علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره شانزدهم ، شماره چهار، زمستان ۹۳

# امکان سنجی فنی- اقتصادی و زیست محیطی استفاده از پمپهای حرارتی زمین گرمایی

**فریده عتابی**[1*]
far-atabi@jamejam.net
**سیدمحمدرضا هیبتی**[2]
**ستاره مهرخو**[3]

تاریخ دریافت:۸۸/۲/۱۵ تاریخ پذیرش: ۸۸/۵/۱۵

**چکیده**

**زمینه و هدف:** با توجه به منابع رو به اتمام سوخت های فسیلی و انتشارفراوان آلاینده های زیست محیطی از این منابع ، استفاده از انرژی های پاک همچون انرژی زمین گرمایی مورد توجه قرار گرفته است. پمپ های حرارتی زمین با مصرف برق در کمپرسور، جهت تأمین بار حرارتی وتامین آب گرم مصرفی می‌توانند گرما را از زمین به داخل ساختمان منتقل نمایند.

**روش بررسی:** در این تحقیق با انجام محاسبات تهویه مطبوع، بار حرارتی مورد نیاز برای یک نمونه ساختمان ۴ طبقه ۱۲واحدی واقع در شرق تهران با زیر بنای هر طبقه ۵۶۵ متر مربع به طور جداگانه محاسبه شده و باتوجه به ویژگی های حرارتی خاک ودمای میانگین سالیانه منطقه مورد نظر، پمپ حرارتی زمین گرمایی مناسب انتخاب گردید. سپس با توجه به هزینه اولیه خرید، نصب و راه اندازی سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی و مصرف برق آن، با نرم افزار Proform مقرون به صرفه بودن جایگزینی این سیستم با سیستم قبلی تأمین کننده بار حرارتی ساختمان (بویلر)، بر اساس قیمت اعتبار کربن در بازارهای جهانی، سناریو سازی شده وموردارزیابی فنی- اقتصادی وزیست محیطی قرار گرفته است.

**یافته ها:** باتوجه به نتایج حاصل، درصورت استفاده ازپمپ های حرارتی زمین گرمایی، انتشارکل آلاینده هادرطول انجام پروژه (۱۰سال)، به میزان ۳۷۵۹ تن معادل $CO_2$ کاهش یافته و همچنین ۶۷ هزارگیگاژول درمصرف سوخت گازطبیعی صرفه جویی می گردد.

**بحث و نتیجه گیری:** باتوجه به مشخصات خاک، شرایط آب وهوایی وشرایط زمین محل استقرارساختمان، می توان ازسیستمGSHP به جای بویلراستفاده شود. این امرموجب کاهش قابل توجه درمصرف انرژی الکتریکی وکوتاه شدن زمان بازگشت سرمایه می گردد.

**کلمات کلیدی:** انرژی زمین گرمایی، پمپ حرارتی، اعتبار کربن، امکان سنجی فنی- اقتصادی- زیست محیطی

۱- استادیار دانشکده محیط زیست وانرژی، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاداسلامی*(مسئول مکاتبات)
۲- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پردیس
۳- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده محیط زیست وانرژی، واحد علوم وتحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی

Archive of SID
www.SID.ir

**مقدمه**

محیط اطراف ما منابع انرژی بسیار بزرگ و ارزانی را در اختیارمان می‌گذارد. یکی از این منابع، انرژی زمین‌گرمایی است و یکی از راه‌های بهره‌برداری از این منبع انرژی، پمپ حرارتی زمین گرمایی است. این وسیله که برای گرمایش، سرمایش و تأمین آب گرم مصرفی ساختمان‌های مسکونی، تجاری و اداری مورد استفاده قرار می‌گیرد، با زمین تبادل گرما می‌کند. دمای زمین، به عنوان چشمه یا چاه گرمایی، در مقایسه با سیستم‌های تهویه مطبوع هوایی، در طول سال تقریباً ثابت و به دمای مطلوب محیط تهویه شده نزدیک تر است. به همین دلیل، این سیستم‌ها در مقایسه با بسیاری سیستم‌های دیگر، بازدهی بیش تری دارند و انرژی کم تری مصرف می‌کنند(۱). مزایای اصلی این سیستم‌ها عبارتند از مصرف کم تر انرژی، طرح ساده‌تر، نیاز کم تر به تعمیر و نگهداری، و نداشتن آلایندگی. معایب آن ها هم مربوط به بالا بودن هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیه نسبت به سایر سیستم‌های تهویه مطبوع ، کمبود طراحان متخصص، و کمبود پیمان‌کاران باتجربه برای نصب و راه‌اندازی این سیستم‌ها هستند. بخش مهمی از هزینهٔ سرمایه‌گذاری در پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی مربوط به مبدل حرارتی زمینی است. این بخش شامل هزینهٔ حفاری و پر کردن کانال زمینی، پمپ سیرکولاتور، سیال ضدیخ (در مناطق سردسیر)، لوله‌های پلی اتیلنی و نصب آنها می‌باشد. بررسی‌های اقتصادی نشان می دهندکه گرچه سرعت بازگشت سرمایهٔ پروژه‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی کم است، اما برای استفاده در دورهٔ ۵ تا ۷ سال توجیه اقتصادی دارند(۲) .

