

آنالیز فنی، اقتصادی و زیست محیطی استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی

فریده عتابی^{۱*}، عبدالرزاق کعبی نژادیان^۲، المیرا موسی‌زاده نمینی^۳

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۰/۰۶/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۰/۱۱/۰۴

چکیده:

در این مقاله با توجه به مشخصات جغرافیایی و اقلیمی شهر تهران، مشخصات یک نمونه ساختمان مسکونی ۸ واحدی و میزان تقاضای گاز طبیعی و آبگرم مصرفی ساختمان مورد نظر، دو سناریو با در نظر گرفتن نرخ داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی مورد بررسی قرار گرفته است. در سناریوی A یک سیستم آبگرمکن خورشیدی چرخش اجباری برای تأمین آبگرم مورد نیاز با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی و در سناریوی B، همان سیستم با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی با استفاده از نرم‌افزار RETScreen مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در سناریوهای A و B سهم آبگرمکن خورشیدی در تأمین انرژی مورد نیاز جهت گرمایش آب ۵۳٪ می‌باشد. میزان صرفه‌جویی گاز طبیعی m^3/yr ۴۷۷۷، مقدار کل هزینه سرمایه‌گذاری ۷۸۹۸ دلار و میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای tCO_2/yr ۶/۴ می‌باشد. در سناریوی A میزان کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای tCO_2 ۱۲۳ دلار و دوره بازگشت سرمایه yr ۱۶/۹ می‌باشد. در سناریوی B نیز میزان کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای tCO_2 ۱۰۱ دلار و دوره بازگشت سرمایه yr ۶/۳ می‌باشد. بنابراین، استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی با در نظر گرفتن قیمت الکتریسیته و گاز طبیعی در سطح جهانی، توجیه اقتصادی دارد.

کلمات کلیدی:

سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ساختمان مسکونی، آنالیز فنی - اقتصادی و زیست‌محیطی

مقدمه

سالمون^۱ اهل فرانسه در سال ۱۶۱۵ بیانیه‌ای در رابطه با موتور خورشیدی منتشر نمود. او با استفاده از تعدادی عدسی نصب شده بر روی یک قاب، اشعه خورشید را بر روی یک استوانه فلزی سربسته که قسمتی از آن از آب پر شده بود، متمرکز نمود. تابش خورشید باعث گرم شدن هوای داخل استوانه شده و با انبساط هوا، فشار داخل محفظه افزایش یافته و آب به بیرون از محفظه رانده شد. موشو^۲ اولین کلکتور خورشیدی با متمرکزکننده مخروطی شکل را طراحی نمود. آینه‌های داخل مخروط کلیه پرتوهای خورشید را در نقطه‌ای در وسط مخروط ناقص که جذب‌کننده‌ای در آنجا نصب شده بود، متمرکز می‌کرد. این کلکتور، اکسیکون^۳ نامیده شد. اولین اکسیکون بزرگی که ساخته شد، شامل یک صفحه از جنس نقره با قطر ۵۴۰ cm و سطح $۱۸/۲ \text{ m}^2$ بود و وزن آن با کلیه قسمت‌های متحرک در حدود ۱۴۰۰ kg بود و قدرت داشت ۷۸٪ از انرژی خورشیدی تابیده شده را جذب کند، ولی از آنجایی که در این طرح، تابش خورشید به جای یک نقطه در یک سطح متمرکز می‌شد، دارای شدت کمتری بود. در سال ۱۸۸۰، اولین کلکتور صفحه تخت خورشیدی به وسیله تلی^۴ ساخته شد [۱].

استفاده از انرژی خورشیدی در تولید آبگرم مصرفی و گرمایش ساختمان‌ها در آمریکا، روسیه، استرالیا و سایر کشورها از سال ۱۹۴۰ به بعد رو به توسعه نهاد. بحران انرژی در سال ۱۹۷۳، اهمیت استفاده از انرژی خورشیدی را افزایش داد و سرمایه‌گذاری‌های زیادی در غالب کشورهای جهان به ویژه در کشورهای صنعتی برای دستیابی به طرح‌های بهینه کاربردهای مختلف انرژی خورشیدی انجام پذیرفت [۱۱]. زنگ خطر محدودیت منابع کره زمین در سال ۱۹۷۰، توسط پیچی^۵، بازرگان ایتالیایی، و کینگوراً^۶ از متولیان سازمان رم کلاب^۷، به صدا درآمد. آنان در گزارشی به نام "محدودیت رشد"، محدودیت انرژی را اعلام کردند که محدودیت انرژی و وابستگی جهان به کاربرد سوخت‌های فسیلی به خصوص نفت، دنیا را به لرزه در خواهد آورد [۳].

نخستین اختراع تجاری آبگرمکن خورشیدی توسط کلارنس کمپ^۸ در سال ۱۸۹۱ صورت گرفت. این آبگرمکن موسوم به کلیماکس^۹ شامل چهار مخزن آب استوانه‌ای شکل بلند از جنس آهن گالوانیزه و آغشته به رنگ سیاه بود که به طور افقی در جعبه‌ای عایق با پوششی از شیشه قرار داشت. آبگرمکن خورشیدی به شکل کنونی آن توسط ویلیام جی بیلی^{۱۰} در سال ۱۹۰۹ در کالیفرنیا به ثبت رسید که مشابه سیستم ترموسیفون بود [۶].

- 1) Salmon De Caum
- 2) Mouchot
- 3) Axicon
- 4) Telier
- 5) Pecchi
- 6) Kingura
- 7) Rome Club
- 8) Kelarns Camp
- 9) Climax
- 10) William.J.Bailey

بر اساس آنالیز فنی- اقتصادی بر روی سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی در کشور اردن در سال ۲۰۰۴، مشخص شد که استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی مناسب‌تر از آبگرمکن گازی می‌باشد [۸]. در سال ۲۰۰۴، آنالیزی بر روی سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی در کشور برزیل انجام شد و نتایج نشان داد استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی خانگی برای افراد کم درآمد برزیل از نظر اقتصادی بسیار مناسب است [۹]. در کشور لبنان حدود ۹۹٪ انرژی اولیه مصرفی از سایر کشورها تأمین می‌شود و الکتریسیته مهمترین سوخت مصرفی این کشور می‌باشد. بنابراین، استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی باعث کاهش میزان مصرف برق و صرفه‌جویی اقتصادی به میزان میلیون‌ها دلار شده است [۷]. در تحقیقی تحت عنوان استراتژی افزایش انرژی‌های تجدیدپذیر در کشور تایوان اثبات گردید که تولید آب گرم توسط سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی از نظر اقتصادی بسیار مقرون به صرفه بوده و گزینه مناسبی برای توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در این کشور می‌باشد [۵]. استفاده از آبگرمکن‌های خورشیدی خانگی در یونان طی سال‌های ۱۹۷۸ الی ۲۰۰۷ باعث صرفه‌جویی در مصرف برق و کاهش انتشار آلاینده‌های هوا گردید و انتشار CO₂ را به میزان ۴۴/۷٪ کاهش داد [۱۰].

