

مدلسازی عددی ذخیره‌سازی فصلی انرژی در اکیفر برای استفاده یک مجتمع مسکونی و بررسی اثرات اقتصادی و زیست محیطی

هادی غائبی*

مهدی بهادری‌نژاد

محمدحسن سعیدی

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

چکیده

اکیفرها (سفره‌های آب زیرزمینی) ساختارهای متخلخلی هستند که محتوی و انتقال‌دهنده آب می‌باشند. فراوانی و پراکندگی این ساختارها آنها را برای ذخیره‌سازی انرژی جالب توجه می‌نماید؛ بویژه سفره‌های آب زیرزمینی محبوس که از بالا و پایین توسط لایه‌های نفوذناپذیر رسی محدود شده و از آب، اشباع می‌باشند. یک اکیفر محبوس با سرعت آب زیرزمینی بسیار پایین جهت تأمین نیازهای سرمایشی و گرمایشی یک مجتمع مسکونی در تهران در نظر گرفته شده است. سه نوع بهره‌برداری مختلف جهت استفاده از ذخیره‌سازی فصلی انرژی حرارتی در اکیفر برای تأمین نیاز گرمایشی و سرمایشی سالانه مجتمع بررسی شده است. این موارد شامل استفاده تنها از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایش، تلفیق آن با کلکتورهای خورشیدی جهت گرمایش و تلفیق آن با پمپ حرارتی جهت سرمایش و گرمایش بوده است. برای ارزیابی اقتصادی از روش ارزیابی چرخه عمر استفاده شده است. نرم افزار Ret Screen برای ارزیابی زیست‌محیطی بکار گرفته شده است. نتایج نشان دادند که از بین بهره‌برداری‌های مختلف، استفاده تنها از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایش دارای کمترین بازگشت سرمایه (۲/۴۱ سال) و کمترین میزان هزینه چرخه عمر (۱۶۰۰۰ دلار) بوده است. همچنین تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی برای تأمین نیاز سرمایشی و گرمایشی کمترین میزان تولید گاز دی‌اکسید کربن (۳۵۹ تن در سال) را داشته است.

واژه‌های کلیدی: ذخیره‌سازی فصلی انرژی، ارزیابی اقتصادی، ارزیابی زیست‌محیطی، کلکتور خورشیدی، پمپ حرارتی.

Numerical Modeling of an Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) for Using in a Residential Complex and Investigation of Economic and Environmental Effects

H. Ghaebi

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabil, Ardabil, Iran

M. Bahadorinejad

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

M. H. Saidi

Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

The Aquifers are underground porous formations containing water. Confined aquifers are surrounded by impermeable layers on top and bottom, called cap rocks and bed rocks. These aquifers are suitable for seasonal thermal energy storage. A confined aquifer with a very low groundwater flow velocity was considered to meet the annual cooling and heating energy needs of a residential complex located in Tehran, Iran. Three different alternatives of aquifer thermal energy storage (ATES) were employed to meet the heating/cooling demands of the complex. These alternatives were: using ATES for cooling alone, employing flat plate solar energy collectors for heating alone and employing a heat pump for cooling and heating. For the economical evaluation of the alternatives, a life cycle cost analysis was employed. For the environmental evaluation, Ret Screen software was employed. For the three considered operational alternatives, using ATES for cooling alone had the minimum payback period time of 2.41 year and life cycle cost of \$16000. In the environmental consideration of the three alternatives, coupling of ATES with heat pump for cooling and heating had the minimum of CO₂ generation, corresponding to 359 tons/year.

Keywords: Aquifer thermal energy storage, economical evaluation, environmental evaluation, solar collector, heat pump.

۱- مقدمه

برای کاهش مصرف انرژی و آلاینده‌های زیست‌محیطی، بخش مسکن نیاز به کاربری‌هایی با کمترین قیمت دارد. یکی از راه‌حل‌ها استفاده از سیستم‌هایی با منابع انرژی نو به جای سیستم‌های سرمایش و گرمایش معمولی است. ذخیره زیرزمینی انرژی به لحاظ فنی و اقتصادی یک جایگزین مطمئن برای سیستم‌های گرمایش و سرمایش معمولی می‌باشد [۲-۴].

استفاده از سیستم‌های زمین‌گرمایی که در آن از گرمای ذخیره‌شده در زیر زمین برای سرمایش و یا گرمایش ساختمان‌ها در ایالات متحده [۵-۸] کشورهای اروپایی [۹-۱۴] و سایر کشورها [۱۵-۱۸] استفاده می‌شود

سهم ساختمان‌ها در مصرف انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای^۱ در کشورهای توسعه یافته حدود ۴۰٪ است که ۵۵٪ از این مقدار برای سرمایش و گرمایش مصرف می‌شود. کاهش آلودگی‌های مربوط به انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط بخش مسکن جزء اولویت‌های بالای سیاست‌های بین‌المللی است. به همین دلیل و به دلیل اینکه راه‌حل‌های زیادی برای این کار وجود دارد، این سیاست‌ها منجر به بهبود سیستم‌های انرژی مؤثر شده است [۱].

1 Green House Gas (GHG)

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hghaebi@uma.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۴

- طراحی یک سیستم ذخیره‌سازی مناسب انرژی در اکیفر جهت تأمین نیازهای سرمایشی و گرمایشی یک مجتمع مسکونی در تهران.
- مدلسازی عددی ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر و ارزیابی ترمودینامیکی.
- ارزیابی عملکرد سه حالت مختلف بهره‌برداری از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر و تلفیق آن با سیستم‌های انرژی دیگر.
- ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی حالت‌های مختلف بهره‌برداری.
- استفاده از روش ارزیابی چرخه عمر برای تحلیل اقتصادی.

۲- مجتمع مسکونی مورد مطالعه

۲-۱- مشخصات ساختمان

یک مجتمع مسکونی ۱۰ بلوکه و چهار طبقه در منطقه پونک تهران انتخاب شده است. هر طبقه شامل چهار واحد آپارتمان بوده و کل مساحت زیربنا ۱۲۸۰۰ متر مربع است.

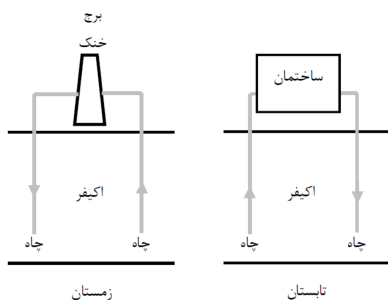
۲-۲- نیاز حرارتی و برودتی سالانه مجتمع مسکونی

برای تخمین نیازهای حرارتی و برودتی ساختمان از نرم افزار Carrier استفاده شده است. پس از تعیین میزان بار در ساعت‌های مختلف ماه‌های سال، اوج بار گرمایی و سرمایشی مشخص می‌شود. تعداد ماه‌های نیاز به سرمایش ۴ ماه (خرداد- تیر- مرداد- شهریور) و نیاز به گرمایش نیز ۴ ماه (آذر- دی- بهمن- اسفند) است. میزان انرژی مورد نیاز سرمایشی و گرمایی مجتمع با توجه به میزان کارکرد سیستم سرمایشی و گرمایشی به ترتیب برابر ۸/۷ و ۱/۹ تراژول بدست می‌آید.

