنک مجهز به اکونومايزر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی تحقیق، ارزیابی تأثیر به کارگیری اکونومايزر بر ضریب عملکرد، کاهش توان مصرفی کمپرسور و بهبود بازده انرژی سیستم تبرید می باشد. برای این منظور دو مدل شامل سیکل تراکمی دو مرحله و سیکل تراکمی مجهز به اکونومايزر توسعه یافته و با استفاده از نرم افزار EES شبیه سازی گردید. در این تحلیل هشت نوع مبرد مختلف بررسی شده و نتایج شبیه سازی نشان داد که افزودن اکونومايزر باعث افزایش ضریب عملکرد (COP) در محدوده ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به سیکل تراکمی ساده می شود. همچنین مبرد R1234ze به عنوان کاراترین و سازگارترین گزینه از نظر زیست محیطی شناسایی شد، در حالی که مبرد R407C پایین ترین راندمان را ارائه داد. بررسی پارامتری نشان داد که با افزایش دمای کندانسور، ضریب عملکرد کاهش و توان ورودی کمپرسور افزایش می یابد.

کلیدواژه ها: چیلر تراکمی هواخنک، اکونومايزر، ضریب عملکرد، مبرد، تحلیل ترمودینامیکی

Thermodynamic modeling and performance evaluation of the economizer effect on increasing the efficiency of air-cooled compression chillers

Ahmad Reza Mollakazemi¹, Jamasb Pirkandi^{2*}, Mahdi Hashem Abadi³, Seyed Mohammad Navid Tabatabaei Zadeh⁴

1- M.Sc Student, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

2- Professor, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Aerospace, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

4- M.Sc Student, Energy Systems Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 3159916111, Tehran, Iran, jpirkandi@mut.ac.ir

Received: 14 December 2025 Accepted: 09 June 2026

Abstract

Since the invention of refrigeration systems, human living standards have increased rapidly. Air conditioners have provided people with comfort regardless of external conditions, and refrigerators have significantly improved the quality of human food. Since refrigeration systems with high energy efficiency require less energy for the same amount of cooling or heating capacity, they reduce electricity demand. Therefore, improving the performance of the refrigeration system can be a valid approach to preserving the environment. In this study, the thermodynamic performance of an air-cooled vapor compression chiller equipped with an economizer was investigated. The main objective was to evaluate the effect of the economizer on the coefficient of performance (COP), compressor power reduction, and overall energy efficiency

improvement. Two models—a two-stage vapor compression cycle and a single-stage cycle with an economizer were developed and simulated using EES software. Eight different refrigerants were analyzed. The simulation results showed that employing an economizer enhanced the COP by 10–15% compared with the conventional system. Among the studied refrigerants, R1234ze(Z) exhibited the highest thermal efficiency and environmental compatibility, while R407C demonstrated the lowest performance. Parametric analysis revealed that an increase in condenser temperature leads to a reduction in COP and a higher compressor power requirement.

Keywords: Air-cooled chiller, Economizer, Coefficient of performance, Refrigerant, Thermodynamic analysis

1- مقدمه

سیستم‌های تبرید تراکمی یکی از مهمترین روش‌های خنک کاری در سامانه‌های تهویه مطبوع بوده و در سال‌های اخیر به شدت مورد توجه پژوهشگران و شرکت‌های تهویه و تبرید قرار گرفته‌اند. اگرچه سیستم‌های تبرید شرایط زندگی انسان را بسیار بهبود بخشیده است، اما عوارض جانبی زیادی به همراه دارد. مواد تشکیل دهنده مبردهای موجود در سیستم‌های تبرید، لایه اوزون در استراتوسفر را از بین برده و زمین را گرم کرده‌اند. افزایش استفاده از کولرهای گازی و یخچال‌ها منجر به تقاضای برق شده است. از آن جایی که حدود 50 درصد از برق در سطح جهان از سوخت‌های فسیلی تولید می‌شوند، این امر باعث گرمایش جهانی و آلودگی محیط زیست می‌شود. با توجه به این آگاهی که سیستم‌های تبرید تاثیر منفی بر محیط زیست دارند، تلاش‌های زیادی برای سازگار کردن آن با محیط زیست انجام شده است. یکی از این دسته تلاش‌ها در راستای سیستم تبرید با بهره‌وری انرژی بالا می‌باشد. در سالهای اخیر پژوهشگران و شرکت‌های زیادی بر روی بهبود عملکرد سیستم‌های تبرید تراکمی کار کرده و به نتایج مطلوبی در این زمینه دست پیدا کرده‌اند. به طور کلی سه روش جهت افزایش عملکرد سیستم تبرید به شرح ذیل وجود دارد: 1- توسعه اجزای سیکل تبرید تراکمی 2- اختراع مبردهای جدید 3- پیشنهاد یک چرخه جایگزین سیکل تبرید تراکمی

مطالعات اخیر در رابطه با توسعه کارآمدتر اجزای سیکل تبرید تراکمی (کمپرسور و مبدل حرارتی) بر توسعه فناوری‌های جدید برای دستیابی به عملکرد بهتر و همچنین گزینش بهترین نوع مبرد متمرکز شده‌اند. یکی از این فناوری‌های جدید سیستم‌های اکونومایزر مبدل حرارتی هستند. سیستم اکونومایزر مبدل حرارتی یک سیستم تبرید پیشرفته می‌باشد که از اجزای بسیار کارآمد و جهت چرخه جایگزین چرخه تبرید تراکمی دو مرحله‌ای می‌باشد. پیکربندی این سیستم مشابه سیستم تبرید تراکمی دو مرحله‌ای است که از دو کمپرسور برای افزایش عملکرد استفاده می‌شد، با این حال، سیستم تبرید تراکمی اکونومایزر مبدل حرارتی به یک کمپرسور تطبیق یافته به درگاه اکونومایزر مجهز شده است. از آنجایی که این سیستم تنها از یک کمپرسور استفاده می‌کند و کمپرسور جزئی از سیستم تبرید با بیشترین برق مصرفی می‌باشد، بنابراین، برای افزایش عملکرد سیستم تبرید، کاهش توان ورودی کمپرسور بسیار مهم است. همچنین مبرد انتخاب شده در این سیستم‌ها بایستی با توجه به مشکلات زیست محیطی کنونی جهانی، ترجیحاً پتانسیل گرمایش جهانی پایین (GWP¹) و پتانسیل تخریب لایه ازن صفر (ODP²) داشته باشد. هیدروکلروفلوروکربن (HCFC) و کلروفلوروکربن (CFC) به دلیل خواص ترمودینامیکی چشمگیرشان به طور گسترده به عنوان مبرد برای مقاصد

گرمایش و یا سرمایش استفاده می‌شوند. گزارش شده است که استفاده از این مبردها باعث ایجاد مشکلات زیست محیطی متعددی می‌شود. در نتیجه استفاده از این مبردها به دلیل مقادیر بالای GWP و ODP اخیراً ممنوع شده است [1].

