مدلسازی، بهینه سازی و مقایسه سیستم ذخیره سازی یخ و سیستم مواد تغییرفازدهنده برای کاربردهای تهویه مطبوع

محمد حسینی راهدار [۱]، ابوالقاسم امامزاده [۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۹۴/۸/۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۱/۱۵

چکیده:

در این پروژه ، دو نمونه سیستم ذخیره سازی انرژی سرمایشی برای مصارف تهویه مطبوع در یک ساختمان اداری به صورت مجزا از جنبه های اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی در دو فرایند شارژ و تخلیه مورد تحلیل، بهینه سازی و مقایسه فنی-اقتصادی قرار گرفته است. یک سیستم شامل یک مخزن ذخیره سازی یخ (ITES) و یک سیستم شامل مخزن ذخیره سازی انرژی حاوی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) می باشد. بازده اگزرژی و نرخ هزینه کلی سیستم به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده اند. متغیرهای تصمیم گیری شامل دمای آب ورودی به هواساز (T_3)،دمای آب بازگشتی از هواساز (T_4)، دمای مخزن ذخیره سازی یخ (T_{ST})، دمای اشباع مبرد در اواپراتور (T_5)، دمای اشباع مبرد در کندانسور (T_8) هستند. در ادامه، بهینه سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)روی کل سیستم صورت گرفت و مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و توابع هدف به دست آمدند. در پایان، عملکرد سیستم های مدل شده از نظر میزان برق مصرفی و همچنین میزان نشر گاز CO_2 و نیز مدت زمان بازگشت سرمایه با یک سیستم سرمایشی معمول در یک مطالعه موردی مقایسه شد. نتایج حاکی از کاهش ۴،۵۹ و ۷،۵۸ درصد مصرف برق و همچنین کاهش سالانه ۱۷،۸ و ۲۷،۲ درصد تولید گاز CO_2 بترتیب برای سیستم های ITES و PCM در مقایسه با سیستم معمول است.

کلمات کلیدی:

بهینه سازی چندهدفه، مخزن ذخیره سازی یخ، مواد تغییر فاز دهنده، بازده اگزرژی، نرخ هزینه کلی

۱) کارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران (نویسنده مسئول) hoseini_mohamad_1986@yahoo.com
۲) استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران aemamzadeh2004@yahoo.com

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

مقدمه

امروزه بخش عمده‌ای از برق مصرفی ساختمان ها صرف مصارف تهویه مطبوع می گردد.افزایش تقاضای مصرف برق، افزایش ظرفیت نیروگاه های تولید توان را به دنبال دارد که این امر منجر به افزایش قابل توجه مصرف سوخت های بازگشت ناپذیر می گردد. همچنین محققان اذعان داشته اند که مصرف سوخت های فسیلی به منظور تولید توان، بیشترین سهم را در تولید و نشر گاز CO_2 دارد که تغییرات جدی را در شرایط آب و هوایی زمین به دنبال خواهد داشت [۲۸،۲]. پژوهشگران مطالعات گسترده ای را در زمینه سیستم های TES انجام داده اند. Dincer [۱۳] اطلاعات و مثال های مفیدی را در زمینه سیستم های TES[۱] و کاربردهای آن ارائه نمود و همچنین آن را از دیدگاه انرژی و اگزرژی بررسی کرد و فواید زیست محیطی و اقتصادی بکارگیری سیستم های TES را بیان نمود. Akbari و Sezgen [۷] عملکرد یک سیستم ذخیره ساز یخ را در دو مطالعه موردی مجزا در شمال کالیفرنیا بررسی کردند و نتایج را در دو حالت با در نظر گرفتن سیستم TES و بدون در نظر گرفتن آن ارزیابی و مقایسه کردند. L. L. Wood و همکارانش [۱۸] امکان پذیری فنی و اقتصادی استفاده از سیستم های TES را در بخش های تجاری بررسی کردند. نتایج نشان داد استفاده از سیستم های TES در بخش های تجاری از نظر اقتصادی مقرون بصرفه است. MacPhee وDincer [۴] عملکرد چهار نوع متفاوت سیستم های ذخیره ساز یخ (ITES) را در یک ساختمان تجاری برای مصارف تهویه مطبوع ارزیابی کردند. در مطالعه آنها هر سه مرحله شارژ، ذخیره و تخلیه از دیدگاه انرژی و اگزرژی بررسی گردید و نتایج نشان داد که تحلیل انرژی نمی تواند به تنهایی اطلاعات مفیدی را در زمینه عملکرد بهینه سیستم ارائه دهد و از آنجا که بخش عمده ای از اتلافات سیستم به واسطه تولید آنتروپی است، تحلیل اگزرژی سیستم ضروری است. عملکرد یک سیستم ذخیره ساز یخ در یک ساختمان تجاری توسط Henze [۵] در چهار راهبرد مختلف بررسی و نتایج نشان داد که راهبرد کنترل با اولویت ذخیره سازی، دارای کمترین هزینه عملکرد است. Habeebullah [۲] امکان پذیری اقتصادی استفاده از سیستم های ITES[۲] را به منظور تامین بار سرمایشی مسجد الحرام در عربستان سعودی ارزیابی نمود. در بررسی او، عملکرد سیستم ITES در دو راهبرد ذخیره سازی کامل و جزئی تحلیل گردید و هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه عملکرد سیستم به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و کمینه گردید. نتایج نشان داد بکارگیری راهبرد ذخیره سازی کامل از نظر میزان مصرف برق و همچنین هزینه سرمایه گذاری معقول تر است.Rosen و Dincer [۲۰] عملکرد سیستم‌های TES را از دیدگاه اگزرژی بررسی کردند. سیستم های مورد بررسی شامل سیستم های آبی زیرزمینی[۳] (ATES)، سیستم های ذخیره سازی لایه‌ای[۴]

1) Thermal energy storage
2) Ice thermal energy storage
3) Aquifer
4) Stratified thermal energy storage