۳- آلترناتیوهای مختلف بهره‌برداری

۳-۱- سرمایش مستقیم^۹

در تابستان معمولاً سرمایش مستقیم از طریق زیرزمین برای ساختمان فراهم شده و آب گرم خروجی ساختمان دوباره به داخل اکیفر تزریق می‌شود تا در زمستان با استفاده از برج خنک‌کن سرد شده و ذخیره گردد. در هر حالت آب استفاده‌شده عاری از هرگونه آلودگی است. با گذشت زمان تعادل گرمایی در داخل اکیفر برقرار می‌شود. این کارکرد در واقع کارکرد مستقیم استفاده از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای تأمین نیاز سرمایشی ساختمان مورد نظر است (شکل ۱).



شکل ۱- سرمایش مستقیم

از سال ۱۹۷۰ شروع شد. اخیراً استفاده از ذخیره‌سازی انرژی گرمایی^۱ بدلیل کاهش منابع سوخت‌های فسیلی و تخریب لایه ازن مرسوم شده است [۱۵]. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی عموماً به دو بخش سیستم باز^۲ و بسته^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند. بدلیل اینکه در سیستم باز (ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر) از آب زیرزمینی بصورت مستقیم استفاده شده و آب نیز دارای ظرفیت گرمایی بالایی است، بنابراین این سیستم دارای کارایی بیشتری نسبت به سیستم بسته می‌باشد. در ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر، آلودگی و تخریب آب زیرزمینی حداقل است، چرا که آب در داخل مدار بسته‌ای حرکت کرده و پس از تبادل گرما با فضای داخل ساختمان دوباره به داخل اکیفر تزریق می‌شود [۱۶].

در سال ۲۰۰۷، ستیا و شارما [۱۹] ارزیابی اقتصادی اکیفری را که از طریق مبادله‌کن گرمایی سرمایش و گرمایش یک گلخانه را فراهم می‌کرد، انجام داده‌اند. زمان بازگشت سرمایه این سیستم ۳/۵ سال بوده که در مقایسه با سیستم معمولی که بازگشت سرمایه آن ۷ سال است بسیار مقرون به صرفه است. آنها در تحقیق دیگری [۲۰] که انجام داده‌اند، روش ترموآکونومیک را بکار گرفته‌اند. گین و دافی [۱] با استفاده از روش هزینه چرخه عمر^۴ یک سیستم بسته را از دیدگاه اقتصادی بررسی کرده‌اند. آنها هزینه‌های سرمایه‌ای^۵ و عملیاتی^۶ را لحاظ کرده و سناریوهای مختلف بهره‌برداری را مطرح کرده‌اند. ونهوندت و همکاران [۲۱] ارزیابی اقتصادی بهره‌برداری از یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر را برای تهیه‌مطبوع یک بیمارستان در بلژیک انجام داده و به بازگشت سرمایه ۳/۹ سال رسیده‌اند.

ژوا و همکاران [۲۲] یک مطالعه امکان‌سنجی بر مبنای هزینه چرخه عمر پمپ‌های حرارتی منبع زمینی^۷ و با استفاده از روش مونت کارلو^۸ انجام داده‌اند. آنها دریافته‌اند که این سیستم در مقایسه با سیستم معمولی ارجحیت دارد. هانگ و همکاران [۲۳] سیستم آب گرم خورشیدی را برای ساختمان‌های مسکونی آمریکا از سه دیدگاه انرژی، اگزرژی و اقتصادی مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها همچنین دو نوع کلکتور (صفحه تخت و لوله‌خالی) را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که سیستم آب گرم خورشیدی صفحه تخت که از یک هیتر کمکی با سوخت گاز طبیعی کمک می‌گیرد، بهترین عملکرد را در بین تمامی کلکتورها و مکان‌ها دارد. کگل و همکاران [۲۴] سیستم‌های مختلف پمپ حرارتی با منابع انرژی تجدیدپذیر در اقلیم کانادا را با تحلیل هزینه چرخه عمر مورد مطالعه قرار داده‌اند. پس از بهینه‌سازی و تحلیل هزینه چرخه عمر به مدت ۲۰ سال، مشخص گردیده است که پمپ حرارتی هوایی به لحاظ اقتصادی بسیار ارزشمند است.

با این وجود و طبق بررسی‌های صورت گرفته، ارزیابی اقتصادی و زیست-محیطی سیستم‌ذخیره‌سازی در اکیفر برای آلترناتیوهای مختلف بهره‌برداری و در حالت تلفیق با سیستم‌های انرژی دیگر صورت نگرفته است. اهداف این تحقیق متنوع بوده و شامل موارد زیر می‌باشند:

- 1 Thermal Energy Storage
- 2 Aquifer Thermal Energy Storage (ATES)
- 3 Borehole Thermal Energy Storage (BTES)
- 4 Life Cycle Cost (LCC)
- 5 Capital Cost
- 6 Operational Cost
- 7 Ground Source Heat Pumps (GSHPs)
- 8 Monte Carlo

9 Direct Cooling (DC)

$$\vec{q} = -K_f \vec{\nabla} h \quad (2)$$

(K)، گذردهی نامیده می‌شود که واحد آن سرعت است. معادله‌ی حاکم بر انتقال گرما شامل جملات زسانش و جابجایی در محیط متخلخل که از اصل بقای انرژی بدست می‌آید، در حالت کلی خود به شکل زیر است [۲۶]:

$$p_s \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2(\lambda T) - (\rho c)_f \vec{q} \cdot \vec{\nabla} T + Q_H \quad (3)$$

$$p_s = (\rho c)_f \phi + (\rho c)_s (1 - \phi) \quad (4)$$

که در آن $(\rho c)_f$ و $(\rho c)_s$ به ترتیب ظرفیت گرمایی بر واحد حجم زمین و آب می‌باشد. T دما، λ رسانایی گرمایی اکیفر و Q_H جمله معرف چشمه یا چاه انرژی درون اکیفر می‌باشد. در این معادله، λ یک ضریب ترکیبی است که تابعی از ضریب رسانایی گرمایی آب، زمین و تخلخل اکیفر می‌باشد:

$$\lambda = \phi K_f + (1 - \phi) K_s \quad (5)$$

اکیفرهای محبوس اکیفرهایی هستند که از بالا و پایین توسط لایه‌های نفوذناپذیر رسی محدود شده‌اند. با توجه به اینکه انتقال گرما درون لایه‌های محاطی بالا و پایین اکیفر عمدتاً بر اثر رسانش می‌باشد، لذا معادله حاکم بر انتقال گرمای این لایه‌ها معادله رسانش سه‌بعدی است:

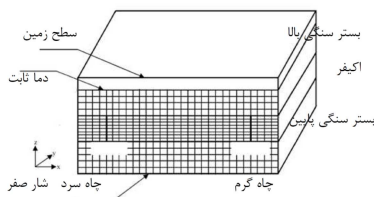
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T \quad (6)$$

۲-۴-۲- مدلسازی عددی

در این تحقیق بدلیل ساده بودن شرایط مرزی و هندسی از روش اختلاف محدود برای مدل کردن دما و جریان استفاده شده است. استفاده از روش اختلاف محدود در مدل کردن جریان و دما در ذخیره سازی انرژی در اکیفر امری رایج است. میدان حل سه بعدی بوده و با گسسته سازی معادلات جریان (معادله (۱)) و دما (معادلات (۳) و (۶)) حل می‌شود.