هوگن وو و همکاران [2] به بررسی تجربی یک سیستم تبرید تراکمی مجهز به سیستم اکونومایزر و فلش تانک پرداختند. آن‌ها تاثیرات فشار را در هنگام استفاده از سیستم اکونومایزر و فلش تانک با استفاده از قرار یک سنسور فشار درون روتور ماده‌گی کمپرسور اسکرو انجام دادند. آن‌ها نتایج فشار را در بازه 0/7 تا 1/2 مگاپاسکال به همراه مبرد R22 بررسی نمودند. نتایج نشان دادند که هنگام استفاده از سیستم اکونومایزر فشار سیکل بالاتر از حالت بدون آن می‌باشد و همچنین هنگام استفاده از فلش تانک نیز فشار آن کمی کمتر از فشار سیستم اکونومایزر می‌باشد. یوان و ژو [3] به بررسی تجربی سیکل تبرید تراکمی مجهز به اکونومایزر مبدل حرارتی و اکونومایزر فلش تانک با کمپرسور اسکرال جهت گرمایش به عنوان هیت پمپ پرداختند. با توجه به اینکه سیکل تبرید تراکمی معمولی جهت گرمایش در اقلیم سرد ضعیف عمل می‌کند نتایج این دو سیستم اکونومایزر نشان داد که مقدار ظرفیت گرمایشی فلش تانک 10/5 درصد بیشتر از اکونومایزر مبدل حرارتی بوده و COP فلش تانک 4/3 درصد بیشتر از اکونومایزر مبدل حرارتی می‌باشد و همچنین به دلیل قابلیت اطمینان و تجهیزات ساده تر در سیستم اکونومایزر فلش تانک به عنوان سیستم برتر در جهت استفاده از ظرفیت‌های گرمایش منطقه کوچک انتخاب گردید. تورلا و همکاران [4] به بررسی تجربی سیکل تبرید دو مرحله‌ای با دو تجهیز میانی پرداختند. این دو تجهیز میانی عبارتند از: 1- سیکل تبرید تراکمی دو مرحله‌ای مجهز به سابکولر 2- سیکل تبرید تراکمی دو مرحله‌ای مجهز به تزریق مستقیم مایع، این آزمایش تجربی در دمای کندانسور بین 30 الی 47 درجه سانتیگراد و دمای اواپراتور 20- الی 36- درجه سانتیگراد با مبرد R404a انجام شده است. نتایج نشان داد که فشار میانی سیکل که هر تجهیز استفاده شود، بیشتر از زمانی است که تجهیز استفاده نمی‌شود. این فشار با افزایش جریان مبرد، بیشتر می‌شود. در مورد COP، راندمان سیکل مجهز به سابکولر بیشتر از سیکل معمولی دو مرحله‌ای بوده و همچنین راندمان سیکل مجهز به تزریق مستقیم مایع کمتر از سیکل معمول دو مرحله‌ای می‌باشد. ژانگ و همکاران [5] به بررسی تئوری یک پمپ گرمایی مجهز به سیستم اکونومایزر پرداختند. در این تحلیل از مدلسازی ریاضی با معادلات PDE³ کمک گرفته‌اند. فرضیات این شبیه‌سازی عبارتند از: مبرد R134a، کمپرسور اسکرو، دمای محیط 2 درجه سانتیگراد، دمای آب ورودی به اواپراتور 40 درجه سانتیگراد و همچنین کمپرسور در حالت 100 درصد ظرفیت خود در حال کار می‌باشد.

³ Partial Differential Equation

¹ Global warming potential

² Ozone Depletion Potential

نتايج نشان داد كه كنترل شير انبساط فرعی (شير انبساط اکونومايزر) به شدت وابسته به كنترل شير انبساط اصلی سيكل تبريد بستگی دارد. ليانگ دونگ و همكاران [6] به بررسی سيكل های تبريد تراكمی دو مرحله ای به عنوان هيت پمپ های دما بالا پرداختند. آن ها سه نوع مختلف از سيكل تبريد دو مرحله ای كه شامل مبدل باز يافت حرارتی و فلش تانك هستند را با شش نوع مختلف مبرد R245fa و R245ca و R236ea و R123 و R600 و R134a بررسی نمودند. نتايج نشان داد كه، مبرد R600 در تمام سيكل ها بالاترين راندمان را داشته اما با توجه به اشتغال زا بودن آن، بايستی واحد آن در جای مناسب با تهويه خوب قرار گیرد. پس از مبرد R600 مبردهای R245fa و R245ca مناسب سيستم هيت پمپ می باشند. COP گرمایی با افزايش تعداد مرحله سيكل افزايش می يابد. سلف و همكاران [7] به بررسی گرمایش ناشی از هيت پمپ ها پرداختند. در اين تحقيق آن ها پیشنهاد استفاده از اکونومايزر مبدل حرارتی را جهت افزايش راندمان دادند و در زمانی كه سيستم در حالت گرمایش است، سرمای خود را توسط چند حلقه به زمین با به گردش درآوردن آب حاوی گلايكول به زمین بدهد. مبرد مورد استفاده آن ها R134a، فشار كندانسور 1000 كيلوپاسكال، فشار اواپراتور 200 كيلوپاسكال و فشار میانی 400 كيلوپاسكال در نظر گرفته شده است. نتايج نشان داد كه، COP در حدود 4/8 مشاهده گردیده، فشار كندانسور بیشترین تاثیر را در راندمان سيستم و پس از آن فشار اواپراتور بیشترین نقش را بازی می كند، جهت افزايش راندمان هر چه بیشتر توصیه می شود كه تا حد امکان فشار میانی افزايش يابد. كلانتر و همكاران [8] به بررسی بهينه سازی سيكل تبريد تراكمی چند مرحله ای در پالایشگاه های گازی پرداختند. اين بررسی به منظور اهميت بهينه سازی در سيكل های تبريد جهت مایع سازی گازها در پالایشگاه ها پرداخته شده است. جهت بهينه سازی از يك مدل مطالعاتی مرسوم از مایع سازی گاز پروپان در ايران استفاده شده است. در اين مدل از سيكل ها و کاربری ها از مخزن گاز فلش و خنك كن میانی جهت بهبود راندمان استفاده می كنند. نتايج نشان داد كه فقط با تغيير متغیرهای مستقل سيكل موجود و بدون تغيير اجزای سيكل، مصرف برق سيكل تبريد 15/4 درصد کاهش يافت. صالح بكيم و همكاران [9] به بررسی ترمودينامیکی سيكل تبريد تراكمی دو مرحله ای مجهز به يك فلش چمبر با مبردهای مختلف پرداختند. هدف اصلی آن ها استفاده از مبردهای سازگار با محیط زیست و جديد می باشد كه آن مبردها عبارتند از: R22، R717، R134a، R1234yf، R1234ze(E)، R404A، R410A و R407C آن ها شبیه سازی را درون نرم افزار EES مدل سازی نموده و دمای كندانسور 45 درجه سانتیگراد و دمای اواپراتور صفر درجه سانتیگراد در نظر گرفتند. نتايج نشان داد كه مبرد R717 بالاترين COP و مبرد R407C پايين ترين COP را دارد. چانگ مون و همكاران [10] به بررسی ویژگی های عملکردی يك سيستم تبريد تراكمی اکونومايزر در فشار متوسط را تحت شرایط مختلف مورد آزمایش تجربی قرار دادند. آن ها دریافته اند كه دبی جرمی عبوری از كمپرسور با سيستم اکونومايزر افزايش می يابد. توان فشره سازی كمپرسور در تمام حالات روند افزايشی داشته و ظرفیت سرمایش در اواپراتور نیز افزايش یافته است. عمار بهمن و همكاران [11] به بررسی تجربی اکونومايزر در يك سيستم تهويه مطبوع یکجی جهت مصارف نظامی در آب و هوای گرم پرداختند. آزمایش در