در سال ۱۹۱۲برای نخستین بار ایدهٔ استفاده از زمین به عنوان منبع گرما مطرح شد و نخستین پمپ‌های حرارتی زمین گرمایی در اواسط دههٔ ۱۹۴۰ در آمریکا و انگستان نصب شدند(۳). بنابراین، استفاده از این پمپ‌ها در دنیا دارای سابقه طولانی مدت است. اما به کارگیری آنها در ایران روشی نوین است. در واقع، با توجه به رشد مصرف انرژی و افزایش قیمت برق در سال‌های اخیر، مطالعات فنی و اقتصادی و امکان‌سنجی استفاده از این سیستم‌ها در ایران آغاز شده ، به طوری که در حال حاضر، این سیستم در پنج شهر اهواز، بندرعباس، رشت، طالقان و مشکین‌شهر نصب شده است و توسط سیستم یاد شده در حالت سرمایشی ۵۰٪ و در حالت گرمایشی ۷۰٪ مصرف برق کاهش داده شده است. پیش‌بینی می‌شود که در سال‌های آینده، این سیستم‌ها جایگاه مناسبی بین سیستم‌های تهویهٔ مطبوع در کشورمان به دست آورند. در طی دو دههٔ اخیر مطالعات بسیاری در زمینهٔ طراحی و مدل‌سازی (۷-۴)، تست و ارزیابی کارآیی (۱۲-۸)، و مقایسه و امکان‌سنجی فنی ـ اقتصادی (۱۷-۱۳) پمپ‌های گرمایی ژئوترمال انجام یافته است. اسن[1] (۱۳) یک سیستم پمپ حرارتی زمینی با مبدل افقی را برای استفادهٔ گرمایشی در منطقه‌ای در شرق ترکیه از لحاظ فنی و اقتصادی ارزیابی کرده است. او تحلیل اقتصادی مفصلی ارایه داده و زمان بازگشت سرمایهٔ سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی را با شش روش گرمایش دیگر (مقاومت الکتریکی، مازوت، گاز مایع، زغال سنگ، نفت، و گاز طبیعی) مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده است که در این حالت، سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی از لحاظ اقتصادی از پنج روش گرمایشی اول بهتر است، اما جایگزین اقتصادی مناسبی برای سیستم گرمایش با استفاده از گاز طبیعی نیست. هیلی[2] (۱۴) استفاده از پمپ حرارتی زمین گرمایی را در آب و هوای سرد از لحاظ فنی و اقتصادی امکان‌سنجی کرده است. او تأثیر پارامترهای مختلف سیستم را بر کارآیی پمپ حرارتی زمین گرمایی با استفاده از یک مدل رایانه‌ای بررسی کرده و نیز یک ارزیابی اقتصادی قیاسی به منظور امکان‌سنجی استفاده از پمپ حرارتی زمین گرمایی به‌جای سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی دیگر انجام داده است. نتایج او نشان داده‌اند که پمپ حرارتی زمین گرمایی از لحاظ اقتصادی از سیستم‌های دیگر بهتر است و پارامترهای مختلف این سیستم تأثیر به سزایی بر کارآیی آن دارند. پتیت[3] قابلیت اقتصادی پمپ گرمایی ژئوترمال با مبدل زمینی عمودی (۱۵) و مبدل زمینی افقی (۱۶) را با

1- Esen
2- Healy
3- Petit

Archive of SID

www.SID.ir

سیستم‌های تهویه مطبوع هوایی در آفریقای جنوبی مقایسه کرده است. او هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و عمق بهینهٔ چاه‌های مبدل زمینی را محاسبه کرده است. همچنین، ظرفیت‌های گرمایشی و سرمایشی ماهیانه و ضریب عملکرد را به منظور تعیین هزینه‌های عملکردی ارزیابی کرده است. سرانجام زمان بازگشت سرمایه، ارزش فعلی خالص، و سرعت بازگشت داخلی را به دست آورده و نتیجه گرفته است که استفاده از پمپ حرارتی زمین گرمایی با هر دو مبدل زمینی عمودی و افقی، ارزان‌تر و اقتصادی‌تر از سیستم تهویه مطبوع هوایی است.

در بیش تر مقالات یاد شده، نصب پمپ حرارتی زمین گرمایی از دیدگاه اقتصادی و در برخی از آنها از دیدگاه‌های فنی و اقتصادی بررسی شده است، اما از جنبه زیست‌محیطی موردبررسی قرارنگرفته است. همچنین درهیچ یک از مقالات یاد شده اعتبار کربن در محاسبات مربوط به امکان‌سنجی اقتصادی در نظر گرفته نشده است.

سیستم‌های پمپ حرارتی زمین‌گرمایی، بسته به این که از زمین، آب زیرزمینی یا آب سطحی به عنوان چشمه یا چاه گرمایی استفاده کنند، به سه نوع حلقه‌بسته [1](GCHP) ، حلقه باز [2](GWHP)و حلقه‌دریاچه‌ای[3](SWHP) تقسیم می‌شوند (۱۷).

۱- سیستم‌های حلقه‌باز یا پمپ‌های حرارتی بامنبع آب زمینی (GWHP)

در این سیستم‌ها، آب برگرفته از منابع آب زمینی (آب‌های سطحی و سفره‌های زیرزمینی) به عنوان سیال حامل گرما، مستقیماً به پمپ حرارتی ارسال می‌گردد و پس از تبادل حرارتی با پمپ حرارتی، مجدداً به زمین برگردانده می‌شود.

۲- سیستم‌های پمپ‌های حرارتی با منبع آب سطحی (SWHP)

مبدل زمینی این گونه سیستم‌ها متشکل از شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلنی است که برای تأمین تبادل گرمای مورد نیاز در آب فرو برده شده است. این سیستم‌ها گرمازدایی را با کارآیی بیش تری نسبت به گرمازایی انجام می‌دهند، بنابراین استفاده از آن ها در مناطق گرمسیر متداول‌تر است. البته ساختمان بایستی در نزدیکی منابع آب مناسب قرار داشته باشد.

۳- سیستم‌های حلقه‌بسته یا پمپ‌های حرارتی متصل به زمین (GCHP)

در این سیستم‌ها، مبدل حرارتی زمینی متشکل از شبکه‌ای از لوله‌های پلی‌اتیلنی به صورت افقی در یک ترانشه یا به طورعمودی در یک چاه قرار می‌گیرد و سیال حامل گرما در آنها به گردش در می‌آید و حرارت را از زمین به پمپ حرارتی (یا بالعکس) منتقل می‌کند. در این حالت، سیال حامل گرما توسط دیوارهٔ مبدل حررتی از خاک، سنگ یا آب زیرزمین جدا شده که آن را تبدیل به یک سیستم بسته می‌نماید. هزینهٔ نصب این گونه سیستم‌ها از انواع دیگرآن بالاتر است، اما دراکثر مکان‌ها و برای سیستم‌هایی با ظرفیت های مختلف قابل استفاده هستند. درمیان سیستم‌های حلقه بسته، مبدل‌های زمینی عمودی به دلیل نفوذ در عمق بیش تر زمین و تماس با خاک زمین در عمق زیادتر که دمای نسبتاً ثابتی در طول سال دارد، کارایی بیش تری دارند و برای نصب آن ها، مساحت کمتری از سطح زمین مورد نیاز است. در مقابل، هزینهٔ سرمایه‌گذاری اولیهٔ آن ها بیشتر از مبدل‌های افقی می‌باشد. نمای سه نوع مختلف از لوله گذاری سیستم پمپ حرارتی حلقه‌بسته (عمودی، افقی، و مارپیچ) در شکل ۱ مشاهده می شود (۱۷).

