

## شبیه‌سازی و تحلیل فنی - اقتصادی آبرمکن خورشیدی برای کاربری مسکونی

امید گزانه<sup>۱</sup> و محمدعلی بهشتی‌نیا<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> تحلیل اقتصادی، انرژی تجدیدپذیر، آبرمکن خورشیدی، شبیه‌سازی، نرم‌افزار SAM</p>	<p>در دنیای امروزی به‌کارگیری انرژی‌های تجدید پذیر مهم‌ترین راه حل جامعه بشری در جهت ادامه حیات است. این ضرورت پس از کمبود انرژی‌های فسیلی از دهه ۱۹۷۰ شکل جدی تری به خود گرفته است. سه مقوله کمبود منابع انرژی، افزایش جمعیت و کاربرد فراگیر انرژی در تمام امور جامعه بشری ضرورت استفاده از انرژی‌های نو را بهتر به ما می‌رساند. یکی از کاربردهای انرژی خورشیدی، استفاده در سیستم‌های گرمایش و سرمایش خانگی می‌باشد. در این مقاله پس از برآورد تقاضای آبرم مصرفی و با در نظر گرفتن پارامترهای جغرافیایی، طراحی و اقتصادی به شبیه‌سازی و انتخاب مدل مناسب آبرمکن خورشیدی در یک ساختمان نمونه در شهر تهران می‌پردازیم و پس از آن به تحلیل اقتصادی مساله، نظیر میزان صرفه‌جویی انرژی در سال و تحلیل جریان نقدی پروژه و بررسی حمایت مشوق‌ها و تاثیر آن‌ها بر روند سوددهی پروژه می‌پردازیم. در ادامه تحقیق به تعیین زوایای بهینه برای قرارگیری کلکتور می‌پردازیم و مشاهده می‌کنیم که زوایای ۳۲ و ۱۷۰ درجه بهترین زوایا برای قرارگیری کلکتور در محل مورد نظر هستند.</p>

### ۱- مقدمه

تجدید ناپذیر بودن، علاوه بر آلودگی‌های زیست‌محیطی باعث افزایش دمای کره زمین نیز می‌شوند، این مساله منجر به بروز خشک‌سالی‌ها، نابودی محصولات کشاورزی و کاهش مواد غذایی، قحطی، باران‌های سیل‌آسا، انقراض بسیاری از گونه‌های گیاهی و جانوری، آتش‌سوزی جنگل‌ها و بروز بیماری‌ها خواهد شد که در حال حاضر شاهد وقوع این وقایع در اکثر نقاط جهان هستیم. بنابراین انسان مجبور است برای رهایی از مشکلات مذکور به روش‌های دیگری از تولید انرژی روی آورد که علاوه بر حل مسائل زیست‌محیطی، امکان توسعه پایدار را نیز فراهم نماید. روش‌های گوناگونی برای استفاده از انرژی خورشیدی وجود دارد، اما گرم نمودن آب با استفاده از آبرمکن خورشیدی، شاید آسان‌ترین و اقتصادی‌ترین روش باشد.

نگرانی‌هایی که در زمینه تغییرات آب و هوایی ناشی از انتشار گازهای کربنی در جو وجود دارد، تمام کشورهای دنیا را مجبور کرده است تا به دنبال یافتن راه‌هایی برای کاهش میزان انتشار این گازها باشند [۱]. اتحادیه اروپا تصمیم گرفته است تا سال ۲۰۲۰ به میزان ۲۰ درصد از پخش گازهای گلخانه‌ای کم کند [۲]. با توجه به این نکته که انرژی‌های فسیلی و معدنی به لحاظ محدودیت و

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: [beheshtinia@semnan.ac.ir](mailto:beheshtinia@semnan.ac.ir)

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشکده

انرژی‌های نوین، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه سمنان

شود و تحلیل اقتصادی آن نیز بر پایه اصول اقتصاد مهندسی با در نظر گرفتن ۳ پارامتر جغرافیایی، طراحی و اقتصادی که تاکنون برای این شهر انجام نگرفته است، ارائه می‌گردد. نوآوری مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- بهینه‌سازی زاویه قرارگیری کلکتور برای دریافت حداکثر انرژی تابشی خورشیدی با متغیر گرفتن هردو زاویه شیب کلکتور<sup>۳</sup> و زاویه جنوبی کلکتور<sup>۴</sup>.

- در نظر گیری نرخ بیمه<sup>۵</sup> به عنوان پارامتر اقتصادی و تاثیر آن بر جریان نقدی پروژه.

- تاثیر مشوق‌ها<sup>۶</sup> بر روند اجرایی پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر.

محدوده مورد پژوهش در این مقاله ساختمان‌های مسکونی در شهر تهران می‌باشد.

در ادامه، در بخش ۲ به مرور ادبیات موضوع پرداخته می‌شود، سپس در بخش ۳، پارامترهای مساله مورد نظر ارائه می‌گردد. در بخش ۴، نحوه شبیه‌سازی آبگرمکن خورشیدی بیان می‌شود. تحلیل اقتصادی شبیه‌سازی آبگرمکن خورشیدی با نرم‌افزار SAM<sup>۷</sup> در بخش ۵ ارائه می‌شود و در بخش ۶، زوایای بهینه قرارگیری کلکتور و در انتها در بخش ۷ نتیجه‌گیری مساله بیان می‌شود.

## ۲- مرور ادبیات موضوع

هر فعالیت بشری به پشتوانه انرژی صورت می‌گیرد. انرژی خورشید به علت سازگاری با محیط‌زیست و منبع تامین نامحدود آن و در دسترس بودن آن در قسمت اعظمی از کره زمین، جایگزین مناسبی برای سوخت‌های فسیلی است. گرمایش ساختمان‌ها با استفاده از انرژی خورشید، ایده تازه‌ای بود که در سال ۱۹۳۰ مطرح و در یک دهه به پیشرفتهای قابل توجهی نائل آمد. در سال ۱۹۳۸ اولین

