



استفاده از قاعده سرانگشتی برای مقایسه فناوری پمپ زمین گرمایی و فناوری چیلرهای سرمایشی

نام و نام خانوادگی مریم فاطمی اردکانی^{۱*}، محمد علی شفیعا^۲، آرنوش شاکری^۳
دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی دانشگاه علم و صنعت، (maryam_fatemi_a@VU.iust.ac.ir)
استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت، (omidshafia@iust.ac.ir)
دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت، (shakeri@iust.ac.ir)

چکیده

امروزه یکی از مهمترین نیازهای کشورهای در حال توسعه، تصمیم‌گیری در خصوص نحوه سرمایه‌گذاری در عرصه فناوری و دانش است. کمبود منابع مالی از یک سو و هزینه‌های بالای پژوهش و توسعه فناوری از جهتی دیگر اهمیت قیمت‌گذاری فناوری^۴ را دو چندان نموده است. عدم دسترسی به اطلاعات و داده‌های مناسب مدیران و سازمانها را به سوی روشهای تقریبی و سریع قیمت‌گذاری فناوری نظیر قاعده سرانگشتی^۵ سوق می‌دهد. هدف این مقاله بکارگیری قاعده سرانگشتی برای مقایسه فناوری پمپ زمین گرمایی^۶ به منظور تهویه مطبوع ساختمانها و فناوری سیستم‌های گرمایش و سرمایش متداول در کشور نظیر چیلرهای جذبی^۷ و تراکمی^۸ است. برای این منظور هزینه سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه‌های متغیر سالیانه دو تکنولوژی برآورد شده‌اند و سپس با استفاده از روشهای اقتصاد مهندسی میزان اقتصادی بودن دو فناوری با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در انتها نیز ظرفیت سرمایشی کل کشور با روش سرانگشتی برآورد و میزان صرفه‌جویی حاصل از جایگزینی فناوری پمپ زمین گرمایی با انواع چیلرهای مورد استفاده در کشور محاسبه شده است.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری فناوری، قاعده سرانگشتی، پمپ زمین گرمایی، ارزش خالص فعلی، بار برودتی.

۱- مقدمه

نیاز بشر به انرژی انکارناپذیر است. از یک سو اساس زندگی انسان بر پایه انرژی استوار است و از سوی دیگر منابع انرژی بر روی زمین محدود هستند. منابع انرژی را می‌توان در دو گروه منابع محدود و نامحدود طبقه‌بندی کرد. نفت، گاز و زغال سنگ منابع محدودی هستند که در همه نقاط زمین وجود ندارند، هر جا هم باشند، به هر حال یک روز تمام می‌شوند و به

۱ و * - نویسنده مسئول: دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی دانشگاه علم و صنعت

۲ - استادیار دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت

۳ - دانشجوی دکتری مهندسی صنایع دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت!!!

⁴ Technology Pricing

⁵ Rules of thumb

⁶ Geothermal Heat Pump(GHP)

⁷ Absorption Chiller

⁸ Compressed Chiller



همین دلیل سالهاست که انسان به دنبال استفاده از منابع نامحدود انرژی نظیر آب، باد، انرژی خورشیدی و انرژی هسته‌ای است. استفاده از انرژی آب و باد در همه نقاط کره زمین میسر نخواهد بود و استفاده از انرژی خورشیدی و انرژی هسته‌ای هزینه زیادی دارد بنابراین باید در جستجوی منابع دیگر انرژی بود. یکی از این منابع خود کره زمین است، درون زمین بسیار گرم است و در صورت دستیابی به آن در واقع به منبع عظیمی از انرژی دست یافته‌ایم. این انرژی را انرژی گرمایی زمین، زمین گرمایی یا ژئوترمال^۱ می‌نامند.

در این مقاله ابتدا به بررسی تاریخچه انرژی گرمایی زمین و کاربردهای آن می‌پردازیم. سپس تکنولوژی استفاده از این انرژی در سرمایش و گرمایش ساختمانها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در گام بعدی جهت اعتبارسنجی و مقایسه اقتصادی فناوری استفاده از سیستم زمین گرمایی برای تامین گرمایش و سرمایش با فناوری‌های معمول گرمایش و سرمایش، هزینه‌های اولیه و سالیانه فناوری‌های مختلف برآورد شده و با استفاده از روش ارزش خالص فعلی، فناوری بهینه مشخص شده است. در نهایت با استفاده از قانون سرانگشتی برآورد میزان تقاضای مورد نیاز برای کل کشور صورت گرفته و میزان صرفه جویی اقتصادی جایگزینی سیستم زمین گرمایی با سیستم‌های معمول سرمایش و گرمایش در ایران برآورد شده است.