³ Condenser outlet Split ejector-based Heat Pump cycle

⁴ High Temperature Heat Pump

¹ Basic Heat Pump Cycle

² Ejector outlet Split Heat Pump cycle

نشان داد که استفاده از اکونومایزر ظرفیت گرمایشی را 11/87 درصد افزایش داده و در حالت دمای خروجی 85 درجه سانتی‌گراد دوره بازگشت سرمایه 1/44 سال است. ژبان ژانگ و همکاران [22] به بررسی کوپل یک سیستم تبرید تراکمی دو مرحله‌ای با سیکل تبرید جذبی با بازیافت حرارتی پرداختند. نتایج نشان دادند که، برق مصرفی کمپرسورها به میزان 33/3 درصد کاهش یافته است. دمای رانش کمپرسورها با استفاده از مبدل بازیافت حرارت کاهش یافته و راندمان اگزرژی 26/9 درصد افزایش و راندمان گرمایش 109/7 درصد افزایش یافته است. همچنین راندمان اگزرژی با افزایش فشار میان مرحله‌ای در بالاترین مقدار خود، افزایش یافته است. با توجه به هزینه اولیه خرید سیستم، میزان بازگشت هزینه تقریباً 7/5 سال تخمین زده شده است.

با توجه به اینکه در تمامی پژوهش‌های انجام شده عمدتاً به جایگزینی مبردها جهت کاهش پتانسیل گرمایش جهانی GWP در سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای و اکونومایزر و همچنین به تحلیل فشار متوسط اکونومایزر پرداخته شده است. هیچ یک از تحقیقات به بررسی نتایج در مقایسه با سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای نپرداختند که تا چه حدی سیکل تبرید تراکمی اکونومایزر موثرتر واقع گردیده است. در این مطالعه سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای و سیکل تبرید تراکمی اکونومایزر ایده آل را در نرم افزار حل گر معادلات مهندسی (EES) مدل‌سازی ترمودینامیکی شده و به بررسی و تجزیه تحلیل و مقایسه این دو سیکل با مبردهای R1234ze(Z)، R22، R134a، R290، R410A، R407C و R1234yf پرداخته شده است. عملکرد مبردهای مختلف در این دو حالت با هم مقایسه و به صورت تخصصی میزان مبرد ورودی به سیستم اکونومایزر در دماهای مختلف بررسی شده‌اند.

در جدول 1 به ویژگی‌های مبردهای مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است.

جدول 1 مقایسه خصوصیات مبردهای مورد مطالعه

مبرد	وزن مولکولی (g/mol)	نقطه جوش (°C)	دمای بحرانی (°C)	فشار بحرانی (psi)	ODP	GWP
R1234ze(Z)	114	9/8	15/1	51/98	0	<10
R22	86/47	40/81	9/14	723/7	0/05	181
R134a	102	26/07	10/1	588/7	0	143
R290	44/10	42/11	9/74	616/6	0	3
R410A	72/59	51/44	7/34	710/9	0	208
R407C	86/20	43/63	8/19	671/8	0	177
R1234yf	114	29/49	9/70	490/5	0	4
R32	52/02	51/65	7/11	838/6	0	675

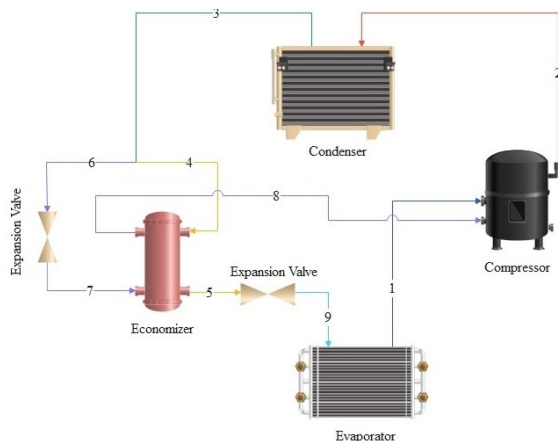
نوع مبرد با توجه به اهمیت مسائل محیط زیستی به تحلیل پرداختند. نتایج نشان داد که راندمان اگزرژی تمامی مبردها بین 36/67 الی 42/42 درصد بوده و نرخ تخریب اگزرژی نیز 1/47 الی 1/89 کیلووات می‌باشد. همچنین با توجه به اهمیت مسائل محیط زیستی استفاده از مبردهایی نظیر R1234ze(E) و R1234yf می‌توانند به جای مبرد R134a استفاده شوند. ادویو و همکارانش [17] به بررسی سیکل‌های تبرید آبشاری پیشرفته جهت رسیدن به دمای 80- درجه سانتیگراد پرداختند. اهمیت این بررسی جهت نگهداری واکسن‌هایی همانند کووید 19 و سایر آن‌ها می‌باشد. در این سیستم‌ها از دو مبرد R290 جهت استفاده در سیکل دما بالا و از مبرد R170 جهت سیکل دما پایین استفاده شده است. نتایج نشان داد که در سیکل‌های کمپرسور موازی، سیکل V+E (در سیکل دما بالا سیستم بخار ورودی + در سیکل دمای پایین کمپرسور موازی با اکونومایزر) بیشترین راندمان و در سیکل‌های بدون کمپرسور موازی سیکل‌های I+V (سیکل دما بالا با مبدل حرارتی داخلی + سیکل دما پایین سیستم بخار ورودی) و سیکل S+V (سیکل دما بالا تبرید تک مرحله + سیکل دما پایین سیستم بخار ورودی) بالاترین راندمان را در بین بقیه سیکل‌ها دارند. لیو گیونگدی و همکاران [18] به بررسی دو سیکل تبرید دو مرحله‌ای مجهز به اکونومایزر و دارای دو اواپراتور پرداختند. این دو سیستم دارای دو کمپرسور سری و یک کمپرسور موازی با مبرد R744 سازگار با محیط زیست می‌باشد. تحلیل در دماهای محیط مختلف انجام گرفته شده و ظرفیت سرمایشی و دمای اواپراتورها یکسان برای هر دو سیکل می‌باشد. نتایج نشان داد که نرخ جریان جرمی مبرد سیکل با اکونومایزر تقریباً 8 درصد کمتر سیکل فلش تانک می‌باشد. فشار سیکل فلش تانک بزرگ تر سیکل اکونومایزر می‌باشد. سیستم دارای اکونومایزر فشار ورودی و خروجی کمپرسور کمکی را کاهش داده و راندمان و ظرفیت سرمایشی سیکل را افزایش می‌دهد. کانگ لی و همکاران [19] به بررسی تجربی سیکل‌های هیت پمپ مجهز به سه نوع مختلف اکونومایزر (اکونومایزر فلش تانک، اکونومایزر مبدل حرارتی با شیر انبساط بالادست و پایین دست) جهت استفاده در وسایل نقلیه برقی در شرایط آب و هوایی سرد پرداختند. نتایج نشان داد که اکونومایزر با شیر انبساط بالادست، پایین دست و همچنین فلش تانک به ترتیب 19/7، 22/6، 92/3 درصد حداکثر ضریب عملکرد را افزایش دادند. همچنین فشار تزریق بهینه با توجه به حداکثر ضریب عملکرد، در محدوده 0/16 الی 0/37 مگاپاسکال قرار دارد. در نهایت سیکل مجهز به اکونومایزر فلش تانک در دمای 15- درجه سانتی‌گراد ظرفیت گرمایش بالاتری را نسبت به سایر سیکل‌ها ارائه داد. وانگ و همکاران [20] به بررسی هیت پمپ‌های دما بالا جهت استفاده همزمان در دیتا سنترها و تولید آب داغ تا 120 درجه سانتیگراد پرداختند. در این تحقیق از شش نوع سیکل مختلف شامل سیکل تبرید تراکمی تک و دومرحله‌ای با تجهیزات پیشرفته همچون مبدل حرارتی داخلی، اکونومایزر و اجکتور با شش نوع مبرد سازگار با محیط زیست پرداخته شده است. نتایج نشان داد که COP مبرد R1234ze(Z) در تمام سیکل‌ها بالاتر بوده است و سیکل تبرید تراکمی تک مرحله‌ای به همراه اکونومایزر، دو کمپرسور موازی و مبدل حرارتی داخلی بالاترین راندمان را دارد. ژانگ یو و همکاران [21] به بررسی هیت پمپ‌های دما بالا با پیکربندی مختلف اکونومایزر و مبدل حرارتی داخلی و سابلور جهت کاربردهای حرارتی پرداختند. آن‌ها آزمایش را با دمای خروجی 85 الی 125 درجه سانتی‌گراد به همراه تحلیل تلفات اگزرژی و اقتصادی انجام دادند. نتایج