1 -Ground Coupled Heat Pump
2 - Ground Water Heat Pump
3- Surface Water Heat Pump

Archive of SID
www.SID.ir

**شکل ۱ - سیستم‌های پمپ حرارتی حلقه‌بسته یا پمپ‌های حرارتی متصل به زمین (GCHP) (۱۷)**

**مواد وروش ها**

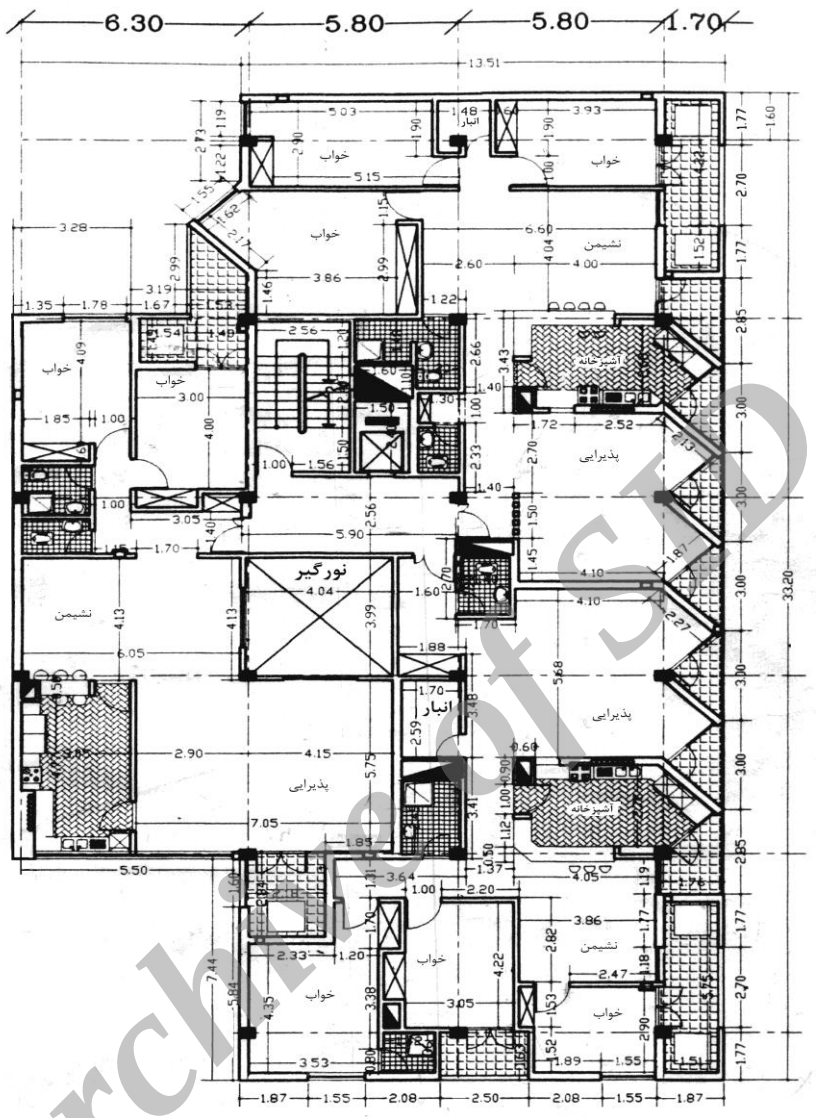
در این تحقیق ساختمان مورد مطالعه، یک آپارتمان مسکونی ۱۲ واحدی واقع درشرق تهران با تعداد طبقات۴ و زیربنای ۵۶۵ مترمربع می باشد. محاسبات تهویه مطبوع برای به دست آوردن بار حرارتی ساختمان انجام یافته است و با توجه به بارحرارتی مورد نیاز، موقعیت جغرافیایی، مشخصات خاک وشرایط آب وهوایی منطقه موردنظر، به منظورتامین گرمایش ساختمان درزمستان وتامین آب گرم مصرفی، به جای بویلر ازیک سیستم پمپ حرارتی زمین گرمایی بامبدل زمینی عمودی (GSHP) استفاده گردیده است که انتخاب نوع سیستم عمودی، به دلیل محدودیت زمین و عدم دسترسی به زمین کافی و درنتیجه حفظ حریم همسایگان، همچنین نفوذ به اعماق بیش تری از زمین و دستیابی به درجه حرارت ثابت درطول سال می باشد. سپس با در نظر گرفتن اعتبار کربن در بازار جهانی، ضمن تعریف سه سناریوی مختلف، سیستم GSHP موردنظر با سیستم قبلی (بویلر) توسط نرم افزار Proform از سه دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد بررسی و مقایسه قرارگرفته است.

درشکل ۲، نمایی ازنقشه کل ساختمان موردمطالعه و درجدول ۱ مشخصات سیستم حرارتی ساختمان‌در وضعیت موجود، مشاهده می گردد.

Archive of SID

www.SID.ir

شمالی




جنوبی

**شکل ۲- نمایی ازنقشه کل ساختمان موردمطالعه**

**جدول۱ - مشخصات سیستم حرارتی ساختمان موردمطالعه دروضعیت موجود(بویلر)**

| مصرف سالیانه گازطبیعی | نوع سوخت مصرفی | بازده | نوع سیستم |
|---|---|---|---|
| ۱۶۷۵GJ/Y | گازطبیعی | ٪۷۵ | بویلر |

جهت جایگزین نمودن سیستم GSHP به‌جای سیستم بویلرموجود به منظورتامین‌گرمایش موردنیاز در داخل ساختمان مسکونی موردنظر، برخی اطلاعات ومشخصات موردنیازاست که درجدول۲ به آنها اشاره شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

**جدول۲- مشخصات واطلاعات موردنیاز جهت انتخاب پمپ حرارتی ژئوترمال برای ساختمان موردنظر**

| | | | |
|---|---|---|---|
| بازده آیزنتروپیک کمپرسور | ٪۷۵ | بارحرارتی | ۲۲۰kW |
| بازده الکتریکی کمپرسور | ٪۸۰ | باربرودتی | ۱۸۴/۴kW |
| بازده پمپ | ٪۸۰ | کل زمان کارکرددرحالت گرمایش | ۲۸۸۰h/y |
| بازده موتورپمپ | ٪۸۰ | زمان کارکرد سیستم با بارکامل | ۱۳۵۰ h/y |
| قطرداخلی لوله درونی کندانسور | ۰/۰۳۱۸m | طول عمرسیستم | ۱۰ سال |
| قطرخارجی لوله درونی کندانسور | ۰/۰۳۴۸m | نرخ بهره | ٪۱۰ |
| ضریب هدایت گرمایی لوله کندانسور | ۰/۳۹۸kW/(m°C) | ضریب هدایت گرمایی خاک | ۴/۲W/(m°C) |
| قطرداخلی لوله درونی اواپراتور | ۰/۰۳۱۸m | دمای زمین | ۱۶°C |
| قطرخارجی لوله درونی اواپراتور | ۰/۰۳۴۸m | ضریب کلی انتقال گرما درخاک | ۱۲W/(m$^2$°C) |
| ضریب هدایت گرمایی لوله مبدل حرارتی | ۰/۳۹۷۹W/(m°C) | ضریب هدایت گرمایی لوله اواپراتور | ۰/۳۹۸kW/(m°C) |

با توجه به اطلاعات موجود در جدول ۲ و مشخصات ارایه شده توسط کمپانی های سازنده انواع پمپ های حرارتی ژئوترمال (۱۸)، و با استفاده از روابط ارایه شده در مرجع شماره ۵، سیستم GSHP با مبدل زمینی عمودی بامشخصات ارایه شده درجدول ۳ جهت تامین گرمایش و آب گرم مورد نیاز ساختمان مورد مطالعه، انتخاب گردید.

