

## بررسی فنی و اقتصادی سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی بوسیله هوای فشرده به منظور مدیریت مصرف در اوج بار

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران، a.amiri@ub.ac.ir

امین امیری دلویی\*

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران، h.sajjadi@ub.ac.ir

حسن سجادی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بجنورد، بجنورد، ایران، h.naeimi@ub.ac.ir

هومن نعیمی

کارشناسی مهندسی برق، مدیر عامل شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی، بجنورد، ایران، a.saboori@nkedc.ir

علیرضا صبوری

کارشناسی ارشد مدیریت تکنولوژی، رئیس تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی، بجنورد، ایران، e.hoseinpour@nkedc.ir

اسماعیل حسین پور

### چکیده

در مطالعه حاضر، دو طرح پیشنهادی برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، یکی مجهز به بازیاب گرما و دیگری بدون آن ارائه و تحلیل‌های فنی مربوط به آن‌ها انجام شده است. هزینه‌های مربوط به هر یک از طرح‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و یک تحلیل اقتصادی شامل ارزش خالص فعلی (NPV)، نرخ بازگشت سرمایه (IRR)، شاخص سودآوری (PI) و دوره بازگشت سرمایه تنزیل یافته (DPBP) صورت گرفته است. این تحلیل‌ها برای مقادیر ذخیره انرژی ۸۰، ۲۲۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۶۴۰ و ۱۰۰۰ کیلووات ساعت و فشارهای ذخیره‌سازی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ بار ارائه گردیده است. نتایج مربوط به تحلیل‌های فنی و اقتصادی نشان می‌دهد که این سیستم‌ها برای تولید توان‌های بالاتر و در فشار ذخیره‌سازی پایین‌تر، توجه‌پذیرتر هستند. در پایان با استفاده از نتایج حاصل از این تحلیل، طرح بهینه ذخیره انرژی ۶۴۰ کیلووات ساعت با فشار ذخیره‌سازی ۵۰ بار پیشنهاد گردیده است. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان برای انتخاب یک سیستم ذخیره هوای فشرده مناسب به منظور اوج زدایی در ساعات اوج مصرف برق بهره برد. **واژه‌های کلیدی:** سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده، اوج زدایی، تحلیلی فنی، تحلیل اقتصادی، ذخیره انرژی، انرژی الکتریکی.

## Technical and economic study of electrical energy storage systems by compressed air to manage consumption at peak load

A. Amiri Delouei

Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

H. Sajjadi

Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

H. Naeimi

Department of Mechanical Engineering, University of Bojnord, Bojnord, Iran

A. R. Saboori

North Khorasan Electric Distribution Company, Bojnord, Iran

S. Hoseinpour

North Khorasan Electric Distribution Company, Bojnord, Iran

### Abstract

In the present study, two proposed designs for compressed air storage systems, one equipped with heat recovery and the other without it, are presented and their technical analysis is performed. The costs of each project are evaluated and economic analysis including Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Profitability Index (PI), and Discounted Payback Period (DPBP) is performed. These analyses are presented for storage energy values of 80, 220, 360, 480, 640, and 1000 kWh and storage pressures of 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, and 450 bar. The results of the technical and economic analysis show that these systems are more justifiable to produce higher capacities at lower storage pressures. Finally, using the results of this analysis, the optimal energy storage plan of 640 kWh with storage pressure of 50 bar is proposed. The results of this study can be used to select a suitable compressed air storage system for peak shaving during peak hours of power consumption.

**Keywords:** Compressed air energy storage (CAES) system, Peak shaving, Technical analysis, Economic analysis, Energy storage, Electrical energy.

سازی آن در مخازن استفاده می‌شود. این هوای فشرده در ساعات اوج بار برای به حرکت درآوردن توربین مورد بهره برداری قرار گرفته و برق تولید می‌کند. در واقع سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده از انرژی الکتریکی ارزان و کم‌ارزش در ساعات غیر اوج بار استفاده کرده و انرژی الکتریکی گران قیمت و پر ارزش در ساعات اوج بار را به شبکه تحویل

### ۱- مقدمه

ذخیره انرژی به روش هوای فشرده تکنیکی است که برای اوج-زدایی شبکه برق مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش از انرژی برق در ساعات غیر اوج بار برای فشرده کردن هوا توسط کمپرسور و ذخیره-

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: a.amiri@ub.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۰۳

می‌دهد و از این طریق صرفه اقتصادی سیستم را بالا می‌برد. در سال‌های اخیر به دلیل رو به اتمام بودن سوخت‌های فسیلی و مضرات فراوان آن‌ها برای محیط زیست، بحث گسترش استفاده از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر قوت گرفته است. با این‌وجود استفاده از انرژی باد و خورشید به دلیل متغیر بودن و ناپایداری محدود شده است. به خصوص اینکه الگوی وزش باد و ساعات موثر تابش خورشید در طول ساعات شبانه روز با الگوی تقاضا برای انرژی برق مطابقت ندارد، به این معنی که وزش باد در ساعات بعد از نیمه شب و ابتدای صبح که ساعات غیر اوج بار و کمترین تقاضا محسوب می‌شود، شدیدتر است. بنابراین تلفیق نیروگاه خورشیدی و بادی با یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی، ایده بسیار خوبی است [۱ و ۲]. در سال‌های اخیر، استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده (CAES) بسیار مورد توجه قرار گرفته و هم‌اکنون چندین نیروگاه تلفیقی به همین منظور در حال ساخت هستند [۳ و ۴]. ذخیره‌سازی انرژی به روش ذخیره‌سازی هوای فشرده بیشتر از ۲۵ سال عمر دارد. عملکرد روش ذخیره‌سازی هوای فشرده با راه‌اندازی نیروگاه هانتورف<sup>۲</sup> در آلمان و نیروگاه مک‌اینثا<sup>۳</sup> در آمریکا به خوبی به اثبات رسیده است. در ادامه به بعضی از مطالعات شاخص در این زمینه پرداخته خواهد شد.

بودت و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۶ یک مطالعه مروری در خصوص ذخیره‌سازی انرژی توسط هوای فشرده ارائه کرده‌اند. آن‌ها به معرفی قواعد بنیادین این نوع سیستم‌ها، یافته‌های گذشته و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه پرداخته‌اند. باقری و وحیدی [۶]، یک مطالعه موردی روی استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی هوای فشرده کوچک<sup>۴</sup> انجام داده‌اند. آن‌ها این سیستم را به عنوان یک راهکار ذخیره سبز انرژی در کنار سیستم‌های تولید توان بادی در نظر گرفته‌اند. آن‌ها سه عامل بارده، توان خروجی و ظرفیت ذخیره‌سازی را به عنوان پارامترهای مهم دسته‌بندی این سیستم‌ها معرفی کرده‌اند. آن‌ها معتقدند با توجه به فشار پایین کاری، سیستم‌های ذخیره انرژی هوای فشرده کوچک برای استفاده در محیط‌های شهری مناسب هستند و این روش می‌تواند برای ایجاد منابع تولید انرژی پراکنده<sup>۵</sup> که جایگزین مناسبی برای انرژی الکتریکی گران قیمت نیروگاه‌ها هستند، مفید باشد. مطالعه آن‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این سیستم‌ها برای تولید بی‌وقفه توان (در سیستم‌های بادی) و اوج زدایی<sup>۶</sup> کمک می‌کند و می‌تواند به عنوان جایگزین برای خطوط توزیع الکتریسیته در برخی شهرهای ایران مطرح باشد. جین چائو و همکاران [۷] یک تحلیل اقتصادی برای سیستم‌های ذخیره هوای فشرده رو زمینی<sup>۷</sup> ارائه کرده‌اند. تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های زیرزمینی<sup>۸</sup> گران‌تر هستند. همچنین تحلیل ایشان متمرکز بر انواع تکنولوژی ذخیره هوای فشرده یعنی (۱) مخازن ذخیره هوا، (۲) سیلندرها<sup>۹</sup> گاز<sup>۹</sup> و (۳) لوله‌های