۲- قاعده سرانگشتی

قاعده سرانگشتی در علوم مختلف جایگاه ویژه ای دارد و بعنوان روشی تقریبی و مبتنی بر استدلال‌های منطقی توسط کارشناسان علوم مختلف مورد بهره برداری قرار می‌گیرد. بعنوان مثال در خصوص پشتیبانی طراحی محصول، سه فاز برنامه ریزی اولیه، برنامه ریز سرانگشتی و برنامه ریزی فرایندی تفضیلی را در نظر می‌گیرند. دو مرحله اول بر اساس اطلاعات ناکامل محصول صورت می‌گیرد و به همین دلیل بعنوان برنامه‌ریزی فرایند سرانگشتی نامیده می‌شود. هدف از بررسی برنامه ای سرانگشتی، بررسی امکان پذیری ساخت محصول در همان مراحل طراحی و نزدیک کردن مرحله ساخت به مرحله طراحی می‌باشد. در کاربرد دیگری، سازمانهای پروژه محور در هنگام شرکت در مناقصات جهت برآورد احجام کاری و برآورد قیمت پیشنهادی از روش سرانگشتی استفاده می‌نمایند.

۳- انرژی زمین گرمایی

۳-۱- تاریخچه

ژئوترمال از کلمه یونانی ژئو به معنی زمین و ترمال به معنی گرما و گرمایی گرفته شده است. بنابراین، انرژی ژئوترمال به معنای انرژی زمین گرمایی یا انرژی با منشا درونی زمین است [۱]. از زمان‌های دور، مردم از آب زمین گرمایی که آزادانه در سطح زمین به صورت چشمه‌های گرم جاری بودند، استفاده کرده‌اند. برای مثال رومی‌ها از این آب برای درمان امراض پوستی و چشمی بهره می‌گرفتند [۲]. بومی‌های آمریکا نیز از آب زمین گرمایی برای پختن و مصارف دارویی بهره می‌گرفتند [۱]. در قرن سیزدهم برای اولین بار در ایسلند در سال ۱۳۰۰ میلادی از آن برای گرم کردن محل زندگی انسان استفاده شده است ولی نخستین بار ایتالیایی‌ها در مقیاس صنعتی از این منبع انرژی استفاده کردند و اولین نیروگاه برق زمین گرمایی در منطقه لاردولو در نزدیکی پیزا در سال ۱۹۰۴ میلادی ساخته شد. سپس فرانسوی‌ها نیروگاه‌های زمین گرمایی مختلفی را در سالهای پس از ۱۹۷۰ احداث کردند و مورد بهره برداری قرار دادند [۳]. استفاده از گرمای درونی زمین از سالهای پس از ۱۹۸۰ برای گرم کردن خانه‌ها در کالیفرنیا ایالات متحده آمریکا آغاز شد [۴] و به مرور به سایر مناطق دنیا تسری پیدا کرد به گونه‌ای که امروزه کشورهای ایسلند، ایتالیا، مکزیک، فیلیپین، زلاندنو، ژاپن، ترکیه، روسیه، چین و فرانسه سالهاست که از این منبع انرژی برای گرمایش و سرمایش ساختمانها استفاده می‌کنند [۲].

¹ Geothermal



ایران از نظر منابع انرژی زمین گرمایی، بسیار غنی است و بر روی کمر بند زمین گرمایی جهان قرار دارد. این کشور در مقام چهاردهم کشورهای مناسب برای استفاده از این انرژی در مقیاس صنعتی قرار گرفته است [۵]. صدها چشمه آب گرم و سابقه آتشفشانی و زلزله خیز بودن ایران نیز این نکته را تایید می کند.

۳-۲- کاربردهای انرژی ژئوترمال

توزیع دما در زیر زمین تابعی از دو فرآیند است [۶ و]:

- از یک طرف افزایش منظم دما با عمق، نتیجه شار گرمای هدایت شده از داخل زمین به سمت سطح آن است. این گرما که اساساً از مواد رادیواکتیو سنگها ناشی می شود، گرادیان زمین گرمایی یا افزایش دما در واحد عمق حتی در ناحیه ای با لایه های زمینی یا طبیعت متفاوت شار حرارتی تقریباً ثابت و گرادیان بطور غیر قابل اغماض تغییر می کند. شناسایی این گرادیان در یک ناحیه معین سبب ارزیابی دمای حاکم بر عمقی می شود که در آن سفره آبی قابل استخراج وجود دارد.
- فرآیند دیگری که به توزیع دماها در زیر زمین حاکم است. همرفت یا جابجایی است. خاک قابل نفوذ به جریان سریع آب در جهت قائم اجازه می دهد و به این دلیل همرفت تولید می شود. این همرفت مخصوصاً در مورد یک رگه بخار اهمیت دارد، از این انرژی زمین گرمایی (با انرژی بالا) بسیار جالب برای تولید الکتریسته استفاده می شود.

انرژی ژئوترمال با درجه حرارت بالا برای تولید برق مورد استفاده قرار می گیرد. در نیروگاههای برق زمین گرمایی، بخار طبیعی یا آب گرم دارای بخار، با فشار زیاد به سطح زمین می رسد و سپس از این بخار برای چرخاندن توربین و تولید برق استفاده می شود [۷].