**جدول۳- مشخصات فنی وهزینه های سیستم GSHPانتخابی درساختمان موردمطالعه**

| | | | |
|---|---|---|---|
| طول لوله مبدل عمودی | ۹۰۰۰ متر | توان مصرفی کمپرسور | ۳۹kW |
| جنس لوله | پلی اتیلن | توان مصرفی پمپ | ۵/۵ kW |
| ضریب بازگشت سرمایه | ۰/۱۱۷۵ | عمق چاه | ۱۱۱/۸ متر |
| *هزینه سرمایه گذاری اولیه | ۳۰۳۱۹۵۶۳۰ریال | ضریب عملکرد | ۴/۹۴ |
| مصرف انرژی الکتریسیته | ۶۰MWh/y | | |

*هزینه سرمایه گذاری اولیه شامل :هزینه پمپ+هزینه کمپرسور+هزینه اواپراتور+هزینه کندانسور+هزینه حفاری+هزینه لوله گذاری+هزینه مبدل زمینی عمودی+هزینه نصب وراه اندازی می باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

**بررسی فنی- اقتصادی وزیست محیطی سیستم GSHP**

به منظور بررسی امکان سنجی فنی اقتصادی و زیست محیطی سیستم GSHP انتخابی در ساختمان مورد مطالعه، اطلاعاتی در مورد سیستم قدیم (بویلر) و سیستم جدید(GSHP) به عنوان اطلاعات ورودی، به نرم افزارProform داده می‌شود. این اطلاعات شامل بخش فنی و بخش اقتصادی طرح می‌باشد که در جداول ۴ و ۵ به اختصار ارائه گردیده است.

**جدول۴- اطلاعات فنی ورودی به نرم افزارProform**

| دوره استهلاک (سال) | ظرفیت GSHP (kW) | ضریب عملکرد GSHP | طول عمر GSHP (سال) | میزان مصرف انرژی سیستم جدید (GSHP) | بازده بویلر | نوع سوخت مصرفی توسط بویلر | میزان مصرف انرژی سیستم قدیم(بویلر) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰ | ۲۲۰ | ۴/۹۵ | ۱۰ | ۶۰MWh/y | ٪۷۵ | گازطبیعی | ۴۶۵/۲ MWh/y |

**جدول ۵- اطلاعات مالی واقتصادی ورودی به نرم افزارProform**

| نـــرخ تنزیل | نرخ مالیات بردرآمد | هزینه سرمایه گذاری اولیه سیستمGSHP (ریال) | *نرخ تورم | نرخ رشدسالیانه قیمت برق | نرخ رشدسالیانه قیمت گازطبیعی | **هزینه هر واحد مصرف گاز طبیعی (Rial/Gj) | هزینه هرکیلووات ساعت برق (ریال) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ٪۱۶ | ٪۱۵ | ۳۰۳۱۹۵۶۳۰ | ٪۲۰/۲ | ٪۲۱ | ٪۵/۶ | ۲۹۲۸/۹ | ۱۲۴/۶۷ |

*نرخ تورم سالیانه برمبنای گزارش بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران ، مدیریت کل آمارهای اقتصادی فادره آماراقتصادی، دایره شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی دراردیبهشت سال ۱۳۸۸ (۱۹)

**طبق ترازنامه انرژی سال۱۳۸۶، هریک مترمکعب گازطبیعیGJ ۰۳۷۲۶/۰وقیمت گازطبیعی(خانگی$Rials/m^3$ ۱۱۱/۳). (۲۰)

در ادامه بـه منظـور دسـتیابی بـه نتـایج بهتـر، براسـاس ارزش اعتبارکاهش هرتن دی اکسیدکربن[1] دربازارهای‌جهانی، سه سناریوی A,B,C مطابق اطلاعات جدول(۶) توسط نرم افـزار Proform مورد بررسی و مقایسه قرارگرفت.

1- Carbon Credit

Archive of SID
www.SID.ir

**جدول۶- سناریوسازی براساس ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ درسازمان بانک جهانی**

| سناریو | ارزش اعتبارکاهش هرتن$CO_2$ | نرخ رشد قیمت (%) | مالیات بردرآمد فروش اعتبارکاهش هرتن $CO_2$(%) |
|---|---|---|---|
| سناریوA | ۱۰$/ton $CO_2$ | ۱۵ | ۰ |
| سناریوB | ۱۵ $/ton $CO_2$ | ۱۵ | ۰ |
| سناریوC | ۲۰ $/ton $CO_2$ | ۲۰ | ۰ |

همان گونه که درجدول ۶ مشاهده می گردد، ارزش اعتبار کاهش هرتن $CO_2$ درسناریوی A معادل ۱۰ دلار، سناریوی B ۱۵ دلار و سناریوی C معادل ۲۰ دلار در نظرگرفته شده است، لیکن درسناریوی A درصد رشد قیمت آن معادل ۱۵٪، درسناریوی B معادل ۱۵٪ و در سناریوی C معادل ۲۰٪ درنظر گرفته شده است.

در صورتی که هیچ گونه اقدامی جهت فروش اعتبارکاهش کربن صورت نگیرد، مورد یاد شده نیز مورد مقایسه باسناریوهای قبلی (A,B,C) قرار می گیرد. دراین نرم افزارکلیه محاسبات بصورت دینامیکی موردارزیابی قرارمی گیرد، لذاارزش هزینه های مختلف انرژی براساس پول رایج، نرخ ارزونرخ تنزیل برآوردخواهدشد. بنابراین نرخ تنزیل دراین نرم افزار، با توجه به آمار ترازنامه سال ۱۳۸۶معادل با۱۶٪ درنظرگرفته شده است. همچنین نرخ مالیات بردرآمد۱۵٪برای سوخت درنظرگرفته شده است که این مالیات درصورتحساب قبض پرداختی مالکان ساختمان پرداخت می شود، امابرای درآمد ناشی ازفروش ارزش اعتبارکاهش$CO_2$، باتوجه به استانداردهای مطرح شده درکنوانسیون های تغییراقلیم وتجارت کربن، میزان مالیات صفردرصددرنظرگرفته شده است.