ذخیره گاز<sup>۱۱</sup> بوده است. مطابق با تحلیل ایشان اگر چه استفاده از لوله‌های ذخیره گاز مقرون به صرفه‌تر است اما این شیوه محدودیت فشار ذخیره‌سازی دارد. سالوینی [۸] یک تحلیل اقتصادی-فنی برای نسل دوم سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده با اندازه کوچک<sup>۱۱</sup> ارائه داده است. در این نوع سیستم‌ها، یک مکانیزم تراکم و ذخیره هوا با یک توربین گازی تجاری موجود ترکیب می‌شود. سالوینی [۸] مطالعاتش را برای فشار ذخیره‌سازی بین ۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلوپاسکال انجام داده است. تحلیل اقتصادی ایشان نشان می‌دهد که کمترین هزینه سالانه مربوط به سیستم با فشار ۴۰۰۰ کیلوپاسکال خواهد بود. صفایی و عزیز [۹] یک تحلیل ترمودینامیکی برای سه نوع مختلف از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده انجام داده است. این سه نوع عبارتند از سیستم‌های مرسوم، آدیاباتیک و سوخت هیدروژن<sup>۱۲</sup>. در نوع سوم از گرمای ناشی از تراکم برای الکترولیز آب و ذخیره هیدروژن استفاده می‌کنند. نتایج کار ایشان نشان می‌دهد که سیستم‌های ذخیره‌سازی آدیاباتیک بهترین عملکرد را خواهند داشت. لوند و سالجی [۱۰] مطالعه‌ای جامع در خصوص نقش ذخیره هوای فشرده در سیستم‌های انرژی پایدار آینده در کشور بلژیک انجام داده‌اند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در مقایسه با سایر روش‌های ذخیره‌سازی انرژی هیچگونه توجیهی حتی با قیمت‌های پیش‌بینی شده برای آینده ندارد. اما از این سیستم‌ها می‌توان در کنار سیستم‌های کمکی دیگر استفاده کرد. یک رویکرد جدید برای بازیابی گرما در سیستم‌های ذخیره انرژی هوای فشرده توسط ساپوترو و فرید [۱۱] ارائه گردیده است. آن‌ها برای این منظور از یک مخزن فشار بالای دو لیتری (۲۰۰ بار) همراه با میکروکپسول‌های تجاری<sup>۱۳</sup> که در آن‌ها از مواد با توانایی ذخیره انرژی نهان<sup>۱۴</sup> بهره گرفته شده، استفاده کرده‌اند. نتایج آزمایشگاهی آن‌ها می‌دهد که این نوع از سیستم‌های بازیابی انرژی گرمایی کارکرد مطلوبی خواهند داشت. ساتکین و همکاران [۱۲] در مورد انتخاب مکان مناسب برای نیروگاه‌های بادی مجهز به سیستم ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در ایران تحقیقاتی را انجام داده‌اند. نتایج کار آن‌ها نشان می‌دهد که بیش از ۳۰ سایت و ۵ منطقه اصلی در ایران می‌توانند برای نصب تجهیزات مربوط به این نیروگاه‌ها با مخازن زیر زمینی مناسب باشند. شایان ذکر است که سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده به صورت ترکیبی با سیستم‌های ترمودینامیکی دیگر از قبیل نیروگاه‌های بادی [۶ و ۱۲-۱۴]، نیروگاه‌های خورشیدی [۱۵]، سیستم‌های تبرید [۱۶] و سیستم‌های ذخیره پمپاژ آب<sup>۱۵</sup> [۱۷] نیز وجود دارند. امکان‌سنجی استفاده از مخازن ذخیره غیرمتعارف برای ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده نظیر یک لوله خط گاز بدون استفاده در شیلی [۱۸] یا یک معدن بسته شده در چین [۱۹] از موارد جالب توجه در بررسی ادبیات تحقیق حاضر است.

در این مطالعه به بررسی فنی و اقتصادی دو طرح مربوط به

<sup>1</sup> Compressed-air energy storage

<sup>2</sup> Huntorf

<sup>3</sup> McIntosh

<sup>4</sup> Small CAES

<sup>5</sup> Distributed generation source

<sup>6</sup> Peak shaving

<sup>7</sup> Above ground CAES

<sup>8</sup> Underground CAES

<sup>9</sup> Gas cylinders

<sup>10</sup> Gas storage pipelines

<sup>11</sup> Small Size Second Generation CAES System

<sup>12</sup> Hydrogen-Fueled

<sup>13</sup> Commercial microcapsules

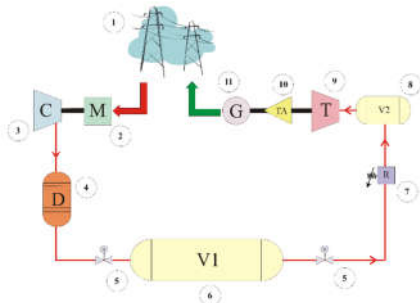
<sup>14</sup> Latent heat

<sup>15</sup> Pumped hydro storage

اوج مصرف، این هوای فشرده دوباره از طریق شیر کنترل سمت راست به رگولاتور (شماره ۷) منتقل شده و از آنجا وارد یک مخزن فرعی (شماره ۸) می‌شود. شیر کنترل اول، فشار داخل مخزن اصلی و شیر کنترل دوم فشار داخل مخزن فرعی را کنترل می‌کند. هوای فشرده موجود در این مخزن برای به گردش درآوردن توربین (شماره ۹) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در عمل در هنگام اوج مصرف انرژی، سیستم CAES در حالت تولید توان وارد عمل می‌شود. در این حالت، هوای ذخیره شده داخل مخزن اصلی (شماره ۶) با استفاده از شیر کنترل دوم آزاد و توسط رگولاتور فشار (شماره ۷) کنترل می‌شود. برای بهبود بازده سیستم، فرایند انبساط گاز به صورت تدریجی توسط مخزن فرعی (شماره ۸) انجام می‌شود. حرکت دورانی محور توربین پس از عبور از یک تقویت کننده گشتاور (شماره ۱۰) به ژنراتور الکتریکی (شماره ۱۱) منتقل می‌شود که می‌تواند انرژی ذخیره شده را دوباره به شبکه برق برگرداند. همچنین ممکن است یک جعبه دنده<sup>۵</sup> برای ارتباط بین موتور الکتریکی و کمپرسور و یا ارتباط بین ژنراتور و توربین مورد نیاز باشد. علاوه بر این یک ترانسفورماتور<sup>۶</sup> مناسب برای ایجاد ارتباط بین سیستم CAES و شبکه برق مورد نیاز است.