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

(STES) و سیستم های ذخیره سازی انرژی سرمایشی CTES[1] بودند. در نهایت، مدت زمان بهینه فرایند تخلیه به کمک تحلیل اگزرژی و بهینه سازی سیستم به دست آمد. بهینه سازی ترمودینامیکی یک سیستم ذخیره ساز سرمایشی هیدرات گاز[2] در دو فرایند شارژ و تخلیه توسط Bi و همکارانش[۲۹] انجام شد. در مطالعه آنها ترم تولید آنتروپی به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و کمینه گردید و به دنبال آن، شرایط بهینه عملکرد سیستم به دست آمدند. نتایج بهینه سازی نشان داد بیشترین میزان تولید آنتروپی در طول فرایند شارژ و تخلیه در هنگام تغییر فاز ماده ذخیره ساز رخ می دهد. همچنین مدل سازی ریاضی و بهینه سازی یک سیستم ذخیره ساز حرارتی آب خنک شده توسط Henze و همکارانش[۶] انجام شد. در بررسی آنها هزینه های سرمایه گذاری به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد اضافه کردن سیستم های TES به سیستم های سرمایشی معمول دارای صرفه اقتصادی است. همچنین در زمینه سیستم های ذخیره ساز با ماده ذخیره ساز PCM[3] نیز مطالعات وسیعی انجام شده است. Vakilaltojjar و Saman [۲۴] یک سیستم ذخیره سازی PCM شامل مواد PCM متفاوت با دماهای ذوب متفاوت را به منظور مصارف تهویه مطبوع مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد استفاده از این گونه سیستم ها در کنار سیستم های سرمایشی معمول می تواند تا حد زیادی از مصرف انرژی الکتریکی بکاهد. تحلیل تجربی و عددی سرمایش ساختمان با استفاده از سرمایش در طول شب به کمک مواد PCM توسط Stritih و Butala [۲۷] انجام شد. در مطالعه آنها پارافین به عنوان ماده PCM استفاده شد به طوری که در طول شب به ذخیره انرژی سرمایشی می پردازد تا در طول روز (در تابستان) هوای گرم داخل ساختمان را خنک سازد. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از مواد ذخیره ساز PCM نوسانات دمای داخل ساختمان (در طول روز و شب) و همچنین نیاز به سرمایش اضافی را کاهش می دهد. همچنین تحلیل انرژی و اگزرژی یک سیستم ذخیره سازی انرژی PCM و نیز بهینه سازی ترمواکونومیک[4] یک سیستم ذخیره سازی حرارتی گرمای محسوس[5] توسط Koca و همکارانش [۱] و Badar [۱۹] بررسی و ارزیابی گردید.

در این تحقیق، روشی مبتنی بر تحلیل اگزرژی، اقتصادی، زیست محیطی و در نهایت بهینه سازی چندهدفه یک سیستم ذخیره سازی یخ (ITES) و یک سیستم ذخیره سازی مواد تغییر فاز دهنده (PCM) برای مصارف تهویه مطبوع به صورت مجزا می باشد. برای انجام این کار، ابتدا کل سیستم شامل چرخه شارژ و تخلیه مدلسازی و تحلیل می گردد. در ادامه، بهینه سازی چندهدفه سیستم به منظور به دست آوردن پارامترهای بهینه طراحی با استفاده ازالگوریتم ژنتیک چند هدفه با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)[6] انجام می شود. توابع هدف، بازده اگزرژی و هزینه کلی (شامل هزینه های

1) Cold thermal energy storage
2) Gas-hydrate
3) Phase change material
4) Thermoeconomic
5) Sensible
6) Non-dominated sorting genetic algorithm-II

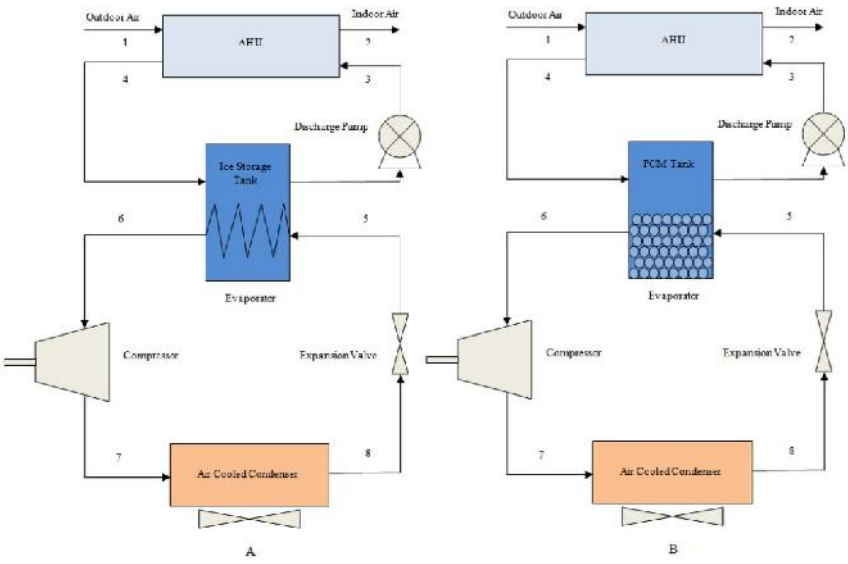
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

سرمایه‌گذاری، نگهداری، عملکردی و هزینه جریمه برای نشر گاز CO_2) می باشند که با توجه به قیدهای طراحی به ترتیب بیشیه و کمینه می گردند.

مواد و روش ها

تشریح سیستم

یک روش برای کاهش مصرف برق سیستم های تهویه مطبوع، استفاده از سیستم های ذخیره ساز انرژی سرمایشی می باشد. به همین منظور، در این تحقیق یک سیستم ذخیره ساز یخ (ITES) و یک سیستم ذخیره ساز PCM به منظور تامین بار سرمایشی ساختمان مدلسازی و مورد تحلیل از نظر اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی قرار می گیرد و در نهایت، دو سیستم مقایسه می گردد. شکل ۱-A شماتیک یک سیستم ITESو شکل ۱-B شماتیک یک سیستمPCM را نشان می دهد که به منظور تامین بار سرمایشی ساختمان مدل شده است.