2- معرفی سیستم پیشنهادی

2-1- چرخه تبرید تراکمی چند مرحله‌ای

افزایش دمای مبرد در ورودی کمپرسور و کاهش دمای مبرد در خروجی کندانسور یکی از مهمترین روش‌های بهبود عملکرد سیکل‌های تبرید تراکمی می‌باشد. افزایش دمای ورودی به کمپرسور و سوپرهیت کردن مبرد سبب جلوگیری از آسیب دیدن کمپرسور شده و کاهش دمای خروجی کندانسور و ساب کول شدن مبرد سبب افزایش راندمان سیکل تبرید خواهد شد. بر این اساس در این مقاله دو سیکل مختلف بر اساس این دو رویکرد در نظر گرفته شده و عملکرد آنها در شرایط مختلف کاری با هم مقایسه شده است.

سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای شامل دو کمپرسور، دو شیر انبساط، یک اواپراتور، یک محفظه تبخیر آبی و یک محفظه اختلاط می‌باشد. عملکرد این سیکل مشابه سیکل تبرید تراکمی می‌باشد، با این تفاوت که مبرد خروجی از شیر انبساط سیکل بالایی وارد یک محفظه تبخیر آبی می‌شود و در این محفظه بخار تولید شده وارد محفظه اختلاط و مایع مبرد به سمت شیر انبساط سیکل پایینی می‌رود. در محفظه اختلاط، بخار تولید شده در محفظه تبخی آبی و گاز خروجی از کمپرسور سیکل پایینی با هم مخلوط شده و با پایین آمدن دمای کلی مبرد، وارد کمپرسور سیکل بالایی می‌شود و سیکل تکرار می‌گردد. این روش هم به طور متقابل باعث افزایش ضریب عملکرد سیکل خواهد شد.



شکل 2 طرح شماتیک چرخه تبرید تراکمی مجهز به اکونومايزر مبدل حرارتی

3- معادلات حاکم

3-1 سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای

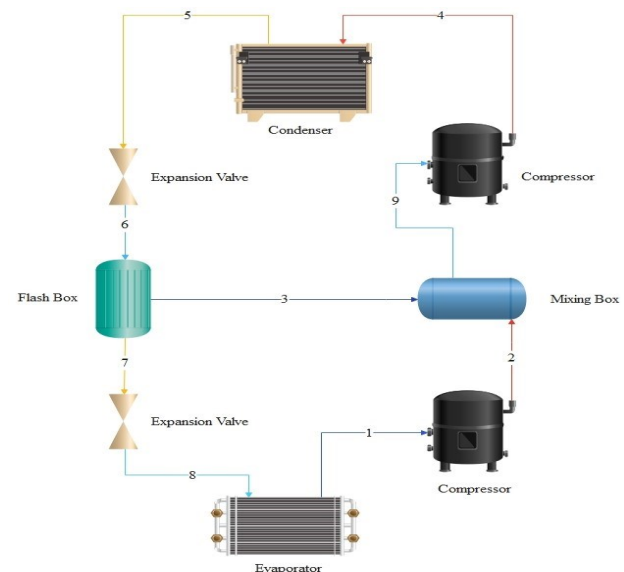
سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای شامل دو کمپرسور، یک کندانسور، دو شیر انبساط، یک محفظه تبخیر آبی، یک محفظه اختلاط و یک اواپراتور می‌باشد. معادله بقای جرم سیستم تبرید تراکمی چند مرحله‌ای در معادلات (1) تا (4) نمایش داده شده است :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (1)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_9 \quad (2)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_3 + \dot{m}_7 \quad (3)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (4)$$



شکل 1 طرح شماتیک چرخه تبرید تراکمی چند مرحله‌ای

2-2- چرخه تبرید تراکمی اکونومايزر

اکونومايزر نوعی خنک‌کننده فرعی است که از بخشی از جریان کل مبرد از کندانسور برای خنک کردن بقیه جریان مبرد استفاده می‌کند. سپس مبرد تبخیر شده با فشار متوسط وارد کمپرسور می‌شود. از مبرد سرد اکونومايزر نیز می‌توان برای تأمین خنک‌کننده اضافی کمپرسور استفاده کرد.

خنک شدن فرعی جریان مبرد اصلی، کیفیت بخار ورودی به اواپراتور را کاهش می‌دهد که باعث افزایش ظرفیت خنک‌کننده می‌شود. راندمان بالای اکونومايزر مبدل حرارتی صفحه‌ای لحیم‌کاری شده، اختلاف دمای مورد نیاز

اکونومایزر برای سیستم‌های با میرد R22 و R134a بین 0/6 الی 1/2 مگاپاسکال قرار می‌گیرد.