## ۲-۲- طرح شماره ۲

هنگامی که هوا در کمپرسور فشرده می‌شود، دمای سیال بسته به فشار تراکم به میزان قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین انرژی کل ذخیره شده در مخزن ترکیبی از انرژی قابل استحصال از هوای فشرده و همچنین انرژی گرمایی ایجاد شده است. شکل ۲ سهم مربوط به انرژی هوای فشرده و انرژی گرمایی را از انرژی کل در حالت پایدار نشان می‌دهد [۲۰].



۱	شبکه برق	۷	رگولاتور
۲	موتور الکتریکی	۸	مخزن ذخیره هوای فشرده فرعی
۳	کمپرسور	۹	توربین
۴	رطوبت‌گیر	۱۰	تقویت کننده گشتاور
۵	شیر کنترلی	۱۱	ژنراتور
۶	مخزن ذخیره هوای فشرده اصلی		

شکل ۱- طرحواره شماره ۱

سیستم‌های ذخیره انرژی هوای فشرده، مجهز به بازیاب و فاقد بازیاب، پرداخته شده است. پس از بررسی میزان توانایی هر یک از سیستم‌ها برای ذخیره‌سازی انرژی در فشارهای مختلف، هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری اولیه و عایدات ناشی از آن مورد بحث قرار گرفته است. تحلیل اقتصادی انجام شده به ارزش خالص فعلی<sup>۱</sup> (NPV)، نرخ بازگشت سرمایه داخلی<sup>۲</sup> (IRR)، شاخص سودآوری<sup>۳</sup> (PI) و دوره بازگشت سرمایه تنزیل یافته<sup>۴</sup> (DPBP) پرداخته است. تحقیق حاضر برای دامنه ذخیره انرژی بین ۸۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات ساعت با فشار ذخیره‌سازی ۵۰ تا ۴۵۰ بار صورت گرفته است. پارامترهای متعدد تاثیرگذار در انتخاب طرح بهینه مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت طرح بهینه با توجه به ظرفیت مورد نیاز، هزینه اولیه و هدف تحقیق پیشنهاد گردیده است. شایان ذکر است که این تحقیق برای یک سیستم ذخیره‌سازی رو زمینی و برای اجرا در مناطق شمال شرقی ایران (استان خراسان شمالی) انجام شده است. نوآوری کار حاضر ارائه یک طرح مقرون به‌صرفه برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی با هدف اوج زدایی در ساعات اوج مصرف است. با توجه به دانش نویسندگان تاکنون تحلیل اقتصادی جامعی در این خصوص صورت نگرفته است لذا در تحقیق حاضر روی تحلیل اقتصادی این سیستم تاکید بیشتری شده است. همچنین از نرم‌افزار Aspen-HYSIS برای شبیه‌سازی عددی فرایندهای مربوط به ذخیره‌سازی (شارژ) و تخلیه (دشارژ) در طرح پیشنهادی بهره گرفته شده است. این شبیه‌سازی برای توان‌ها و بازده‌های متفاوت کمپرسور و توربین مربوط به طرح پیشنهادی، انجام شده و اطلاعات مفیدی برای علاقه‌مندان به استفاده از این سیستم در شرایط کارکرد مختلف، ارائه می‌دهد.

## ۲- طرح‌های پیشنهادی

با توجه به بررسی‌های به‌عمل آمده، دو طرح زیر به عنوان طرح‌های مبنای دستور کار قرار گرفته‌اند.

### ۲-۱- طرح شماره ۱

همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است این طرح شامل یازده قسمت اصلی است. ابتدا با استفاده از توان شبکه برق (شماره ۱) در ساعات کم باری، موتور الکتریکی (شماره ۲) یک کمپرسور هوا (شماره ۳) را به گردش در می‌آورد. باید توجه داشت که منبع انرژی علاوه بر شبکه برق می‌تواند منابع مکانیکی نظیر توربین‌های آبی یا بادی باشد که جایگزین موتور الکتریکی (شماره ۲) خواهند شد. همچنین منبع انرژی الکتریکی می‌تواند مستقل از شبکه برق بوده و توسط توربین‌های بادی یا ژنراتورهای الکتریکی خورشیدی و فتوولتائیک تامین شود. در ادامه هوای فشرده وارد رطوبت‌گیر (شماره ۴) شده و خشک می‌گردد. رطوبت‌گیر برای نواحی با رطوبت نسبی بالا کاربرد دارد. هوای خشک پس از عبور از شیر کنترل (شماره ۵) در یک مخزن بزرگ (شماره ۶) به صورت فشرده نگهداری می‌شود. در ساعات

<sup>1</sup> Net present value

<sup>2</sup> Internal rate of return

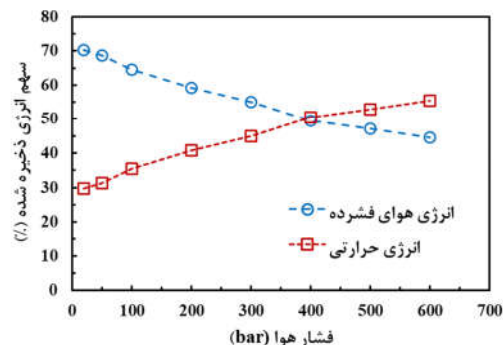
<sup>3</sup> Profitability index

<sup>4</sup> Discounted payback period

<sup>5</sup> Set-up or set-down gearbox

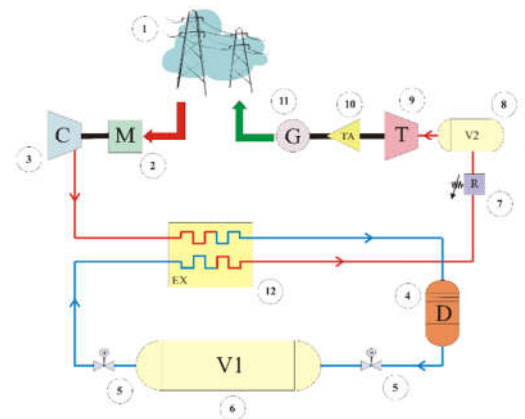
<sup>6</sup> Set-up transformer

همانگونه که از شکل ۲ مشخص است، در فشارهای بالای ۲۰۰ بار سهم انرژی گرمایی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد تا حدی که در فشارهای بالاتر از ۴۰۰ بار، سهم انرژی گرمایی حتی غالب نیز خواهد بود.