شکل ۱) شماتیک سیستم ذخیره سازی سرمایی ITES (A) و PCM (B)

چرخه تبرید تراکمی یا همان چرخه شارژ در ساعت های غیر اوج مصرف (در شب) که قیمت برق ارزان است عمل می‌کند و در مخزن ذخیره ساز یخ و مواد PCM منجمد شده ذخیره می کند. یخ و مواد PCM منجمد شده ذخیره شده در ساعات اوج مصرف (روز) که قیمت برق گران است، برای تامین بار سرمایشی ساختمان مورد استفاده قرار می گیرد. چرخه تبرید تراکمی در ساعت های اوج مصرف در حالت خاموش قرار می گیرد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

تجزیه و تحلیل اگزرژی

منظور از اگزرژی کیفیت انرژی و یا همان ظرفیت آن برای ایجاد تغییرات و توانایی انجام کار مکانیکی است . میزان قابلیت کاردهی یک سیستم که حاوی مقدار معینی انرژی است، علاوه بر شکل یا نوع انرژی آن (شیمیائی و حرارتی) به شرایط ترمودینامیکی آن (دما، فشار و حجم) و شرایط محیط بستگی دارد. برای مقابله کیفیت سیستم های انرژی و ارایه یک معیار عددی برای اندازه گیری کیفیت، یک استاندارد جهانی به منظور تعریف مفهوم کیفیت انرژی مورد نیاز است. یک معیار بسیار مناسب و همگانی می تواند میزان حداکثر کاری باشد که از یک سیستم حاوی انرژی با در نظر گرفتن یک شرایط محیطی مشخص قابل تولید است . این معیار استاندارد اندازه گیری کیفیت انرژی، اگزرژی نامیده شده است. معادله بالانس نرخ اگزرژی برای حجم کنترل در حالت پایا به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \sum_j \dot{E}_j^{\,Q} - \dot{E}^{W} + \sum_i \dot{E}_i - \sum_e \dot{E}_e - \dot{E}_D = 0 \qquad (۱)$$

معادلات (۲) تا (۲۱) چگونگی محاسبه نرخ تخریب اگزرژی را به ترتیب در هواساز ($\dot{E}_{D,AHU}$)، کمپرسور چرخه تبرید ($\dot{E}_{D,comp}$)، شیر انبساط ($\dot{E}_{D,EX}$)، کندانسور ($\dot{E}_{D,cond}$)، اواپراتور ($\dot{E}_{D,EV}$)، مخزن ذخیره ساز ($\dot{E}_{D,ST}$) و مخزن PCM ($\dot{E}_{D,PCM}$) را نشان می دهد:

$$\dot{E}_{D,AHU} = \left(\dot{E}_1 + \dot{E}_3\right) - \left(\dot{E}_2 + \dot{E}_4\right) \qquad (۲)$$

$$\dot{E}_{D,Comp} = \dot{E}_6 - \dot{E}_7 + \dot{W}_{Comp} \qquad (۳)$$

$$\dot{E}_{D,EX} = \dot{E}_8 - \dot{E}_5 \qquad (۴)$$

$$\dot{E}_{D,Cond} = \left(\dot{E}_7 - \dot{E}_8\right) + \dot{W}_{fan,cond} - \dot{E}_{cond}^{Q} \qquad (۵)$$

$$\dot{E}_{D,EV} = \left(\dot{E}_5 - \dot{E}_6\right) + \dot{E}_{EV}^{Q} \qquad (۶)$$

که در آن، $\dot{E}_{D,EV}$ نرخ اگزرژی ناشی از انتقال حرارت در اواپراتور می باشد که به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{E}_{EV}^{Q} = \dot{Q}_{EV}\left(\frac{T_0}{T_{EV}} - 1\right) \qquad (۷)$$

برای تعیین نرخ تخریب اگزرژی در مخزن ذخیره ساز یخ خواهیم داشت:

$$\dot{E}_{D,ST} = \dot{E}_{D,ch} + \dot{E}_{D,dc} \qquad (۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

ترم $\dot{E}_{D,ch}$ به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{E}_{D,ice,ch} = \frac{E_{D,ice,ch}}{t_{ch}} = \frac{E^{Q}_{ice,ch} - \left(E_f - E_i\right)_{ice,ch}}{t_{ch}} \quad (۹)$$

که در آن:

$$E^{Q}_{ice,ch} = Q_{ST}\left(\frac{T_0}{T_{ST}} - 1\right) \quad (۱۰)$$

مقدار تغییرات اگزرژی در طول فرایند شارژ به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\left(E_f - E_i\right)_{ice,ch} = \left(-Q_{ST}\right) - m_{w,ST}T_0\left[c_{p,w}\ln\left(\frac{T_{FP,w}}{T_4}\right) - \frac{i_{ph,ice}}{T_{FP,w}} + c_{p,ice}\ln\left(\frac{T_{ST}}{T_{FP,w}}\right)\right] \quad (۱۱)$$

همچنین نرخ تخریب اگزرژی مخزن ذخیره ساز یخ در طول فرایند تخلیه ($\dot{E}_{D,dc}$) به صورت زیر به دست می آید:

$$\dot{E}_{D,ice,dc} = \frac{E_{D,ice,dc}}{t_{dc}} = \frac{E^{Q}_{ice,dc} - \left(E_f - E_i\right)_{ice,dc}}{t_{dc}} \quad (۱۲)$$

که در آن:

$$E^{Q}_{ice,dc} = Q_{C,ITES}\left(\frac{T_0}{T_{ST}} - 1\right) \quad (۱۳)$$

$$\left(E_f - E_i\right)_{ice,dc} = \left(Q_{C,ITES}\right) - m_{w,ST}T_0\left[c_{p,ice}\ln\left(\frac{T_{FP,w}}{T_{ST}}\right) + \frac{i_{ph,ice}}{T_{FP,w}} + c_{p,w}\ln\left(\frac{T_4}{T_{FP,w}}\right)\right] \quad (۱۴)$$

همچنین برای تعیین نرخ تخریب اگزرژی در مخزن ذخیره ساز PCM ($\dot{E}_{D,PCM}$) خواهیم داشت:

$$\dot{E}_{D,PCM} = \dot{E}_{D,PCM,ch} + \dot{E}_{D,PCM,dc} \quad (۱۵)$$

که برای فرآیند شارژ داریم :

$$\dot{E}_{D,PCM,ch} = \frac{E_{D,PCM,ch}}{t_{ch}} = \frac{E^{Q}_{PCM,ch} - \left(E_f - E_i\right)_{PCM,ch}}{t_{ch}} \quad (۱۶)$$

$$E^{Q}_{PCM,ch} = \left(-Q_{C,PCM}\right)\left(1 - \frac{T_0}{T_{PCM}}\right) \quad (۱۷)$$

$$\left(E_f - E_i\right)_{PCM,ch} = \left(-Q_{C,PCM}\right) - m_{PCM}T_0\left[c_{P_{PCM}}\ln\left(\frac{T_{m,PCM}}{T_4}\right) - \frac{i_{ph,PCM}}{T_{m,PCM}} + c_{P_{PCM}}\ln\left(\frac{T_{ST}}{T_{m,PCM}}\right)\right] \quad (۱۸)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