۲-۴-۱- مش بندی

از آنجا که شرایط مرزی نسبتاً ساده است، از مش بندی منظم و مستطیل شکل استفاده شده است. مش بندی به صورتی است که هر یک از چاه‌های تزریق/برداشت در هر گره‌ای می‌تواند واقع شود. شکل ۴ نحوه مش بندی را نشان می‌دهد.



شکل ۴- میدان محاسباتی سه بعدی

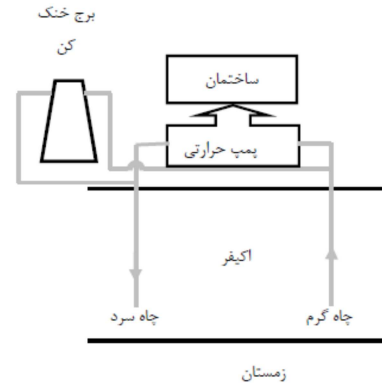
۲-۴-۲- شرایط مرزی و اولیه

در شکل ۴ صفحات ABC و DEF مرزهای بین اکیفر و لایه‌های محاطی بالا و پایین آن را تشکیل می‌دهند. فرایند حل بصورتی است که ابتدا معادله انرژی به روش گام‌های جزئی درون اکیفر (مکعب مستطیلی که با ABCFED مشخص می‌شود) حل می‌شود. در هر گام زمانی بسته به شرایط تزریق یا برداشت، گره‌هایی که بر روی چاه‌های سرد یا گرم واقع شده‌اند دارای دمای ثابت در نظر گرفته می‌شوند. شرط مرزی در

۲-۳- استفاده از تلفیق پمپ حرارتی و ذخیره سازی در

اکیفر برای سرمایش و گرمایش

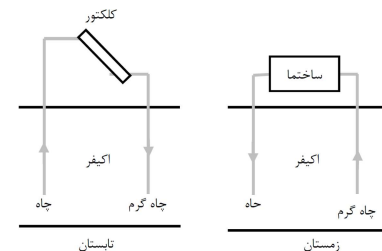
سیستم ذخیره سازی انرژی در اکیفر تلفیقی با پمپ حرارتی در شکل ۲ نشان داده شده است. سرمایش در این سیستم در فصل تابستان، همانند آلترناتیو سرمایش مستقیم صورت می‌گیرد. آب خروجی از سیستم تهویه مطبوع ساختمان که دارای دمای بالاتری است در زیر زمین ذخیره می‌شود. بخشی از این آب در فصل زمستان به عنوان منبع حرارتی دما پایین برای پمپ حرارتی عمل کرده و پس از افت دما در اکیفر ذخیره می‌شود تا در تابستان برای سرمایش مورد استفاده واقع شود. بخش دیگر در زمستان از طریق برج خنک کن سرد می‌شود.



شکل ۲- تلفیق ذخیره سازی انرژی در اکیفر و پمپ حرارتی برای گرمایش

۳-۳- ذخیره سازی انرژی خورشیدی برای گرمایش

شکل ۳ طرح‌واره سیستم تلفیقی خورشیدی/ذخیره سازی انرژی در اکیفر را نشان می‌دهد. در این سیستم انرژی خورشیدی در طول فصل گرم جمع‌آوری و در داخل اکیفر ذخیره شده و در طول فصل سرد برای گرمایش استفاده می‌شود.



شکل ۳- ذخیره سازی انرژی خورشیدی در اکیفر برای گرمایش

۴- مدلسازی

۴-۱- معادلات حاکم

در این بخش اصول تئوری حاکم بر جریان آب و انتقال گرما برای محاسبات دما در داخل اکیفر تشریح می‌شود. معادلات کوپل شده جریان و دما بصورت معادلات دیفرانسیل جزئی بیان می‌شود.

معادله پیوستگی در محیط متخلخل بصورت زیر بیان می‌شود [۲۵]:

$$\left[\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{q}) \right] dV = S_f \quad (1)$$

که S_f جمله مربوط به چشمه در داخل محیط متخلخل و \vec{q} بردار شار جریان است که از معادله دارسی بدست می‌آید. معادله دارسی معادله جریان حاکم بر محیط متخلخل است:

وجه AD شرط دما ثابت (دمای جریان آب زیرزمینی) و در وجه $BCFE$ و همچنین وجوه جانبی عایق است.

برای در نظر گرفتن اثرات انتقال گرمایی آکیفر به لایه‌های محاطی بالا^۱ و پایین^۲ ابتدا معادله انرژی برای آکیفر حل شده و در نقاط مرزی (وجه ABC و DEF) دما با لایه‌های محاطی بالا و پایین که بطور جداگانه حل می‌شوند، یکی در نظر گرفته می‌شود. شرط مرزی وجه بالایی لایه محاطی بالا (GHI) دما ثابت است و این عمقی از سطح زمین (تهران) است که در آن دما در سراسر سال ثابت باقی می‌ماند. در وجه پایینی لایه محاطی پایین (JKL) نیز شرط عایق لحاظ شده و به این علت است که در عمق به اندازه کافی پایین آکیفر عملاً شار گرمایی ناشی از تغییرات دما درون آکیفر تأثیری ندارد.

۴-۲-۳- بازایافت انرژی از آکیفر

پس از تعیین میدان دما درون آکیفر در مقاطع زمانی مختلف، تعیین میزان بازایافت انرژی از آکیفر امکان‌پذیر می‌شود. در واقع از میان نتایج حاصل از مدل‌سازی آکیفر، درصد بازایافت انرژی مهم‌ترین عامل می‌باشد چرا که تعیین می‌کند به ازای ذخیره‌سازی انرژی معین، چه مقدار از آن را می‌توان پس از طی دوره‌ی ذخیره‌سازی تعیین شده، استحصال نمود. در حالت کلی میزان بازایافت آکیفر η_A به عنوان منبع ذخیره‌سازی انرژی که معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود، برابر میزان انرژی استحصال شده به انرژی تزریق شده می‌باشد:

$$\eta_A = \frac{Q_{Withdraw}}{Q_{Injection}} \times 100 \quad (7)$$

۴-۲-۴- ضریب عملکرد کلی سیستم تهویه مطبوع

در یک سیستم تهویه مطبوع (گرمایشی و یا سرمایشی) ضریب عملکرد به صورت حاصل تقسیم خروجی مطلوب به ورودی مورد نیاز تعریف می‌شود:

$$COP_{system} = \frac{Q_{Required}}{W} \quad (8)$$

$Q_{Required}$ انرژی گرمایشی و سرمایشی مورد نیاز سالیانه برای ساختمان و W مجموع توان الکتریکی لازم برای راه‌اندازی پمپ‌های چرخش، کمپرسور چیلر و پمپ حرارتی و ... می‌باشد.