شکل ۲- سهم مربوط به انرژی هوای فشرده و انرژی گرمایی از انرژی کل در فشارهای مختلف [۲۰]

بنابراین بازایی درصدی از این انرژی گرمایی می‌تواند به افزایش راندمان سیستم کمک بسزایی نماید. در طرح شماره ۲ روی بحث بازایی انرژی گرمایی تاکید شده است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، تفاوت عمده بین طرح ۲ و طرح ۱، وجود یک مبادله-کن گرمایی مجهز به بازیاب (شماره ۱۲) است. همانطور که در بخش بعد خواهید دید، با افزایش فشار مخازن، سهم عمده‌ای از انرژی ذخیره شده به صورت گرما به هدر می‌رود. برای حل این مشکل، مبادله‌کن گرمایی مجهز به بازیاب پیشنهاد شده است تا بتواند بخشی از این انرژی را به سیستم برگرداند.



۱	شبکه برق	۷	رگولاتور
۲	موتور الکتریکی	۸	مخزن ذخیره هوای فشرده فرعی
۳	کمپرسور	۹	توربین
۴	رطوبت‌گیر	۱۰	تقویت کننده گشتاور
۵	شیر کنترلی	۱۱	ژنراتور
۶	مخزن ذخیره هوای فشرده اصلی	۱۲	مبادله‌کن گرمایی مجهز به بازیاب

شکل ۳- طرحواره شماره ۲

در واقع هوا پس از فشرده شدن در کمپرسور به شدت گرم می‌شود و این مبادله‌کن گرمایی انرژی آن را قبل از ذخیره‌سازی در مخزن جذب کرده و در مرحله تولید توان دوباره به هوا بر می‌گرداند. در داخل مبادله‌کن گرمایی می‌توان از نمک مذاب برای بازیابی انرژی گرمایی استفاده کرد. اگر چه استفاده از مبادله‌کن گرمایی باعث افزایش راندمان سیستم می‌شود، اما این امر می‌تواند به افزایش سرمایه اولیه مورد نیاز منجر شود که در ادامه به بررسی نحوه تغییرات پرداخته خواهد شد.

### ۳- هزینه‌ها

در این قسمت دو طرح معرفی شده از لحاظ اقتصادی مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای این منظور دو طرح پیشنهادی برای ذخیره انرژی ۱۰۰۰ کیلووات ساعت ارزیابی خواهند گردید.

انرژی (کار) ذخیره شده در یک حجم مشخص از هوا وقتی که از فشار  $P_A$  تا  $P_B$  متراکم می‌شود، از رابطه (۱) بدست می‌آید [۲۱]:

$$E = P_B V_B \ln\left(\frac{P_A}{P_B}\right) + (P_A - P_B) V_B \quad (1)$$

که در آن فشار بر حسب پاسکال، حجم بر حسب مترمکعب و انرژی بر حسب ژول در نظر گرفته شده‌اند.

اگر فشار اولیه را فشار اتمسفر ( $P_0$ ) و فشار ثانویه را فشار مخزن ( $P_s$ ) در نظر بگیریم و همچنین حجم مخزن را با  $V_s$  نشان دهیم، آنگاه می‌توان رابطه بالا را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{E}{V_s} = 2.78 \times 10^{-5} P_s \left(1 + \ln\left(\frac{P_0}{P_s}\right) - \frac{P_0}{P_s}\right) \quad (2)$$

که در آن فشار بر حسب بار، حجم بر حسب لیتر و انرژی بر حسب کیلو وات ساعت است.

قیمت مخازن ذخیره تجاری معمول برای فشار ۵۰ بار با حجمی حدود ۲۰۰۰ لیتر، ۱۰۰۰ دلار معادل ۰/۵ دلار به ازاء هر لیتر است. همچنین قیمت مخازن ذخیره تجاری معمول برای فشار ۱۰۰ بار با حجمی حدود ۲۰۰۰ لیتر، ۵۰۰۰ دلار یا به عبارتی ۲/۵ دلار به ازاء هر لیتر است. برای فشار ۱۵۰ بار، قیمت مخازن به ازاء هر لیتر حدود ۳/۲ دلار است. در فشار ۲۰۰ بار یا به عبارتی بالاتر از ۳۰۰۰ psi استاندارد های ASME برای مخازن تحت فشار تغییر می‌کند و علاوه بر آن مخازن ذخیره با حجم بالا موجود در بازار بسیار کمیاب می‌شوند. استاندارد ASME الزامات سخت‌گیرانه‌ای برای طراحی، ساخت، تست و بازرسی مخازن در این فشارها ایجاد می‌کند که باعث افزایش قابل توجه قیمت مخازن در این فشارها می‌شود. بر مبنای قیمت تمام شده برای هر لیتر، مخازن تحت فشار موجود در بازار برای فشارهای ۲۰۰ و ۳۵۰ بار دارای ظرفیت ذخیره پایین و قیمتی بالاتر از ۳۵ دلار برای هر لیتر است. البته برای فشار ۴۰۰ بار، مخازن تجاری با قیمتی در حدود ۳۳ دلار بر لیتر و حجم ۷۶۴ لیتر موجود هستند. در جدول ۱ قیمت مخازن به همراه حجم مورد نیاز برای ذخیره انرژی ۱۰۰۰ کیلووات ساعت در فشارهای مختلف برای دو طرح مجهز به بازیاب و بدون بازیاب ارائه شده است [۲۰]. باید توجه داشت که حجم و به تبع آن هزینه مخازن مورد نیاز برای طرح بدون بازیاب بیشتر است. در واقع در طرح مجهز به بازیاب، مقداری از سهم مربوط به تولید توان توسط

در شکل ۵ هزینه کل مربوط به ساخت سیستم هوای فشرده در دو حالت (۱) بدون قابلیت بازیابی گرما و (۲) با قابلیت بازیابی گرما ارائه شده است. این هزینه‌ها حاصل جمع هزینه‌های مربوط به مخازن، مبادله‌کن گرمایی (برای طرح ۲)، شیرهای کنترل، کمپرسور و توربین است [۲۰]. همانگونه که از شکل ۵ مشخص است، فشار هوای ۲۰۰ بار، بدترین حالت را از لحاظ هزینه‌های احتمالی خواهد داشت. همچنین در فشارهای کمتر از ۱۵۰ بار، هزینه‌های مربوط به طرح بدون بازیاب کمتر از طرح مجهز به بازیاب است، در حالی که در فشارهای بالاتر از ۱۵۰ بار، عکس این موضوع را شاهد هستیم. همانطور که قبلاً بحث شد این موضوع مربوط به حجم بالای مخازن مورد نیاز در طرح بدون بازیاب در فشارهای بالا نسبت به طرح مجهز به بازیاب است. مطابق با این نمودار کمترین هزینه به طرح بدون بازیاب در فشار ۵۰ بار اختصاص دارد.