و برای فرایند تخلیه داریم :

$$\dot{E}_{D,PCM\,melting} = \frac{E_{D,PCM\,melting}}{t_{dc}} = \frac{E^{Q}_{PCM,dc} - \left(E_f - E_i\right)_{PCM,dc}}{t_{dc}} \quad (۱۹)$$

$$E^{Q}_{PCM,dc} = \left(Q_{C,PCM}\right)\left(\frac{T_0}{T_{PCM}} - 1\right) \quad (۲۰)$$

$$\left(E_f - E_i\right)_{PCM,dc} = \left(Q_{C,PCM}\right) - m_{PCM}T_0\left[c_{P_{PCM}}\ln\left(\frac{T_{m,PCM}}{T_{ST}}\right) + \frac{i_{ph,PCM}}{T_{m,PCM}} + c_{P_{PCM}}\ln\left(\frac{T_4}{T_{m,PCM}}\right.\right. \quad (۲۱)$$

تحلیل اقتصادی

برای ارزیابی و بهینه سازی اقتصادی سیستم‌های انرژی به مقایسه مقادیر سالانه هزینه های مرتبط با سرمایه‌گذاری[1]، هزینه های سوخت و هزینه های عملکرد و نگهداری نیاز می باشد. این اجزای هزینه ممکن است در طول عمر اقتصادی[2] یک سیستم انرژی بطور قابل توجهی تغییر کنند. بنابراین، در ارزیابی و بهینه سازی این سیستم‌ها باید از مقادیر سالانه همسطح شده[3] برای همه اجزای هزینه استفاده نمود. دراین پروژه، نرخ هزینه کلی سیستم[4] (TCR) شامل هزینه های سرمایه گذاری اولیه و نگهداری ($\dot{Z}_{inv+main}$)، عملکردی ($\dot{Z}_{op}$) و همچنین هزینه جریمه به منظور تولید و نشر گاز CO_2 ($\dot{Z}_{CO_2\,penalty}$) می باشد که به صورت زیر ارائه می گردد:

$$TCR = \dot{Z}_{inv+main} + \dot{Z}_{op} + \dot{Z}_{CO_2\,penalty} \quad (۲۲)$$

هزینه های سرمایه گذاری و نگهداری

جدول (۱) توابع هزینه سرمایه گذاری هر یک از اجزای چرخه نشان داده شده در شکل (۱) را (برحسب دلار) نشان می دهد[۱۱،۲۶،۲۵،۲۳]:

1) Capital- related charges (carrying charges)
2) Economic life
3) Levelized annual values
4) Total cost rate

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

جدول۱) توابع هزینه سرمایه گذاری اجزا سیستم برحسب دلار

اجزا سیستم	تابع هزینه سرمایه گذاری
PCM	۱۲,۹ دلار برای هر کیلو گرم
Air handling unit (AHU)	$Z_{AHU}=24202\times A_{AHU}^{0.4162}$
Pump	$Z_{pump}=4590\times \dot{W}_{pump}^{0.55}$
Ice storage tank	$Z_{ST}=11761\times V_{ST}^{0.53}$
Evaporator	$Z_{EV}=4832\times A_{EV}^{0.68}$
Compressor	$Z_{Comp}=11642\times \dot{W}_{Comp}^{0.46}$
Expansion valve	$Z_{EX}=114.5\times \dot{m}_{r}$
Condenser	$Z_{Cond}=(1397\times A_{Cond}^{0.89})+629\times W_{fan}^{0.76}$

از رابطه (۲۳) می توان نرخ هزینه های سرمایه گذاری اولیه و نگهداری هر یک از اجزای سیستم را (برحسب دلار بر ثانیه) محاسبه کرد :

$$\dot{Z}_k=\frac{Z_k\times CRF\times \Phi}{N\times 3600} \quad (۲۳)$$

ضریب بازگشت سرمایه به صورت زیر تعریف می شود:

$$CRF=\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1} \quad (۲۴)$$

هزینه های عملکردی

هزینه عملکردی سالانه کلی سیستم (بر حسب دلار بر ثانیه) شامل نرخ هزینه مربوط به کمپرسور چرخه تبرید، پمپ و فن کندانسور در ساعات غیر اوج مصرف و همچنین نرخ هزینه توان مصرفی پمپ چرخه تخلیه، فن هواساز در ساعات اوج مصرف و میان باری می باشد (سیستم ۴ ساعت در اوج مصرف و ۷ ساعت در میان باری کار می کند) :

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

$$\dot{Z}_{op}=\left[\left(\dot{W}_{Comp}+\dot{W}_{fan,Cond}\right)\times\frac{c_{elec,off\text{-}peak}}{3600}\right]+\left[\left(\dot{W}_{fan,AHU}+\dot{W}_{pump,dc}\right)\times\left(\frac{4}{11}\times\frac{c_{elec,on\text{-}peak}}{3600}+\frac{7}{11}\times\frac{c_{elec,mid\text{-}peak}}{3600}\right)\right] \quad (۲۵)$$

تحلیل زیست محیطی

محققان اذعان داشته اندکه مصرف سوخت های فسیلی به منظور تولید توان، بیشترین سهم را در تولید و نشر گاز CO_2 دارد. به همین دلیل، انتشار گاز CO_2 نیز به عنوان یک عامل مهم در این مدلسازی انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است. پیش بینی دقیق مقدار تشکیل CO_2 بسیار مشکل است. میزان گاز CO_2 تولید شده در سیستم مدل شده به واسطه مصرف برق از شبکه عبارت است از [۱۵]:

$$\dot{Z}_{CO_2,penalty}=\frac{\left(\frac{m_{CO_2}}{1000}\right)\times c_{CO_2}}{N\times 3600} \quad (۲۶)$$

که در آن :

$$m_{CO_2}=\mu_{CO_2}\times S_{elec} \quad (۲۷)$$

مدت زمان بازگشت سرمایه

بکارگیری سیستم ITES و یا سیستم PCM در مقایسه با سیستم های معمول[1] دارای هزینه اضافی می باشد. این هزینه اضافی به دلیل هزینه سرمایه گذاری اولیه و نگهداری مخزن ذخیره ساز می باشد. از طرفی، اگر این سیستم ها به کار گرفته شوند، این هزینه های اضافی به واسطه کاهش مصرف برق در آنها (در مقایسه با سیستم معمول) می تواند در مدت زمان کوتاهی جبران شود.