4- بحث و نتایج

در ابتدا برای اعتبارسنجی این مدل‌سازی از مطالعه مولز و همکاران [24] استفاده شده است. در دماهای مختلف اواپراتور برای میرد R1234ze ضریب عملکرد برای سیکل تبرید تراکمی ساده به دست آورده شده است که به صورت میانگین حدود 1/2 درصد خطا داشته است که عدد مناسبی بوده و می‌توان به مدل‌سازی موردنظر اعتماد کرد. نتایج اعتبارسنجی در جدول (2) نمایش داده شده است.

جدول 2 مقایسه نتایج به دست آمده از مدل‌سازی سیکل تبرید تراکمی ساده با مطالعه مولز و همکاران [24]

T_E (K)	COP (Present study)	COP (Moles et al)	Error (%)
260	3.50	3.54	1.21
265	4.02	4.07	1.22
270	4.85	4.91	1.22
275	6.05	6.12	1.22

همان‌طور که قابل مشاهده است، نتایج شبیه‌سازی سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای و اکونومایزر (میزان دبی میرد ورودی به سیستم اکونومایزر 10 درصد می‌باشد) به ترتیب در جداول (3) و (4) نمایش داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت ایده‌آل با دماهای حباب خشک 30، 40 و 50 درجه سانتی‌گراد و دمای اواپراتور 5 درجه سانتی‌گراد، میرد R1234ze بهترین عملکرد را در هر دو سیکل داشته و ضریب عملکرد آن در سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای در دماهای حباب خشک 30، 40 و 50 درجه سانتی‌گراد به ترتیب برابر 4/201، 3/353 و 2/733 و اکونومایزر در همان دماها به ترتیب برابر 5/567 و 4/668 و 3/942 می‌باشد. همچنین، با توجه به جداول می‌توان دریافت که ضعیف‌ترین عملکرد برای میرد R407C برای هر دو سیکل می‌باشد و ضریب عملکرد آن در سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای در دماهای حباب خشک 30، 40 و 50 به ترتیب برابر 2/676، 3/386 و 2/087 و همچنین در سیکل اکونومایزر نیز در همان دماها به ترتیب برابر 4/627، 3/754 و 2/987 می‌باشد.

جدول 3 نتایج سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای

Refrigerant	COP I	COP II	P_{HP} (psi)	P_{LP} (psi)	T_{DB} (°C)
R1234ze	4.201	42.75	56.66	11.04	30
R22	3.859	39.27	281.80	77.07	
R134a	3.899	39.68	191.30	45.65	
R290	3.816	38.83	248.44	73.12	
R32	3.662	37.26	455.56	125.67	
R1234yf	3.747	38.13	188.83	48.99	
R410A	3.569	36.32	445.41	123.31	40
R407C	3.386	34.45	321.40	71.57	
R1234ze	3.353	46.3	74.88	11.04	
R22	3.018	41.68	352.15	77.07	
R134a	3.031	41.86	244.09	45.65	40
R290	2.946	40.68	307.04	73.12	

معادلات حاکم (معادله بقای انرژی) کمپرسورها، کندانسور، شیرهای انبساط، محفظه تبخیر آبی، محفظه اختلاط و اواپراتور در معادلات (5) تا (13) نمایش داده شده است:

$$\dot{W}_{C1} = \dot{m}_1(h_2 - h_1) \quad (5)$$

$$\dot{W}_{C2} = \dot{m}_4(h_4 - h_9) \quad (6)$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_5(h_4 - h_5) \quad (7)$$

$$h_5 = h_6 \quad (8)$$

$$h_7 = h_8 \quad (9)$$

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_6 h_6 \quad (10)$$

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 = \dot{m}_9 h_9 \quad (11)$$

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_1(h_1 - h_8) \quad (12)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{C1} + \dot{W}_{C2}} \quad (13)$$

2-3 سیکل تبرید تراکمی مجهز به اکونومایزر

سیکل تبرید تراکمی مجهز به اکونومایزر شامل یک کمپرسور، یک کندانسور، دو شیر انبساط، یک اکونومایزر و یک اواپراتور می‌باشد. معادله بقای جرم برای سیکل تبرید تراکمی مجهز به اکونومایزر در معادلات (14) تا (18) نمایش داده شده است:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (14)$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_6 + \dot{m}_4 \quad (15)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_8 \quad (16)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_9 \quad (17)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (18)$$

همچنین، معادلات حاکم بر کمپرسور، کندانسور، شیرهای انبساط، اکونومایزر و اواپراتور به ترتیب در معادلات (19) تا (25) نمایش داده شده است.

$$\dot{W}_C = \dot{m}_2(h_2 - h_{new}) \quad (19)$$

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_2(h_2 - h_3) \quad (20)$$

$$h_6 = h_7 \quad (21)$$

$$h_5 = h_9 \quad (22)$$

$$\dot{m}_5 h_5 + \dot{m}_8 h_8 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \quad (23)$$

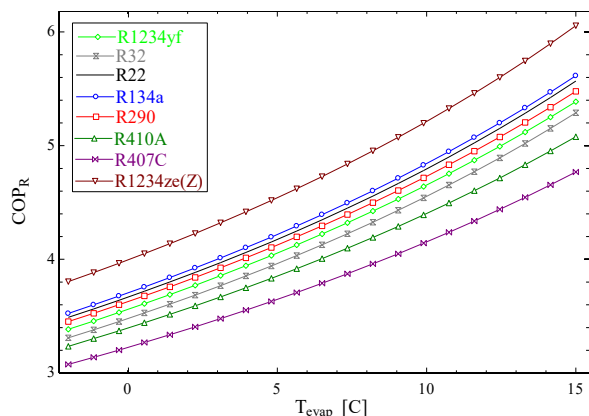
$$\dot{Q}_L = \dot{m}_1(h_1 - h_9) \quad (24)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_C} \quad (25)$$

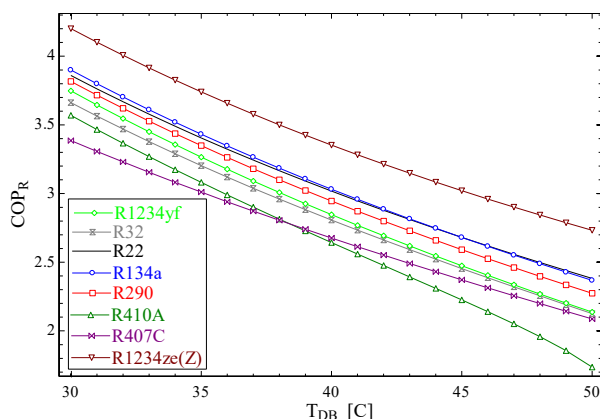
در چرخه مجهز به اکونومایزر، فشار میان مرحله یا فشار اکونومایزر به گونه‌ای انتخاب می‌شود که کار کل کمپرسور کمینه شود. بر اساس تئوری سیکل دو مرحله‌ای ایده‌آل، مقدار فشار بهینه میانی از رابطه هندسی زیر بین فشار کندانسور و فشار اواپراتور تعیین می‌شود [23]:

$$P_{Eco} = \sqrt{P_{Cond} \times P_{Evap}} \quad (26)$$

این انتخاب باعث می‌شود نسبت فشار هر مرحله متعادل شده و تزریق بخار در بهترین حالت انجام شود. طبق داده‌های مطالعات معتبری چون چانگ مون و همکاران [10] و کانگ لی و همکاران [19] مقدار عملیاتی فشار