گرمایش آب به طور متوسط ۲۰ الی ۳۰ درصد کل انرژی مصرفی در منازل را شامل می‌شود. با استفاده از آبگرمکن خورشیدی می‌توان سالانه ۷۰٪ انرژی مورد نیاز برای گرمایش آب را تأمین نمود. اکثر آبگرمکن‌های خورشیدی به سادگی بر روی بام منازل قابل نصب بوده و با لوله‌کشی و اتصال تانک ذخیره به سیستم آبگرمکن داخلی قابل استفاده می‌باشند. استفاده از آبگرمکن خورشیدی تا حدود ۷۰٪ از میزان هزینه‌های انرژی را جهت تأمین آبگرم مصرفی می‌کاهد. به دلیل بهره‌مندی از انرژی خورشیدی، خطرات مسمومیت، آتش‌سوزی، انفجار و برق‌گرفتگی که ناشی از مصرف گاز و سوخت‌های مایع، جامد و برق است، کاملاً حذف می‌شود [۴].

استفاده از گرمایش خورشیدی برای تأمین آبگرم مصرفی در ایران از طریق راه‌اندازی دو نوع سیستم آبگرمکن‌های خانگی خورشیدی و حمام‌های عمومی خورشیدی صورت گرفته است. در زمینه نصب آبگرمکن‌ها و حمام‌های خورشیدی، دو وزارتخانه نیرو و نفت اقداماتی را انجام داده‌اند. تا قبل از سال ۱۳۸۵، وزارت نیرو تعداد ۱۰۴۱ آبگرمکن خورشیدی نصب نمود و در سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۶ عملکردی در این خصوص نداشته است. وزارت نفت نیز طی سال‌های ۱۳۸۰ الی ۱۳۸۶ در مجموع ۱۴۹۳۰ آبگرمکن خورشیدی و ۳۴۱ حمام خورشیدی نصب و راه‌اندازی کرده است. در سال ۱۳۸۶ تعداد ۱۵۰۰ آبگرمکن خورشیدی و ۵۳ حمام خورشیدی به مرحله بهره‌برداری رسیده است [۲].

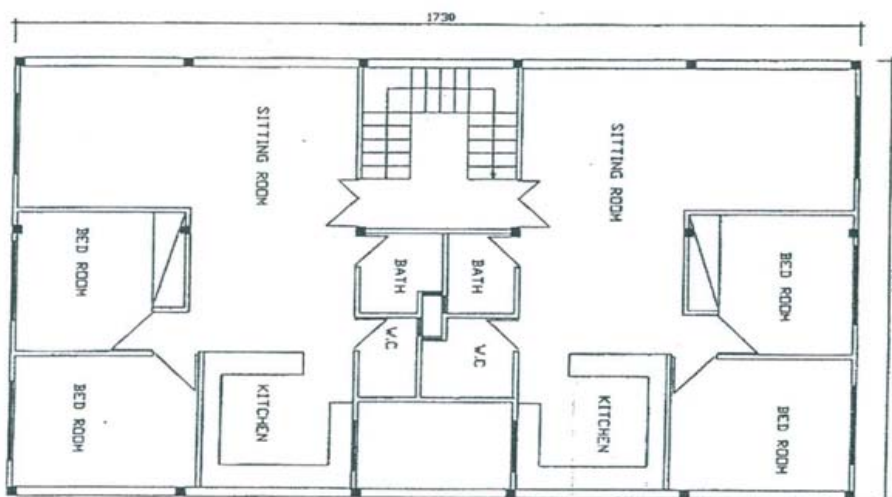
در این تحقیق، آنالیز فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی در ساختمان‌های مسکونی صورت گرفته است. با توجه به مشخصات جغرافیایی و اقلیمی شهر تهران، مشخصات یک نمونه ساختمان مسکونی ۸ واحدی و همچنین میزان تقاضای گاز طبیعی و آبگرم مصرفی ساختمان مورد نظر، دو سناریو با در نظر گرفتن نرخ داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی با استفاده از نرم‌افزار RETScreen Version 4 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

با توجه به مشخصات جغرافیایی و اقلیمی شهر تهران، برای یک ساختمان مسکونی ۸ واحدی و با توجه به تعداد افراد ساکن در آن، میزان گاز طبیعی و آب مصرفی مورد نیاز ساکنین، دو سناریوی مختلف با در نظر گرفتن نرخ‌های داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی برای سیستم آبگرمکن خورشیدی مد نظر قرار گرفت. سپس این دو سناریو با استفاده از نرم‌افزار RETScreen Version 4 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. ساختمان مورد مطالعه یک ساختمان مسکونی ۴ طبقه ۸ واحدی، واقع در مرکز شهر تهران است و تعداد ساکنین در ساختمان مجموعاً ۲۵ نفر می‌باشد. زیر بنای کل ساختمان 668 m^2 و زیر بنای هر یک از واحدهای مسکونی 82 m^2 می‌باشد. طبقه زیرزمین ساختمان دارای زیر بنای 173 m^2 است و در دو جهت شمال و جنوب دارای نمای خارجی به مساحت 261 m^2 می‌باشد که در هر نما $42/8 \text{ m}^2$ پنجره با شیشه یک جداره قرار گرفته است. دیوارهای ساختمان از جنس آجر معمولی بوده و فاقد عایق‌بندی می‌باشد. جدول ۱ مشخصات اقلیمی شهر تهران را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۱ نمای پلان افقی ساختمان مورد مطالعه نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات اقلیمی شهر تهران [۱۳]