مدت زمان بازگشت هزینه های اضافی از رابطه زیر محاسبه می گردد [۲۱،۱۷]:

$$\Delta(Z_{op})\left(\frac{(1+i)^p-1}{i(1+i)^p}\right)+Z_{SV}\left(\frac{i}{(1+i)^p}\right)=\Delta(\sum_k Z_k) \quad (۲۸)$$

رابطه (۲۸) یک معادله غیر خطی است که به کمک روش های عددی (روش نیوتن–رافسون[2]) قابل حل است.

1) Conventional
2) Newton-Rophson

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

بهینه سازی چندهدفه با استفاده از الگوریتم NSGA-II

در این پروژه، توابع هدف بازده اگزرژی کل سیستم و نرخ هزینه کلی سالانه می باشد که باید به ترتیب بیشینه و کمینه شوند:

$$\text{Objective function I: } \Psi_{tot} = 1 - \frac{\dot{E}_{D,tot}}{\dot{E}_{in}} \quad (۲۹)$$

$$\text{Objective function II: } \dot{Z}_k = \sum_k \dot{Z}_k + \dot{Z}_{op} + \dot{Z}_{CO_2,penalty} \quad (۳۰)$$

جدول (۲) پارامترهای طراحی سیستم به همراه محدوه تغییرات آن ها و همچنین قیدهای مساله را نشان می دهد. این محدودیت ها بر اساس داده های موجود در هندبوک تهویه مطبوع استخراج شده است.

جدول ۲) متغیرهای تصمیم گیری (پارامترهای طراحی) به همراه محدوده تغییرات آنها و قیدهای طراحی سیستم

علت	قید	
	ITES	PCM
داده های مرسوم در سیستم های تبرید	$3<T_3<5$	$3<T_3<5$
داده های مرسوم در سیستم های تبرید	$11<T_4<13$	$11<T_4<13$
داده های مرسوم در سیستم های تبرید	$-10<T_{ST}<0$	$1<T_{ST}<3$
حداقل و حداکثر دمای اشباع مبرد در اواپراتور برای گستره وسیعی از کاربردها	$-30< T_5<0$	$-1< T_5<1$
حداقل و حداکثر دمای اشباع مبرد در کندانسور برای گستره وسیعی از کاربردها	$(T_{WB,out})+5<T_8<60$	$(T_{WB,out})+5<T_8<60$
داده های مرسوم در سیستم های تبرید	$\zeta = 0.25$	$\zeta = 0.25$
برای ایجاد انتقال حرارت بین اواپراتور و مخزن ذخیره ساز یخ	$T_{EV}<T_{ST}$	$T_{EV}<T_{ST}$

الگوریتم NSGA اولین بار توسط Srinivas and Deb [۲۲] به عنوان روش گزینش رتبه بندی شده استفاده شد و پس از آن، Deb و همکارانش [۱۶] پیچیدگی های زمانی آن را بهبود دادند و بحث فاصله ازدحامی[1] را به آن اضافه کردند و نام NSGA-II را برای آن قرار دادند. در جدول (۳) پارامترهای انتخابی برای الگوریتم آورده شده است.

1) Crowding Distance

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

جدول ۳) پارامترهای الگوریتم NSGA-II برای بهینه سازی

۱۰۰	تعداد جمعیت
۰ر۸	درصد تقاطع[1]
۰ر٤	درصد جهش
۰ر۰۲	نرخ جهش

مطالعه موردی

یک مطالعه موردی به منظور تحلیل مدلسازی و بهینه سازی سیستم مدل شده انجام شده است. به همین منظور، بار سرمایشی روزانه یک ساختمان اداری ۵ طبقه با زیر بنای تقریبی ۵۰۰ متر مربع واقع در شهر اهواز به عنوان نقطه شروع کار در نظر گرفته شده است. بار سرمایشی روزانه ساختمان در شکل (۲) نشان داده شده است. ظرفیت سرمایشی چیلر در سیستم TES و سیستم معمول نیز در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳) مقادیر حداکثر (در طول روز) و حداقل (در طول شب) تغییرات دمای محیط را در شهر (در طول سال) نشان می دهد [۹]. خواص ترموفیزیکی ماده PCM استفاده شده(RT3HC) در مدلسازی مخزن ذخیره ساز PCM در جدول (۴) آمده است [۱۰]. مبرد مورد استفاده در مدل سازی

جدول ٤) خواص ترمودینامیکی ماده PCM (RT3HC)

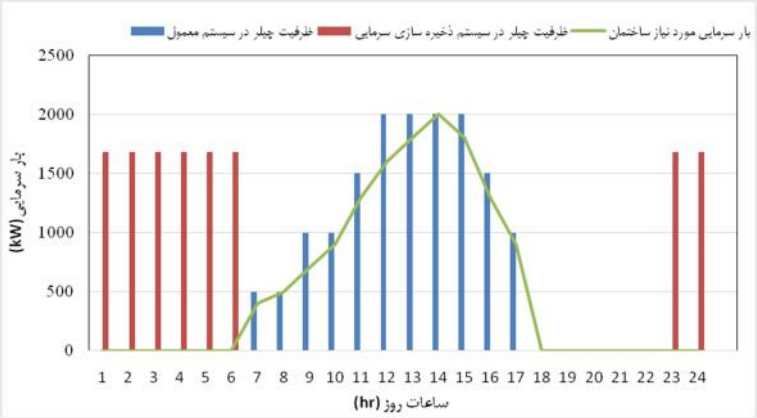
دمای ذوب ($^{\circ}C$)	۳
چگالی در حالت جامد (kg/m^3)	۸۸۰
چگالی در حالت مایع (kg/m^3)	۷۷۰
ظرفیت گرمای ویژه ($kJ/kg\ K$)	۲
گرمای نهان ذوب (kJ/kg)	۲۰۰
سمیت[2]	خیر