در بسیاری از موارد از این سیستم برای تامین آبگرم خانگی استفاده می‌شود، ولی در برخی موارد نیز برای گرمایش محیط استفاده می‌شود. آبگرمکن خورشیدی به سیستمی گفته می‌شود که با جذب انرژی خورشید آبگرم تولید می‌نماید. آبگرمکن‌های خورشیدی قابلیت نصب در هر شرایط آب‌وهوایی را داشته و در هر مکان میزان عملکرد آن متفاوت بوده و به عواملی همچون شدت تابش خورشید در محل و همچنین میزان درجه حرارت آب ورودی به سیستم وابسته است. مدل خانگی آبگرمکن خورشیدی دارای کلکتور<sup>۱</sup> و مخزن ذخیره افقی<sup>۲</sup> دو جداره می‌باشند. کلکتور، اصلی ترین جزء سیستم گرمایش خورشیدی می‌باشد. عمل جذب تابش خورشیدی و انتقال گرما به سیال توسط این قسمت انجام می‌گیرد. مهمترین عنصر در یک کلکتور صفحه جاذب آن است. این قطعه از یک صفحه فلزی تشکیل می‌شود که لوله‌های عبور سیال بر پشت آن جوش شده است. با تابش خورشید بر روی کلکتورها و جذب گرمای آن توسط صفحات جاذب، سیال عامل داخل کلکتورها گرم شده و به علت کاهش چگالی شروع به بالا رفتن از لوله‌های عمودی داخل آن‌ها می‌کند. با تبادل گرما بین جداره داخلی و جداره خارجی مخزن، گرمای سیال عامل به آب داخل مخزن ذخیره منتقل شده و سیال عامل پس از سرد شدن، از لوله‌های برگشت به سمت کلکتور حرکت می‌کند. این چرخه چندین بار در طول روز تکرار می‌گردد. از مهمترین مزیت‌های آبگرمکن خورشیدی می‌توان به سادگی سیستم و اصول کارکرد، حذف و یا کاهش محسوس هزینه سوخت، کاهش قابل توجه میزان آلاینده‌ها، هزینه تعمیر و نگهداری کمتر نسبت به آبگرمکن‌های معمولی اشاره کرد و از مهمترین معایب آن می‌توان به هزینه نصب و راه‌اندازی نسبتا بالا، وابستگی راندمان به تابش خورشید و نیاز به پشتیبان در تقاضاهای نسبتا بالا اشاره کرد. در این مقاله به شبیه‌سازی آبگرمکن خورشیدی در شهر تهران پرداخته می‌-

<sup>3</sup> Tilt

<sup>4</sup> Incentives

<sup>5</sup> Insurance Rate

<sup>6</sup> Incentives

<sup>7</sup> System Advisor Model

<sup>1</sup> Collector

<sup>2</sup> Tank

مناطق با عرض جغرافیایی کم، نزدیک به عرض جغرافیایی و برای مناطق با عرض جغرافیایی بیشتر، کمتر از عرض جغرافیایی می‌باشد.

بهینه‌سازی زاویه قرارگیری کلکتور برای دریافت حداکثر انرژی تابشی خورشیدی با متغیر گرفتن هردو زاویه شیب کلکتور و زاویه جنوبی کلکتور توسط هیچ یک از مقالات موجود در ادبیات موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین هیچ یک از مقالات نرخ بیمه و تاثیر مشوق‌ها را به عنوان پارامتر اقتصادی و تاثیر آن بر جریان نقدی پروژه، در نظر نگرفته اند. مشوق‌ها امری رایج در سرمایه‌گذاری‌های اقتصادی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر هستند. برای مثال در کشور چین که در بهره‌وری از انرژی تجدیدپذیر بسیار پیشگام می‌باشد از سوی دولت و استان‌ها برای تشویق کردن مردم به استفاده هرچه بیشتر از انرژی تجدیدپذیر قوانین و سیاست‌های تشویقی وجود دارد [۱۹، ۲۰].

در این پژوهش شبیه‌سازی آبگرمکن با در نظرگیری اهداف ذکر شده و با در نظر گرفتن ۳ پارامتر جغرافیایی، طراحی و اقتصادی انجام می‌گیرد.

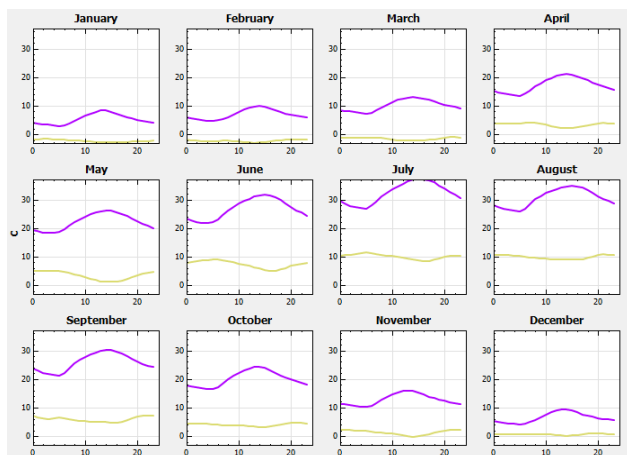
### ۳- پارامترهای مساله

به عنوان ورودی مساله به اطلاعات دقیقی از جمله پارامترهای جغرافیایی، پارامترهای طراحی آبگرمکن و پارامترهای اقتصادی احتیاج داریم که به این موارد در قسمت‌های ۳-۱ و ۳-۲ و ۳-۳ به صورت مجزا می‌پردازیم.

#### ۳-۱: پارامترهای جغرافیایی

برای شبیه‌سازی آبگرمکن خورشیدی، باید ویژگی‌های آب و هوایی و جغرافیایی منطقه مورد نظر در نظر گرفته شود. در این تحقیق شهر تهران در کشور ایران بعنوان مطالعه موردی مورد بررسی قرار گرفته است. شهر تهران دارای عرض جغرافیایی ۳۶ درجه، طول جغرافیایی ۵۱ درجه (شکل ۱)، ارتفاع از سطح دریاهای آزاد ۱۱۹۰ متر و میانگین دمای ۱۸ درجه سانتی‌گراد است.

خانه خورشیدی در انستیتو تکنولوژی ماساچوست آمریکا ساخته شد [۳]. گرمایش آب برای اهداف خانگی در حال حاضر از پرکاربردترین راه‌های استفاده از انرژی خورشیدی است. به طور مثال اردن از جمله کشورهایی است که از انواع آبگرمکن خورشیدی استفاده می‌کنند به طوری که در این کشور حدود ۲۴ درصد از مصرف آبگرم خانگی خود را از این طریق تامین می‌کنند [۴، ۵]. آبگرمکن خورشیدی از جمله تجهیزاتی است که طی سال‌های اخیر مورد مطالعه محققین قرار گرفته و در طرح‌های گوناگونی ارائه گردیده است. مطالعات زیادی توسط سولیوتیس و همکاران [۶-۸]، کاریسیس و همکاران [۹] در مورد عملکرد اجزای آبگرمکن خورشیدی برای افزایش راندمان صورت گرفته است. هو و چن [۱۰] و المدانی [۱۱] در مورد انواع کلکتورهای خورشیدی به مطالعه پرداختند. مطالعات زیادی توسط موریسون [۱۲، ۱۳]، ژانگ و یاماگوچی [۱۴]، هانگ [۱۵] و لی و همکاران [۱۶] در مورد انواع مختلف آبگرمکن خورشیدی جهت بالا بردن راندمان، کم کردن هزینه‌ها و کوچکتر شدن اندازه آبگرمکن انجام شده است، که دو عامل بسیار مهم جهت رسیدن به اهداف فوق، کاهش اتلاف حرارتی از آبگرمکن و کاهش درجه حرارت آبگرم مصرفی و رساندن آن به اندازه معقول می‌باشد. بازده کلکتورهای خورشیدی وابستگی زیادی به شار تشعشع ورودی به آنها دارد. بنابراین لازم است زاویه کلکتور با افق به گونه‌ای تعیین شود که بیشترین شار تشعشعی خورشید به آنها برسد. گونرهان و هپباسلی [۱۷] زاویه بهینه کلکتورهای خورشیدی را در از میر ترکیه با کمک داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی برای یک دوره سه ساله تعیین نمودند. آنها زاویه بهینه سالانه را برابر ۳۶/۶ درجه گزارش نمودند. سیرکی و پیلا [۱۸] زاویه بهینه صفحات خورشیدی را برای کاربردهای شهری در عرض‌های جغرافیایی مختلف تعیین نمودند. آنها گزارش کردند که زاویه بهینه وابسته به عرض جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی مناطق مختلف می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج آنها زاویه بهینه سالانه برای