کاربرد انرژی ژئوترمال با درجه حرارت پایین عموماً به صورت مستقیم است. کاربرد مستقیم انرژی زمین گرمایی، بهره برداری بدون واسطه از انرژی زمین گرمایی است. در این حالت، انرژی زمین گرمایی به انرژی الکتریکی تبدیل نمی شود، بلکه فقط از انرژی حرارتی آن استفاده می شود. برخی از این کاربردها عبارتند از:

الف- درمان بیماری ها: این کاربرد بسیار قدیمی است و از روزگاران دور اقوامی چون رومی ها، چینی ها، ژاپنی ها، عثمانی ها و ساکنان سایر نواحی کره زمین به منظور استحمام و درمان بیماری های گوناگون از آب های گرم طبیعی زمین استفاده می کردند. هم اکنون حدود ۴۵ کشور جهان از چشمه های آب گرم خود برای این منظور استفاده می کنند [۸]. ژاپنی ها با بهره گیری از بیش از ۲۲۰۰ کانون تفریحی مرتبط با چشمه های آب گرم، سالانه قریب به صد میلیون مهمان و گردشگر را پذیرا هستند و از آب های گرم دارای حرارت بیش از ۵۰ درجه سانتیگراد برای درمان بیماری هایی نظیر فشار خون بالا، روماتیسم، بیماری های پوستی و بیماری های دستگاه عصبی استفاده می کنند [۹].

ب- کشاورزی: عمده ترین کاربرد انرژی زمین گرمایی در زمینه فعالیت های کشاورزی، تامین گرمایش گلخانه ها است. در برخی از مناطق سردسیر از حرارت آب داغ مخزن های زمین گرمایی برای گرم کردن خاک کشاورزی استفاده می شود. از جمله محصولات که به کمک این انرژی کشت می شوند می توان به خیار، گوجه فرنگی، انواع گل ها، گیاهان خانگی، نهال درختان و انواع کاکتوس ها اشاره کرد. برای گرم کردن گلخانه ها معمولاً یا آب داغ را از لوله های فلزی عبور می دهند یا اینکه همانند سیستم های گرمایشی خانه ها از پره های رادیاتور استفاده می کنند، یا آب داغ را از درون شبکه مترامی از لوله ها که در پشت آنها یک فن قوی وجود دارد، عبور می دهند [۱۰]. در بین کشورهای جهان مجارستان از نظر استفاده از گلخانه های زمین گرمایی مقام نخست را دارد [۱۱].

ج- آبری پروی: به کمک انرژی زمین گرمایی می‌توان زمان مورد نیاز برای رشد و پرورش انواع مختلف آبریان را کاهش داد. امروزه در سطح جهان از انرژی زمین گرمایی برای پرورش و رشد آبریانی نظیر میگو، قزل آلا، صدف و همچنین آبریان آکواریومی استفاده می‌شود [۳]. نظر به اینکه درجه حرارت بهینه برای پرورش انواع مختلف آبریان برای هر یک از آنها میزان مشخصی است، با استفاده از انرژی زمین گرمایی می‌توان درجه حرارت حوضچه‌های پرورش را در حد مطلوب تامین کرد و آن را در تمام طول سال ثابت نگه داشت [۴]. بدین ترتیب می‌توان مقدار تولید انواع مختلف آبریان را به میزان قابل توجهی افزایش داد.

د- کاربرد صنعتی: از انرژی زمین گرمایی برای پاستوریزه کردن شیر، خشک کردن سبزیجات و میوه جات و الوارکشی استفاده می‌شود [۱].

ه- ذوب برف و یخ: به کمک انرژی زمین گرمایی می‌توان برف یا یخ جاده‌ها و پیاده‌روها را نیز ذوب کرد. گسترش این نوع کاربرد نسبت به سایر موارد انرژی زمین گرمایی محدودتر است. امروزه در سراسر جهان به کمک انرژی زمین گرمایی حدود ۵۰۰ هزار متر مربع از مسیر پیاده‌روها و جاده‌ها گرم می‌شوند که بخش اعظم آنها نیز در کشور ایسلند است [۱۱].

و- گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها: یکی از جنبه‌های گوناگون کاربرد مستقیم انرژی زمین گرمایی بکارگیری آن برای گرمایش و سرمایش ساختمان‌هاست. درجه حرارت زیرزمین تا اعماق کم ۲ تا ۱۵ متری تقریباً در تمام طول سال ثابت است. بنابراین با استفاده از این پدیده طبیعی می‌توان گرمایش و سرمایش منازل را در زمستان و تابستان فراهم کرد. در واقع سازوکار اصلی این سیستم‌های تهویه، تبادل حرارت با بخش‌های کم‌عمق زمین است، بدین معنی که در فصل تابستان، حرارت را از داخل منازل به زمین منتقل می‌کنند و در زمستان، حرارت زیرزمین را به داخل فضاها مسکونی هدایت می‌کنند. این کار با استفاده از سیستمی بعنوان پمپ زمین گرمایی صورت می‌پذیرد [۱۰]. مهمترین ویژگی پمپ‌های زمین گرمایی تامین همزمان گرمایش و سرمایش ساختمانها تنها با یک سیستم است.