شکل 3 نمودار تغییرات ضریب عملکرد سیکل تبرید تراکمی دو مرحله‌ای بر حسب دمای اواپراتور برای مبردهای مختلف



شکل 4 نمودار تغییرات ضریب عملکرد سیکل تبرید تراکمی دو مرحله‌ای بر حسب دمای حباب خشک برای مبردهای مختلف

بسیاری از چیلرهای سانتریفیوژ و اسکرو تجاری بزرگ زمانی که زیر بار 100 درصدی خود بروند، از اکونومايزر استفاده می‌کنند. هدف آن‌ها ساب‌کول کردن مبرد مایع قبل از ورود به خنک‌کننده است. مبردی که به صورت مایع از کندانسور خارج می‌شود، مقداری به بخش اکونومايزر وارد می‌شود. فشار در اکونومايزر بین فشار کاری کندانسور و خنک‌کننده است. به دلیل افت فشار در اکونومايزر، مقداری از مبرد مایع به بخار تبدیل شده و به کمپرسور بازگردانده می‌شود. این فلش کردن در اکونومايزر، مبرد مایعی را که به اواپراتور منتقل می‌شود، ساب‌کول می‌کند. به دلیل این ساب‌کول کردن، هنگامی که مبرد مایع از شیر انبساط عبور می‌کند و وارد اواپراتور می‌شود، گاز فلش کمتری تولید می‌شود. این امر باعث می‌شود مبرد مایع بیشتری در اواپراتور موجود باشد. مبردی که در اکونومايزر تبخیر ناگهانی می‌شود، مستقیماً به مکش کمپرسور نمی‌رود. از آنجایی که اکونومايزر فشار بالاتری نسبت به فشار مکش دارد، بخار می‌تواند در مرحله بعدی وارد کمپرسور شود و این مزیتی است نسبت به سیکل‌های چند مرحله‌ای که به جای استفاده از دو کمپرسور از یک کمپرسور استفاده شود و راندمان بالاتری را داشته باشیم.

حال کدنویسی دیگری در نرم افزار EES انجام گرفت تا میزان مبرد ورودی به سیستم اکونومايزر به بهینه ترین حالت برسد. از آن جایی که در پژوهش‌های قبلی هیچ یک به این موضوع نپرداختند که چه میزان مبرد و در چه دمای محیطی سیستم اکونومايزر عمل خواهد نمود، شبیه سازی ترمودینامیکی یک

R32	2.807	38.76	570.42	125.67
R1234yf	2.846	39.31	238.15	48.99
R410A	2.643	36.5	557.37	123.31
R407C	2.676	36.95	401.60	71.57
R1234ze	2.733	47.67	97.27	11.04
R22	2.382	41.55	434.82	77.07
R134a	2.386	41.31	307.18	45.65
R290	2.274	39.66	375.21	73.12
R32	2.125	37.07	707.34	125.67
R1234yf	2.137	37.27	296.60	48.99
R410A	1.736	30.29	690.95	123.31
R407C	2.087	36.41	496.02	71.57

جدول 4 نتایج سیکل تبرید تراکمی مجهز به اکونومايزر 10 درصد

Refrigerant	COP I	COP II	P_{HP} (psi)	P_{LP} (psi)	T_{DB} (°C)
R1234ze	5.567	56.65	48.96	11.04	30
R22	5.246	53.39	250.91	77.07	
R134a	5.206	52.97	168.38	45.65	
R290	5.129	52.19	22.48	73.12	
R32	5.093	51.83	405.38	125.67	
R1234yf	4.983	50.71	167.37	48.99	
R410A	4.916	50.02	396.53	123.311	
R407C	4.627	47.09	286.014	71.55	
R1234ze	4.668	64.47	65.28	11.04	40
R22	4.305	59.45	315.60	77.07	
R134a	4.231	58.43	216.39	45.65	
R290	4.139	57.16	276.58	73.12	
R32	4.113	56.81	310.53	125.67	
R1234yf	3.935	54.34	212.48	48.99	
R410A	3.849	53.15	498.92	123.311	
R407C	3.754	51.85	359.83	71.57	
R1234ze	3.942	68.77	85.51	11.04	50
R22	3.524	61.48	391.89	77.07	
R134a	3.413	59.53	274.26	45.65	
R290	3.301	57.59	339.8	73.12	
R32	3.272	57.08	635.84	125.67	
R1234yf	3.029	52.85	266.14	48.99	
R410A	2.846	49.64	621.19	123.31	
R407C	2.987	52.1	447.006	71.57	

شکل‌های (3) و (4) به ترتیب نمودار تغییرات ضریب عملکرد سیکل تبرید تراکمی دو مرحله‌ای بر حسب دمای اواپراتور و بر حسب دمای حباب خشک را نشان می‌دهند. همان‌طور که قابل مشاهده است با افزایش دمای حباب خشک، ضریب عملکرد تمامی مبردها کاهش و با افزایش دمای اواپراتور، ضریب عملکرد تمامی مبردها افزایش می‌یابند. با افزایش دمای کندانسور، فشار بخار خروجی از کندانسور افزایش یافته و کار مصرفی کمپرسور بیشتر می‌شود.

به طور مشخص، با افزایش دمای کندانسور و ثابت نگه داشتن دمای اواپراتور، تزریق مقدار مناسبی از بخار اشباع خشک از خروجی اکونومایزر به مکش کمپرسور، باعث می شود دمای تخلیه کمپرسور کاهش یافته و نسبت تراکم مؤثر کمتر شود. این پدیده باعث کاهش توان مصرفی کمپرسور و افزایش COP سیستم می گردد. بر اساس تحلیل های ترمودینامیکی و نتایج به دست آمده از مدل عددی، نسبت بهینه جرمی بخار تزریقی به جریان کل مبرد حدود ۵ تا ۱۰ درصد است. در محدوده ۵ درصد، سیستم بیشترین راندمان را نشان می دهد و در صورت افزایش بیش از حد این نسبت، کاهش دبی جریان اصلی تبخیرکننده و افزایش افت فشار داخلی باعث افت راندمان می گردد. در کاربردهای تراکمی هواخنک، افزایش دمای حباب خشک محیط باعث افزایش قابل توجه دمای چگالش و در نتیجه افزایش فشار کندانسور می شود. با افزایش فشار کندانسور، اختلاف دمای مؤثر بین مبرد داغ خروجی از کمپرسور و مبرد مایع ورودی به اکونومایزر به میزان زیادی افزایش می یابد. بر اساس معادله کلی شار حرارتی (27)، مقدار ΔT_{lm} در دماهای حباب خشک 45 الی 50 درجه سانتی گراد نسبت به شرایط 30 الی 35 درجه سانتی گراد تا حدود 55 درصد افزایش می یابد. این افزایش اختلاف دما موجب بهبود چشمگیر فرآیند ساب کولینگ در اکونومایزر می شود. ساب کولینگ بیشتر باعث کاهش آنتالپی ورودی به شیر انبساط اواپراتور h_g شده و ظرفیت سرمایشی طبق رابطه (28) افزایش می یابد و همزمان نسبت فشار کمپرسور در دماهای بالا افزایش یافته و تزریق بخار میانی (Flash gas injection) در اکونومایزر منجر به کاهش دمای رانش و کاهش کار کمپرسور مطابق رابطه (29) می گردد.