**یافته ها**

نتایج حاصل ازنرم افزار، دررابطه بابررسی فنی-اقتصادی وزیست محیطی استفاده ازفناوری GSHPبه جای بویلرجهت تامین گرمایش وآب گرم مصرفی ساختمان موردنظر، به شرح ذیل می باشد:

**نتایج بررسی فنی**

در طول مدت انجام کل پروژه، درازای مصرف ۱۰ yr/ ۶۰۱MWh برق، ۶۷۰۰۰GJ سوخت فسیلی ازنوع گازطبیعی کاهش یافته است،که این امرناشی ازبه کارگیری فناوری GSHP به جای استفاده ازبویلرمی باشد. درجدول ۷ ، میزان مصرف برق وکاهش درمیزان مصرف سوخت دراثراستفاده از GSHP به صورت سالیانه ودرطول انجام کل پروژه(۱۰سال)، ارایه گردیده است.

**جدول۷- میزان مصرف برق وکاهش درمیزان مصرف سوخت توسط GSHP طی انجام پروژه**

| | میزان مصرف برق در GSHP (MWh) | میزان کاهش مصرف گازطبیعی (GJ000) |
|---|---|---|
| **میانگین سالیانه** | ۶۰/۰۵۳ | ۷ |
| **کل پروژه** | ۶۰۱ | ۶۷ |

**۲ - نتایج بررسی اقتصادی**

پارامترهای مهم اقتصادی براساس سناریوهای مختلف برای ساختمان مورد مطالعه، مقایسه گردیده اند:

لازم به ذکراست، درصورتی که نرخ بازگشت داخلی(IRR) از نرخ تنزیل بزرگ تر باشد، اقدامات جایگزینی پمپ حرارتی زمین گرمایی به جای سیستم گرمایش قدیمی در طول مدت

Archive of SID

www.SID.ir

زمان اجرای پروژه یاد شده مقرون به صرفه می باشد.مقایسه سناریوهای مذکوربه دوروش بادرنظرگرفتن مالیات وبدون درنظرگرفتن مالیات انجام گرفته است. نتایج مالی برای سه سناریوی یاد شده به شرح جدول ۸ می باشد.

**جدول۸- آنالیزمالی سناریوهای مختلف C,B,A**

| سناریو | قبل ازمالیات | | | پس ازمالیات | |
|---|---|---|---|---|---|
| | زمان بازگشت سرمایه (سال) | ارزش سودخالص کنونی (NPV) (دلارآمریکا) | نرخ بازگشت داخلی (IRR) (%) | ارزش سودخالص کنونی (NPV) (US $) | نرخ بازگشت داخلی (IRR) (%) |
| **A** ارزش اعتبارکاهش هرتن $CO_2$، ۱۰دلار با رشد قیمت۱۵٪ | ۳/۹ | ۱۷۰۰۰ | ۲۷/۴۵ | ۱۵۰۰۰ | ۲۵/۸۸ |
| **B** ارزش اعتبارکاهش هرتن $CO_2$ ، ۱۵ دلار با رشد قیمت۱۵٪ | ۳/۱ | ۳۳۰۰۰ | ۳۶/۱۱ | ۳۰۰۰۰ | ۳۴/۶۶ |
| **C** ارزش اعتبارکاهش ۲۰ دلار $CO_2$ هرتن با رشد قیمت۲۰٪ | ۲/۶ | ۶۲۰۰۰ | ۴۷/۶۶ | ۵۹۰۰۰ | ۴۶/۳۸ |
| بدون فروش ارزش $CO_2$اعتبارکاهش هرتن | ۸/۸ | -۱۴۰۰۰ | ۲/۷۴ | -۱۶۰۰۰ | منفی |

**بحث و نتیجه گیری**

با انجام آنالیز مالی سناریوهای مختلف، نتایج ذیل حاصل می گردد:

**سناریوی A**: درحالت بدون درنظرگرفتن مالیات، دوره بازگشت سرمایه ۳/۹سال، میزان ارزش سودخالص کنونی معادل۱۷۰۰۰ دلار و میزان نرخ بازگشت داخلی ۲۷/۴۵٪ می باشد. و پس از اعمال مالیات، ارزش کنونی سود معادل ۱۵۰۰۰دلار و میزان نرخ بازگشت داخلی، ۲۵/۸۸٪ می‌گردد. دراین سناریو، هزینه سرمایه گذاری اولیه در مدت زمان ۳/۹ سال برمی گردد و سود ناشی از فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ و همچنین سود ناشی از کاهش میزان مصرف انرژی درطی ۱۰سال ۱۷۰۰۰دلار می‌باشد، و از آن جا که میزان نرخ بازگشت داخلی ۲۷/۴۵٪ است. (بزرگ تر از نرخ تنزیل ۱۲٪ می باشد) بنابراین این سناریو مقرون به صرفه است.

**سناریوی B**: دراین سناریو، قیمت فروش اعتبارکاهش هرتن $CO_2$ معادل۱۵ دلار باافزایش قیمت ۱۵٪ درسال درنظرگرفته می شود.درحالت بدون درنظرگرفتن مالیات، زمان بازگشت سرمایه۳/۱ سال، میزان ارزش سودخالص کنونی ۳۳۰۰۰دلار و میزان نرخ بازگشت داخلی ۳۶/۱۱٪ می باشد. پس از اعمال مالیات، میزان ارزش سود خالص کنونی۳۰۰۰۰ دلار و نرخ بازگشت داخلی۳۴/۶۶ ٪ است. باتوجه به عددنرخ بازگشت داخلی که هم درسناریوی A و هم درسناریوی B بزرگ تر از نرخ تنزیل ۱۲٪ می باشد، بنابراین هردو سناریو مقرون به صرفه هستند.

Archive of SID

www.SID.ir

**سناریوی C:** دراین سناریو، ارزش اعتبارکاهش هرتن $CO_2$ معادل ۲۰ دلار با رشد قیمت ۲۰٪ در سال در نظر گرفته می‌شود. درحالت بدون درنظرگرفتن مالیات، زمان بازگشت سرمایه ۲/۶ سال، میزان ارزش سود خالص کنونی ۶۲۰۰۰ دلار و میزان نرخ بازگشت داخلی معادل ۴۷/۶۶ ٪ درنظرگرفته می شود. پس ازاعمال مالیات ، میزان سودخالص کنونی ۱۲۱۰۰۰ دلار و نرخ بازگشت داخلی ۸۶/۷۰ درصد می باشد. همان گونه که مشاهده می گردد، میزان سود کنونی درحالت دوم (پس ازاعمال مالیات) کم تر از حالت اول بوده و میزان نرخ بازگشت داخلی درهر دو حالت بیش از۱۲٪ است، که نشان دهنده مقرون به صرفه بودن پروژه درمورداین سناریو نیزمی باشد.