چرخه تبرید تراکمی R134a می باشد. دمای آسایش و رطوبت نسبی اتاق و همچنین فشار محیط بیرون به ترتیب $21\ ^{\circ}C$، ۵۵/۰، $1\ atm$ در نظر گرفته شده است. همچنین قیمت برق در ساعات اوج مصرف $0.075\frac{\$}{kWh}$ و در ساعات میان باری $0.0375\frac{\$}{kWh}$ و در ساعات کم باری $0.0187\frac{\$}{kWh}$ در نظرگرفته شده است [۱۴]. همچنین ساعات عملکرد سالانه سیستم برای چرخه شارژ (۱۱ شب تا ۷ صبح) و تخلیه (۷ صبح تا ۶ شب) به ترتیب ۲۱۱۲ و ۲۹۰۴ ساعت

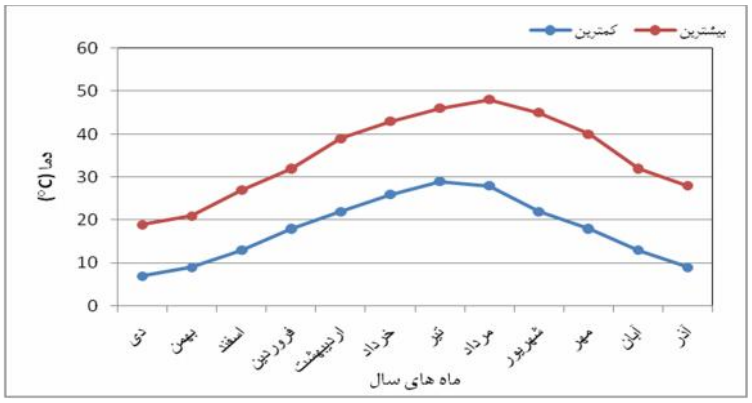
1) Crossover Percentage
2) Toxicity

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

می باشد. همچنین نرخ بهره بانکی سالانه برابر ۲۲ درصد در نظر گرفته شده است[۳].



شکل ۲) نمودار بار سرمایی مورد نیاز و تامین شده ساختمان



شکل ۳) تغییرات دمای هوای اهواز در طول یک سال

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل

برای اطمینان از صحت مدلسازی، داده های یک مثال از کتاب "کاربردهای سیستم های تبرید" به عنوان ورودی به کد سیستم مدل شده وارد شد و خروجی های کد MATLAB با نتایج ارائه شده در مرجع مورد نظر مقایسه شدند. مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی با مرجع [۱۲] در شرایط ورودی یکسان در جدول (۵) ارائه شده است. نتایج نشانگر این مطلب می‌باشد که برای مقادیر ورودی مشابه، درصدهای اختلاف نتایج خروجی کمتر از ۲ درصد می باشد.

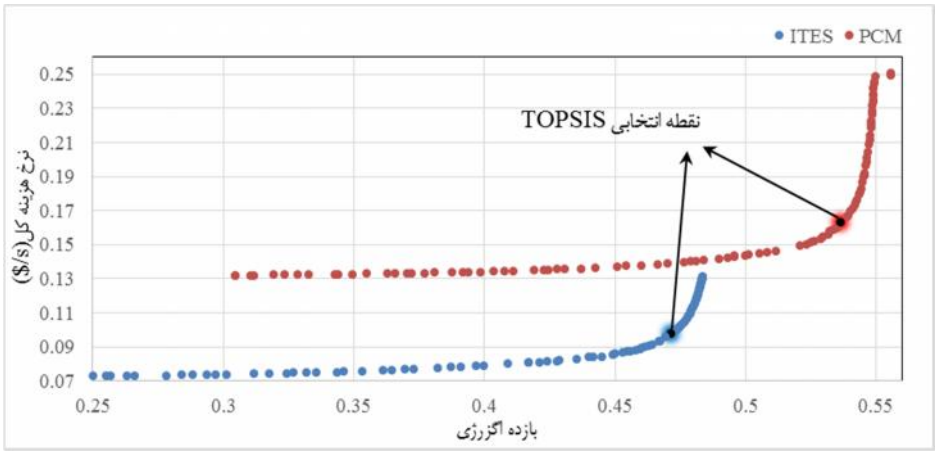
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

جدول۵) اعتبارسنجی نتایج مدل سازی با مرجع [۱۲]

ورودی	مقدار	خروجی	نتایج گزارش شده از مرجع [۲۸]	نتایج مدلسازی	اختلاف (٪)
T_{EV} (°C)	۱۰-	$\dot{m}_r$	۰,۰۴۴۵۸	۰,۰۴۴۱۷	۰/۹
T_{Cond} (°C)	۴۶,۳	$\dot{W}_{Comp}$	۲,۵	۲,۴۵۲۷	۱/۸۹
$\dot{Q}_{EV}$ (kW)	۵,۴۱	COP	۲,۱۶	۲,۱۳۹۶	۰/۹۴

نتایج بهینه سازی

منحنی Pareto بدست آمده از بهینه سازی چند هدفه توابع هدف ذکر شده در شکل (۴) برای سیستم ITES و PCM نشان داده شده است که به وضوح تضاد بین دو تابع هدف نرخ هزینه کلی و بازده اگزرژی را آشکار می سازد.



شکل ٤) منحنی بهینه Pareto Front برای دو سیستم ITES و PCM

نمودار بالا روند تغییرات بازده اگزرژی را نسبت به نرخ هزینه کل نشان می دهد که همانطور که قابل پیش بینی نیز بود، با افزایش هر تابع هدف، تابع هدف دیگر کاهش می یابد و برعکس. در بهینه سازی چند هدفه، تمام نقاط واقع در منحنی Pareto Front می توانند به عنوان جواب بهینه سیستم انتخاب شوند. انتخاب نقطه بهینه نهایی به اهمیت هریک از توابع هدف برای طراح بستگی دارد. یک روش برای انتخاب نقطه طراحی بهینه، استفاده از روش تصمیم گیری TOPSIS است. بر اساس این روش، پس از بی بعدسازی توابع هدف، نزدیک ترین نقطه منحنی به نقطه ایده آل [۱] و

1) Ideal Point

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

همچنین دورترین نقطه به نقطه ایده آل منفی[1] به عنوان جواب بهینه نهایی انتخاب می گردد [۸]. پس از انتخاب نقطه بهینه هر کدام از دو سیستم، مقادیر بهینه پارامترهای طراحی سیستم مورد بررسی در مطالعه موردی در بهینه سازی هر دو سیستم (ITES و PCM) در جدول (۶) فهرست شده اند.