۵- مراحل کلی طراحی سیستم ذخیره‌سازی انرژی در

یک آکیفر معین

برای تعیین پارامترهای یک آکیفر ذخیره‌کننده انرژی، باید داده‌های زیر را در اختیار داشت:

- ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی
- حداکثر نرخ تزریق و برداشت و اختلاف دما

در سیستم ذخیره‌سازی انرژی در آکیفر مطالعه شده در این تحقیق، ابتدا مقدار انرژی مورد نیاز سرمایشی و گرمایشی مجتمع مسکونی بدست می‌آید. پارامترهای آکیفر شامل ضخامت، تخلخل و نفوذپذیری نیز مورد نیاز است. عموماً پارامترهای آکیفر در نقاط مختلف آن تغییر می‌کند و برای جبران این نقص باید با اتخاذ تدابیر مهندسی

مقادیر همگن معقولی را در نظر گرفت [۲۸]. جدول ۱ خواص ترموفیزیکی آب و آکیفر را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات ترموفیزیکی آکیفر و آب

مقدار	خاصیت
0.017×10^{-3}	ضریب گذردهی آکیفر ($\frac{m}{s}$)
۰/۳	تخلخل
۱۰۰۰	چگالی آب ($\frac{kg}{m^3}$)
۱۸۰۰	چگالی سنگ ($\frac{kg}{m^3}$)
۴۲۰۰	گرمای ویژه آب ($\frac{J}{kgK}$)
۱۲۹۲	گرمای ویژه سنگ ($\frac{J}{kgK}$)
۰/۶۳	رسانایی گرمایی آب ($\frac{W}{mK}$)
۱/۳	رسانایی گرمایی سنگ ($\frac{W}{mK}$)

پس از اینکه مشخصات آکیفر و نیازهای حرارتی/برودتی معین شد، می‌توان طبق روال زیر سیستم ذخیره‌سازی را طراحی کرد [۲۹]:

۱- ظرفیت گرمایی ویژه (PS) تعیین شود (معادله (۴)).

۲- بازده آکیفر (η_A) تعیین شود.

این بازده توسط شبیه‌سازی کامپیوتری محاسبه می‌شود. ابعاد و خواص آکیفر به عنوان ورودی مدل‌سازی می‌باشند. در ابتدا مقدار تقریبی برای بازده در نظر گرفته می‌شود. در پایان این روند طراحی و پس از تعیین فاصله‌ی تقریبی چاه‌ها، می‌توان با اعمال مدل تدوین شده بر شرایط حاصل، بازده آکیفر را با دقت بهتری محاسبه کرد و روند را آنقدر تکرار کرد تا بازده محاسبه شده در دو مرحله با هم برابر شوند.

۳- حجم ذخیره‌سازی موردنیاز برای ذخیره‌سازی محاسبه می‌شود:

$$V_{Storage} = \frac{E_{req}}{q_s \Delta T \eta_A} \quad (9)$$

با تقسیم حجم ذخیره‌سازی بر طول دوره ذخیره‌سازی/برداشت مقدار دبی تزریق/برداشت بدست می‌آید.

۴- مساحت افقی موردنیاز برای آکیفر با عمق b تعیین می‌شود:

$$A = \frac{V_{Storage}}{b} \quad (10)$$

۵- فاصله‌ی موردنیاز بین جفت چاه‌ها تعیین می‌شود:

$$R = \sqrt{\frac{A}{1.05}} \quad (11)$$

۶- با معلوم شدن فاصله چاه‌ها و دبی تزریق/برداشت، کد برای بدست-آوردن بازده اجرا می‌شود.

۷- مراحل ۳ تا ۶ آنقدر تکرار می‌شود تا مقدار تفاضل بازده در دو مرحله متوالی کمتر از مقدار مشخصی گردد.

۶- مدل اقتصادی

در ارزیابی اقتصادی روش‌ها و عوامل زیر مورد توجه می‌باشند:

- ۱- هزینه چرخه عمر عبارت است از مجموع تمام هزینه‌های سیستم در طول مدت بکارگیری یا عمر آن بر حسب قیمت‌های همان روز.
- ۲- دوره بازگشت سرمایه مدت زمان لازم برای جبران کلیه هزینه‌های صرف‌شده برای سیستم که از طریق کسب درآمد یا سایر موارد تأمین می‌شود.

¹ Cap Rock

² Bed Rock

$$Pa = 1 + x + x^2 + \dots + x^n = \frac{1}{1-x} - \sum_{i=n}^{\infty} x^i \quad (17)$$

$$= \frac{1}{1-x} - x^n \sum_{i=0}^{\infty} x^i = \frac{1-x^n}{1-x}$$

در نتیجه معادله (۱۵) به صورت زیر خلاصه می‌شود:

$$PW = Pa \times Ca \quad (18)$$

که

$$Pa = \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^{n-1}} \quad (19)$$

که در آن Ca هزینه سالانه، d نرخ بهره، n تعداد سال‌ها، و Pa ارزش فعلی پرداخت سالانه است.

۶-۲- هزینه چرخه عمر

با استفاده از ضرایب ارزش فعلی Pr و Pa برای هر یک از هزینه‌هایی که قرار است در طول بهره‌برداری سیستم پرداخت شود، می‌توان ارزش فعلی یا PW را محاسبه نمود. حاصل جمع تمام ارزش‌های فعلی بدست آمده برابر کل هزینه پرداختی در طول عمر سیستم است که در اصطلاح آن را هزینه چرخه عمر یا LCC می‌نامند:

$$LCC = \sum_i PW_i \quad (20)$$

بدین ترتیب با داشتن مقادیر هزینه چرخه عمر سیستم‌های مورد نظر و مقایسه آنها می‌توان در خصوص انتخاب یکی از آنها به عنوان سیستم اقتصادی‌تر تصمیم‌گیری کرد [۳۰].

۶-۳- هزینه چرخه عمر سالانه

چنانچه مجموعه هزینه چرخه عمر بصورت سالانه بیان شود آن را هزینه چرخه عمر سالانه می‌نامند و برابر است با هزینه سالانه در صورتی هیچگونه هزینه سرمایه‌ای وجود نداشته باشد.