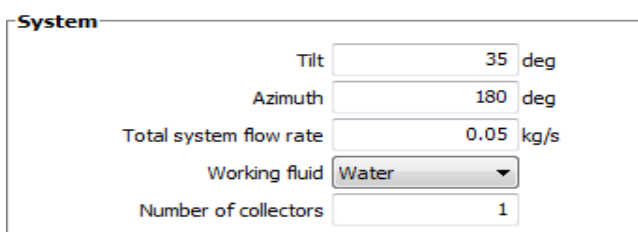


شکل ۳: میانگین دمای خشک و تر شهر تهران به صورت تفکیک‌شده در ماه‌های سال

در شکل ۳ رنگ بنفش دمای خشک شهر تهران و رنگ زرد، دمای تر این شهر را نشان می‌دهند.

### ۲-۳: پارامترهای طراحی

به عنوان قاعده کلی در نصب آبرگمکن خورشیدی، زاویه شیب کلکتور با افق را برابر عرض جغرافیایی محل مورد نظر در نظر می‌گیرند و برای زاویه جنوبی کلکتور، طراحان سیستم این زاویه را برابر ۱۸۰ درجه و یا رو به خط استوا در نظر می‌گیرند [۲۴]. میزان جریان سیال در حلقه کلکتور در زمان کارکرد برابر ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه در نظر گرفته می‌شود. سیال عامل آب [۲۵] و تعداد کلکتور، یک عدد در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴).



شکل ۴: پارامترهای طراحی آبرگمکن خورشیدی

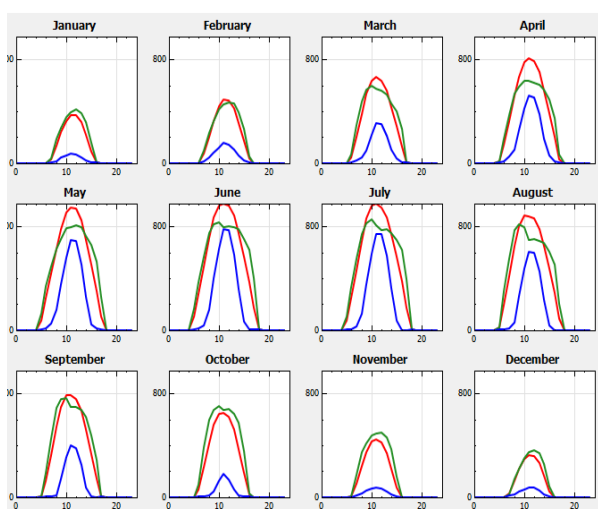
### ۳-۳: پارامترهای اقتصادی

برای پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر همواره اقتصاد مسئله مورد نظر کارشناسان بوده است. در این مقاله نیز پارامترهای اقتصادی به کار رفته به صورت زیر شرح داده



شکل ۱- نقشه جغرافیایی شهر تهران

برای شبیه‌سازی آبرگمکن خورشیدی در یک مکان به عنوان ورودی مساله به اطلاعات جغرافیایی دقیقی از جمله میزان تابش خورشید و میانگین دما در ماه‌های مختلف سال نیاز داریم [۲۱] که این اطلاعات در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. فرمت تمامی نمودارها در نرم‌افزار باید به صورت EPW<sup>۸</sup> باشد. در شکل ۲، رنگ قرمز تابش کل خورشید و رنگ سبز تابش مستقیم و رنگ آبی تابش پراکنده خورشید را نشان می‌دهد. شدت کل تابش خورشید به صورت سالیانه اغلب برای تخمین زدن انرژی تولیدی سالیانه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲، ۲۳].



شکل ۲: شدت تابش خورشید در ماه‌های مختلف سال در شهر تهران

<sup>8</sup> Energy Plus Weather

بخشی از این مشوقها در ابتدای پروژه به سرمایه گذاران اعطا می گردد. در این مقاله فرض شده است که همانند کشور چین، ۳۰ درصد هزینه سرمایه گذاری اولیه بعنوان مشوق دولتی و ۲۰ درصد نیز توسط مشوق استانی به سرمایه گذار اعطا می شود. همچنین در این کشور سالانه ۱٫۵ درصد مبلغ مشوق دولتی و ۱ درصد مبلغ مشوق استانی به عنوان مالیات از سرمایه گذار اخذ می گردد. با نظر خبرگان، نرخ بیمه نیز در هر دوره برابر ۱ درصد کل هزینه سرمایه گذاری اولیه در نظر گرفته شده است. با استفاده از نمودارهای تابش خورشید و دمای مکان مورد نظر و همچنین در نظر گرفتن پارامترهای طراحی و اقتصادی پروژه به عنوان ورودی مسئله در مراحل بعدی به شبیه سازی و تحلیل اقتصادی پروژه به عنوان خروجی مساله با نرم افزار SAM می پردازیم.

#### ۴- شبیه سازی آبگرمکن خورشیدی

برای شبیه سازی آبگرمکن خورشیدی، ابتدا باید میزان آب گرم مورد نیاز برای ساختمان مورد نظر محاسبه گردد و سپس متناسب با مقدار آب گرم، مشخصات فنی و ظرفیت آبگرمکن توسط نرم افزار شبیه سازی می گردد. برای تعیین میزان آبگرم مصرفی در ساختمانهای مختلف، جداولی توسط انجمنهای مهندسی تاسیسات کشورهای اروپایی و آمریکا در کتب راهنما ارائه گردیده است که طبعاً بر پایه عادات ملی و فرهنگی کشور مورد نظرشان می باشد [۲۷]. از آنجائیکه در ایران مطالعه جامعی در مورد میزان مصرف آبگرم صورت نگرفته و از طرفی با توجه به گوناگونی آب و هوا در نقاط مختلف ایران و عادات مختلف مردم ساکن این مناطق، تعیین میزان واقعی مصرف آبگرم بسیار دشوار است [۲۷]، ناگزیریم همان جداول خارجی را مبنای محاسبات قرار داده و تجربیات و مشاهدات کارشناسان ایرانی را نیز در این امر دخالت دهیم. میزان آبگرمی که در جدول ۱ برای مصارف مختلف پیشنهاد

می شوند. با توجه به مشخصات ارائه شده در قسمت طراحی، میزان سرمایه گذاری اولیه مورد نیاز توسط نرم افزار محاسبه می شود که در بخش شبیه سازی به عنوان خروجی نشان داده خواهد شد.