پمپ‌های زمین گرمایی تکنولوژی جدیدی در دنیای امروز محسوب می‌شوند و سهم کوچکی از بازار تجهیزات گرمایش و سرمایش را در دنیا دارا هستند ولی پر واضح است که این سهم دائماً در حال افزایش است. استفاده از این تکنولوژی هزینه اولیه بیشتری نسبت به سایر سیستم‌های متداول دارد ولی این اختلاف سرمایه‌گذاری اولیه به سرعت بواسطه صرفه جوئی‌های ناشی از مصرف انرژی کمتر جبران می‌گردد. علیرغم این مزیت ویژه و افزایش روز افزون قیمت انرژی در جهان و همچنین نیاز بشر به منابع انرژی پایدار و دائمی، استفاده از انرژی زمین گرمایی در همه نقاط زمین میسر نیست. شکل ۱- نحوه کارکرد پمپ‌های زمین گرمایی را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

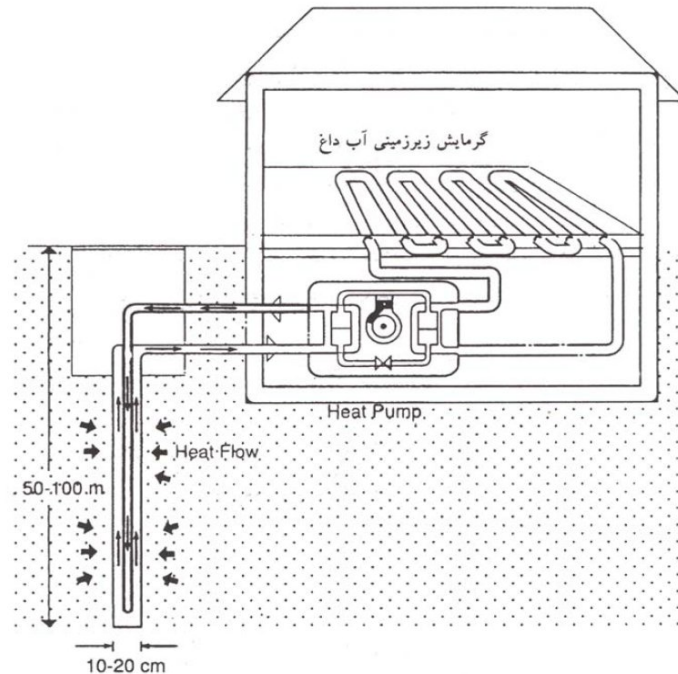
بطور کلی دو نوع سیستم برای گرمایش و سرمایش ساختمانها با استفاده از پمپ‌های زمین گرمایی وجود دارد.

۱- پمپ زمین گرمایی با سیستم بسته^۱

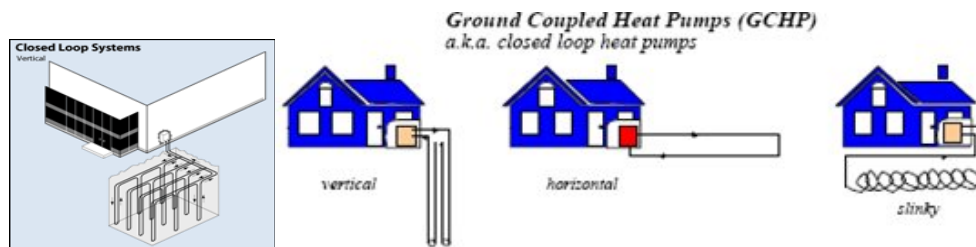
در این سیستم آب توسط پمپ زمین گرمایی و یک شبکه لوله کشی به درون زمین منتقل می‌شود و پس از تبادل حرارتی مجدداً به سطح زمین انتقال یافته و در ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. شبکه لوله‌کشی که عموماً پلی اتیلنی است محدود و بسته می‌باشد و از این جهت این سیستم را بسته می‌نامند. بسته به موقعیت جغرافیایی ساختمان، شبکه لوله-کشی می‌تواند به صورت افقی، عمودی و یا حتی مارپیچ باشد. انواع مختلف این سیستم به صورت شماتیک در شکل ۲- ارائه

^۱ Closed loop heat pump

شده است [۲]. سیستم بسته تقریباً در اکثر نقاط زمین که امکان خاکبرداری و یا حفاری و مته زنی در آنجا وجود داشته باشد قالب اجرا می‌باشد. به همین دلیل در این مقاله تمرکز اصلی بر روی سیستم‌های بسته افقی و عمودی است.



شکل ۱: نحوه کارکرد پمپ‌های زمین گرمایی به صورت شماتیک [۱۲]



شکل ۱: نمونه داده شده

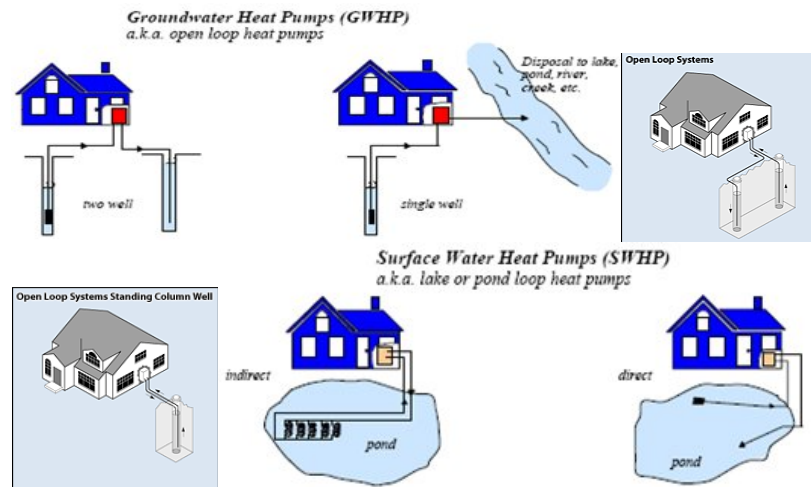
شکل ۲: انواع مختلف سیستم بسته پمپ زمین گرمایی به صورت شماتیک [۲]