هزینه چرخه عمر سالانه از تقسیم هزینه چرخه عمر به ضریب ارزش فعلی پرداخت سالانه (Pa) و بر حسب واحد پول بر سال بدست می‌آید:

$$ALCC = \frac{LCC}{Pa} \quad (21)$$

۶-۴- هزینه انرژی تولید شده

برای محاسبه مقدار واقعی هزینه تولید انرژی از هزینه چرخه عمر سالانه و مقدار تولید سالانه انرژی استفاده می‌شود، یعنی $C_E = \frac{ALCC}{E}$ که در این رابطه $ALCC$ هزینه چرخه عمر سالانه بر حسب $Rls/year$ و E انرژی تولید شده سالانه سیستم بر حسب (کیلو وات ساعت/سال) و C_E هزینه انرژی بر حسب (ریال/کیلووات ساعت) می‌باشد.

۶-۵- دوره بازگشت انرژی و سرمایه

این هزینه در واقع معیار ما برای مقایسه خواهد بود. برای بازگشت سرمایه باید هزینه صرف شده برای تولید انرژی در سیستم‌ها و آلترناتیوهای مختلف با این هزینه برابر قرار داده شود. طبق روابط محاسبه نرخ بازگشت سرمایه داریم:

$$PW_c = PW_b \quad (22)$$

ارزیابی اقتصادی بر اساس چرخه عمر کاملترین تحلیل اقتصادی می‌باشد و روشی است که برای بررسی کاربردهای تجاری بکار می‌رود.

۶-۱- محاسبه ارزش واقعی هزینه‌ها

در این روش نه تنها هزینه‌های سرمایه‌ای بلکه هزینه‌های بعدی که در طول کار سیستم ایجاد می‌شود در نظر گرفته می‌شود. برای آنکه مقایسه معناداری انجام شود تمام مخارج یا هزینه‌ها و منافع و درآمدها بایستی به صورت ارزش‌های معادل روز یا اصطلاحاً ارزش فعلی در آیند. برای این امر از نرخ تنزیل یا بهره به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$PW = Pr \times FW \quad (12)$$

که

$$PW = \frac{1}{(1+d)^n} \quad (13)$$

که در آن PW ارزش فعلی Pr ضریب ارزش فعلی، d نرخ بهره سالانه، n تعداد سال‌های بهره‌برداری و FW ارزش آینده مربوط به هزینه‌ها یا درآمدها می‌باشد. نرخ بهره سالانه (d) عبارتست از درصد کاهش ارزش پول سرمایه‌گذاری شده در مدت یکسال و غالباً بین ۸ تا ۱۵ درصد می‌باشد.

در بررسی اقتصادی هزینه‌های چرخه عمر برای محاسبه ارزش فعلی هزینه‌ها یا درآمدها از دو روش استفاده می‌شود. روش نخست برای محاسبه ارزش فعلی پرداخت‌هاست که یکبار صورت می‌گیرد (مانند هزینه خرید تجهیزات). روش دوم نیز برای محاسبه ارزش فعلی پرداخت‌هایی است که به دفعات صورت می‌گیرد (مانند هزینه‌های سوخت و تعمیر و نگهداری سالانه). روش دوم مجموع ارزش فعلی پرداخت‌هایی است که به صورت جداگانه در طول دوره مورد بررسی صورت می‌گیرد. ارزش فعلی تمام هزینه‌ها و درآمدها بسته به مورد یکی از روش‌های یاد شده و با ضرب کردن در ضرایب مربوطه محاسبه می‌شود.

۱- یکبار پرداخت: ارزش فعلی هزینه‌ای است که قرار است پس از n سال و به صورت یکبار پرداخت شود (هزینه خرید تجهیزات و نصب و لوله‌کشی). ارزش فعلی یکبار پرداخت با قرار دادن هزینه یکبار پرداخت به جای FW در رابطه (۱۳) بدست می‌آید:

$$PW = Pr \quad (14)$$

که در آن PW ارزش فعلی یکبار پرداخت، Cr هزینه یکبار پرداخت و Pr ضریب ارزش فعلی یکبار پرداخت است. در اینجا هزینه‌های نصب لوله‌کشی برابر ۵٪ هزینه خریداری شده کل تجهیزات در نظر گرفته شده است.

۲- پرداخت سالانه: ارزش فعلی هزینه‌ای است که قرار است به صورت سالانه طی n سال پرداخت شود (هزینه سوخت و هزینه تعمیر و نگهداری) و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$PW = Ca + Ca \left(\frac{1}{1+d} \right) + Ca \left(\frac{1}{1+d} \right)^2 + \dots + Ca \left(\frac{1}{1+d} \right)^{n-1} \quad (15)$$

با قرار دادن $X = \frac{1}{1+d}$ می‌توان معادله (۱۵) را طبق روابط زیر خلاصه کرد:

$$\sum_{i=0}^{\infty} x^i = 1 + x + x^2 + \dots = \frac{1}{1-x} \quad (16)$$

جدول ۳- نتایج طراحی

پارامتر	سرمایش تنها و در حالت تلفیق با پمپ حرارتی برای سرمایش و گرمایش	تلفیق با کلکتور خورشیدی برای گرمایش
بازده اکیفر (%)	۷۳	۶۳
طول اکیفر (m)	۱۸۲	۸۰
عرض اکیفر (m)	۱۱۶	۳۲
نرخ تزریق/برداشت ($\frac{L}{P}$)	۳۲/۵	۷/۵
حجم اکیفر (m^3)	۳۳۷۰۸۰	۳۵۳۸۷
مساحت افقی اکیفر (m^2)	۲۱۰۶۷	۲۵۲۷
فاصله چاه‌ها (m)	۱۴۲	۵۰
مختصات چاه سرد در صفحه افقی تزریق اکیفر	x = 20 m y = 58 m	x = 15 m y = 16 m

۷-۳- ارزیابی اقتصادی

جدول ۴ مشخصات و قیمت تجهیزات مورد استفاده در هر یک از آلترناتیوها و همچنین حالت پایه را نشان می‌دهد در این تحقیق فرض می‌شود که هزینه نصب برابر ۵٪ هزینه خریداری شده کل تجهیزات و هزینه تعمیر و نگهداری در سال اول بهره‌برداری برابر ۲٪ هزینه نهایی تجهیزات است. نرخ بهره برابر ۱۵٪ و طول عمر همه سیستم‌ها ۲۰ سال در نظر گرفته شده‌اند. قیمت هر متر مکعب گاز طبیعی ۰/۰۴ دلار [۳۴] و قیمت هر کیلووات ساعت برق ۰/۰۳۲ دلار [۳۵] در نظر گرفته می‌شود.

با استفاده از نرم افزار Ret Screen میزان مصرف برق و گاز طبیعی در هر یک از آلترناتیوها بدست آمده‌اند. در شکل ۵ مصرف برق و گاز طبیعی هر یک از این آلترناتیوها باهم مقایسه شده‌اند. در دو آلترناتیو تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی و گرمایش خورشیدی، گاز طبیعی مصرف نمی‌شود و گرمایش از سیستم جدید تأمین می‌شود. علاوه بر این در دو آلترناتیو دیگر بدلیل اینکه تأمین گرمایش از طریق بویلر است، بنابراین مصرف گاز طبیعی آنها یکسان می‌باشد. بیشترین مصرف برق مربوط به چیلرهای تراکمی است. آلترناتیو استفاده از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایش مستقیم کمترین مصرف برق را دارد که آن هم مربوط به مصرف پمپ‌ها است.