معمولاً دولتها در راستای حمایت از انرژیهای تجدید پذیر وامهای با بهره پایین به سرمایه گذاران در این بخش ارائه می دهند. در شکل ۵، درصدی از هزینه نصب پروژه که وام گرفته می شود با تعداد سال مورد نیاز به بازپرداخت وام<sup>۹</sup> و همچنین بهره وام که سالیانه باید پرداخت گردد به ترتیب آورده شده است.

#### -Residential Loan Parameters

Debt Fraction	50.00	%
Loan Term	15	years
Loan Rate	7.00	%/year

شکل ۵: پارامترهای وام دریافتی پروژه

با نظر خبرگان، نرخ وام ۷ درصد در نظر گرفته می شود. تعداد سال تحت پوشش برای تجزیه و تحلیل این پروژه ۱۰ سال در نظر گرفته می شود. نرخ سالیانه تغییر در هزینهها یا بعبارتی نرخ تورم<sup>۱۰</sup>، ۲۵ درصد در نظر گرفته می شود. با توجه به ماهیت انرژیهای تجدیدپذیر حمایت از این نوع انرژی به منظور توسعه پایدار بسیار کارآمد می باشد [۲۶]. برای مثال در کشور چین که در بهرهوری از انرژی تجدیدپذیر بسیار پیشگام می باشد از سوی دولت و استانهایش برای تشویق کردن مردم به استفاده هرچه بیشتر از انرژی تجدیدپذیر قوانین و سیاستهای تشویقی وجود دارد [۱۹، ۲۰]. بنابراین جهت بالا بردن بهرهوری پروژه به استفاده از برخی حمایتها و مشوقها داریم. مشوقهای کلان اقتصادی به طور غیر مستقیم بر فضای اقتصادی پروژه تاثیر مثبت می گذارند. مشوقهای خرد مالی هم به طور مستقیم بر پروژه تاثیر گذارند. معمولاً

<sup>۹</sup> Loan

<sup>۱۰</sup> Inflation Rate

$$= 20 \times 2 + 3 \times 2 = 62 \text{ Litres per Hour}$$

$$= 617.40 \text{ Litres per Hour} = 163.1 \text{ GPH} \times 0.35$$

$$= 163.1 \times 1.25 = \text{ظرفیت منبع آبگرم}$$

$$= 203.87 \text{ لیتر} = 771.73 \text{ گالن}$$

با در نظر گرفتن مقدار واقعی مصرف آبگرم و ظرفیت منبع آبگرم، مشخصات آبگرمکن به صورت شکل ۶ شبیه-سازی شده است.

در شکل ۶، **SRCC** شماره کلکتور شرکت سازنده و **Type** نوع کلکتور می‌باشد. با توجه به پارامترهای ورودی مساله، نرم افزار ضریب بهره‌وری نوری کلکتور را ۰/۷۱۹ قرار داده است. همچنین، مقدار ۰/۰۹ برای ضریب اصلاح زاویه کلکتور، مقدار ۵/۳۱ برای ضریب اتلاف حرارتی و مقدار ۳/۷۳ برای مساحت کلکتور و سیال عامل بین کلکتور و مخزن که آب محاسبه شده است.

مخزن ذخیره و مبدل حرارتی از دیگر اجزای آبگرمکن خورشیدی می‌باشند. در شکل ۷ مشخصات مخزن و مبدل حرارتی آمده است. در این شکل به ترتیب، حجم مخزن بر حسب مترمکعب، قطر مخزن، ضریب اتلاف حرارتی مخزن، بازده مبدل حرارتی و دمای آبی که به دست مصرف‌کننده می‌رسد و ماکزیمم دمای مخزن نیز محاسبه شده است.

در شکل ۸ نیز موارد به ترتیب بیانگر طول و قطر لوله‌های به کار رفته و ضریب هدایتی عایق، ضخامت عایق و توان و بازده پمپ می‌باشد.

می‌گردد، حداکثر مقداری است که بر پایه استفاده مستمر در تمام ساعات روز تعیین گردیده است، ولی بدیهی است که میزان تقاضا برای آبگرم در تمام ساعات یکسان نیست بلکه در ساعاتی از روز این مقدار حداکثر و در ساعاتی دیگر حداقل و حتی صفر است. از طرفی تمام وسایل بهداشتی موجود در ساختمان در آن واحد و به طور همزمان مشغول به کار نمی‌باشند، بنابراین انجام محاسبات مربوط به آبگرم مصرفی اعم از اندازه‌گیری لوله‌ها، حجم منبع و بار حرارتی آبگرم مصرفی بر مبنای حداکثر مصرف، معقول به نظر نمی‌رسد. برای پی بردن به میزان واقعی مصرف که می‌تواند اساس محاسبات قرار گیرد، در جدول ۱ ضریبی بنام ضریب تقاضا<sup>۱۱</sup> ارائه گردیده است که با ضرب کردن آن در ارقام ارائه شده برای حداکثر آبگرم مصرفی، مقدار واقعی مصرف آبگرم ساختمان مورد نظر بدست می‌آید. برای تعیین حجم منبع آبگرم مصرفی، ضریبی تحت عنوان ضریب ذخیره منبع<sup>۱۲</sup> در جدول ۱ ارائه شده است که با ضرب کردن آن در مقدار واقعی مصرف آبگرم، حجم منبع آبگرم بدست می‌آید. ساختمان مورد نظر در این پژوهش، ساختمان دو طبقه در شهر تهران و با کاربری مسکونی می‌باشد. برای هر طبقه، یک دستشویی و توالت، یک وان و دوش حمام، یک سینک ظرفشویی و ماشین ظرفشویی و یک ماشین لباسشویی در نظر گرفته می‌شود.

$$\text{حداکثر مصرف} = \text{مقدار واقعی مصرف آبگرم} \times (\text{ضریب تقاضا}) \times \text{آبگرم}$$

(رابطه ۱)

$$\text{حداکثر مصرف آبگرم} = \text{ظرفیت منبع آبگرم} \times (\text{ضریب ذخیره منبع}) \times \text{ضریب تقاضا}$$

(رابطه ۲)

با در نظر گرفتن روابط ۱ و ۲ مقدار واقعی مصرف آبگرم و ظرفیت منبع آبگرم برای هر طبقه به صورت زیر محاسبه می‌گردد.