۲- پمپ زمین گرمای با سیستم باز^۱

این سیستم از منبع گرمایی دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و یا منابع آب زیرزمینی استفاده می‌کنند. از این جهت این سیستم‌ها باز نامیده می‌شوند که آب برداشت شده پس از استفاده مجدداً در سیستم استفاده نمی‌شود و دائماً در حال تجدید می‌باشد. دمای آب در این منابع گرمایی همواره ثابت است. آنگونه که در شکل ۳- مشخص است استفاده از آب بعنوان منبع گرمایی حالت‌های مختلف دارد. در ساده‌ترین حالت آب را از یک منبع زیرزمینی برداشت کرده و پس از استفاده از گرمای آن در سطح ساختمان آن را در چاه دیگری تزریق می‌کنند یا به درون یک رودخانه منتقل می‌نمایند. در حالت دوم منبع برداشت و تزریق یکی هستند که بیشتر در مورد آب‌های سطحی نظیر دریاچه‌های دائمی کاربرد دارند [۲]. سیستم‌های باز به لحاظ نیاز به

^۱ Open loop heat pump

دسترسی به منابع آبی در همه نقاط زمین قابل استفاده نمی‌باشند ولی در صورت وجود چنین شرایطی هزینه کمتری نسبت به سیستم‌های بسته دارند.



شکل ۱: نمونه داده شده

شکل ۳: انواع مختلف سیستم باز پمپ زمین گرمایی به صورت شماتیک [۲]

۳-۳- مزایا و معایب تکنولوژی پمپ زمین گرمایی

- از جمله عمده‌ترین مزایای این سیستم می‌توان موارد زیر را برشمرد [۱ و ۲ و ۳]:
- استفاده از تجهیزات یکسان برای سرمایش و گرمایش ساختمان و صرفه جویی در فضای مورد نیاز برای تجهیزات
 - قابل اطمینان است و می‌تواند در طول سال فعال باشد و به دلیل قرار گرفتن روی منبع سوخت، مشکلات مربوط به قطع نیروی محرکه در نتیجه بدی هوا، بلایای طبیعی و یا تنش‌های سیاسی را ندارد.
 - هزینه‌های عملیاتی کمتر
 - آلودگی کمتر محیطی
 - بی صدا بودن
 - ایجاد گرمای یکنواخت به صورتی که هرگز دما به اندازه‌ای که هوا را خشک کند بالا نمی‌رود
 - امکان سرمایش و گرمایش همزمان (با استفاده از پمپ‌های مختلف)
 - دارای هزینه‌های تعمیراتی نسبتاً پایین
 - کاهش استخراج و حمل و نقل سوخت
 - دائمی است و مانند انرژی‌های نو دیگر (خورشیدی و بادی) از تغییرات فصلی اثرپذیر نیست
 - تمیز است و نیازی به سوخت ندارد، بنابراین سوخت‌های فسیلی حفظ می‌شوند و هیچگونه آلودگی وارد هوا نمی‌شود
 - معایب این سیستم نیز عبارتند از [۱ و ۲ و ۳]:
 - هزینه‌های اولیه نسبتاً بالا برای طراحی و خرید تجهیزات
 - امکان تداخل با پروژه‌های بزرگ عمومی
 - نا آشنا بودن برای شرکت‌های خدماتی نگهداری و تعمیرات

۴- مقایسه پمپ‌های زمین گرمایی با چیلرهای جذبی و تراکمی به روش سرانگشتی

امروزه روشها و رویکردهای بسیاری برای قیمت‌گذاری فناوری بکار گرفته شده‌اند که برخی از این روشها مبتنی بر محاسبات پیچیده ریاضی هستند که موسوم به روشهای کمی‌اند^۱ و دسته دیگر که به نام روشهای کیفی^۲ شناخته می‌شوند کمتر مبتنی بر چنین محاسباتی هستند. این روشها نیازمند اطلاعات و داده‌های ورودی متعددی هستند که عموماً تمامی آنها در دسترس نمی‌باشند. همین مساله مدیران را به سوی روشهای تقریبی و سریع نظیر قاعده سرانگشتی سوق می‌دهد. در این قسمت از قاعده سرانگشتی برای قیمت‌گذاری دو فناوری پمپ‌های زمین گرمایی به منظور تهیه مطبوع ساختمانها و فناوری سیستم‌های گرمایش و سرمایش متداول در کشور نظیر چیلرهای جذبی و تراکمی استفاده می‌شود.