شکل ۵- مصرف انرژی آلترناتیوهای مختلف

در شکل ۶ مقادیر هزینه چرخه عمر و هزینه چرخه عمر سالانه آلترناتیوهای مختلف باهم مقایسه شده‌اند. بیشترین مقادیر به ترتیب مربوط به آلترناتیوهای تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با گرمایش خورشیدی و حالت پایه است.

PW_c ارزش فعلی تمام هزینه‌ها (سیستم‌ها و آلترناتیوهای مختلف) و PW_b ارزش فعلی تمام درآمدها (قیمت انرژی تولیدی حالت پایه) می‌باشد:

$$LCC = E \times P \times \left[\frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^{n-1}} \right] \quad (23)$$

که n سال بازگشت سرمایه، d نرخ بهره، E انرژی تولیدی (مورد نیاز) سالانه و P قیمت واحد انرژی تولیدی (حالت پایه) است.

۷-۷- بحث و بررسی نتایج

۷-۱- طراحی یک سیستم ذخیره‌سازی مناسب در اکیفر برای سرمایش مجتمع مسکونی

برای گرمایش و سرمایش مجتمع مسکونی، ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی کویل می‌شود. از آنجا که نیاز برودتی خیلی بیشتر از نیاز حرارتی است، طراحی بر اساس نیاز برودتی انجام شده است. بهمین دلیل به هنگام تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با کلکتورهای خورشیدی برای استفاده گرمایشی، اکیفر طراحی شده کوچکتر خواهد بود. هد مورد نیاز پمپ‌های برج خنک‌کننده و همچنین پمپ حرارتی و کلکتورهای خورشیدی از کاتالوگ شرکت سازنده بدست می‌آیند [۳۱-۳۳]. افت فشار حاصل از اصطکاک از دیاگرام مودی و با استفاده از عدد رینولدز و با فرض لوله فولاد تجاری بدست آمده‌اند. برای طراحی ابتدا باید اطلاعات لازم را در اختیار داشت. این اطلاعات ورودی در جدول ۲ آورده شده‌اند.

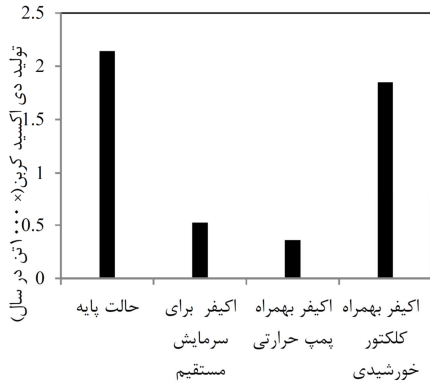
جدول ۲ اطلاعات ورودی برای طراحی سیستم ذخیره‌سازی انرژی

در اکیفر		پارامتر
اکیفر برای سرمایش تنها و در حالت تلفیق با کلکتور خورشیدی برای گرمایش	اکیفر در حالت تلفیق با کلکتور خورشیدی برای گرمایش	
۴۳	۳	دمای تزریق در زمستان (°C)
۶۵	۱۴	دمای تزریق در تابستان (°C)
۷۰	۷۰	بازده اولیه اکیفر (%)
۱۶	۱۶	ضخامت اکیفر (m)
۲۵	۲۵	ضخامت لایه محاطی بالا (m)
۵۰	۵۰	ضخامت لایه محاطی پایین (m)
۵	۵	سرعت آب زیرزمینی (m/year)
۱۲	۱۲	دمای آب زیرزمینی (°C)
۱۲	۱۲	دمای اولیه اکیفر (°C)
۱۸	۱۸	دمای سطح بالایی لایه محاطی بالایی اکیفر (°C)
۱/۹ (نیاز حرارتی)	۸/۷ (نیاز برودتی)	انرژی که باید ذخیره شود (TJ)

طراحی بر اساس آنچه که در بخش ۵ شرح داده شد، انجام می‌شود. نتایج طراحی بصورت جدول ۳ می‌باشد.

۷-۴- ارزیابی زیست محیطی

اصلی‌ترین شاخص ارزیابی زیست‌محیطی یک سیستم انرژی میزان انتشار دی‌اکسیدکربن توسط آن است. میزان انتشار هر یک از این آلترناتیوها در شکل ۸ نشان داده شده است. آلترناتیو تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی میزان مصرف برق کمتری داشته و همچنین میزان مصرف گاز طبیعی آن صفر است. بنابراین میزان انتشار دی‌اکسید کربن آن از بقیه آلترناتیوها کمتر است. حالت پایه بدلیل اینکه هم مصرف گاز طبیعی و هم برق بیشتری دارد، دی‌اکسید کربن بیشتری نیز تولید می‌کند.

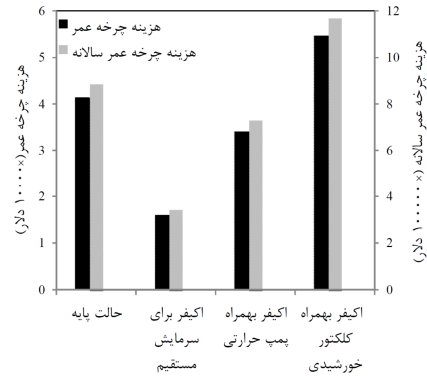


شکل ۸- دی‌اکسید کربن تولیدی آلترناتیوهای مختلف

۸- نتایج

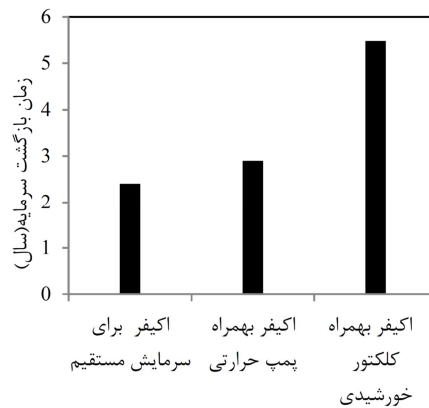
در این تحقیق سه آلترناتیو مختلف بهره‌برداری از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر (استفاده از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایش مستقیم، تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی برای سرمایش و گرمایش و تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با گرمایش خورشیدی) به لحاظ اقتصادی و زیست‌محیطی باهم و همچنین با حالت پایه مقایسه شدند. برای ارزیابی اقتصادی از روش هزینه چرخه عمر و برای ارزیابی زیست‌محیطی از نرم‌افزار Ret Screen استفاده شده است. نتایج عمده حاصل به صورت زیر می‌باشند:

همان‌طور که از جدول ۶ بر می‌آید بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به چیلر تراکمی است که در هر دو این آلترناتیوها کاربرد داشته و نقش پررنگی در هزینه چرخه عمر و هزینه چرخه عمر سالانه دارد. همچنین میزان مصرف برق این دو آلترناتیو نیز بیشتر از بقیه بوده که آن نیز به نوبه خود در بیشتر بودن هزینه چرخه عمر و هزینه چرخه عمر سالانه تأثیر دارد. کمترین هزینه سرمایه‌گذاری و سوخت نیز مربوط به استفاده از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایش مستقیم است که باعث شده این آلترناتیو هزینه چرخه عمر و هزینه چرخه عمر سالانه کمتری داشته باشد.