ماه	درجه حرارت هوا	رطوبت نسبی (%)	اشعه خورشید به صورت افقی ($\text{kWh/m}^2/\text{day}$)	فشار اتمسفر (kPa)	سرعت باد (m/s)	دمای زمین ($^{\circ}\text{C}$)	درجات گرمایشی ($^{\circ}\text{C}/\text{day}$)	درجات سرمایشی ($^{\circ}\text{C}/\text{day}$)
ژانویه	۳	۶۵	۲/۴۴	۸۸/۵	۳/۵	۱	۴۶۵	۰
فوریه	۵/۳	۵۷	۳/۳۳	۸۸/۳	۵	۲/۵	۳۵۶	۰
مارس	۱۰/۳	۴۷	۴/۰۸	۸۷/۹	۶/۴	۷/۳	۲۳۹	۹
آوریل	۱۶/۴	۳۹	۵/۴۲	۸۷/۵	۷/۱	۱۵/۷	۴۸	۱۹۲
مه	۲۲/۱	۳۳	۶/۴۲	۸۷/۳	۷/۲	۲۱/۹	۰	۳۷۵
ژوئن	۲۷/۵	۲۴	۷/۶۴	۸۶/۸	۶/۷	۲۶/۹	۰	۵۲۵
ژوئیه	۳۰/۴	۲۴	۷/۵۰	۸۶/۵	۵/۵	۲۹/۱	۰	۶۳۲
اگوست	۲۹/۲	۲۴	۶/۹۲	۸۶/۸	۴/۹	۲۸/۱	۰	۵۹۵
سپتامبر	۲۵/۳	۲۵	۵/۷۵	۸۷/۳	۴/۷	۲۳/۱	۰	۴۵۹
اکتبر	۱۸/۵	۳۶	۴/۲۵	۸۷/۹	۴/۷	۱۶	۰	۲۶۴
نوامبر	۱۱/۶	۴۷	۲/۹۲	۸۸/۳	۳/۹	۸/۷	۱۹۲	۴۸
دسامبر	۵/۶	۶۱	۲/۲۵	۸۸/۵	۳/۵	۲/۹	۳۸۴	۰
میانگین	۱۷/۱	۴۰/۱	۴/۹۱	۸۷/۶	۵/۲	۱۵/۲	-	-

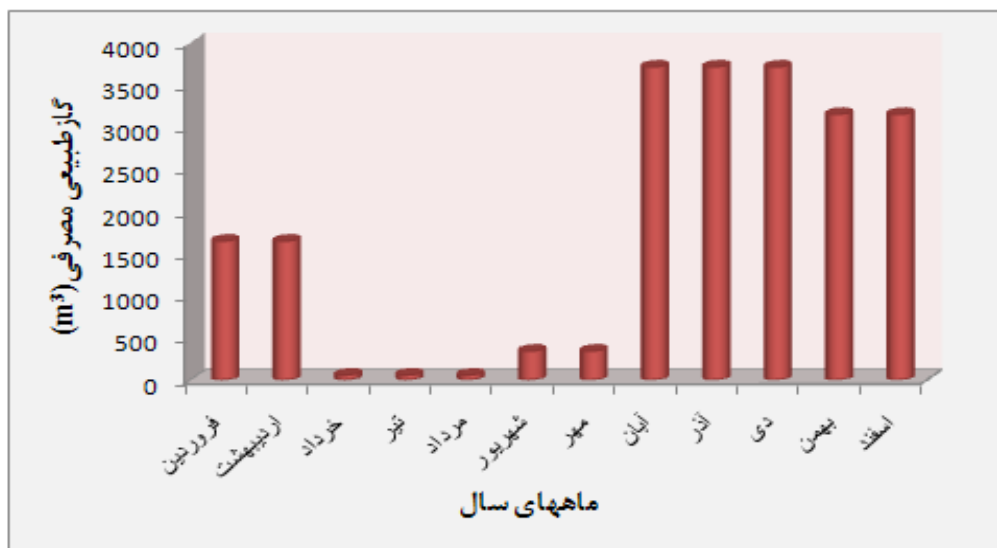


شکل ۱: پلان افقی ساختمان مورد مطالعه

گاز طبیعی مورد استفاده در ساختمان توسط شبکه سراسری گاز حوزه مرکزی کشور تأمین می‌شود. جدول ۲ میزان مصرف ماهیانه گاز طبیعی، آب و دمای متوسط محیط را در ساختمان مسکونی مورد مطالعه نشان می‌دهد. شکل ۲ پروفایل میزان مصرف گاز طبیعی برای تأمین انرژی حرارتی ماهیانه مورد نیاز را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مصرف ماهیانه گاز طبیعی، آب و دمای متوسط محیط در ساختمان مسکونی مورد مطالعه

ماه	گاز طبیعی (m ³)	آب (m ³)	دمای متوسط محیط (°C)
فروردین	۱۶۴۷	۴۳/۳	۱۴/۶
اردیبهشت	۱۶۴۷	۳۸/۹	۲۰
خرداد	۵۸	۴۰/۵	۲۵/۳
تیر	۵۸	۴۵	۲۷/۸
مرداد	۵۸	۴۴/۲	۲۶/۶
شهریور	۳۴۲/۵	۴۵/۱	۲۳/۳
مهر	۳۴۲/۵	۴۴/۳	۱۷/۳
آبان	۳۷۱۴	۴۳/۲	۹/۶
آذر	۳۷۱۴	۳۸/۷	۵/۱
دی	۳۷۱۴	۳۶/۴	۴/۷
بهمن	۳۱۵۱	۳۷/۴	۴/۱
اسفند	۳۱۵۱	۳۷/۵	۸/۶
مجموع	۲۱۵۹۷	۴۹۴/۵	



شکل ۲: پروفایل میزان مصرف گاز طبیعی برای تأمین انرژی حرارتی ماهیانه مورد نیاز

میزان انرژی حرارتی مصرفی

انرژی حرارتی برای گرمایش فضای ساختمان و تأمین آبگرم مصرفی مختلف است. حداکثر میزان مصرف انرژی حرارتی در ماه‌های آبان، آذر و دی، به دلیل استفاده از سیستم‌های گرمایشی می‌باشد. همچنین حداقل میزان مصرف انرژی حرارتی در ماه‌های خرداد، تیر و مرداد است. جدول ۳ کل انرژی حرارتی مصرفی را در طول سال در ساختمان مورد مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۳: کل انرژی حرارتی مصرفی در طول سال در ساختمان مورد مطالعه