درادامه این سه سناریو، درآخرین سطر جدول ۸ موردی با عنوان بدون فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ مشاهده می شود که با توجه به منفی بودن ارزش سودخالص (۱۴۰۰۰ US$ ) بدون در نظر گرفتن سود ناشی از فروش کربن این پروژه به هیچ وجه مقرون به صرفه نخواهد بود. هدف از انجام این پروژه، سودآوری براساس کاهش میزان مصرف انرژی سوخت فسیلی وفروش این میزان کاهش آلودگی براساس مکانیزم تجارت کربن است، بنابراین می بایست این کاهش آلودگی براساس سازو کار تجارت کربن دریکی ازسناریوهای A,B,C باشدکه سناریوی C مقرون به صرفه تر از سایر سناریوها می باشد، زیرا میزان نرخ بازگشت داخلی (IRR) آن از همه بزرگ تر است. در نتیجه نرخ بهره ناشی از اجرای پروژه مذکور با در نظر گرفتن سناریوی C بیش تر و پروژه مقرون به صرفه تر خواهد بود . درصورتی که از سازوکارهای یاد شده استفاده نشود، ارزش سودخالص کنونی(NPV) ناشی از اجرای پروژه منفی و به هیچ وجه در ایران با توجه به هزینه های غیر واقعی انرژی و همچنین هزینه سرمایه گذاری بالای خرید ، نصب و راه اندازی GSHP در محل مذکور توجیه اقتصادی ندارد، لذا به کار گیری سازوکار تجارت کربن یکی از اقدامات مهم جهت به کار گیری از منابع تجدید شونده انرژی و تجهیزات نوین در کشور است که با توجه به این که ایران در آذر ۱۳۸۴ به پروتکل کیوتو پیوسته است می توان بااستفاده از کمک های مالی کشورهای عضو این پروتکل از مزایای فروش اعتبار کربن در جهان بهره مفید برد. برای آن که درتحلیل نتایج مالی واقتصادی، سودآوری ناشی از فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ و سودآوری ناشی از کاهش مصرف انرژی از یکدیگر مجزا شوند، درجدول ۹، اطلاعات مالی کربن و میزان سود خالص کنونی درهریک ازسه سناریو، به طور مجزا مورد بررسی قرارگرفته است. میزان سود خالص کنونی پروژه به ترتیب درسناریوهای C,B,A به ترتیب ۳۱۰۰۰ دلار، ۴۷۰۰۰ دلار و ۷۶۰۰۰ دلارمی باشد که این ارقام درحالت قبل ازاعمال کردن مالیات بردرآمد و پس ازاعمال مالیات بردرآمد تغییری ننموده و ثابت باقی مانده اند، درنتیجه مشخص می شود درازای فروش اعتبارات کربن (کاهش آلودگی برحسب تن معادل $CO_2$) هیچ گونه مالیاتی پرداخت نشده است.

Archive of SID

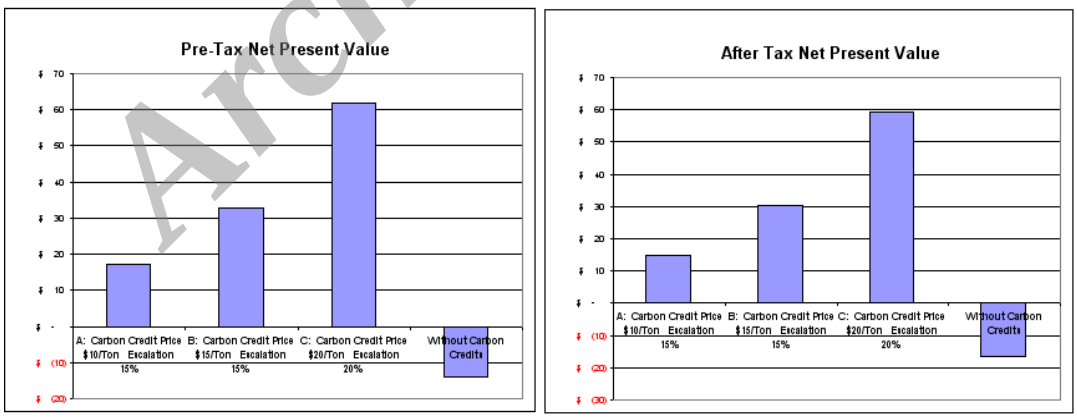
www.SID.ir

**جدول۹- مقایسه سناریوهای A,B,C ازلحاظ میزان سودخالص کنونی دردوحالت قبل و پس ازمالیات بردرآمد ناشی ازفروش ارزش اعتبارکاهش$CO_2$**

| سناریو | قبل ازمالیات بردرآمد فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ میزان سودخالص کنونی (US $) | پس ازمالیات بردرآمد فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ میزان سودخالص کنونی (US $) |
|---|---|---|
| **سناریوی A** ارزش اعتبارکاهش$CO_2$ : ۱۰دلاردرتن رشد قیمت ۱۵٪ | ۳۱۰۰۰ | ۳۱۰۰۰ |
| **سناریوی B** ارزش اعتبارکاهش$CO_2$ : ۱۵دلاردر تن رشد قیمت۱۵٪ | ۴۷۰۰۰ | ۴۷۰۰۰ |
| **سناریوی C** ارزش اعتبارکاهش$CO_2$ : ۲۰دلاردر تن رشد قیمت ۲۰٪ | ۷۶۰۰۰ | ۷۶۰۰۰ |

**مقایسه میزان سودخالص کنونی درسناریوهای مختلف**

سودخالص کنونی درکلیه سناریوهای یاد شده به صورت نمودارهای ستونی طی ۱۰سال طول عمر GSHP با یکدیگر مقایسه شده اند. باتوجه به نمودار ۱، سناریوی C در مقایسه با سناریوهای دیگر از سودآوری بالاتری برخوردار است.




**شکل ۳- مقایسه سناریوهای مختلف ازنظرمیزان سودخالص کنونی درحالت قبل و بعد از اعمال مالیات با استفاده ازنرم افزارProform**

باتوجه به جدول۱۰، میزان درآمدحاصل ازفروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ درسه سناریوی یاد شده، به صورت سالانه مشخص شده است. به طوری که اگر در سال اول (سال صفر)۳۰۰۰۰ دلار برای انجام پروژه سرمایه گذاری شود، درسال

Archive of SID
www.SID.ir

بعد(سال یک)، در سناریوی A ۷۰۰۰ دلار، درسناریوی B ۹۰۰۰دلار ودرسناریوی C ۱۰۰۰۰دلار سودحاصل می شود درحالی که بدون فروش مالیات کربن تنها ۳۰۰۰دلار در سال سود به دست می آید که در نهایت اجرای پروژه توجیه اقتصادی نداشته و مقرون به صرفه نخواهد بود. به همین ترتیب درسالهای آتی نیز در طول مدت زمان انجام پروژه (۱۰سال) میزان سودآوری سالانه (Cash Flow) درجدول یاد شده با یکدیگر مقایسه شده اند. درواقع مجموع سودهای سالانه به دست آمده درطی۱۰سال طول عمرکارآمدGSHP، همان میزان سودخالص کنونی به دست آمده درسناریوهای یاد شده می باشد.