جدول (٦) مقادیر پارامترهای طراحی برای حالات مختلف بهینه سازی

پارامترهای طراحی	ITES	PCM
T_3(℃)	۴,۹۹	۴,۹۹
T_4(℃)	۱۱	۱۱
T_{ST}(℃)	-۰,۲۳	۱,٦۲
T_5(℃)	-۳,۰۱	۰,۹۹
T_8(℃)	۵۷,۵۵	۵۶,۵۱

بازده اگزرژی و نرخ هزینه کل بهینه سیستم ITES در حالت بهینه سازی چندهدفه برابر ۴۶/۹۳ درصد و ۰,۰۹۵۴۱۲۴۸ $USDs^{-1}$ می باشد و برای سیستم PCM برابر ۵۳/۴۴ درصد و ۰,۱۵۹۰۲۹۴۲ $USDs^{-1}$ است. تخریب اگزرژی هر یک از اجزای سیستم و همچنین نتایج تحلیل اقتصادی سیستم حاصل از بهینه سازی چندهدفه در جداول (۷) و (۸) آورده شده است. همانطور که در جدول (۷) مشاهده می شود، تفاوت تخریب اگزرژی در چرخه شارژ سیستم وجود دارد که دلیل آن تفاوت در چیلر مورد نیاز هر کدام از سیستم هاست. بدیهی است که چیلر مورد نیاز سیستم ITES دارای کمپرسور با ظرفیت بالاتری نسبت به سیستم PCM است که از دمای پایین تر اواپراتور ناشی می شود.

جدول ۷) تخریب اگزرژی اجزا دو سیستم ITES و PCM

تخریب اگزرژی اجزا	ITES	PCM
AHU Exergy Destruction (kW)	۶۰	۶۰
ST Exergy Destruction (kW)	۷۵	۷۴
EV Exergy Destruction (kW)	۱۱۶	۱۰۳
Comp Exergy Destruction (kW)	۲۲۳	۱۹۶
EXP Exergy Destruction (kW)	۳۶	۳۵
Cond Exergy Destruction (kW)	۱۴۹	۱۳۲

1) Negative Ideal Point

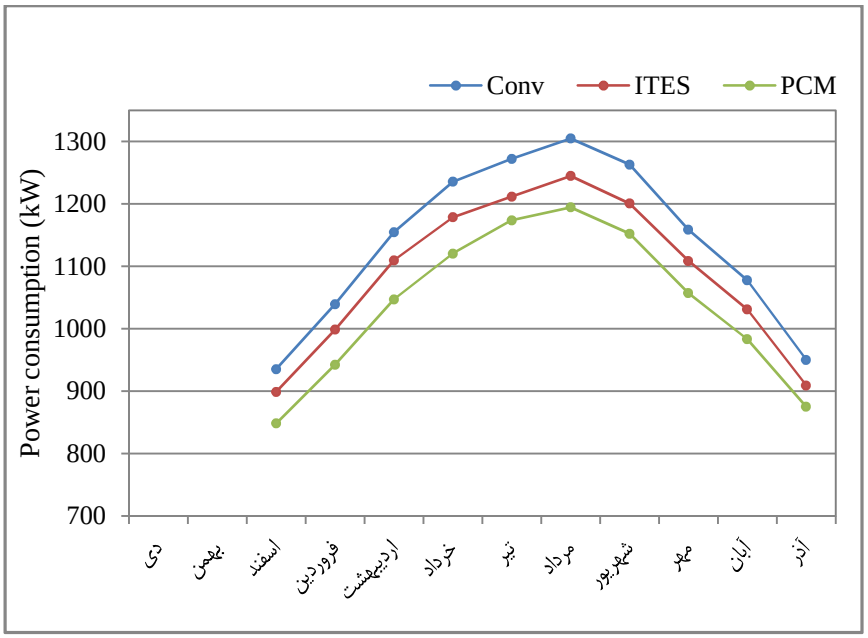
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

چنانچه در جدول (۸) مشاهده می شود، هزینه کلی سالانه سیستم PCM نزدیک به دو برابر سیستم ITES است. دلیل این اختلاف، قیمت بالای مواد تغییر فازدهنده است (هر کیلو ۱۲,۹ دلار) [۱۱].

جدول ۸) نتایج تحلیل اقتصادی بهینه سازی چندهدفه

پارامتر	ITES	PCM
هزینه سرمایه گذاری و عملکرد سالانه سیستم برحسب دلار	۴۸۲۸۲۳	۸۰۶۵۹۱
میزان نشر سالانه CO_2 برحسب کیلوگرم	۳۰۱۵۲۲۵	۲۶۷۰۳۰۶

همچنین به منظور ارزیابی مدل فوق از نظر میزان برق مصرفی در ۱۰ ماه کاری سیستم، سیستم های مدل شده سرمایشی PCMوITESو همچنین یک سیستم سرمایشی معمول مقایسه شد که نتایج آن در شکل (۵) آورده شده است که حکایت از کاهش ۴,۵۹ و ۷,۵۸ درصد بترتیب برای سیستم ITES و PCM می کند.