کل انرژی حرارتی مصرفی در ساختمان مورد مطالعه	
۲۱۵۹۷	کل انرژی حرارتی مصرفی (m ³ /yr)
۱۷۹۹/۷۵	متوسط مصرف انرژی حرارتی ماهیانه (m ³ /month)
۵۸	حداقل میزان مصرف انرژی حرارتی ماهیانه (خرداد، تیر و مرداد) (m ³ /month)
۳۷۱۴	حداکثر میزان مصرف انرژی حرارتی ماهیانه (آبان، آذر و دی) (m ³ /month)

محاسبه حداکثر بار حرارتی

انرژی حرارتی مورد نیاز در ساختمان شامل انرژی مورد نیاز جهت گرمایش فضا، پخت و پز و آبگرم مصرفی می‌باشد که تجهیزات مورد استفاده شامل شوفاژ، اجاق و دیگر وسایل متفرقه گازسوز است و بازدهی این تجهیزات حدود ۷۵٪ می‌باشد. بیشترین مصرف انرژی حرارتی مختص گرمایش فضا در ماه‌های سرد سال است. حداکثر بار حرارتی ساختمان به شرایط آب و هوایی، مساحت ساختمان، جنس دیوارها، عایق‌بندی ساختمان، تعداد افراد ساکن، نوع تجهیزات گرمایشی و غیره بستگی دارد. کل انرژی حرارتی مصرفی مطابق جدول ۲، $21597 \text{ m}^3/\text{yr}$ می‌باشد.

میزان کل انرژی حرارتی مصرفی (kWh/yr):

$$\text{kWh/yr} = 21597 \text{ m}^3/\text{yr} \times 37900 \text{ kJ/m}^3 \times 0.75 \text{ kWh/kJ} = 496273 \text{ kWh/yr}$$

حداکثر میزان مصرف گاز طبیعی در ساختمان $3714 \text{ m}^3/\text{month}$ می‌باشد، لذا حداکثر میزان انرژی حرارتی مصرفی در ساختمان مطابق رابطه فوق $29348/58 \text{ kWh/month}$ است. حداقل میزان مصرف گاز طبیعی در ساختمان $58 \text{ m}^3/\text{month}$ می‌باشد، لذا حداقل میزان انرژی حرارتی مصرفی در ساختمان مطابق رابطه فوق $458/32 \text{ kWh/month}$ است.

حداکثر بار حرارتی (kW):

$$\text{kW} = 496273 \text{ kWh/yr} \div 8760 \text{ h} = 566 \text{ kW}$$

مشخصات فنی - اقتصادی سناریوهای A و B

به منظور بررسی استفاده از سیستم آبگرمکن خورشیدی جهت تأمین آب گرم مورد نیاز در ساختمان مورد مطالعه، سناریوهای A و B تعریف شد. در این سناریوها، استفاده از سیستم آبگرمکن خورشیدی با چرخش اجباری برای تأمین آب گرم مورد نیاز کل ساختمان مورد مطالعه با نرخ داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی در نظر گرفته شد. مشخصات فنی، مدل کلکتور و مدل آبگرمکن مورد نیاز مربوط به سناریوهای A و B جهت تأمین آب گرم مورد نیاز ساختمان، در جدول ۴ ارائه شده است. جدول ۵ اطلاعات فنی آبگرمکن خورشیدی مورد نیاز و جدول ۶ اطلاعات مالی - اقتصادی آبگرمکن خورشیدی مورد نیاز در سناریوی A و B را نشان می‌دهد.

جدول ۴: مشخصات فنی، مدل کلکتور و مدل آبگرمکن مورد نیاز برای سناریوهای A و B

مقدار	مشخصات کلکتور	مقدار	مشخصات کلکتور
۱۸۰	دمای سکون (°C)	Solar Polar	شرکت سازنده کلکتور
۴۲/۹	وزن (kg)	Optimal	مدل کلکتور
۵۰	ضخامت عایق پشت کلکتور (mm)	۹۴ × ۲۰۰	ابعاد بیرونی (cm)
۹۶	ضریب جذب (%)	۱/۵۷	سطح جاذب (m ²)
AL6063 اکسترود شده	جنس قاب	۱/۷۸	سطح قابل رویت (m ²)
۱۴۳	عرض صفحه جاذب (mm)	پشم سنگ	نوع عایق
پاشش یونی در خلأ	پوشش صفحه جاذب	۸۰	دانسیته عایق حرارتی (kg/m ³)
۷	ضریب بازتاب حرارتی صفحه جاذب (%)	شیشه مشجر کم آهن	نوع شیشه
قطر ۲۲، ضخامت ۰/۹	ابعاد لوله هدر (مس) (mm)	۸۶	ضریب عبور شیشه (%)
قطر ۱۰، ضخامت ۰/۹	لوله اتصال صفحه جاذب به هدر (مس) (mm)	۴	ضخامت شیشه (mm)
تست نفوذ آب به کلکتور تست عدم نشست از کلکتور در فشار (۱۱۷/۷ Psi)		تست‌های انجام شده بر اساس استانداردهای (ISO 9060/9459-I/II, En12975-2)	
مقدار	مشخصات آبگرمکن	مقدار	مشخصات آبگرمکن
۳۱۰	وزن مخزن (kg)	Tisun	شرکت سازنده آبگرمکن
۱۰	حداکثر عملکرد فشار (bar)	BE-SSPK1500	مدل آبگرمکن
۹۵	حداکثر عملکرد دما (°C)	۱۰۰۰ و ۲۰۸۰	ارتفاع و قطر مخزن (mm)

افت فشار در کلکتور برای دبی ۱۰۸ kg/hr برابر ۱۲۸/۵ mbar است.