<sup>11</sup> Demand Factor

<sup>12</sup> Storage Factor

جدول ۱: میزان مصرف آبگرم بر حسب نوع ساختمان و نوع وسایل بهداشتی [۲۷]

نوع ساختمان	وسيلة بهداشتی	حداکثر مصرف آبگرم بر حسب گالن بر ساعت [GPH]									مصرف آبگرم در روز	مصرف آبگرم در ماه	
		دشویی و توالت	دشویی و حمام	دشویی و حمام	دشویی و حمام	دشویی و حمام	دشویی و حمام	دشویی و حمام	دشویی و حمام	دشویی و حمام			
آپارتمان		3	5	20	100	10	15	20	25	75	3	0.35	1.25
منزل مسکونی		3	-	20	100	10	15	20	25	75	3	0.35	1.25
هتل		3	10	20	100	20	30	50-150	35	150	3	0.35	0.8
ورزشگاه		3	10	30	300	-	-	-	-	-	12	0.40	1
بیمارستان		3	8	20	100	20	20	50-150	35	150	3	0.50	0.6
کلوب		3	8	20	200	20	20	50-150	35	150	3	0.30	0.9
کارخانجات		3	15	-	300	-	20	20-100	-	-	12	0.60	1
ادارات		3	8	-	-	20	20	-	-	-	-	0.30	2
مدارس		3	15	-	300	20	20	20-100	-	-	-	0.60	1
خوابگاه دانشجویی		3	10	30	200	20	20	50-150	30	100	12	0.4	1
رستورانها:		شستشوی دست			شستشوی ماشین ظرفشویی								
برای هر پرس غذا		1.5			2.5						0.3	1.25	

SRCC #	1981085D	Area	3.73 m <sup>2</sup>	FRta	0.719	Test fluid	Water
Type	Glazed Flat-Plate	IAM	0.09	FRUL	5.31 W/m <sup>2</sup> .C	Test flow	0.056 kg/s

شکل ۶: مشخصات کلکتور خورشیدی

**Solar Tank and Heat Exchanger**

Solar tank volume	0.77 m <sup>3</sup>
Solar tank height to diameter ratio	3
Solar tank heat loss coefficient (U value)	3.6 W/m <sup>2</sup> .C
Solar tank maximum water temperature	80 C
Heat exchanger effectiveness	0.75 0..1
Outlet set temperature	60 C
Ambient temperature in mechanical room	30 C

شکل ۷: مشخصات مخزن و مبدل حرارتی آبگرمکن خورشیدی

**Piping and Pumping**

Total piping length in system	2.5 m
Pipe diameter	0.03 m
Pipe insulation conductivity	0.03 W/m.C
Pipe insulation thickness	0.01 m
Pump power	30 W
Pump efficiency	0.85 0..1

شکل ۸: مشخصات پمپ و لوله آبگرمکن خورشیدی

Total Installed Cost	\$ 420.31
Total Installed Cost per Capacity (\$/Wt)	\$ 0.20

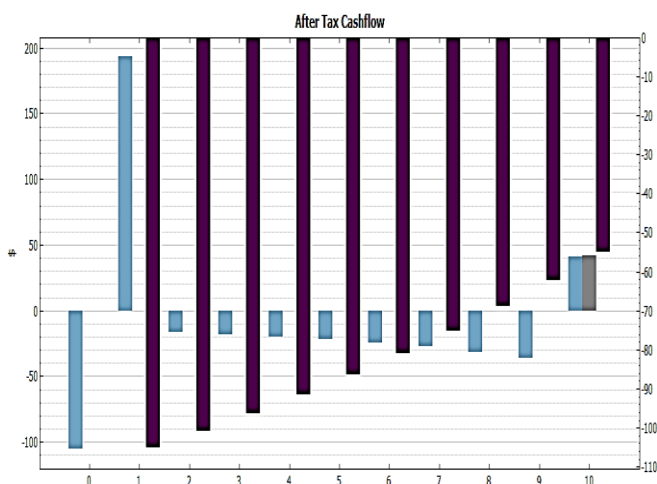
شکل ۹: هزینه کل نصب آبگرمکن خورشیدی



	Monthly Energy (kWh)
1	111.827
2	109.804
3	130.961
4	129.364
5	131.212
6	117.739
7	119.858
8	117.428
9	114.826
10	118.462
11	100.096
12	92.9722

شکل ۱۰: نمودار ذخیره انرژی آبگرمکن خورشیدی در ماه‌های مختلف سال

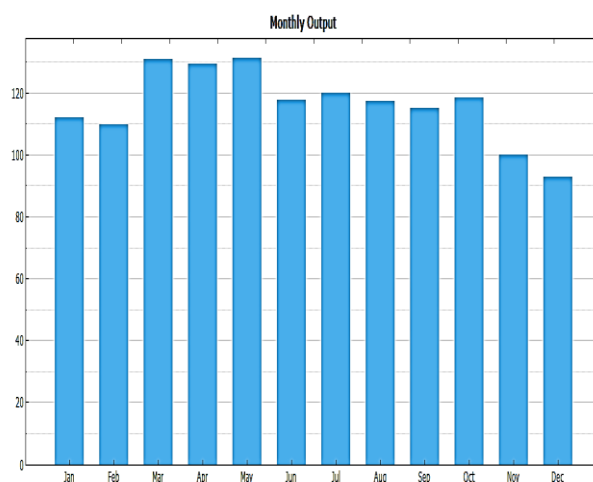
در شکل ۱۱ ستون آبی، جریان مالی پروژه<sup>۱۳</sup> در طول تجزیه و تحلیل آبگرمکن خورشیدی را نشان می‌دهد. جریان نقدی پروژه در سال دهم بیشترین مقدار می‌باشد. این امر به دلیل ارزش اسقاطی پروژه<sup>۱۴</sup> (ستون طوسی رنگ در شکل) است که در سال آخر به میزان ۱۰ درصد از هزینه کل احداث پروژه محاسبه می‌گردد. ارزش اسقاطی هزینه عملیاتی را در سال آخر تجزیه و تحلیل کاهش می‌دهد. ستون بنفش در شکل میزان وضعیت پرداختی پروژه<sup>۱۵</sup> با توجه به نرخ سالیانه بهره که باید پرداخت گردد را نشان می‌دهد.



با در نظر گرفتن هزینه‌های اجزای آبگرمکن خورشیدی و همچنین هزینه‌های نصب و تعمیر و نگهداری، کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه‌ی این پروژه (شکل ۹) ۴۲۰/۳۱ هزار دلار محاسبه می‌گردد.

## ۵- تحلیل اقتصادی آبگرمکن خورشیدی با نرم-افزار System Advisor Model (SAM)

در این قسمت، بعد از طراحی و شبیه‌سازی آبگرمکن خورشیدی به تحلیل اقتصادی آن توسط نرم‌افزار SAM می‌پردازیم. در ابتدا به بررسی میزان ذخیره انرژی آب در ماه‌های مختلف می‌پردازیم. در این بخش، مقدار زاویه کلکتور با افق ۳۵ درجه در نظر گرفته شد (برابر با عرض جغرافیایی شهر تهران). همچنین زاویه جنوبی کلکتور هم ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شد. شکل ۱۰ نمودار ذخیره انرژی آبگرمکن خورشیدی در ماه‌های مختلف سال را نشان می‌دهد. در ماه‌هایی که شدت تابش خورشید بیشتر است انرژی بیشتری قابل استحصال و ذخیره‌سازی است. برای مثال در ماه مرداد انرژی و شدت تابش خورشید در شهر تهران نسبت به دیگر ماه‌های سال بیشتر است و به همین دلیل انرژی بیشتری هم از کلکتور آبگرمکن خورشیدی قابل ذخیره‌سازی است.