#### ۴- بررسی اقتصادی طرح‌ها

در این بخش به تحلیل اقتصادی طرح‌ها خواهیم پرداخت. مطابق با استاندارد انجام شده از شرکت توزیع برق، قیمت برق صادراتی به اِزاه هر کیلووات تقریباً ۷ سنت محاسبه می‌شود. همچنین میانگین قیمت برق برای مصارف داخلی (خانگی، عمومی، کشاورزی، صنعتی و تجاری) مبلغ ۹۵ تومان به اِزاه هر کیلووات است. علاوه بر این قیمت تولید برق در نیروگاه برق (استعلام از نیروگاه شیروان) حدود ۴۰۰ تومان به اِزاه هر کیلووات اعلام شده است. البته بایستی توجه داشت که این مبلغ با استفاده از سوخت یارانه‌ای در نیروگاه اعلام می‌شود. در تحلیل‌های اقتصادی زیر، عمر مفید دستگاه ۳۰ سال (با توجه تحقیقات پیشین [۱۰]) و نرخ بهره بانکی ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است با توجه به قیمت ناچیز برق در ساعات کم‌باری و همچنین طرح‌های تشویقی مختلف پیشنهادی برای بحث اوج زدایی در شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی، از هزینه برق مربوط به شارژ سیستم ذخیره انرژی حاضر صرف‌نظر شده است. همچنین در تحقیق حاضر بازده اجزاء سیستم ذخیره‌سازی انرژی ۸۰ درصد فرض شده است [۲۳].

#### ۴-۱- تحلیل اقتصادی طرح‌های پیشنهادی مجهز به

##### بازیاب و بدون بازیاب

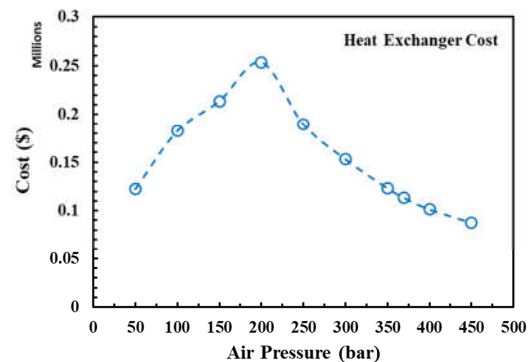
در این قسمت تحلیل اقتصادی طرح‌های پیشنهادی مجهز به بازیاب و بدون بازیاب در فشارهای مختلف برای ذخیره انرژی ۱۰۰۰ کیلووات ساعت مورد بررسی قرار گرفته است.

برای بررسی موضوع ابتدا شاخص سودآوری دو طرح معرفی شده مورد بررسی قرار گرفته‌اند. شاخص سودآوری (PI) یا نسبت منافع به مخارج (B/C) یک طرح سرمایه‌گذاری، نرخ است که از تقسیم ارزش خالص فعلی جریان نقدی ورودی بر ارزش فعلی هزینه سرمایه‌گذاری به‌دست می‌آید [۲۴]. شاخص سودآوری ارتباط بین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عواید آتی طرح را نشان می‌دهد. اگر شاخص سودآوری بالاتر از یک باشد انجام طرح از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است و در غیر این صورت به صرفه نخواهد بود.

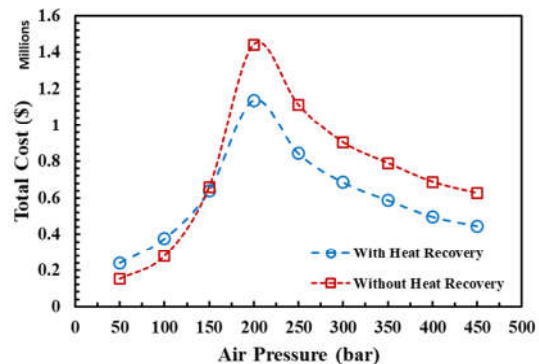
گرمای بازیافتی تامین می‌شود، در حالی که در طرح بدون بازیاب تمام این توان باید توسط انرژی مکانیکی ذخیره شده در هوای فشرده تامین شود. در نتیجه طرح فاقد بازیاب نیازمند حجم بیشتری برای تولید توان مشابه با طرح دیگر خواهد بود. کاهش حجم مورد انتظار برای طرح مجهز به بازیاب با توجه به شکل ۲ قابل محاسبه است. هزینه مربوط به تامین مبادله‌کن گرمایی برای بازیافت گرما نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. این هزینه‌ها با استفاده از روابط معرفی شده در کتاب سیدر و همکاران [۲۲] استخراج شده که از مراجع شناخته شده در زمینه طراحی مبادله‌کن گرمایی است.

#### جدول ۱- قیمت مخزن مورد نیاز برای دو سیستم ذخیره هوای فشرده

فشار (بار)	حجم (لیتر)	قیمت مخزن (دلار)	
		با بازیاب	بدون بازیاب
۵۰	۱۶۹۳۱۲/۵۸	۲۴۶۵۲/۰۹	۰/۵ دلار
۱۰۰	۶۴۳۵۰/۲۴	۹۹۸۶۰/۷۱	۲/۵ دلار
۱۵۰	۳۵۹۹۳/۱۴	۵۹۸۸۸/۷۵	۱۰ دلار
۲۰۰	۲۴۸۴۷/۳۷	۴۱۹۲۳/۳۵	۳۳ دلار
۲۵۰	۱۷۸۰۰/۱۴	۳۱۸۸۶/۹۰	۳۳ دلار
۳۰۰	۱۴۰۲۶/۰۴	۲۵۵۴۴/۱۳	۳۳ دلار
۳۵۰	۱۱۰۷۷/۴۷	۲۱۲۰۰/۹۱	۳۳ دلار
۴۰۰	۸۹۲۶/۳۰	۱۸۰۵۴/۸۲	۳۳ دلار
۴۵۰	۷۵۶۵/۰۴	۱۵۷۶۸/۸۵	۳۴ دلار



شکل ۴- هزینه مبادله‌کن گرمایی در فشارهای مختلف [۲۲]



شکل ۵- هزینه کل ساخت سیستم ذخیره سازی انرژی هوای فشرده

در دو حالت وجود بازیاب گرما و بدون بازیاب گرما [۲۰]

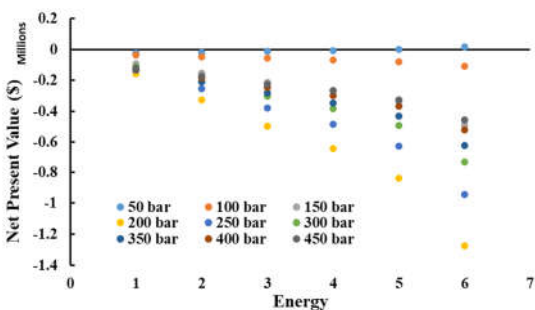
• ارزش خالص فعلی

ارزش خالص فعلی (NPV) تفاوت بین ارزش فعلی جریان نقدی ورودی و ارزش فعلی جریان نقدی خروجی است. این معیار برای بودجه‌بندی سرمایه و تحلیل پروژه بکار می‌رود [۲۴]. در روش ارزش خالص فعلی، ابتدا تمامی هزینه‌ها و درآمدها بسته به اینکه در چه زمانی به وقوع خواهند پیوست، با نرخ بهره مناسبی طبق رابطه زیر تنزیل می‌شوند.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+i)^t} - C_0 \quad (3)$$

در این رابطه  $C_t$  جریان نقدی خالص طی دوره،  $C_0$  کل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه،  $i$  نرخ بهره و  $t$  تعداد دوره‌های زمانی است. ارزش فعلی خالص مثبت نشان می‌دهد که درآمد پیش‌بینی شده یک پروژه یا سرمایه‌گذاری (در حال حاضر) بیش از هزینه‌های پیش‌بینی شده (با ارزش فعلی پول) است. به‌طور کلی، سرمایه‌گذاری با NPV مثبت سودآور خواهد بود و سرمایه‌گذاری با NPV منفی منجر به زیان خالص خواهد شد.