جدول ۵: اطلاعات فنی آبگرمکن خورشیدی مورد نیاز در سناریوهای A و B

مقدار	مشخصات فنی	مقدار	مشخصات فنی
Optimal	مدل کلکتور	۱۵۰۰	آبگرم مصرفی روزانه (L/d)
Tisun	شرکت سازنده آبگرمکن	آبگرمکن ۱۵۰۰ لیتری همراه با مبدل حرارتی	آبگرمکن انتخابی (L)
BE-SSPK1500	مدل آبگرمکن	۶۰	درجه حرارت آبگرم (°C)
۸۰	راندمان مبدل حرارتی (%)	ثابت	وضعیت تعقیب خورشید
۵۰	ظرفیت ذخیره به سطح کلکتور خورشیدی (L/m ²)	۴۵ درجه	شیب کلکتور
۲/۹۱	توان پمپ به سطح کلکتور خورشیدی (W/m ²)	شیشه‌ای	نوع کلکتور
۵ و ۶	افت آبگرمکن و افت مخزن ذخیره (%)	Solar Polar	شرکت سازنده کلکتور

جدول ۶: اطلاعات مالی و اقتصادی آبگرمکن خورشیدی مورد نیاز در سناریوهای A و B

هزینه	هزینه مالی و اقتصادی	هزینه	هزینه مالی و اقتصادی
۵۷	ساختمان و محوطه (US\$/m ²)	۹۵۲	نصب (US\$)
۱۱۴۳	پمپ چرخش (سیرکولسیون) (US\$/W)	۴۷۶	لوله کشی (US\$)
۲۸۶	سازه تکیه‌گاه کلکتور خورشیدی (US\$/m ²)	۱۱۴	نقل و انتقال (US\$)
۲۰	نرخ اعتبار کاهش گازهای گلخانه‌ای (US\$/tCO ₂)	۹۵	مطالعات امکان‌سنجی (US\$)
۰/۰۶	نرخ داخلی گاز طبیعی (US\$/m ³)	۱۹۰	طراحی مکانیکی (US\$)
۰/۲۴	نرخ جهانی گاز طبیعی (US\$/m ³)	۱۳۳۳	مخزن ذخیره (US\$/L)
۰/۰۴	نرخ داخلی الکتریسیته (US\$/kWh)	۵۷۲	لوله مصرفی (US\$/m)
۰/۱۳	نرخ جهانی الکتریسیته (US\$/kWh)	۲۶۸۰	کلکتور خورشیدی (US\$/m ²)

نرخ افزایش بهای سوخت و نرخ تورم ۱۰٪، طول عمر پروژه ۲۵ سال و قیمت هر دلار معادل ۱۰۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از نرم‌افزار RETScreen Version 4 به منظور استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی برای تأمین آب گرم مورد نیاز در ساختمان مورد مطالعه با در نظر گرفتن نرخ داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی به شرح ذیل می‌باشد:

نتایج امکان‌سنجی فنی حاصل از نرم‌افزار RETScreen Version 4 در ارتباط با بررسی استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی به منظور تأمین آب گرم مورد نیاز در ساختمان مورد مطالعه در سناریوهای A و B به شرح جدول ۷ می‌باشد. همچنین جدول ۸ دوره بازگشت سرمایه و هزینه‌های سیستم را با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی برای سناریوی A نشان می‌دهد.

جدول ۷: نتایج امکان‌سنجی فنی برای سناریوهای A و B

مقدار	مشخصات	مقدار	مشخصات
۱۴/۴	انرژی تولید شده (MWh/yr)	۱۲	تعداد کلکتورها
۵۳	سهم انرژی خورشید در تأمین انرژی سیستم (%)	۹۴۲	ظرفیت ذخیره (L)
۱/۷۹	تشعشع سالیانه خورشید به صورت افقی (MWh/m ³)	۱۲/۲	حداقل دمای آب (°C)
۱/۹۱	تشعشع سالیانه خورشید به صورت عمودی (MWh/m ³)	۲۱/۸	حداکثر دمای آب (°C)
۰/۱	الکتریسیته مصرفی پمپ (MWh/yr)	۲۱/۳۶	مساحت کلکتور خورشیدی (m ²)
۴۷۷۷	صرفه‌جویی گاز طبیعی (m ³ /yr)	۱۳/۱۹	ظرفیت کلکتور خورشیدی (kW)

جدول ۸: دوره بازگشت سرمایه و هزینه‌های سیستم آبگرمکن خورشیدی با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی در سناریوی A

دوره بازگشت سرمایه و هزینه‌های سیستم (با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی)	
۷۸۹۸	کل هزینه سرمایه‌گذاری (US\$)
۱۳۷	کل هزینه سالیانه (با احتساب هزینه تعمیر و نگهداری) (US\$)
۴۱۴	کل درآمد و پس‌انداز سالیانه (US\$)
-۵۰۴۷	ارزش خالص فعلی (NPV) (US\$)
-۷۸۱	منفعت سالانه در مدت زمان طول عمر سیستم (US\$/yr)
۱۶/۹	دوره بازگشت سرمایه (NPBP) (yr)
۵/۳	نرخ بازده داخلی (IRR) (%)
۶/۴	کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (tCO ₂ /yr)
۱۲۳	کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای (US\$/tCO ₂)

نرخ افزایش بهای سوخت و نرخ تورم ۱۰٪، طول عمر پروژه ۲۵ سال و قیمت هر دلار معادل ۱۰۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.

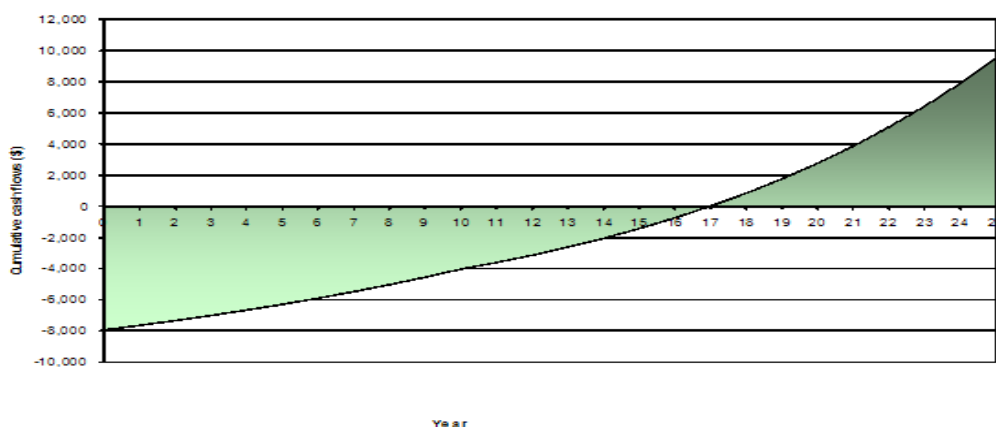
بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار RETScreen Version 4 برای سناریوهای A و B، سهم انرژی خورشیدی در تأمین انرژی سیستم جهت گرمایش آب ۵۳٪ می‌باشد. با در نظر گرفتن نرخ داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی، میزان صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی ۴۷۷۷ m³/yr برآورد گردیده است که این مقدار منجر به میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (به ازای مصرف الکتریسیته و نیز صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی) ۶/۴ tCO₂/yr می‌شود. میزان الکتریسیته مصرفی توسط آبگرمکن خورشیدی به منظور پمپاژ آب ۰/۱ MWh/yr و مقدار کل هزینه سرمایه‌گذاری سیستم آبگرمکن خورشیدی ۷۸۹۸ دلار می‌باشد. با توجه به آنکه قیمت هر tCO₂ ۲۰ دلار در نظر گرفته شده است، طبق رابطه (۱) میزان کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای در سناریوی A