<sup>13</sup> After tax cash flow

<sup>14</sup> Net salvage value

<sup>15</sup> Debt balance



	Federal tax savings (\$)	State tax savings (\$)	Insurance expense (\$)
1	0	0	0
2	124.943	84.1366	4.20315
3	0.104883	0.070628	5.25394
4	0.100232	0.067496	6.56742
5	0.095255	0.0641448	8.20928
6	0.0899301	0.060559	10.2616
7	0.0842324	0.0567221	12.827
8	0.0781359	0.0526167	16.0337
9	0.0716126	0.048224	20.0422
10	0.0646327	0.0435237	25.0527
11	0.0571641	0.0384944	31.3159

شکل ۱۲: نمودار درآمد مالی دولت و استان و بیمه به عنوان مشوق‌های پروژه

### ۶- تحلیل زاویه قرارگیری کلکتور

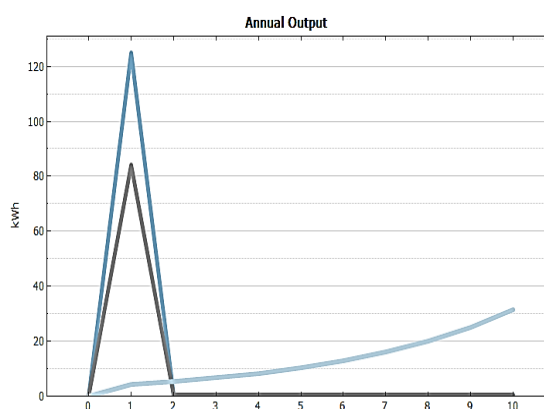
در این بخش زاویه قرارگیری کلکتور به ازای زوایای مختلف مورد تحلیل قرار می‌گیرد و زاویه‌ی مناسب آن تعیین می‌شود. در این آزمایش، مقدار اولیه زاویه کلکتور با افق ۳۵ درجه در نظر گرفته شد (برابر با عرض جغرافیایی شهر تهران). همچنین زاویه جنوبی کلکتور هم ۱۸۰ درجه در نظر گرفته شد. حال برای تعیین زاویه بهینه کلکتور با افق به بررسی و تحلیل زوایا در گستره عرض جغرافیایی می‌پردازیم و نتایج را تحلیل خواهیم نمود. ابتدا زاویه کلکتور نسبت به افق را متغیر و زاویه جنوبی کلکتور را ثابت در نظر می‌گیریم تا زاویه بهینه کلکتور با افق و ارتباط با عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه معین گردد. برای این کار به بررسی زاویه کلکتور در گستره ۲/۵ درجه با عرض جغرافیایی شهر تهران می‌پردازیم و نتایج را به صورت انرژی ذخیره شده سالیانه توسط کلکتور در شکل ۱۳ می‌آوریم.

	After tax cash flow (\$)	Debt balance (\$)	Net salvage value (\$)
1	-105.079	0	0
2	193.339	-105.079	0
3	-16.6155	-100.897	0
4	-17.9368	-96.4229	0
5	-19.587	-91.6354	0
6	-21.6482	-86.5128	0
7	-24.2231	-81.0316	0
8	-27.4401	-75.1668	0
9	-31.4594	-68.8914	0
10	-36.4817	-62.1767	0
11	41.3057	-54.992	42.0315

شکل ۱۱: نمودار جریان نقدی پروژه و نرخ وام و ارزش اسقاطی در طول آنالیز آبرمکن خورشیدی

در شکل ۱۲ خطوط آبی پررنگ و طوسی درآمد حاصل از تشویقات دولت و استان که در قسمت پارامتر اقتصادی ذکر گردید را نشان می‌دهد. این درآمد به صورت درصدی از هزینه کل احداث پروژه محاسبه می‌گردد که برای دولت حدود ۱۲۶ دلار و برای استان ۸۴ دلار محاسبه شده است. بیمه که در شکل با رنگ آبی کم‌رنگ مشخص است که مقدار آن با توجه به افزایش نرخ تورم به صورت سالیانه محاسبه می‌گردد.

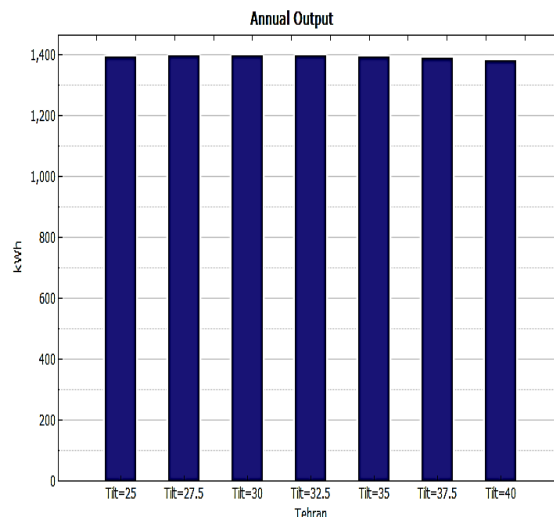
به طور کلی میزان انرژی سالیانه حاصل از شبیه‌سازی آبرمکن خورشیدی ۱۳۹۴/۵۵ کیلووات ساعت می‌باشد و نکته قابل توجه در این پروژه این است که هیچ سوخت فسیلی مصرف نمی‌گردد بلکه انرژی مصرفی، انرژی پاک و دائمی خورشیدی است.



	A	B
1	Parameterized Input(s)	Annual Energy (kWh)
2	Azimuth=170	1400.75
3	Azimuth=175	1400.03
4	Azimuth=180	1397.99
5	Azimuth=185	1391.04
6	Azimuth=190	1370.43

شکل ۱۴: نمودار سالیانه ذخیره انرژی با زوایای جنوبی متغیر و زاویه شیب با افق ۳۲/۵ درجه برای شهر تهران

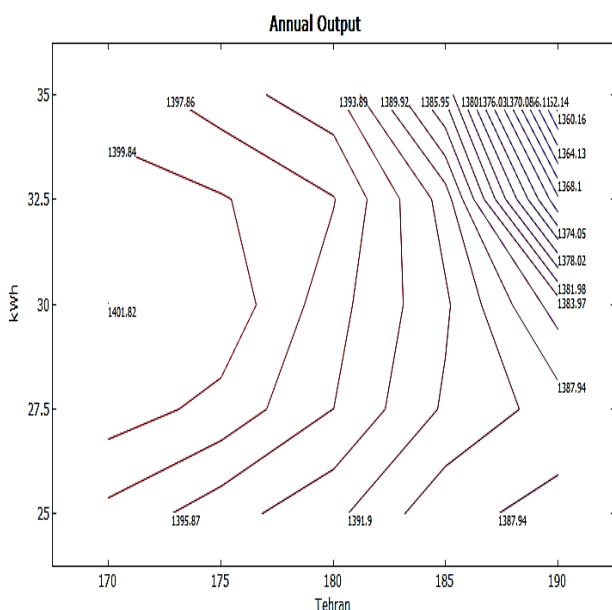
همانطور که شکل ۱۴ نشان می‌دهد با در نظر گرفتن زاویه شیب با افق ۳۲/۵ درجه، بیشترین ذخیره انرژی را در زاویه جنوبی کلکتور ۱۷۰ درجه داریم که مقدار آن ۱۴۰۰/۷۵ کیلووات ساعت است. در حالتی دیگر به بررسی زوایای متفاوت شیب با افق و زوایای متفاوت جنوبی می‌پردازیم. در این تحلیل تاثیر هر دو زاویه را با هم در نظر می‌گیریم.