شکل ۷ ارزش خالص فعلی (میلیون دلار) طرح پیشنهادی (بدون بازیاب) را برای ذخیره انرژی‌ها متفاوت در فشارهای مختلف نشان می‌دهد. متأسفانه همانگونه که در شکل مشخص است، مقدار NPV فقط برای طرح‌های با فشار پایین ۵۰ بار و ذخیره انرژی‌های بالای ۶۴۰ کیلو وات ساعت مثبت است و در سایر موارد منفی است. مقادیر منفی NPV با افزایش توان مورد نیاز و فشار ذخیره‌سازی به شدت افزایش می‌یابد.

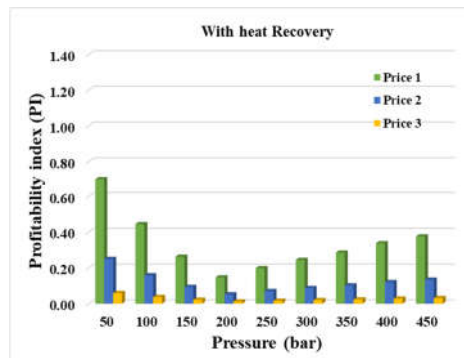


شکل ۷- ارزش خالص فعلی (میلیون دلار) طرح پیشنهادی برای مقادیر ذخیره انرژی متفاوت در فشارهای مختلف

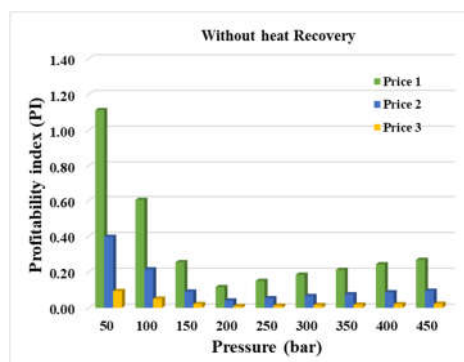
• نرخ بازگشت سرمایه داخلی

نرخ بازگشت سرمایه داخلی (IRR)، نرخ تنزیلی است که ارزش فعلی خالص (NPV) تمام جریان‌های نقدی یک پروژه را برابر با صفر می‌کند. برای محاسبه IRR از همان فرمول NPV (معادله ۳) استفاده می‌شود [۲۴]. برای محاسبه IRR با استفاده از این فرمول، باید NPV را برابر با صفر قرار داد و برای نرخ تنزیل  $(i)$ ، معادله را حل کرد. با توجه به ماهیت فرمول IRR نمی‌تواند به صورت تحلیلی محاسبه شود و باید به جای آن از طریق آزمون و خطا یا با استفاده از نرم‌افزارهایی مانند Excel محاسبه شود. اگر این میزان بازگشت از نرخ بهره بیشتر باشد، طرح سودآور و قابل اجرا بوده و اگر میزان بازگشت محاسبه شده کمتر از نرخ بهره واقعی باشد، طرح زیان‌ده بوده و غیرقابل اجرا است.

شکل ۸ میزان نرخ بازگشت سرمایه را برای طرح پیشنهادی نشان



الف



ب

قیمت برق صادراتی	Price 1
قیمت برق تمام شده برای نیروگاه	Price 2
میانگین قیمت برق مصرفی داخلی	Price 3

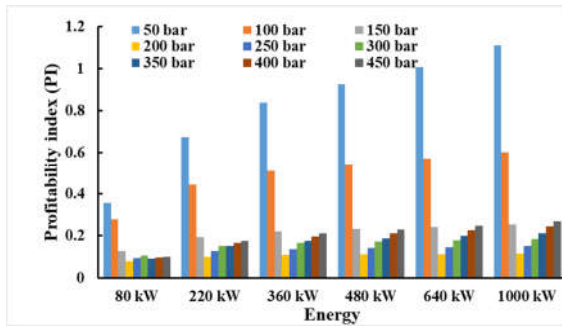
شکل ۶- شاخص سودآوری دو طرح ارائه شده (الف) با استفاده از بازیاب (ب) بدون استفاده از بازیاب

همانگونه که از نمودارهای شکل ۶ مشخص است، استفاده از سیستم هوای فشرده مجهز به بازیاب حتی با در نظر گرفتن قیمت گاز صادراتی نیز در هیچ فشاری از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. در سیستم هوای فشرده بدون بازیاب نیز تنها در فشار ۵۰ بار که قیمت مخازن به نسبت پایین است، استفاده از این نوع سیستم البته با لحاظ کردن قیمت گاز صادراتی توجیه‌پذیر خواهد بود. در ادامه تحلیل اقتصادی کامل‌تری برای سیستم‌های هوای فشرده بدون بازیاب در فشارهای مختلف به ازاء مقادیر ذخیره انرژی متفاوت ارائه خواهد شد.

۴-۲- تحلیل اقتصادی طرح پیشنهادی بدون بازیاب برای ذخیره انرژی‌های مختلف

در این قسمت سیستم ذخیره انرژی هوای فشرده بدون بازیاب برای فشارهای مختلف به صورت جزئی‌تر و در توان‌های متفاوت مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در این بخش از قیمت برق صادراتی برای محاسبات استفاده شده است.

می‌افزاید، جهت رفع این مشکل، به‌جای شاخص PBP، شاخص دوره بازگشت سرمایه تنزیل یافته (DPBP) تعریف شده که در آن جریانات نقدی پس از تنزیل شدن با یکدیگر جمع می‌شوند. همانگونه که در بخش‌های پیشین مشاهده شد، از میان طرح‌های در نظر گرفته شده، تنها دو طرح با انرژی ذخیره‌شده ۶۴۰ و ۱۰۰۰ کیلووات در فشار ۵۰ بار توجیه اقتصادی دارند و بنابراین دوره بازگشت سرمایه تنزیل یافته آن‌ها کمتر از ۳۰ سال و به ترتیب ۲۷ و ۱۵/۵ سال تخمین زده می‌شود.



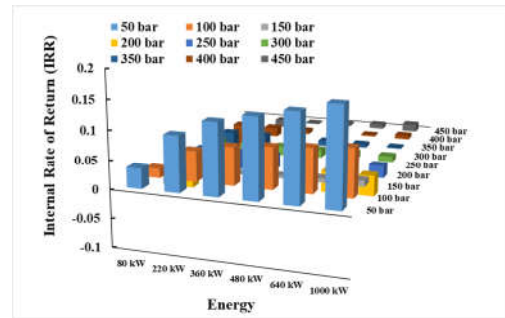
شکل ۹- شاخص سودآوری مربوط به طرح پیشنهادی به ازاء مقادیر ذخیره انرژی مختلف و فشارهای متفاوت

### ۵- شبیه‌سازی نرم‌افزاری

در این بخش از نرم افزار Aspen-HYSIS برای شبیه‌سازی فرایند ذخیره سازی هوا در مخزن و همچنین تولید توان در اثر تخلیه هوای فشرده استفاده شده است. با توجه به توضیحات ارائه شده در بخش قبل، مدل‌سازی‌ها برای حالت انرژی ذخیره شده ۶۴۰ کیلووات ساعت انجام شده است. شکل ۱۰ زمان پرشدن مخزن برحسب توان‌های مختلف کمپرسور (CP) را برای انرژی ذخیره شده ۶۴۰ کیلووات ساعت نشان می‌دهد. این شکل برای مقادیر بازده مختلف کمپرسور رسم شده است. همان‌گونه که در این شکل مشخص است با افزایش توان کمپرسور تاثیر بازده آن بر زمان پر شده مخزن کمتر خواهد شد. با توجه به زمان مطلوب برای پرشدن مخازن در دوره کم‌باری، از این نمودارها می‌توان برای تعیین توان مصرفی مناسب کمپرسورها استفاده کرد.