**جدول۱۰- میزان سودسالیانه ناشی ازفروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ درطی۱۰سال بااستفاده ازنرم افزارProform**

| میزان سود سالیانه (US$000) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| طول عمر پروژه GSHP | بدون فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ | بافروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ (سناریوی A) | با فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ (سناریوی B) | با فروش ارزش اعتبارکاهش $CO_2$ (سناریوی C) |
| سال۰ | -۳۰ | -۳۰ | -۳۰ | -۳۰ |
| سال۱ | ۳ | ۷ | ۹ | ۱۰ |
| سال۲ | ۳ | ۷ | ۱۰ | ۱۲ |
| سال۳ | ۳ | ۸ | ۱۱ | ۱۴ |
| سال۴ | ۳ | ۹ | ۱۲ | ۱۶ |
| سال۵ | ۳ | ۱۰ | ۱۳ | ۱۹ |
| سال۶ | ۴ | ۱۱ | ۱۵ | ۲۲ |
| سال۷ | ۵ | ۱۲ | ۱۷ | ۲۶ |
| سال۸ | ۵ | ۱۴ | ۱۹ | ۳۱ |
| سال۹ | ۵ | ۱۶ | ۲۱ | ۳۶ |
| سال۱۰ | ۶ | ۱۷ | ۲۴ | ۴۳ |

Archive of SID

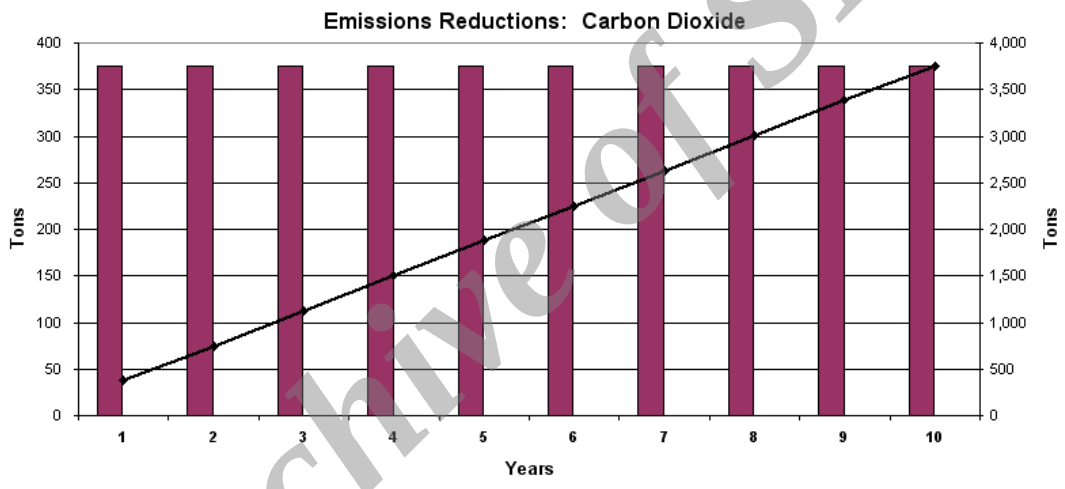
**بررسی اقتصادی- زیست محیطی**

نتایج اجرای نرم افزارنشان می‌دهدکه باتوجه به حذف مصرف سوخت گازطبیعی درساختمان مورد نظر، ۶۵۸ تن درهرسال $CO_2$، ودر مجموع کل پروژه، میزان انتشارکل گازهای گلخانه ای، ۳۷۵۹تن معادل $CO_2$ کاهش می یابد. درجدول۱۱ میزان کاهش انتشارگازهای گلخانه ای به صورت سالیانه و درطول انجام کل پروژه نشان داده شده است.

www.SID.ir

**جدول ۱۱- میزان متوسط سالیانه ومجموع گازهای گلخانه ای**

| نوع گازگلخانه ای | میانگین سالیانه (Tone) | کل پروژه (Tone) |
|---|---|---|
| $CO_2$ | ۳۷۶ | ۳۷۵۹ |
| $SO_X$ | ۰ | ۰ |
| $NO_X$ | ۰ | ۰ |
| ذرات | ۰ | ۰ |
| متان | ۰ | ۰ |
| کل گازهای گلخانه ای معادل $CO_2$ | ۳۷۶ | ۳۷۵۹ |




**شکل ۴- میزان کاهش انتشار $CO_2$ طی سال های مختلف طول عمرپروژه**

باتوجه به نمودار ۴، میزان کاهش انتشار $CO_2$ باگذشت زمان بیشترمی شود و هر سال که ازآغازکار سیستم می گذرد، میزان بیشتری از $CO_2$ کاهش می یابد.

در مقالهٔ حاضر، یک مجتمع مسکونی ۴ طبقهٔ ۱۲ واحدی با زیربنای ۵۶۵ $m^2$ واقع درشرق تهران درنظرگرفته شده که سیستم پمپ حرارتی ژئوترمال ازنوع مبدل زمینی عمودی جایگزین سیستم قدیم (بویلر) در این ساختمان گردیده است. به منظور به دست آوردن بار حرارتی ساختمان محاسبات تهویه مطبوع انجام یافته شده است. سپس با توجه به بار حرارتی ساختمان و ویژگی‌های زمین منطقه موردنظر، پمپ حرارتی زمین گرمایی بهینه انتخاب گردید. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار Proform و با در نظر گرفتن اعتبار کربن در بازار جهانی، ضمن تعریف سه سناریوی مختلف، پمپ حرارتی زمین گرمایی مورد نظر با سیستم قبلی (بویلر) از سه دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مقایسه گردید.

باتوجه به این کهGSHP موردنظردراین پروژه برای تامین بارحرارتی( ۲۲۰kW) برای یک مجتمع مسکونی ۴ طبقهٔ ۱۲ واحدی با زیربنای ۵۶۵ $m^2$ واقع درشرق تهران به کار می رود و ازضریب عملکردبالایی(۴/۹۴) برخوردار می باشد، فقط به میزان۴۴/۴۸کیلووات ازانرژی برق استفاده می کندو بقیه میزان

Archive of SID
www.SID.ir

انرژی موردنیازخود راکه معادل ۱۷۵/۲۷کیلووات است، ازظرفیت حرارتی زمین تامین می کند. به عبارتی سهم مصرف انرژی زمین گرمایی درتامین بارحرارتی موردنیازساختمان ۸۷٪ وسهم مصرف برق درتامین گرمایش ۱۳٪ کل انرژی مورد نیازمی‌باشد. درواقع ۲۳۶۶۱۴/۵ کیلووات ساعت درسال درمصرف انرژی صرفه جویی می شود.