	A	B
1	Parameterized Input(s)	Annual Energy (kWh)
2	Tilt=25	1392.43
3	Tilt=27.5	1395.87
4	Tilt=30	1396.64
5	Tilt=32.5	1397.99
6	Tilt=35	1394.55
7	Tilt=37.5	1388.99
8	Tilt=40	1381.26

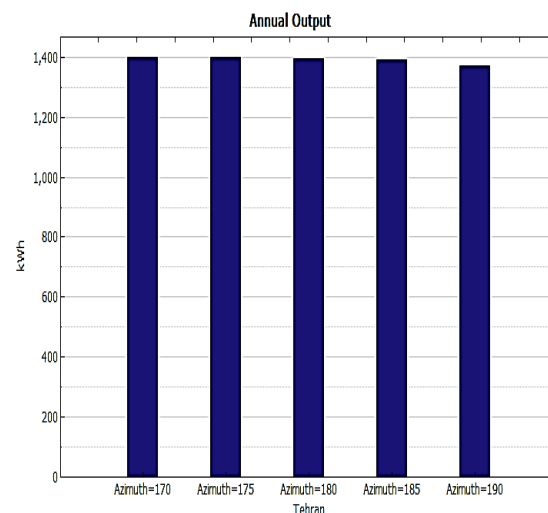
شکل ۱۳: نمودار سالیانه ذخیره انرژی با زوایای شیب متغیر و زاویه جنوبی ۱۸۰ درجه برای شهر تهران

همانطور که در شکل ۱۳ نمایان است بهترین زاویه شیب کلکتور با افق، زاویه ۳۲/۵ درجه و میزان انرژی ذخیره شده برابر ۱۳۹۷/۹۹ کیلووات ساعت می‌باشد. در گام بعدی به تحلیل زاویه جنوبی کلکتور می‌پردازیم. مشابه حالت قبل، این بار زاویه کلکتور با افق را ثابت در نظر می‌گیریم. نتایج به صورت نمودار در شکل ۱۴ آمده است.

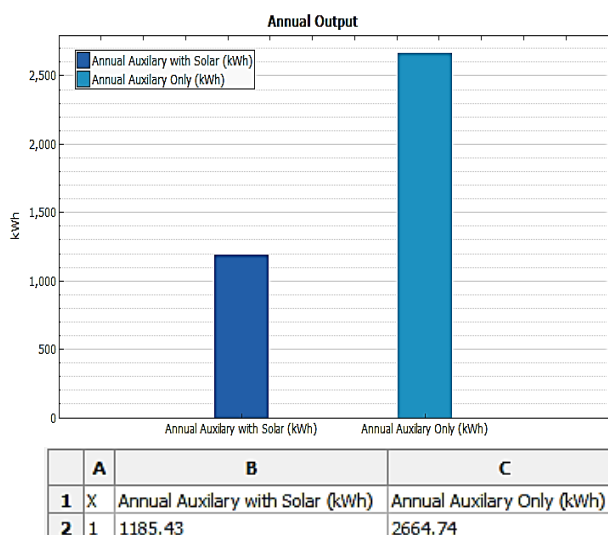


	A	B	C	D	E	F
1	Annual Energy (kWh)	170	175	180	185	190
2	25	1397.35	1394.73	1392.43	1388.5	1387.29
3	27.5	1400.86	1399.22	1395.87	1391.61	1389.04
4	30	1401.82	1401.34	1396.64	1392.22	1384.97
5	32.5	1400.75	1400.03	1397.99	1391.04	1370.43
6	35	1399	1396.79	1394.55	1383.61	1358.18

شکل ۱۵: نمودار سالیانه ذخیره انرژی با زوایای شیب با افق و زوایای جنوبی متفاوت برای شهر تهران



تابد از المنت برقی برای گرمایش آب داخل مخزن استفاده می‌کنیم. شکل ۱۷ انرژی الکتریکی مورد نیاز برای گرمایش آب را برای دو حالت، با کمک کلکتور خورشیدی<sup>۱۶</sup> و بدون کلکتور خورشیدی<sup>۱۷</sup> را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷: نمودار انرژی الکتریکی مورد نیاز برای گرمایش آب داخل مخزن

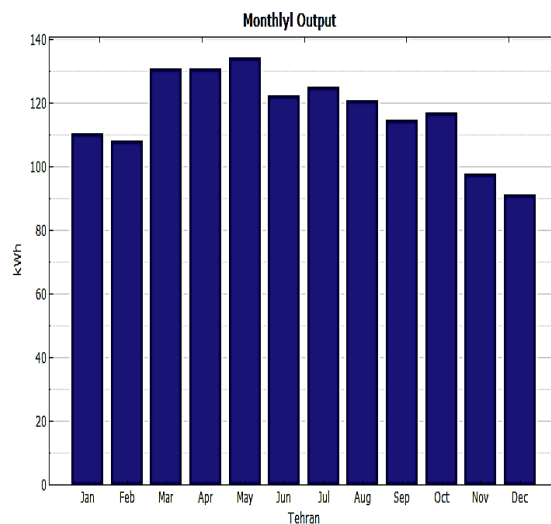
## ۷- نتیجه‌گیری

توسعه شگرف علم و فناوری در جهان امروز ظاهراً آسایش و رفاه زندگی بشر را موجب شده است. لیکن این توسعه‌یافتگی، مایه بروز مشکلات تازه‌ای نیز برای انسان‌ها شده است که از آن جمله می‌توان به آلودگی محیط زیست، تغییرات گسترده آب‌وهوایی و غیره اشاره نمود. سهم و جایگاه انرژی‌های تجدید پذیر در تامین انرژی مورد نیاز جهان بسیار رو به افزایش است. ضرورت این مساله در پایان پذیر بودن منابع فسیلی، همین‌طور آلودگی زیست‌محیطی ناشی از استفاده از سوخت‌های فسیلی نمایان می‌شود. در حال حاضر در جهان هزینه سرمایه‌گذاری در بخش انرژی‌های تجدیدپذیر رو به کاهش است. این امر به دلیل هزینه بالای احداث و بکارگیری پروژه‌های انرژی تجدیدپذیر است. در این مقاله

<sup>16</sup> auxiliary With Solar

<sup>17</sup> auxiliary Without Solar

همانطور که نتایج در شکل ۱۵ نشان می‌دهند، برای شهر تهران بیشترین ذخیره‌سازی انرژی توسط کلکتور را برای زاویه شیب با افق ۳۰ درجه و زاویه جنوبی ۱۷۰ درجه داریم که برابر ۱۴۰۱/۸۲ کیلووات ساعت می‌باشد. با یافتن زوایای بهینه کلکتور، انرژی ذخیره شده در ماههای مختلف سال به صورت شکل ۱۶ می‌باشد.