$$\text{حدود } tCO_2 \text{ } ۱۲۳ \text{ دلار } US\$/tCO_2 = \frac{\left(\frac{US\$}{yr} \right)}{\left(\frac{tCO_2}{yr} \right)} \text{ و دوره بازگشت سرمایه } ۱۶/۹ \text{ yr می‌باشد. شکل (۳)}$$

نمودار جریان نقدینگی تراکمی را بر حسب سال با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی برای سناریوی A نشان می‌دهد. رابطه (۱) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{GHGs Reduction Costs} = \frac{\text{Annual Life Cycle Savings} \left(\frac{US\$}{yr} \right)}{\text{Net Annual GHG Emission Reduction} \left(\frac{tCO_2}{yr} \right)} = US\$/tCO_2 \quad (۱)$$

- ۱) Net Present Value
- ۲) Normal Pay Back Period
- ۳) Internal Rate of Return



شکل ۳: نمودار جریان نقدینگی تراکمی بر حسب سال با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی برای سناریوی A

با توجه به آنکه قیمت هر tCO_2 ، ۲۰ دلار در نظر گرفته شده است، طبق رابطه (۱) میزان کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای در سناریوی B حدود $101 \text{ US\$ } tCO_2$

$$\left(= \frac{\left(\frac{\text{US\$}}{\text{yr}} \right)}{\left(\frac{tCO_2}{\text{yr}} \right)} \right) 101 \text{ US\$/}tCO_2$$

و دوره بازگشت سرمایه $6/3 \text{ yr}$ می‌باشد. جدول ۹ دوره بازگشت سرمایه و

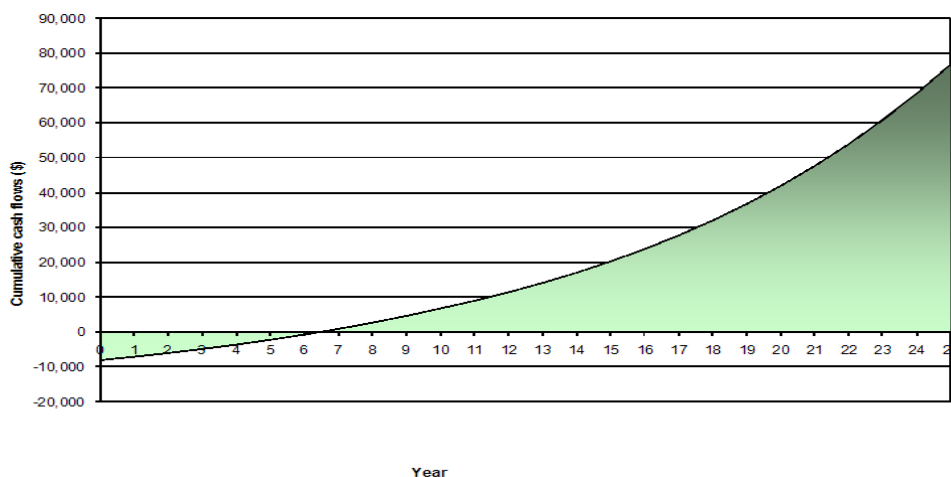
هزینه‌های سیستم را با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی و شکل ۴ نمودار جریان نقدینگی تراکمی را بر حسب سال با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی برای سناریوی B نشان می‌دهد.

جدول ۹: دوره بازگشت سرمایه و هزینه‌های سیستم آبگرمکن خورشیدی با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی در سناریوی B

دوره بازگشت سرمایه و هزینه‌های سیستم (با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی)	
کل هزینه سرمایه‌گذاری (US\$)	۷۸۹۸
کل هزینه سالیانه (با احتساب هزینه تعمیر و نگهداری) (US\$)	۳۷۲
کل درآمد و پس‌انداز سالیانه (US\$)	۱۲۷۴
ارزش خالص فعلی (NPV) (US\$)	۴۱۷۴
منفعت سالانه در مدت زمان طول عمر سیستم (US\$/yr)	۶۴۶
دوره بازگشت سرمایه (NPBP) (yr)	۶/۳
نرخ بازده داخلی (IRR) (%)	۲۰/۳
کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (tCO_2/yr)	۶/۴

کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای (US\$/tCO ₂)	۱۰۱
---	-----

نرخ افزایش بهای سوخت و نرخ تورم ۱۰٪، طول عمر پروژه ۲۵ سال و قیمت هر دلار معادل ۱۰۵۰۰ ریال در نظر گرفته شده است.



شکل ۴: نمودار جریان نقدینگی تراکمی بر حسب سال با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی برای سناریوی B

محاسبه شاخص‌های مالی و تحلیل حساسیت در سناریوی A

به منظور محاسبه شاخص‌های مالی طرح در سناریوی A از نرخ بهره ۱۵٪ جهت محاسبه ارزش خالص فعلی (NPV) استفاده شده است. با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی، جریان‌ات نقدی تجمعی در سال هفدهم مثبت می‌شود که بیانگر سال بازگشت سرمایه (NPBP) است. همچنین نرخ بهره‌ای که ارزش خالص فعلی را صفر می‌کند (همان نرخ بازده داخلی)، معادل ۵/۳٪ می‌باشد. دوره بازگشت سرمایه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$NPBP = \frac{\log \left[\frac{A}{A - rC_0} \right]}{\log (1 + r)} \quad (2)$$

که در آن NPBP: دوره بازگشت سرمایه (yr)، A: صرفه‌جویی سالانه گاز طبیعی (m³/yr)، C₀: سرمایه‌گذاری اولیه (US\$) و r: نرخ بازده داخلی (%) می‌باشد. ارزش خالص فعلی با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