همچنین شکل ۱۱ توان تولید شده توسط توربین را برحسب زمان تخلیه مخزن برای انرژی ذخیره شده ۶۴۰ کیلووات ساعت نشان می‌دهد. این شکل‌ها برای توربین با بازده‌های مختلف گزارش شده است. این نمودار توان قابل استحصال از هوای فشرده برحسب مدت زمان دلخواه برای اوج زدایی قابل تعیین است. همانطور که انتظار می‌رود با طولانی‌تر شدن زمان تخلیه هوای فشرده، توان قابل استحصال نیز کمتر خواهد شد.

می‌دهد. این شکل برای مقادیر ذخیره انرژی مختلف و فشارهای ذخیره‌سازی متفاوت رسم شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، در طرح‌های با فشار پایین‌تر، نرخ بازگشت سرمایه به میزان قابل توجهی بالاتر است. تنها در دو طرح با ذخیره انرژی ۶۴۰ و ۱۰۰۰ کیلووات ساعت، مقدار نرخ بازگشت سرمایه بالاتر از نرخ بهره بانکی و به ترتیب برابر با ۱۵/۱٪ و ۱۶/۸٪ است. با افزایش فشار طرح، نرخ بازگشت سرمایه در حالت کلی کاهش می‌یابد و حتی نرخ بازگشت سرمایه منفی نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۸- میزان نرخ بازگشت سرمایه طرح پیشنهادی به ازاء مقادیر ذخیره انرژی مختلف و فشارهای متفاوت

### • شاخص سودآوری

همانگونه که قبلاً بیان شد، شاخص سودآوری (PI) یا نسبت منافع به مخارج (B/C) یک طرح سرمایه‌گذاری، نرخ است که از تقسیم ارزش خالص فعلی جریانات نقدی ورودی بر ارزش فعلی هزینه سرمایه‌گذاری به‌دست‌آمده می‌آید [۲۴]. شکل ۹ شاخص سودآوری مربوط به طرح پیشنهادی را به ازاء ذخیره انرژی‌های مختلف در فشارهای گوناگون نشان می‌دهد. با توجه به نتایج شکل ۹، تنها برای انرژی‌های بالای ۶۴۰ و ۱۰۰۰ کیلووات ساعت، شاخص سودآوری بالاتر از یک بوده و به ترتیب ۱/۰۱ و ۱/۱۱ است. در سایر موارد شاخص سودآوری کمتر از یک خواهد بود.

### • دوره بازگشت سرمایه تنزیل یافته

دوره بازگشت سرمایه<sup>۱</sup> (BPB) مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا خالص جریانات نقدی تجمعی پروژه صفر شود. به عبارتی مدت‌زمانی است که طول می‌کشد تا سرمایه‌گذاری اولیه در پروژه با عایدات آن برابر شود [۲۴]. دوره بازگشت سرمایه یکی از روش‌های استاندارد ارزیابی طرح‌های اقتصادی است که به دلیل آسان بودن محاسبه آن توسط بیشتر تحلیل‌گران مالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. طرح‌های با دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر جذابیت بیشتری نسبت به طرح‌هایی با دوره بازگشت بلندتر دارند. این روش بخصوص در هنگام مقایسه دو یا چند طرح با یکدیگر کاربرد دارد. اما در محاسبه شاخص PBP ارزش زمانی پول در نظر گرفته نمی‌شود و جریانات نقدی با فرض دارا بودن ارزش یکسان در سال‌های مختلف، با یکدیگر جمع می‌شوند. از آنجایی که در نظر گرفتن ارزش زمانی پول بر دقت و صحت محاسبات

<sup>1</sup> Payback period

- تنها برای فشارهای کم (۵۰ بار) و در ذخیره انرژی‌های بالای ۶۴۰ کیلووات ساعت، ارزش خالص فعلی مثبت خواهد بود.
- برای سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده در انرژی‌های ۶۴۰ و ۱۰۰۰ کیلووات ساعت، نرخ بازگشت سرمایه به ترتیب ۱۵/۱٪ و ۱۶/۱۸٪، شاخص سودآوری به ترتیب ۱/۰۱ و ۱/۱۱ و دوره بازگشت سرمایه به ترتیب ۲۷ و ۱۵/۵ سال خواهد بود.
  - از نتایج شبیه‌سازی انجام شده با استفاده از نرم‌افزار Aspen-HYSIS می‌توان برای تعیین توان مصرفی کمپرسور برای پر کردن مخزن در دوره کم‌باری و همچنین تنظیم زمان تخلیه آن برای رسیدن به توان مطلوب در دوره اوج زدایی استفاده کرد.

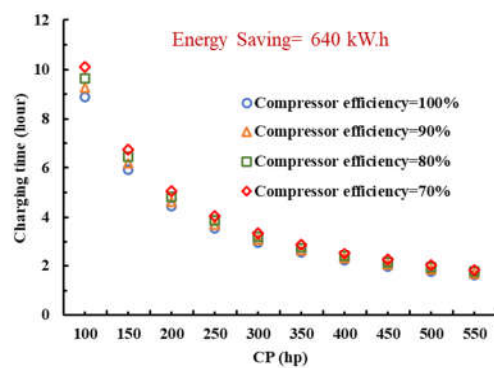
با توجه به اینکه در این طرح، هدف تنها توجیه اقتصادی نیست و بحث اوج زدایی هدف اصلی طرح بوده است و همچنین با توجه به سرمایه اولیه کمتر مورد نیاز، سیستم ذخیره هوای فشرده با فشار ذخیره ۵۰ بار و انرژی ذخیره شده ۶۴۰ کیلووات ساعت به عنوان بهینه‌ترین طرح معرفی می‌گردد.

## ۷- سپاسگزاری

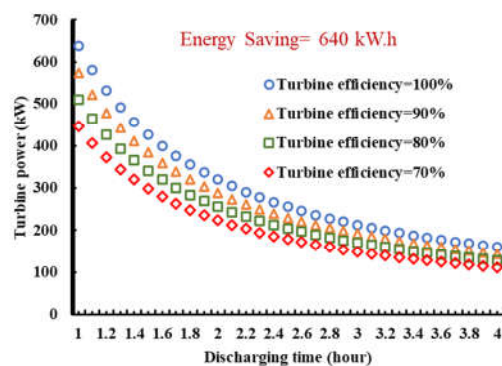
این مطالعه با حمایت شرکت توزیع نیروی برق استان خراسان شمالی و در قالب طرح پژوهشی با شماره ۹۸/۳۴۷/۶۱۰۴ به انجام رسیده است.