$$Q_{eco} = UA\Delta T_{lm} \quad (27)$$

$$Q_L = \dot{m}(h_g - h_1) \quad (28)$$

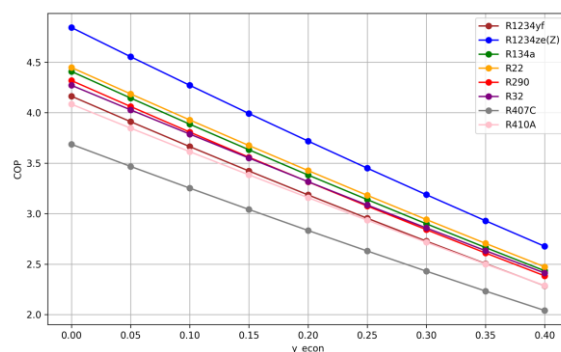
$$W_C = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (29)$$

در فشارهای بالا تاثیر این کاهش به مراتب بیشتر است. به همین دلیل، همان طور که نتایج جداول تحقیق حاضر نشان می دهد، اختلاف COP بین چرخه ساده و چرخه دارای اکونومایزر در دماهای بالاتر از 45 درجه سانتی گراد به بیشترین مقدار خود می رسد (افزایش 15 تا 25 درصد). این نتیجه با گزارش های آزمایشگاهی امیری راد و مداح [12]، چانگ مون و همکاران [10] و نیز وانگ [20] و همکاران همخوانی دارد که همگی بر مؤثر بودن اکونومایزر در شرایط دمایی بالا تاکید کرده اند.

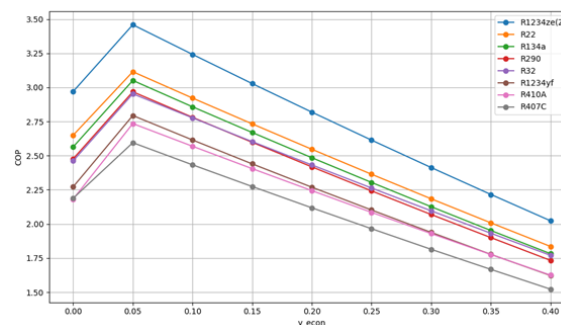
نتایج نمودارهای شکل 8، 9 و 10 نشان می دهند که با افزایش دمای حباب خشک محیط، نسبت فشار کمپرسور در سیکل ساده به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. در حالی که استفاده از اکونومایزر موجب کاهش 10 تا 18 درصدی نسبت فشار در دماهای بالای 45 درجه سانتی گراد می شود. این کاهش فشار مؤثر باعث کاهش دمای رانش، کاهش توان مصرفی کمپرسور و افزایش ضریب عملکرد می گردد. بنابراین، نمودارهای حاضر به صورت مستقیم نشان دهنده علت بهبود COP در دماهای بالا می باشد.

چیلر هوا خنک ساده و یک چیلر هوا خنک مجهز به سیستم اکونومایزر انجام گرفت که نتایج آنها در شکل های 5، 6 و 7 ارائه شده است.

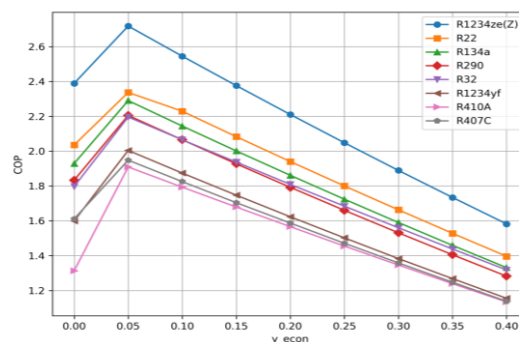
بر اساس نتایج شبیه سازی ها، تأثیر اکونومایزر به شدت به دمای چگالنده (کندانسور) و نسبت جرمی بخار تزریقی وابسته است. در دماهای پایین چگالنده، اختلاف آنتالپی بین جریان مایع ورودی و بخار تزریقی اندک بوده و اثر اکونومایزر بر عملکرد کلی سیستم محدود است. اما با افزایش دمای کندانسور، به ویژه در دماهای بالاتر از حدود 45 درجه سانتی گراد، میزان خنک کاری مایع و در نتیجه کاهش آنتالپی ورودی به شیر انبساط قابل ملاحظه بوده و اکونومایزر موجب بهبود در راندمان چرخه می شود.



شکل 5 نمودار راندمان بر حسب مقدار مبرد ورودی به سیستم اکونومایزر در دمای حباب خشک 40 درجه سانتی گراد برای هشت مبرد تحلیلی



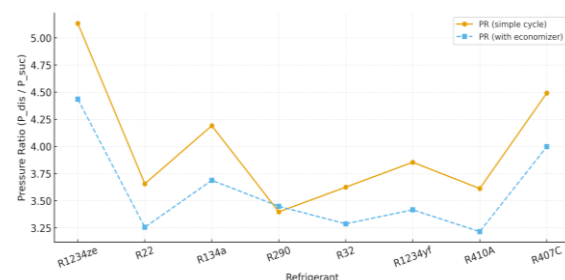
شکل 6 نمودار راندمان بر حسب مقدار مبرد ورودی به سیستم اکونومایزر در دمای حباب خشک 50 درجه سانتی گراد برای هشت مبرد تحلیلی



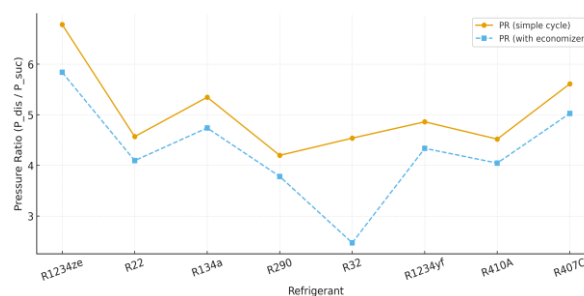
شکل 7 نمودار راندمان بر حسب مقدار مبرد ورودی به سیستم اکونومایزر در دمای حباب خشک 60 درجه سانتی گراد برای هشت مبرد تحلیلی