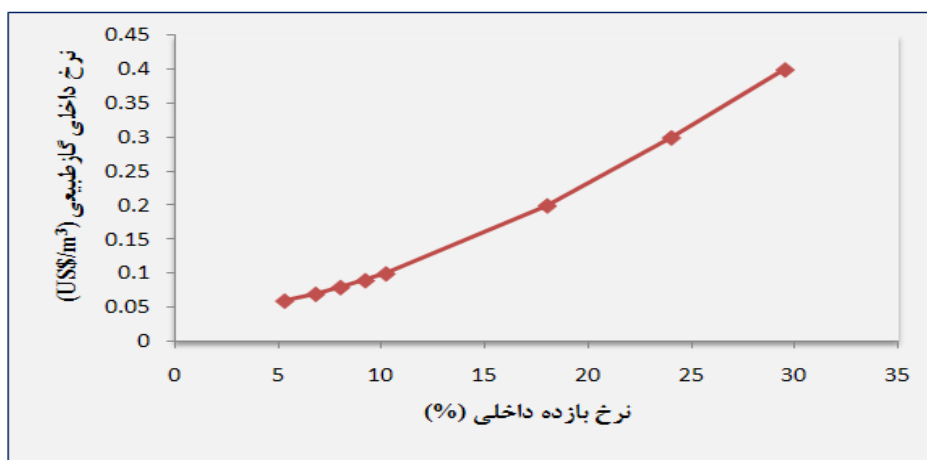
$$NPV = -C_0 + \frac{TR_n - TC_n}{(1+r)^n} \quad (3)$$

که در آن NPV: ارزش خالص فعلی (US\$)، C_0 : سرمایه‌گذاری اولیه (US\$)، TR_n : درآمد در سال n ، TC_n : هزینه در سال n ، r : نرخ بازده داخلی (%) و n : سال می‌باشد. جدول ۱۰ نرخ بازده داخلی را در سناریوی A نشان می‌دهد.

جدول ۱۰: نرخ بازده داخلی در سناریوی A

نرخ بهره (%)	ارزش خالص فعلی (US\$)	نرخ بهره (%)	ارزش خالص فعلی (US\$)
۵	۳۳۶	۲۵	-۶۳۹۰
۱۰	-۳۳۷۰	۳۰	-۶۶۹۳
۱۵	-۵۰۴۷	۳۵	-۶۸۹۷
۲۰	-۵۹۰۳	۴۰	-۷۰۴۳

در سناریوی A به تحلیل حساسیت شاخص نرخ بازده داخلی (IRR) بر اساس تغییرات نرخ داخلی گاز طبیعی پرداخته شده است. شکل ۵ نمودار تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی را بر اساس نرخ داخلی گاز طبیعی در سناریوی A نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی

بر اساس نرخ داخلی گاز طبیعی در سناریوی A

طبق نمودار ۵، در صورتی که نرخ داخلی گاز طبیعی از $0.2 \text{ m}^3/\text{US\$}$ کمتر شود، نرخ بازده داخلی کمتر از ۲۰٪ خواهد بود و در صورتی که نرخ داخلی گاز طبیعی به $0.4 \text{ m}^3/\text{US\$}$ برسد، نرخ بازده داخلی به میزان ۳۰٪ افزایش خواهد یافت.

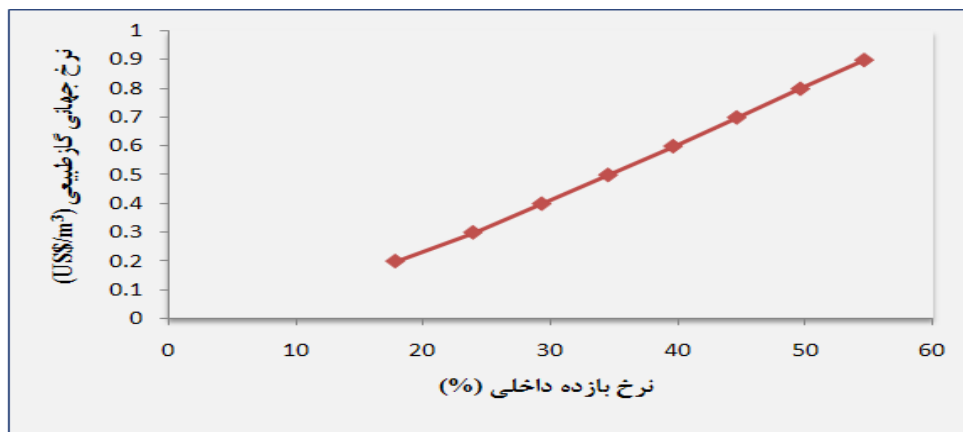
محاسبه شاخص‌های مالی و تحلیل حساسیت در سناریوی B

به منظور محاسبه شاخص‌های مالی طرح در سناریوی B از نرخ بهره ۱۵٪ جهت محاسبه ارزش خالص فعلی (NPV) استفاده شده است. با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی، جریانات نقدی تجمعی در سال ششم مثبت می‌شود که بیانگر سال بازگشت سرمایه (NPBP) است. همچنین نرخ بهره‌ای که ارزش خالص فعلی را صفر می‌کند (همان نرخ بازده داخلی)، معادل ۳/۲۰٪ می‌باشد. جدول ۱۱ نرخ بازده داخلی را در سناریوی B نشان می‌دهد.

جدول ۱۱: نرخ بازده داخلی در سناریوی B

نرخ بهره (%)	ارزش خالص فعلی (US\$)	نرخ بهره (%)	ارزش خالص فعلی (US\$)
۵	۳۰۵۶۸	۲۵	-۱۹۹۵
۱۰	۱۲۲۵۰	۳۰	-۳۳۰۹
۱۵	۴۱۷۴	۳۵	-۴۱۶۴
۲۰	۱۸۹	۴۰	-۴۷۵۷

در سناریوی B به تحلیل حساسیت شاخص نرخ بازده داخلی (IRR) بر اساس تغییرات نرخ جهانی گاز طبیعی پرداخته شده است. شکل ۶ نمودار تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی را بر اساس نرخ جهانی گاز طبیعی در سناریوی B نشان می‌دهد.