## ۸- مراجع

- [۱] کارگر م. ر.، بنی اسدی ا.، تحلیل عملکرد مبادله‌کن گرمایی فوق گرمایش در سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی نیروگاه خورشیدی بخارمستقیم. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۸، ش. ۱، ص ۲۹۷-۳۰۶، ۱۳۹۷.
- [۲] میرزایی ضیاپور ب. و هشترودی اصل ا.، تامین انرژی گرمایشی سالیانه نوع جدیدی از گلخانه‌های خورشیدی با استفاده از بازتابنده‌های NIR و ذخیره‌ساز حرارتی حاوی PCM. *مجله مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز*، د. ۴۶، ش. ۳، ص ۲۳۱-۲۳۶، ۱۳۹۵.
- [3] Schoenung S. M., *Characteristics and Technologies for Long-vs. Short-Term Energy Storage*. A Study by the DOE Energy Storage Systems Program, 2001.
- [4] Huang W., Wang X., Guo J., Zhang J. and Yang J., Discussion on application of super capacitor energy storage system in microgrid. In *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, China, 2009.
- [5] Budt M., Wolf D., Span R. and Yan J., A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments, *Applied Energy*, Vol. 170, pp. 250-268, 2016.
- [6] Baqari F. and Vahidi B., Small-compressed air energy storage system integrated with induction generator for metropolises: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 365-370, 2013.
- [7] Jinchao L., Xinjing Z., Yujie X., Zongyan C., Haisheng C. and Chunqing T., Economic Analysis of using Above Ground Gas Storage Devices for Compressed Air Energy Storage System. *Journal of Thermal Science*, Vol. 23 pp. 535-543, 2014.
- [8] Salvini C., Techno-Economic Analysis of Small Size Second Generation CAES System. *Energy Procedia*,



شکل ۱۰- زمان پرشدن مخزن برحسب توان‌های مختلف کمپرسور و بازده‌های متفاوت کمپرسور برای انرژی ذخیره شده ۶۴۰ کیلووات ساعت.



شکل ۱۱- توان تولید شده توسط توربین برحسب زمان تخلیه مخزن و بازده‌های متفاوت توربین برای انرژی ذخیره شده ۶۴۰ کیلووات ساعت.

## ۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

- در این پژوهش دو طرح مربوط به ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده برای مقادیر ذخیره انرژی ۸۰، ۲۲۰، ۳۶۰، ۴۸۰، ۶۴۰ و ۱۰۰۰ کیلووات ساعت ارائه شده و تحلیل‌های فنی و اقتصادی طرح‌ها با جزئیات انجام گردیده است. یکی از طرح‌ها تنها از انرژی مکانیکی ذخیره شده در هوای فشرده برای ذخیره انرژی استفاده می‌کند، در حالی که در دومین طرح از یک مبادله‌کن گرمایی نیز برای بازیابی انرژی گرمایی استفاده می‌شود. با توجه به کارهای پیشین انجام شده در این خصوص، سیستم‌های ذخیره انرژی هوای فشرده با فشارهای ذخیره‌سازی ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۲۵۰، ۳۰۰، ۳۵۰، ۴۰۰ و ۴۵۰ بار مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. در ذیل برخی از مهمترین نتایج مربوط به بررسی این طرح‌ها بیان گردیده است:
- از لحاظ طراحی، فشار ذخیره ۲۰۰ بار بدترین حالت ممکن را در بین تمامی موارد نشان می‌دهد.
  - پارامترهای مختلف مربوط به تحلیل اقتصادی طرح نشان می‌دهد که حتی با در نظر گرفتن قیمت گاز صادراتی، استفاده از بازیاب در هیچ فشار و یا توانی توجیه اقتصادی ندارد.
  - بررسی طرح ذخیره هوای فشرده بدون بازیاب نشان می‌دهد که



- Vol. 82, pp. 782 – 788, 2015.
- [9] Safaei H. And Aziz M.J., Thermodynamic Analysis of Three Compressed Air Energy Storage Systems: Conventional, Adiabatic, and Hydrogen-Fueled. *Energies*, Vol. 10, pp. 1020, 2017.
- [10] Lund H. and Salgi G., The role of compressed air energy storage (CAES) in future sustainable energy systems. *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 1172–1179, 2009.
- [11] Saputro E. A. and Farid M. M., A novel approach of heat recovery system in compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*, Vol. 178, pp. 217–225, 2018.
- [12] Satkin M., Noorollahi Y., Abbaspour M. and Yousefi H., Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, 579–590, 2014.
- [13] Li Y., Miao S., Yin B., Han J., Zhang S., Wang J. and Luo X., Combined Heat and Power dispatch considering Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for wind power accommodation. *Energy Conversion and Management*, Vol. 200, pp. 112091, 2019.
- [14] Fertig E. and Apt J., Economics of compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT. *Energy Policy*, Vol. 39, pp. 2330–2342, 2011.
- [15] Venkataramani G., and Ramalingam V., Performance analysis of a small capacity compressed air energy storage system for renewable energy generation using TRNSYS. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 9, pp. 044106, 2017.
- [16] Razmi A., Soltani M., Aghanajafi C. and Torabi M., Thermodynamic and economic investigation of a novel integration of the absorption-recompression refrigeration system with compressed air energy storage (CAES). *Energy Conversion and Management*, Vol. 187, pp. 262–273, 2019.
- [17] Kim Y.M., Shin D.G. and Favrat D., Operating characteristics of constant-pressure compressed air energy storage (CAES) system combined with pumped hydro storage based on energy and exergy analysis. *Energy*, Vol. 36, pp. 6220–6233, 2011.
- [18] Valdivia P., Barraza R., Saldivia D., Gacitúa L., Barrueto A. and Estay D., Assessment of a Compressed Air Energy Storage System using gas pipelines as storage devices in Chile. *Renewable Energy*, Vol. 147, pp. 1251–1265, 2020.
- [19] Fan J., Liu W., Jiang D., Chen J., Tiedeu W. N., Chen J. and JJK D., Thermodynamic and applicability analysis of a hybrid CAES system using abandoned coal mine in China. *Energy*, Vol. 157, pp. 31–44, 2018.
- [20] US patent, Patent No. US9938896B2, Apr.10, 2018.
- [21] Cengel Y. and Boles M., *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 8th Edition, McGraw-Hill Education, 2014.
- [22] Seider W. D., Lewin D. R., Seader J. D., Widagdo S., Gani R., Ng K. M, *Product and Process Design Principles: Synthesis, Analysis and Evaluation*, 4th Edition, Wiley, 2016.
- [23] Arabkoohsar A., *Mechanical Energy Storage Technologies*, Chapter 1: Classification of energy storage systems. Academic Press, 2021.
- [24] Ross S. A., Westerfield R. and Jordan B. D., *Fundamentals of corporate finance*. Tata McGraw-Hill Education, 2008.