نخستین گام برای ارزیابی این دو فناوری مشخص کردن، تخمین یا محاسبه اطلاعات اولیه نظیر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه، میزان مصرف انرژی، هزینه واحد انرژی مصرفی و... می‌باشد. پارامترهای در نظر گرفته شده بعنوان فرضیات اولیه در جدول شماره ۱ ارائه شده است. در این جدول هزینه‌ها براساس استعلام از شرکتهای سازنده ایرانی برای چیلر و خارجی برای پمپ‌های زمین گرمایی با ظرفیت‌های مختلف استخراج شده است و مصارف با محاسبات مهندسی و ضرایب با توجه به شرایط اقلیمی تهران بعنوان منطقه ای معتدل در کشور در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱: فرضیات اولیه تکنولوژی چیلر و تکنولوژی پمپ زمین گرمایی

پمپ زمین گرمایی		چیلر		شرح
بسته-عمودی	بسته-افقی	تراکمی	جذبی	
۰۰۰,۸۲۲,۱۴	۰۰۰,۸۲۲,۱۴	۲۵۲,۰۶۶,۷	۸۹۴,۷۳۳,۸	هزینه اولیه به ازای هر تن برودتی (ریال)
۲۹۷	۲۹۷	۲۵۰۰	۱۲۵	برق مصرفی به ازای هر تن برودتی در سال (کیلووات)
-	-	۴۷۳	۱۶۲۳	گاز مصرفی به ازای هر تن برودتی در سال (متر مکعب)
۴	۴	۴	۴	تعداد ماه‌های سرمایش
۵	۵	۵	۵	تعداد ماه‌های گرمایش
۰/۷	۰/۷	۰/۷	۰/۷	ضریب استفاده سرمایش
۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۴	ضریب انقطاع (فقط مصرف گرمایشی)
۰۰۰,۲۰	۰۰۰,۲۰	۰۰۰,۲۲۰	۰۰۰,۲۷۰	هزینه نگهداری و تعمیرات سالیانه هر تن برودتی (ریال)
۳۰	۳۰	۱۵	۱۵	عمر مفید (سال)

با اجرای طرح هدفمند کردن یارانه‌ها و آزاد شدن قیمت‌های انرژی، قیمت نهایی انواع سوخت در کشور به شرح جدول شماره ۲ قابل ارائه است.

براساس اطلاعات جدول شماره ۱ هزینه سرمایه‌گذاری اولیه فناوری پمپ‌های زمین گرمایی بین ۲ تا ۲/۵ برابر فناوری چیلر است. از طرف دیگر براساس جدول شماره ۲ با آزاد شدن قیمت حامل‌های انرژی، قیمت گاز طبیعی به ازای هر متر مکعب ۴ برابر و قیمت برق به ازای هر کیلو وات ۴/۵ برابر قیمت یارانه‌ای فعلی خواهد بود.

جدول ۲: قیمت انواع حامل‌های انرژی پس از اجرای طرح هدفمند کردن یارانه‌ها [۱۳]

حامل انرژی	مصرف سالیانه (میلیارد)	واحد	نرخ فعلی (ریال)	نرخ نهایی بر مبنای هدفمند سازی کامل (ریال)
گازوئیل	۳۳/۵	لیتر	۱۶۵	۵۲۰۰
برق	۲۰۹/۸	کیلووات ساعت	۱۷۰	۷۷۳
بنزین	۲۴/۴	لیتر	۱۰۰۰	۵۸۰۰

^۱ Quantitative methods

^۲ Qualitative methods

گاز	۱۳۶/۸	مترمکعب	۱۷۰	۷۰۰
نفت کوره	۱۷/۲	لیتر	۹۵	۳۸۵۰
نفت سفید	۶/۷	لیتر	۱۶۵	۵۷۰۰

بدیهی است برای داشتن یک سیستم گرمایشی و سرمایشی می‌بایست هزینه سرمایه‌گذاری اولیه چیلر تراکمی بعنوان حداقل سرمایه‌گذاری لازم صورت پذیرد. بنابراین اختلاف سرمایه‌گذاری نسبت به چیلر تراکمی برای محاسبه و مقایسه ارزش خالص فعلی بعنوان هزینه در سال اول لحاظ شده است. در انجام محاسبات متوسط نرخ تورم در طی دوره ۱۵ ساله ۱۰ درصد لحاظ شده است. همچنین هزینه‌های انرژی در ۵ سال اول ثابت فرض شده است و پس از آن سالیانه ۱۰٪ افزایش داده شده است. این فرض اینگونه قابل توجیه است که استفاده کنندگان از چیلر عموماً در زمره مشترکین پرمصرف برق و گاز کشور هستند فلذا طبق جداول محاسبه بهای برق وزارت نیرو و گاز شرکت ملی گاز این مشترکین مشمول دریافت یارانه نمی‌شوند. از طرف دیگر براساس طرح هدفمند سازی یارانه‌ها، آزاد سازی نرخ حامل‌های انرژی در دوره پنج ساله تحقق خواهد یافت. با در نظر گرفتن این فرضیات، مقدار ارزش خالص فعلی برای نرخهای بهره صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد سیستم‌های مختلف محاسبه و در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول ۳: اطلاعات مبنا برای آنالیز اقتصادی دو تکنولوژی به ازای هر بار برودتی