شکل۵) نمودار مصرف برق سیستم ITES و سیستم PCM و سیستم سرمایشی معمول

علیرغم تمام مزیت های ذکر شده در بالا، استفاده از سیستم های TES هزینه سرمایه گذاری اضافه ای را در بر دارد که البته به دلیل کاهش در هزینه های مصرف برق طی چند سال جبران می شود. مدت زمان بازگشت سرمایه طبق فرمول (۲۸) برای سیستم ITES برابر ۲,۱۶ سال و برای سیستم PCM برابر ۵,۵۶ سال است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک سیستم ITES و یک سیستم PCM از نقطه نظرهای اگزرژی، اقتصادی و زیست محیطی مورد بررسی قرار گرفت. دو تابع بازده اگزرژی و نرخ هزینه کلی به عنوان توابع هدف در نظر گرفته شد و به وسیله الگوریتم NSGA-II بهینه سازی شد. نتایج بوضوح نشان دادند که استفاده از سیستم های TES می تواند راهکار بسیار کارآمدی در انتقال مصرف برق از ساعات اوج مصرف به ساعات کم باری باشند. همچنین به واسطه کاهش مصرف برق، در کاهش رشد گرمایش زمین نیز اثر بسزایی دارد. نتایج نشان داد که بازده اگزرژی و نرخ هزینه کلی در نقطه بهینه بدست آمده از بهینه سازی چندهدفه بترتیب برای سیستم ITES، ۴۶/۹۳ درصد و ۰,۰۹۵۴۱۲۴۸ $USDs^{-1}$ و برای سیستم PCM، برابر ۵۳/۴۴ درصد و ۰,۱۵۹۰۲۹۴۲ $USDs^{-1}$ هستند. هزینه کلی سالانه سیستم ITES و PCM بترتیب ۴۸۲۸۲۳ و ۸۰۶۵۹۱ است و همچنین میزان کاهش انتشار گاز CO_2 برای سیستم ITES و PCM نسبت به سیستم متداول بترتیب ۱۷,۸ و ۲۷,۲ درصد است. نهایتا نتایج بهینه سازی نشان داد که کاهش مصرف برق برای سیستم PCM نسبت به سیستم متداول ۷,۵۸ درصد است در حالی که برای سیستم ITES ۴,۵۹ درصد است. نهایتا، بازگشت سرمایه با بکارگیری سیستم ITES، ۲,۱۶ سال و برای سیستم PCM برابر ۵,۵۶ سال تخمین زده شد.

منابع

[1] A.Koca, H. F.Oztop, T.Koyunc, Y. Varol, 2008. "Energy and Exergy Analysis of a Latent Heat Storage System with Phase Change Material for a Solar Collector", Renew. Energy, Vol. 33, PP. 567–574.

[2] B.A. Habeebullah, 2007. "Economic Feasibility of Thermal Energy Storage Systems", Energy and Buildings, Vol. 39, PP. 355–363.

[3] Central Bank of the Islamic Republic of Iran,URL:http://www.cbi.ir/showitem/12570.aspx.

[4] D. MacPhee, I. Dincer, 2009. "Performance Assessment of Some Ice TES Systems", Int. J. Thermal Sciences, Vol. 48, PP. 2288–2299.

[5] G. P. Henze, 2003. "Parametric Study of a Simplified Ice Storage Model Under Conventional and Optimal Control Strategies", J. Solar Energy Engineering, ASME, New York , Vol. 125, PP. 2-12.

[6] G. P. Henze, B. Biffar , D. Kohn , M. P. Becker, 2008. "Optimal Design and Operation of a Thermal Storage System for a Chilled Water Plant Serving Pharmaceutical Buildings", Energy and Buildings, Vol. 40, PP. 1004–1019.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

[7] H.Akbari, O. Sezgen, 1995. "Performance Evaluation of Thermal Energy Storage Systems", Energy and Buildings, Vol. 22, PP. 15-24.

[8] H. Sayyaadi, R. Mehrabipour, 2012. “Efficiency enhancement of a gas turbine cycle using an optimized tubular recuperative heat exchanger”, Energy, Vol. 38, Issue 1, PP. 362-375.

[9] http://www.irimo.ir/English/statistics/synopH/Ahwaz.txt.

[10] http://www.rubitherm.com/english/pages/02a_latent_heat_pcms.htm.

[11] http://www.rubitherm.com/english.

[12] I. Dincer, I. and M. Kanoglu, 2010. “Refrigeration Systems and Applications”, 2nd ed., John Wiley & Sons, Ltd., London.

[13] I. Dincer, 2002. "On Thermal Energy Storage Systems and Applications in Buildings", Energy and Buildings, Vol. 34, PP. 377–388.

[14] Islamic Republic of Iran Energy Ministery, URL: http://www.bahaye_bargh.tavanir.org.ir/

[15] J. Wang, Z. Zhai, Y. Jing, C. Zhang, 2010. "Particle Swarm Optimization for Redundant Building Cooling Heating and Power System", Appl. Energy, Vol. 87, PP. 3668-3679.

[16] K. Deb and A. Pratap and S. Agarwal and T. Meyarivan, 2002. “A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA–II”, IEEE Transactions on Evolutionary Computation.

[17] K. K. Humpherys, S. Kattell, 1981. "Basic Cost Engineering", (Marcel Dekker, New York).

[18] L. L. Wood, A. K. Miedema, S. C. Cares, 1994. "Modeling the Technical and Economic Potential of Thermal Energy Storage Systems Using Pseudo-data Analysis", Resource and Energy Economics, Vol. 16, PP. 123-145.

[19] M. A. Badar, S. M. Zubair, A. A. Al-Farayedhi, 1993 "Second-law Based Thermoeconomic Optimization of a Sensible Heat Thermal Energy Storage System", Energy, Vol. 18, PP. 641-649.

[20] M.A. Rosen, I. Dincer, 2003. "Exergy Methods for Assessing and Comparing Thermal Storage Systems", Int. J. Energy Res, Vol. 27, PP. 415–430.

[21] M. M. Oskounejad, 2006. "Engineering Economy", (Tehran Polytechnic).

[22] N. Srinivas and K. Deb, 1994.” Muiltiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms”, Evolutionary Computation.

[23] O. Rezayan, A. Behbahaninia, 2011. “Thermoeconomic optimization and exergy analysis of CO_2/NH_3 cascade refrigeration systems”, Energy, Vol. 36, Issue 2, PP.888-895.

[24] S. M. Vakilaltojjar, W.Saman, 2001. "Analysis and Modelling of a Phase Change Storage System for Air Conditioning Applications", Appl. Therm. Eng., Vol. 21, PP. 249-263.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]

[25] S. Sanaye, A. Shirazi, 2013. “Thermo-economic optimization of an ice thermal energy storage system for air-conditioning applications, Energy Buildings”, Vol.60, PP.100-109.

[26] Smith R. 2005. “Chemical process: design and integration”, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.

[27] U. Stritih, V. Butala, 2007. "Energy Saving in Building with PCM Cold Storage", Int. J. Energy Res., Vol. 31, PP. 1532–1544.

[28] UNEP. Global Environmental Outlook. NY: United Nations 2000.

[29] Y. Bi, T. Guo, L. Zhang, L. Chen, F. Sun, 2010. "Entropy Generation Minimization for Charging and Discharging Processes in a Gas-hydrate Cool Storage System", Applied Energy, Vol. 87, PP. 1149–1157.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-03]