نتایج حاصل ازاجرای نرم‌افزار Proform نشان می‌دهند در صورتیکه استفاده ازسیستمGSHP عمودی با سیستم بویلرجایگزین شود، سرمایه گذاری اولیه (۳۰۰۰۰ دلار) نه تنها سود آور نخواهد بود، بلکه به علت واقعی نبودن قیمت انرژی های سوخت فسیلی در کشور توجیه اقتصادی ندارد. در این پروژه برای اصلاح معیار اجرای پروژه به کار گیری از فناوری جدید پمپ حرارتی ژئوترمال در تولید حرارت مورد نیاز به جای سیستم های قدیمی بویلر از مکانیزم فروش اعتبار کربن در بازار های جهانی کشورهای عضو پروتکل کیوتو با در نظر گرفتن عضویت ایران در این پروتکل استفاده شده و این اعتبار در ۳ سناریو به کمک پارامتر نرخ بازگشت داخلی (IRR) مورد تحلیل و ارزیابی اقتصادی قرار گرفته و لذا با انتخاب IRR بیش تر، سناریوی C به عنوان سناریوی برتر انتخاب گردید. بنابراین مقرون به صرفه بودن پروژه مورد نظر توجیه اقتصادی قابل قبولی را پیدا نمود که در نهایت با وجود ۳۰,۰۰۰دلار سرمایه گذاری اولیه در اجرای پروژه یاد شده میزان سود مالی طی ۱۰ سال ۶۲,۰۰۰ دلار برآورد گردیده است. بنابراین توصیه می شود باتوجه به مشخصات خاک، شرایط آب وهوایی وشرایط زمین محل استقرارساختمان، ازسیستمGSHP به جای بویلراستفاده شود تا بدین ترتیب حدود ۶۷,۰۰۰ گیگاژول نیزدرمصرف سوخت گازطبیعی صرفه جویی گردد. همچنین طی طول عمرپروژه، باگذشت زمان، میزان انتشار$CO_2$ کاهش چشم گیری یافته، به طوری که طی ۱۰سال طول عمرپروژه، درمجموع ۳۷۵۹ تن معادل $CO_2$ ازمیزان کل گازهای گلخانه ای حذف گردیده است.

ازپمپ های حرارتی زمین گرمایی می توان به عنوان یکی از روشهای کاهش مصرف سوخت وهزینه مصرف انرژی درمصارف خانگی وتجاری نام برد. این امرموجب کاهش قابل توجه درمصرف انرژی الکتریکی وکوتاه شدن زمان بازگشت سرمایه می گردد.

## سپاس گزاری

این تحقیق باحمایت مالی شرکت بهینه سازی مصرف سوخت انجام یافته است که بدین وسیله مراتب قدردانی و سپاس نویسندگان این مقاله از هیئت مدیره، مدیرعامل و ریاست پژوهش شرکت بهینه سازی مصرف سوخت ابراز می گردد. همچنین نویسندگان مقاله از راهنمایی های ارزنده آقای مهندس علی کناری مشاورصنعت دراین پروژه، تقدیروتشکرمی نمایند.

## منابع

1. RETScreen International, 2005, "Ground source heat pump project analysis", Minister of Natural Resources, Canada.
2. McQuay Air Conditioning Application Guide, 2002, "Geothermal heat pump design manual", United States,.
3. Kavanaugh S. P., Rafferty K., 1997 "Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings", ASHRAE Inc., Atlanta.
4. Nagano K., Katsura T., Takeda S., 2006, "Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system", Applied Thermal Engineering, Vol. 26, 1578-1592.
5. Sanaye S., Niroomand B., 2009, "Thermal economic modeling & optimization of vertical ground coupled heat pump", Energy Conversion & Management, Vol. 50,1136 -1147.
6. Zhao Y., Shigang Z., Xun L., 2003, "Cost-effective optimal design of groundwater

Archive of SID

www.SID.ir

source heat pumps", Applied Thermal Engineering, Vol. 23, 1595-1603.
7. Hepbasli, A., 2005 "Thermodynamic analysis of a ground-source heat pump system for district heating", International Journal of Energy Research, Vol. 29, 671-687,.
8. Inalli M., Esen H., 2008 "Performance prediction of a ground-coupled heat pump system using artificial neural networks", International Journal of Energy Research, Vol. 35, 1940-1948.
9. Hepbasli A., Akdemir O., Hancioglu E., 2007, "Performance evaluation of a vertical ground source heat pump system", Energy conversion & management, Vol. 44 , 527-548,.
10. Ozgener O., Hepbasli A., Ozgener L., March 2007,"A Parametric study on the exergoeconomic assessment of a vertical ground-coupled (geothermal) heat pump system", Building and Environment, Vol. 42, 1503-1509.
11. Sunner B., Karytsas C., Mendrinos D., Rybach L., 2005 "Current status of ground source heat pumps & underground thermal storage in Europe", Geothermics, Vol. 32, 579-588.
12. Inalli M., Esen H., 2004 "Experimental thermal performance evaluation of a horizontal ground-source heat pump system", Applied Thermal Engineering, Vol. 24, 2219- 2232.
13. Esen H., Inalli M., Esen M., 2006, "Technoeconomic appraisal of a ground source heat pump system for a heating season in eastern Turkey", Energy Conversion and Management, Vol. 47, 1281–1297.
14. Healy P. F., Ugursal V. I., 1997, "Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate", International Journal of Energy Research, Vol. 21, 857–870.
15. Petit P. J., Meyer J. P., 1998, "Economic potential of vertical ground-source heat pumps compared to air-source air conditioners in South Africa", Energy, Vol. 23, 137- 143.
16. Petit P. J., Meyer J. P., 1997, "A techno-economic analytical comparison of the performance of air-source and horizontal ground source air-conditioners in South Africa", International Journal of Energy Research, Vol. 21, 1011–1021.
17. De Swardt C. A., Meyer J. P. 2001, "A performance comparison between an air-source and a ground-source reversible heat pump", International Journal of Energy Research, Vol. 25, 899–910,.
18. http://www.fhp-mfg.com/aecinfo/1/company/09/09/81/company_1.html
۱۹. نرخ تورم سالیانه برمبنای گزارش بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، مدیریت کل آمارهای اقتصادی دایره آماراقتصادی، دایره شاخص بهای کالاها و خدمات مصرفی در اردیبهشت سال۱۳۸۸
۲۰. وزارت نیرو- معاونت امورانرژی، ۱۳۸۶، ترازنامه انرژی، سازمان بهره وری انرژی ایران

Archive of SID

www.SID.ir