شکل ۶- هزینه چرخه عمر و هزینه چرخه عمر سالانه آلترناتیوهای مختلف

در شکل ۷ دوره بازگشت سرمایه برای جایگزینی حالت پایه با سه آلترناتیو مورد بررسی نشان داده است. با توجه به میزان سرمایه‌گذاری و هزینه عملیاتی بسیار پایین حالت استفاده از ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایش مستقیم، این آلترناتیو زمان بازگشت سرمایه کمتری دارد.



شکل ۷- دوره بازگشت سرمایه آلترناتیوهای مختلف

جدول ۴- مشخصات تجهیزات مورد استفاده در آلترناتیوهای مختلف

تجهیزات	مشخصات	تعداد	سازنده	قیمت (دلار)
چیلر تراکمی	ظرفیت: ۱۶۰ تن تبرید نوع: اسکرو	۲	سرما آفرین-ایران [۳۶]	۲۲۸۰۰۰
بویلر	ظرفیت: ۶۰۰ کیلووات نوع: لوله آبی	۱	تهویه دماوند [۳۷]	۱۲۰۰۰

اکیفر برای سرمایش مستقیم

		سرمایش	
۹۲۰۰	پمپیران [۳۸]	۲	هد: ۱۲۰ متر جریان: ۳۲/۵ لیتر بر ثانیه توان مصرفی: ۳۶ کیلووات نوع: پوسته و لوله
۲۹۴۰۰	تهران مبدل-ایران [۳۹]	۱	نرخ حرارتی: ۱۰۰۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت جریان: ۵۱۵ گالن بر دقیقه
۳۸۰۰	دما تجهیز- ایران [۴۰]	۱	جریان: ۵۱۵ گالن بر دقیقه
۲۴۰۰	ایران	۳۰۰ متر	فولاد
۴۸۰۰	ایران	۱۲۰ متر	-
۸۰۰۰	ایران	-	-
۴۰۰۰	ایران	-	-
۴۰۰۰	ایران	-	-
۲۰۰۰۰	ایران	-	-
		گرمایش	
۱۲۰۰۰	تهویه دماوند [۳۷]	۱	ظرفیت: ۶۰۰ کیلووات نوع: لوله آبی
		اکیفر به‌همراه پمپ حرارتی	
		سرمایش	
۹۲۰۰	پمپیران [۳۸]	۲	هد: ۱۲۰ متر جریان: ۳۲/۵ لیتر بر ثانیه توان مصرفی: ۳۶ کیلووات نوع: پوسته و لوله
۲۹۴۰۰	تهران مبدل-ایران [۳۹]	۱	نرخ حرارتی: ۱۰۰۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت جریان: ۵۱۵ گالن بر دقیقه
۳۰۶۰	دما تجهیز- ایران [۴۰]	۱	جریان: ۵۱۵ گالن بر دقیقه
۲۴۰۰	ایران	۳۰۰ متر	فولاد
۴۸۰۰	ایران	۱۲۰ متر	-
۸۰۰۰	ایران	-	-
۴۰۰۰	ایران	-	-
۴۰۰۰	ایران	-	-
۲۰۰۰۰	ایران	-	-
		گرمایش	
۱۲۸۰۰۰	میامی هیت پمپ- آمریکا [۴۱]	۳۰	ظرفیت: ۶۰۰ کیلووات نوع: آب به آب
		اکیفر به‌همراه کلکتور برای گرمایش	
		سرمایش	
۲۲۸۰۰۰	سرماآفرین-ایران [۳۶]	۲	ظرفیت: ۱۶۰ تن تبرید نوع: اسکرو
		گرمایش	
۴۰۰۰	پمپیران [۳۸]	۲	هد: ۷۵ متر جریان: ۷/۵ لیتر بر ثانیه توان مصرفی: ۱۳ کیلووات نوع: پوسته و لوله
۱۱۴۰۰	تهران مبدل-ایران [۳۹]	۱	نرخ حرارتی: ۳۰۰۰۰۰۰ کیلوکالری بر ساعت جریان: ۱۰۰ گالن بر دقیقه

۴۰۰۰۰	وات-لهستان [۳۱]	۴۵۰	نوع: تخت شیشه‌ای	کلکتور خورشیدی
۱۸۰۰	ایران	۳۰۰ متر	فولاد	لوله
۴۸۰۰	ایران	۱۲۰ متر	-	حفر چاه
۸۰۰۰	ایران	-	-	مطالعه امکان
۴۰۰۰	ایران	-	-	سنجی
۴۰۰۰	ایران	-	-	تسطیح و آماده سازی زمین
۴۰۰۰	ایران	-	-	تست های هیدرولوژی
۲۰۰۰۰	ایران	-	-	اخذ مجوز

سرعت مخصوص (ms^{-1})	q	بیشترین هزینه سوخت (برق و گاز طبیعی) مربوط به حالت پایه بود که برای سرمایه‌اش از چیلر تراکمی و برای گرمایش از بویلر استفاده می‌کرد.
حرارت (J)	Q	
فاصله چاهها (m)	R	
آهنگ جریان (kgs^{-1}) و چشمه گرمایی ($Jm^{-3}K^{-1}$)	S	-
زمان (s)	t	آلترناتیو تلفیق ذخیره-سازی انرژی در اکیفر با گرمایش خورشیدی و سپس حالت پایه بیشترین و آلترناتیو ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایه‌ای مستقیم کمترین هزینه چرخه عمر را دارند.
دما (K)	T	
حجم (m^3)	V	
دبی (m^3s^{-1})	\dot{V}	-
		زمان بازگشت سرمایه آلترناتیو ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر برای سرمایه‌ای مستقیم، تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی برای گرمایش و سرمایه‌ای و تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با گرمایش خورشیدی به ترتیب برابر ۲/۴۱، ۲/۹ و ۵/۴۸ سال بود.
		-
		از لحاظ انتشار میزان دی‌اکسید کربن، آلترناتیو تلفیق ذخیره‌سازی انرژی در اکیفر با پمپ حرارتی برای گرمایش و سرمایه‌ای دارای کمتری میزان انتشار (۳۵۹/۳۲ تن در سال) بود.