شکل ۶: نمودار تحلیل حساسیت نرخ بازده داخلی بر اساس نرخ جهانی گاز طبیعی در سناریوی B

نمودار ۶ در صورتی که نرخ جهانی گاز طبیعی از $0.2 \text{ US\$ m}^3$ کمتر شود، نرخ بازده داخلی کمتر از ۲۰٪ خواهد بود و در صورتی که نرخ جهانی گاز طبیعی به $0.5 \text{ US\$ m}^3$ برسد، نرخ بازده داخلی به میزان ۳۰٪ افزایش خواهد یافت.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق دو سناریوی مختلف با نرخ‌های داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی برای یک ساختمان مسکونی ۸ واحدی برای به کارگیری سیستم آبگرمکن خورشیدی در نظر گرفته شد. سپس این دو سناریو با استفاده از نرم‌افزار RETScreen Version 4 از دیدگاه فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

بر اساس نتایج حاصل از نرم‌افزار RETScreen Version 4 برای سناریوهای A و B، سهم انرژی خورشیدی در تأمین انرژی سیستم جهت گرمایش آب ۵۳٪ می‌باشد. با در نظر گرفتن نرخ داخلی و جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی، میزان صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی $4777 \text{ m}^3/\text{yr}$ برآورد گردیده است که این مقدار منجر به میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (به ازای مصرف الکتریسیته و نیز صرفه‌جویی در مصرف گاز طبیعی) $6/4 \text{ tCO}_2/\text{yr}$ می‌شود. میزان الکتریسیته مصرفی توسط آبگرمکن خورشیدی به منظور پمپاژ آب $0/1 \text{ MWh}/\text{yr}$ و مقدار کل هزینه سرمایه‌گذاری سیستم آبگرمکن خورشیدی ۷۸۹۸ دلار می‌باشد. با توجه به آنکه قیمت هر tCO_2 ۲۰ دلار در سناریوهای A و B در نظر گرفته شده است، میزان کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای در سناریوی A حدود 123 tCO_2 دلار (بر اساس میزان منفعت سالانه در مدت زمان طول عمر سیستم و میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بر حسب tCO_2 معادل) و دوره بازگشت سرمایه $16/9 \text{ yr}$ می‌باشد و میزان کاهش هزینه خسارت‌های زیست‌محیطی حاصل از تولید گازهای گلخانه‌ای در سناریوی B حدود 101 tCO_2 دلار (بر اساس میزان منفعت سالانه در مدت زمان طول عمر سیستم و میزان کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بر حسب tCO_2 معادل) و دوره بازگشت سرمایه $6/3 \text{ yr}$ می‌باشد.

با نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی، درآمد و پس‌انداز سالیانه بیشتر و دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر می‌باشد. زیرا نرخ الکتریسیته و گاز طبیعی در ایران در مقایسه با سطح جهانی بسیار پایین است و استفاده از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی با نرخ داخلی الکتریسیته و گاز طبیعی توجیه اقتصادی ندارد. هزینه سرمایه‌گذاری، صرفه‌جویی سالانه گاز طبیعی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سیستم آبگرمکن خورشیدی با نرخ جهانی الکتریسیته ($0/13$ دلار) و گاز طبیعی ($0/24$ دلار) و با در نظر گرفتن نرخ داخلی الکتریسیته ($0/04$ دلار) و گاز طبیعی ($0/06$ دلار) یکسان می‌باشد. با در نظر گرفتن نرخ جهانی الکتریسیته و گاز طبیعی، درآمد و پس‌انداز سالیانه بیشتر و دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر می‌باشد.

بر اساس محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار RETScreen Version 4، مقدار انرژی تولید شده با توجه به جدول ۷ برای ساختمان مورد مطالعه حدود $14/4 \text{ MWh}/\text{yr}$ می‌باشد. با توجه به اینکه تعداد ساکنین در ساختمان مورد مطالعه ۲۵ نفر می‌باشد، بنابراین حدود $0/57 \text{ MWh}/\text{yr}$ برای هر نفر با استفاده از سیستم آبگرمکن خورشیدی انرژی تولید خواهد شد. جمعیت تهران بزرگ، ۱۲۵۰۵۷۰۵ نفر است که تعداد ۸۷۹۱۳۷۸ نفر در تهران ساکن می‌باشند [۱۲]. با فرض اینکه ۲۵٪ از جمعیت کل تهران بتوانند از سیستم‌های آبگرمکن خورشیدی استفاده نمایند، کل انرژی تولیدی توسط این سیستم‌ها $1252771 \text{ MWh}/\text{yr}$ خواهد بود.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت مالی شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت (IFCO) انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از هیأت مدیره، مدیر عامل و ریاست پژوهش این شرکت ابراز می‌نمایند.

منابع

- [۱] حاج سقطی، اصغر، ۱۳۸۰، "اصول و کاربرد انرژی خورشیدی"، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه علم و صنعت.
- [۲] دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی، "ترازنامه انرژی"، ۱۳۸۶، انتشارات معاونت امور برق و انرژی، وزارت نیرو.
- [۳] کعبی‌نژادیان، عبدالرزاق، ۱۳۸۷، "فناوری انرژی‌های نو"، چاپ اول، انتشارات انجمن انرژی خورشیدی ایران.
- [۴] مدیریت بخش ساختمان و مسکن، ۱۳۸۸، "آبگرمکن‌های خورشیدی خانگی و عمومی"، انتشارات شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور.
- [5] Chen, F.L. Lus, M. Wang, C.C. Chang, Y.L., 2008, "Promotion Strategies for Renewable Energy in Taiwan", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:1681-91.
- [6] Everett, B., 1994, "A Resource Pack For Tertiary Education", The Open University, UK.
- [7] Hour, A., 2005, "Solar Water Heating in Lebanon Current Status and Future Prospects", *Renewable Energy* 31, 663-675.
- [8] Kablan, M.M., 2004, "Techno- Economic Analysis of the Jordanian Solar Water Heating System", *Energy*:29:1069-79.
- [9] Kalogirous, S., 2004, "Environmental Impact of Domestic Solar Water and Space Heating Systems", In proceeding of World Renewable Energy Congress (WREC) Denver, Colorado, USA, August-September (CDROM).
- [10] Tsilingiridis, G. Martinopoulos, G., 2009, "Thirty Years of Domestic Solar Hot Water Systems Use in Greece-Energy and Environmental Benefits-Future Perspectives", *Renewable Energy* 35,490-497.
- [11] WWW.SUNA.Org.Ir/Fag-Fa.2009.html.
- [12] WWW.Amar.org.ir.2010.
- [13] WWW.Weatherbase.com/Weather.php3.2008.html.