6- مراجع

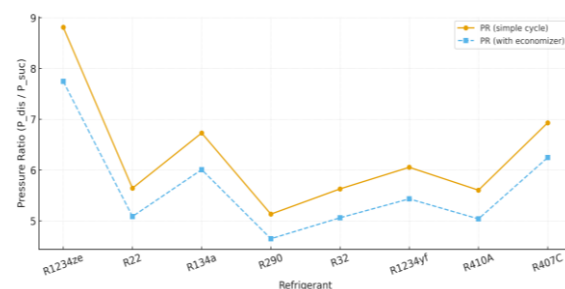
- [1] J. T. B. Tripp, The UNEP montreal protocol: Industrialized and developing countries sharing the responsibility for protecting the stratospheric ozone layer, *New York University Journal of International Law and Politics*, Vol. 20, pp. 733, 1987.
- [2] H. Wu. et al, Experimental study on p-V indicator diagrams of twin-screw refrigeration compressor with economizer, *Applied thermal engineering*, Vol. 24, No. 10, pp. 1491-1500, 2004.
- [3] G.Y. Ma, H.X. Zhao, Experimental study of a heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 5, pp. 697-701, 2008.
- [4] E. Torrella. et al, Experimental evaluation of the inter-stage conditions of a two-stage refrigeration cycle using a compound compressor, *International journal of refrigeration*, Vol. 32, No. 2, pp. 307-315, 2009.
- [5] W.J. Zhang. et al, Transient modeling of an air-cooled chiller with economized compressor. Part I: Model development and validation, *Applied thermal engineering*, Vol. 29, No. 11-12, pp. 2396-2402, 2009.
- [6] M. Liangdong. et al, Thermodynamic cycle performances analysis of high temperature refrigerants in a multi-stage heat pump system, *International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, IEEE, 2010.
- [7] S. Self. et al, Ground source heat pumps for heating: parametric energy analysis of a vapor compression cycle utilizing an economizer arrangement, *Applied thermal engineering*, Vol. 52, No. 2, pp. 245-254, 2013.
- [8] H. Kalantar-Neyestanaki. et al, A novel approach for operational optimization of multi-stage refrigeration cycles in gas refineries, *International journal of refrigeration*, Vol. 80, pp. 169-181, 2017.
- [9] S. S. Baakeem. et al, Optimization of a multistage vapor-compression refrigeration system for various refrigerants, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 136, pp. 84-96, 2018.
- [10] C.U. Moon. et al, Experimental study on the performance of the vapor injection refrigeration system with an economizer for intermediate pressures, *Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 10, pp. 3059-3069, 2018.
- [11] A. M. Bahman. et al, Vapor injected compression with economizing in packaged air conditioning systems for high temperature climate, *International journal of refrigeration*, Vol. 94, pp. 136-150, 2018.
- [12] E. A. Rad, S. Maddah, Entropic optimization of the economizer's pressure in a heat pump cycle integrated with a flash-tank and vapor-injection system, *International journal of refrigeration*, Vol. 97, pp. 56-66, 2019.
- [13] T. Bai. et al, Thermodynamic assessment of a condenser outlet split ejector-based high temperature heat pump cycle using various low GWP refrigerants, *Energy*, Vol. 179, pp.850-862, 2019.
- [14] Z. Sun. et al, Theoretical study on a novel CO2 Two-stage compression refrigeration system with parallel compression and solar absorption partial cascade refrigeration system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 204, pp. 112278, 2020.
- [15] C. Mateu-Royo. et al, Theoretical performance evaluation of ejector and economizer with parallel compression configurations in high temperature heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 119, pp. 356-365, 2020.
- [16] P.D. Malwe. et al, Exergy assessment of a multistage multi-evaporator vapor compression refrigeration system using eighteen refrigerants, *Energy*, Reports 8, pp. 153-162, 2022.
- [17] C.M. Udriou. et al, Advanced two-stage cascade configurations for energy-efficient-80° C refrigeration, *Energy Conversion and Management*, Vol. 267, pp. 115907, 2022.
- [18] G. Liu. et al, Performance study and multi-objective optimization of a two-temperature CO2 refrigeration system with economizer based on energetic, exergetic and economic analysis, *Journal of Thermal Science*, Vol. 31, No. 5, pp. 1416-1433, 2022.
- [19] K. Li. et al, Experimental study on low temperature heating performance of different vapor injection heat pump systems equipped with a flash tank and economizers for electric vehicle, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 227, pp. 120428, 2023.



شکل 8 نسبت فشار کمپرسور در چرخه ساده و چرخه مجهز به اکونومايزر در دمای محیط 30 درجه سانتی گراد برای هشت مبرد تحلیلی



شکل 9 نسبت فشار کمپرسور در چرخه ساده و چرخه مجهز به اکونومايزر در دمای محیط 40 درجه سانتی گراد برای هشت مبرد تحلیلی



شکل 10 نسبت فشار کمپرسور در چرخه ساده و چرخه مجهز به اکونومايزر در دمای محیط 50 درجه سانتی گراد برای هشت مبرد تحلیلی

5- نتیجه گیری

در این مطالعه، بررسی کارایی و عملکرد یک سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای و اکونومايزر در پیکربندی ایده‌آل انجام شده است. نتایج نشان داد که مبرد R1234ze بهترین عملکرد را در هر دو سیکل تبرید تراکمی چند مرحله‌ای و اکونومايزر دارد. همچنین، نتایج نشان داد که مبرد R407C ضعیف‌ترین عملکرد را در هر دو سیکل داشته است. در مقایسه برابر سیکل مجهز به اکونومايزر راندمان در حدود 20 درصد بالاتر نسبت به سیکل چند مرحله‌ای دارد. تأثیر اکونومايزر در دماهای حباب خشک کمتر از 45 درجه سانتی گراد ناچیز است. در دماهای بالاتر از 45 درجه سانتی گراد، اکونومايزر به‌طور میانگین موجب افزایش راندمان بین 5 تا 12 درصد می‌شود. نسبت جرمی تزریق بهینه بین 0/05 تا 0/1 از دبی کل مبرد (5 الی 10 درصد) است، که در این حالت تعادل مناسبی میان کاهش توان کمپرسور و افت ظرفیت تبخیرکننده برقرار می‌گردد همچنین استفاده از اکونومايزر موجب کاهش 10 تا 18 درصدی نسبت فشار در دماهای بالای 45 درجه سانتی گراد می‌شود.

- [20] P. Wang. et al, District heating utilizing waste heat of a data center: High-temperature heat pumps, *Energy and Buildings*, Vol. 315, pp. 114327, 2024.
- [21] G. Huang. et al, Performance assessment of high temperature heat pump working with different configurations in combination with internal heat exchanger, economizer and subcooler, *Energy*, pp. 137727, 2025.
- [22] Z. Zhang. et al, Parametric study of absorption-compression hybrid refrigeration cycle with multi-stage heat recovery, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 260, pp. 124985, 2025.
- [23] W.F. Stoecker, J.W. Jones, *Refrigeration and Air Conditioning*, McGraw-Hill, 1982.
- [24] F. Moles, J. Navarro-Esbri, B. Peris, A. Mota-Babiloni, K.K. Kontomaris, Thermodynamic analysis of a combined organic Rankine cycle and Vapor compression cycle system activated with low temperature heat sources using low GWP fluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 87, pp. 444-453, 2015.