نشانه های

یونانی

پخش (m^2s^{-1})	α
بازده	η
تخلخل	ϕ
چگالی (kgm^{-3})	ρ

بالا نویس

اکیفر	A
سیال	f
تزریق	$injection$
کلی	O
سنگ	$Rock$
مخصوص، جامد	S
خالی	V
آب	$water$
برداشت	$withdraw$

۹- فهرست علائم

A	مساحت، سطح مقطع (m^2)
$ALCC$	هزینه چرخه عمر سالانه (\$)
b	ضخامت اکیفر (m)
c	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)
COP	ضریب عملکرد
d	نرخ بهره (/)
E	انرژی (J)
FW	ارزش آینده (\$)
g	شتاب ثقل زمین (ms^{-2})
h	هد هیدرولیکی (m)
K	نفوذپذیری (ms^{-1})
k	نفوذپذیری مخصوص
L	طول (m)
LCC	هزینه چرخه عمر (\$)
n	طول عمر، بازگشت سرمایه (سال)
p	ظرفیت گرمایی ($Jm^{-3}K^{-1}$)
P	قیمت واحد انرژی تولید شده ($\$J^{-1}$)

۱۰- مراجع

- [1] Gaine K., Duffy A., A life cycle cost analysis of large-scale thermal energy storage technologies for buildings using combined heat and power, zero emission buildings - proceedings of Renewable Energy Conference, Trondheim, Norway, 2010.
- [2] Bakema G., Snijders A. L., Nordell B., Underground Thermal Energy Storage, State of the Art Report, Arnhem, Netherlands, pp.83-89, 1995.
- [3] Sanner B., Karytsas C., Menfrinos D., Rybach L., Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, Geothermics, Vol. 32, pp. 579-588, 2013.

- [27] Hoffmann K.A., Chiang S.T., Computational Fluid Dynamic, *Publication of Engineering education System*, USA, 2000.
- [28] Ghaebi H., Bahadori M.N. and Saidi M.H., Performance analysis and parametric study of thermal energy storage in an aquifer coupled with a heat pump and solar collectors, for a residential complex in Tehran, Iran, *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 156-170, 2014.
- [29] Schaetzle W.J., Thermal energy storage in aquifers, design and applications, *Pergamon Press*, 1980.
- [30] Pehnt M., Dynamic life cycle assessment (LCA) of renewable energy technologies, *Renewable Energy*, Vol. 31, pp. 55–71, 2005.
- [31] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.watt.pl/en>.
- [32] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.saravel>. (In Persian)
- [33] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.York.com>.
- [34] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.nigc.ir>. (In Persian)
- [35] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.tavanir.org.ir>. (In Persian)
- [36] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.ssi.co.ir> (In Persian)
- [37] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.damavandac.com>. (In Persian)
- [38] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.pumpiran.com>. (In Persian)
- [39] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://portal.tehranmobaddel.com>. (In Persian)
- [40] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.damatazhiz.com>. (In Persian)
- [41] *Price List*, Accessed 30 May 2015; <http://www.heatpumpsuppliers.com.Q>
- [4] Dincer I., Rosen M. A., Thermal Energy Storage – *Systems and Applications*, Wiley, Chichester, 2002.
- [5] Meyer C. F., Todd D. K., Heat storage wells” *Water Well Journal*, Vol. 10, pp. 35-41, 1973.
- [6] Molz F. J., Warman J.C., Jones T.E., Aquifer storage of heated water: Part 1: A field experiment, *Ground Water*, Vol. 16, pp. 234-241, 1978.
- [7] Papadopoulos S. S., Larson S. P., Aquifer storage of heated water: Part 2: Numerical simulation of field results, *Ground Water*, Vol. 16, pp. 242-248, 1978.
- [8] Parr D.A., Molz F.J., Melville J.G., Field determination of aquifer thermal energy storage parameters, *Ground Water*, Vol. 21, pp. 22-35, 1983.
- [9] Andersson O., Hellstrom G., Nordell B., Heating and cooling with UTES in Sweden-current situation and potential market development, *International Proceedings of the 9th international conference on thermal energy storage*, Warsaw, Poland, vol. 1, pp. 359-366, 2003.
- [10] Sanner B., Karytsas C., Mendrinis D., Rybach L., Current status of ground source heat pumps and underground thermal energy storage in Europe, *Geothermics*, Vol. 32, pp. 579-588, 2003.
- [11] H.O. Paksoy, O. Andersson, S. Abaci, H. Evliya, B. Turgut “Heating and cooling of a hospital using solar energy coupled with seasonal thermal energy storage in an aquifer” *Renewable Energy*, Vol. 19, pp. 117-122, 2000.
- [12] J.S. Dickinson, N. Buik, M.C. Matthews, A. Snijders “Aquifer thermal energy: theoretical and operational analysis” *Geotechnique*, Vol. 59, pp. 249-260, 2009.
- [13] Novo V.A., Bayon R.J., Castro-Fresno D., Rodriguez-Hernandez R., Review of seasonal heat storage in large basins: water tanks and gravel water pits, *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 390-397, 2009.
- [14] Preene M., Powrie W., Ground energy systems: delivering the potential, *Energy*, Vol. 34, pp. 77-84, 2009.
- [15] Umemiya H., Satoh Y., A cogeneration system for a heavy-snow fall zone based on aquifer thermal energy storage, *Japanese Society of Mechanical Engineering*, Vol. 33, pp. 757-765, 1990.
- [16] Gao Q., Li M., Yu M., Spitler J.D., Yan Y.Y., Review of development from GSHP to UTES in China and other countries, *Renewable Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 1383-1394, 2009.
- [17] Lee K.S., Performance of open borehole thermal energy storage system under cyclic flow regime, *Journal of Geoscience*, Vol. 12, pp. 169-175, 2008.
- [18] Fan R., Jiang Y., Yao Y., Shiming D., Ma Z., A study on the performance of a geothermal heat exchanger under coupled heat conduction and groundwater advection, *Energy*, Vol. 32, pp. 2199-2209, 2007.
- [19] Sethia V.P., Sharma S.K., Greenhouse heating and cooling using aquifer water”, *Energy*, Vol. 32, pp. 1414-1421, 2007.
- [20] Sethia V.P., Sharma S.K., Experimental and economic study of a greenhouse thermal control system using aquifer water, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 306–319, 2007.
- [21] Vanhoudt D., Desmedta J., Van Baela J., Robeynb N., Hoe H., An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings, *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 3657–3665, 2011.
- [22] Zhua Y., Tao Y. and Rayegan R., A comparison of deterministic and probabilistic life cycle cost analyses of ground source heat pump (GSHP) applications in hot and humid climate, *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 312–321, 2012.
- [23] Hang Y., Qu M. and Zhao F., Economical- and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States, *Energy and Buildings*, Vol. 55, pp. 181–188, 2012.
- [24] Kegel M., Sunye R. and Tamasauskas J., Life cycle cost comparison and optimization of different heat pump systems in the Canadian Climate, *Proceedings of e-Sim: The Canadian Conference on Building Simulation*, pp. 492-506, 2012.
- [25] Bear J., Dynamics of fluids in porous media, pp. 450-510, *Elsevier, Dover Publication, Inc.*, 1992.
- [26] Bejan A., Convective Heat Transfer, *Mc Graw Hill Press, New York*, 1997.