Monthly Energy (kWh)	
1	110.149
2	107.995
3	130.636
4	130.539
5	134.202
6	122.376
7	125.006
8	120.558
9	114.724
10	116.683
11	97.7823
12	91.1718

شکل ۱۶: نمودار ذخیره انرژی کلکتور در ماه‌های مختلف سال برای شهر تهران با زاویه شیب ۳۲ و زاویه جنوبی ۱۷۰ درجه

با مقایسه شکل ۱۶ که در آن زوایای بهینه به کار رفته است با شکل ۱۰، مشخص می‌گردد که میزان انرژی سالیانه ذخیره شده توسط کلکتور به اندازه ۷/۲۷ کیلووات ساعت بیشتر است.

همانطور که گفته شد از کلکتور خورشیدی برای گرمایش آب داخل مخزن استفاده می‌کنند. در حالتی دیگر در روزهایی که هوا ابری است و نور خورشید به کلکتور نمی‌-

که با در نظر گرفتن زوایای ۳۲ و ۱۷۰ درجه برای شهر تهران میزان ذخیره‌سازی انرژی برای کاربری مسکونی ۷/۲۷ کیلووات ساعت بیشتر از زوایای ۳۵ و ۱۸۰ درجه می‌باشد. در این تحقیق به شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی آبگرمکن خورشیدی برای کاربری مسکونی پرداخته شد؛ حال موارد ذکر شده، برای کاربری تجاری و صنعتی می‌تواند در زمینه تحقیقات آتی مورد مطالعه بیشتری قرار گیرد.

به شبیه‌سازی و تحلیل اقتصادی آبگرمکن خورشیدی با در نظر گرفتن پارامترهای جغرافیایی و طراحی و اقتصادی نظیر جریان مالی پروژه، ارزش اسقاطی و نرخ وام تواما با هم پرداخته شد. علاوه بر این پارامترهایی به عنوان مشوق اقتصادی و نرخ بیمه نیز مطرح گردید و اثرات متقابل آن بر پروژه و روند سوددهی محاسبه گردید که برای دولت حدود ۱۲۶ دلار و برای استان ۸۴ دلار درآمد حال از مشوق‌های مالی می‌باشد. علاوه بر این زاویه شیب و زاویه جنوبی بهینه کلکتور خورشیدی گفته شد و مشخص شد

## ۸- مراجع

- [1] Dent, C.M., *Wind energy development in East Asia and Europe*. Asia Europe Journal, 2013. **11**(3): p. 211-230.
- [2] Fokaides, P.A., et al., *Promotion of wind energy in isolated energy systems: the case of the Orites wind farm*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2013. **16**(3): p. 477-488.
- [۳] کتابشناسی: اصول و کاربرد انرژی خورشیدی. اقتصاد انرژی، ۱۳۸۱. ۷(۴): p. ۴۱-۴۲.
- [4] Akash, B.A. and M.S. Mohsen, *Energy analysis of Jordan's rural residential sector*. Energy Conversion and Management, 1999. **40**(12): p. 1251-1258.
- [5] Al-Ghandoor, A., et al., *Analysis of energy and exergy use in the Jordanian urban residential sector*. International Journal of Exergy, 2008. **5**(4): p. 413-428.
- [6] Souliotis, M. and Y. Tripanagnostopoulos, *Study of the distribution of the absorbed solar radiation on the performance of a CPC-type ICS water heater*. Renewable Energy, 2008. **33**(5): p. 846-858.
- [7] Tripanagnostopoulos, Y. and M. Souliotis, *Integrated collector storage solar systems with asymmetric CPC reflectors*. Renewable Energy, 2004. **29**(2): p. 223-248.
- [8] Tripanagnostopoulos, Y. and M. Souliotis, *ICS solar systems with two water tanks*. Renewable Energy, 2006. **31**(11): p. 1698-1717.
- [9] Gertzos, K.P. and Y.G. Caouris, *Optimal arrangement of structural and functional parts in a flat plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH)*. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008. **32**(5): p. 1105-1117.
- [10] Ho, C.D. and T.C. Chen, *The recycle effect on the collector efficiency improvement of double-pass sheet-and-tube solar water heaters with external recycle*. Renewable Energy, 2006. **31**(7): p. 953-970.
- [11] Al-Madani, H., *The performance of a cylindrical solar water heater*. Renewable Energy, 2006. **31**(11): p. 1751-1763.
- [12] Morrison, G.L., I. Budihardjo, and M. Behnia, *Water-in-glass evacuated tube solar water heaters*. Solar Energy, 2004. **76**(1-3): p. 135-140.
- [13] Morrison, G.L., I. Budihardjo, and M. Behnia, *Measurement and simulation of flow rate in a water-in-glass evacuated tube solar water heater*. Solar Energy, 2005. **78**(2): p. 257-267.

- [14] Zhang, X.R. and H. Yamaguchi, *An experimental study on evacuated tube solar collector using supercritical CO<sub>2</sub>*. Applied Thermal Engineering, 2008. **28**(10): p. 1225-1233.
- [15] Huang, B.J., J.P. Lee, and J.P. Chyng, *Heat-pipe enhanced solar-assisted heat pump water heater*. Solar Energy, 2005. **78**(3): p. 375-381.
- [16] Li, Y.W., et al., *Experimental performance analysis on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater*. Applied Thermal Engineering, 2007. **27**(17-18): p. 2858-2868.
- [17] Gunerhan, H. and A. Hepbasli, *Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications*. Building and Environment, 2007. **42**(2): p. 779-783.
- [18] Gharakhani Siraki, A. and P. Pillay, *Study of optimum tilt angles for solar panels in different latitudes for urban applications*. Solar Energy, 2012. **86**(6): p. 1920-1928.
- [19] Runqing, H., S. Peijun, and W. Zhongying, *An overview of the development of solar water heater industry in China*. Energy Policy, 2012. **51**: p. 46-51.
- [20] Xie, H., et al. *Review of solar obligations in China*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(1): p. 113-122.
- [21] [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm)
- [22] Kaldellis, J.K., K. El-Samani, and P. Koronakis, *Feasibility analysis of domestic solar water heating systems in Greece*. Renewable Energy, 2005. **30**(5): p. 659-682.
- [23] Li, H. and H. Yang, *Potential application of solar thermal systems for hot water production in Hong Kong*. Applied Energy, 2009. **86**(2): p. 175-180.
- [24] Gilbert.M.Masters, *Renewable and efficient electric power systems*. 2004.
- [25] Thirugnanasambandam, M., S. Iniyan, and R. Goic, *A review of solar thermal technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(1): p. 312-322.
- [26] Hernandez, P. and P. Kenny, *Net energy analysis of domestic solar water heating installations in operation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012. **16**(1): p. 170-177.

[۲۷] طباطبایی، س.م.، محاسبات تاسیسات ساختمان. تهران، ۲۰۰۲، ۷، تهران: انتشارات شرکت قلم.