تکنولوژی گرمایش و سرمایش	هزینه اولیه (ریال)	اختلاف سرمایه‌گذاری نسبت به چیلر تراکمی	مصرف سالیانه گاز (مترمکعب)	مصرف سالیانه برق (کیلو وات)	هزینه نگهداری سالیانه (ریال)
چیلر تراکمی	۲۵۲,۰۶۶,۷	۰	۴۷۳	۲۵۰۰	۰۰۰,۲۲۰
چیلر جذبی	۸۹۴,۷۳۳,۸	۶۴۲,۶۶۷,۱	۱۶۲۳	۱۲۵	۰۰۰,۲۷۰
زمین گرمایی (افقی)	۰۰۰,۸۸۲,۱۴	۷۴۸,۸۱۵,۷	-	۲۹۷	۰۰۰,۲۰
زمین گرمایی (عمودی)	۱۸۸,۹۱۸,۱۶	۹۳۶,۸۵۱,۹	-	۲۹۷	۰۰۰,۲۰

جدول ۴: آنالیز مقدار ارزش فعلی دو تکنولوژی در دوره ۱۵ ساله به ازای هر بار برودتی

تکنولوژی گرمایش و سرمایش	NPV (0%)	NPV (5%)	NPV (10%)	NPV (15%)	NPV (20%)
چیلر تراکمی	۸۹۷,۳۸۱,۵۴	۴۳۳,۵۷۲,۳۳	۰۴۹,۱۴۳,۲۲	۴۱۱,۴۸۳,۱۵	۲۸۰,۳۸۲,۱۱
چیلر جذبی	۵۳۹,۲۱۴,۳۶	۱۹۳,۸۵۵,۲۲	۸۲۲,۴۹۸,۱۵	۷۳۵,۱۹۵,۱۱	۰۵۴,۵۳۱,۸
زمین گرمایی (افقی)	۱۰۹,۶۳۰,۱۲	۳۹۵,۴۲۴,۱۰	۵۹۷,۰۷۷,۹	۰۵۶,۱۸۰,۸	۶۵۸,۵۳۳,۷
زمین گرمایی (عمودی)	۲۹۶,۶۶۶,۱۴	۶۲۲,۳۶۳,۱۲	۶۷۷,۹۲۸,۱۰	۶۵۳,۹۵۰,۹	۴۸۱,۲۳۰,۹

براساس جدول ۴ مشخص است که چیلرهای تراکمی علی‌رغم هزینه اولیه پائینتر به دلیل هزینه انرژی مصرفی بالاتر، صرفنظر از نرخ بهره همواره نسبت به سایر سیستم‌ها در طی دوره ۱۵ سال هزینه کل بیشتری دارد. هزینه پمپ زمین گرمایی افقی نیز همواره بیشتر از هزینه پمپ زمین گرمایی عمودی است. دلیل این اختلاف، تفاوت در سرمایه‌گذاری اولیه دو سیستم است. نکته مهم دیگری که از این جدول قابل استنباط است، توجیه پذیر بودن استفاده از فناوری پمپ زمین گرمایی با بهره حدود ۲۰ درصد است.

در بررسی دیگری ابتدا میزان بار برودتی کشور با تقریب سرانگشتی محاسبه می‌شود و سهم چیلرها در تامین نیازهای گرمایشی و سرمایشی خانوارها برآورده می‌شود و در نهایت با توجه به نتایج حاصل از مرحله قبل میزان صرفه‌جویی هزینه‌های سالیانه انرژی کل کشور در صورت جایگزینی پمپ‌های زمین گرمایی با چیلرهای جذبی یا تراکمی برآورد می‌گردد. کل جمعیت کشور حدود ۷۷ میلیون نفر است که ۶۰ درصد آن جمعیت شهری است. اگر فرض شود که فقط در جمعیت شهری از سیستم سرمایش استفاده می‌شود جمعیت بهره‌مند حدود ۴۶/۲ میلیون نفر برآورد می‌شود. با فرض متوسط ۵ نفر برای هر خانوار و سرانه ۲۰ متر مربع برای هر مترمربع کل منازل بهره‌مند از سیستم سرمایش ۹۲/۴ میلیون مترمربع خواهد بود و با در نظر گرفتن یک تن برودتی به ازای هر ۲۵ مترمربع، حدود ۳/۷ میلیون تن برودتی مورد نیاز کشور خواهد

بود. اگر فرض شود که از این میزان ۱۰ درصد توسط انواع چیلر برآورده می‌شود کل ظرفیت چیلرهای موجود در کشور معادل ۳۷۰ هزار تن بار برودتی خواهد بود. اگر متوسط مصرف چیلرها به ازای هر تن برودتی ۱۳۰۰ کیلووات برق و ۱۰۵۰ مترمکعب گاز در سال باشد آنگاه با فرض قیمت واحد ۷۷۳ و ۷۰۰ ریال برای برق و گاز، هزینه‌ای در حدود ۶۴۴ میلیارد ریال در سال صرف انرژی مصرفی چیلرهای کشور می‌شود. در صورت تامین این نیاز برودتی توسط پمپ‌های زمین گرمایی این هزینه به حدود ۸۵ میلیارد ریال کاهش می‌یابد که ۱۳/۲٪ هزینه انواع چیلرهاست.

۵- نتیجه گیری

تصمیم دولت به اجرای طرح هدفمند کردن یارانه‌ها و آزادسازی نرخ حامل‌های انرژی می‌تواند این پیام را برای مصرف کنندگان انواع حامل‌های انرژی داشته باشد که از این پس بایستی هزینه بیشتری برای انرژی بپردازند. این عدم مطلوبیت منجر به تغییر رفتار مصرف کنندگان و تمایل آنها به استفاده از وسایل، تجهیزات، ماشین آلات و بطور کلی مصرف‌کنندگانی با انرژی مصرفی کمتر و یا حتی جایگزینی منابع انرژی با منابع در دسترس تر، دائمی تر و ارزانتر گردد. بدیهی است پیش از اجرای طرح هدفمند کردن یارانه‌ها بسیاری از این رفتارها توجیه اقتصادی مناسبی برای مصرف کنندگان انواع حامل‌های انرژی نداشته‌اند. با در نظر گرفتن این نکات و توجه به این مساله که کشورهای صنعتی قریب به سه دهه است از زمین بعنوان یک منبع نامحدود انرژی استفاده می‌کنند در این مقاله به مقایسه دو فناوری پمپ‌های زمین گرمایی و چیلرهای سرمایشی برای تامین سرمایش و گرمایش ساختمانها پرداخته شده است.

در ابتدا با محاسبات مهندسی و استعلام از قیمت عرضه کنندگان و تولید کنندگان این سیستم‌ها هزینه اولیه، هزینه سالیانه مصرف انرژی و هزینه نگهداری و تعمیرات سیستم‌ها برآورد و نرمال سازی گردیدند و در نهایت با استفاده از تکنیک ارزش خالص فعلی اثبات گردید که برای نرخ بهره ۲۰٪ و کمتر استفاده از فناوری پمپ‌های زمین گرمایی اقتصادی تر است. با توجه به اینکه ظرفیت انواع چیلرهای مورد استفاده در کشور مشخص نیست و آماری در این خصوص وجود ندارد، با استفاده از روش سرانگشتی، کل ظرفیت برودتی انواع چیلرهای کشور برآورد گردید و براساس نتایج مرحله قبل اثبات گردید در صورت جایگزینی و استفاده از فناوری پمپ‌های زمین گرمایی تنها حدود ۱۳٪ هزینه چیلر صرف می‌گردد و از این محل سالیانه ۵۶۰ میلیارد ریال صرفه جویی حاصل می‌گردد. بدیهی است دستیابی به این میزان صرفه جویی سالیانه نیازمند سرمایه گذاری اولیه بر روی فناوری پمپ‌های زمین گرمایی است. برای ترغیب مصرف کنندگان به استفاده از این فناوری در اکثر کشورهای بهره مند از این تکنولوژی وام‌های بلند مدتی به متقاضیان این فناوری توسط دولت پرداخت می‌گردد. بعنوان مثال بیش از یک دهه است که در امریکا ۳۰٪ هزینه اولیه استفاده از پمپ‌های زمین گرمایی در قالب توسط دولت تامین می‌شود. با توجه به این مساله، نگارندگان این مقاله بررسی میزان مشارکت دولت در فناوری پمپ‌های زمین گرمایی را بعنوان موضوعی برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌نمایند.

منابع

[1] Geo-Heat Center, (2005). *Geothermal direct use - case studies*, U.S. Department of Energy National Renewable Energy Laboratories- Golden, CO.

[2] Blodgett, Leslie, Slack, Kara, (2009). *Basic of geothermal energy production and use*, Geothermal energy association, USA.

[3] <http://geoheat.oit.edu>

[4] <http://www.igshpa.okstate.edu>

[5] Yousefi, Hossein., Ehara, Sachio., Noorollahi, Younes. (2007). **Geothermal potential site selection using gis in iran**, Thirty-Second Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, p. 22-24.

[6] Lamarche, Louis., Kaji, Stanislaw., Beauchamp, Benoit. (2010). **A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heat-pump systems**, Geothermics, p. 187-200.

[7] Ozgener, Onde., (2010). **Use of solar assisted geothermal heat pump and small wind turbine systems for heating agricultural and residential buildings**, Energy journal, Vol. 35, p. 262–268.

[8] <http://www.ghpc.org>

[9] <http://www.epri.com/information/aboutEPRI.htm1>

[10] Garcia-Gutierrez, Alfonso., Reyes, Barragan., Arellano-Gomez, Victor. (2010). **Research and development on heat pump systems in Mexico using geothermal energy**, Current Applied Physics, p.123–127.

[11] Kim, Minsung., Jin Baik, Young., Ryong Park, Seong., Chang Chang, Ki., Ra, Ho Sang. (2010). **Design of a high temperature production heat pump system using geothermal water at moderate temperature**, Current Applied Physics, p.117–122.

[۱۲] شیخ هادی، امین، (۱۳۸۷)، «بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، گروه برق قدرت.

[13] <http://www.dolat.ir>