

مناسب‌ترین روش ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در گلخانه با توجه به عوامل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی

شهرام کیانی^{۱*}، هوشنگ بهرامی^۲، مرتضی الماسی^۳ و محمدجواد شیخ داودی^۴

چکیده

این پژوهش با هدف یافتن مناسب‌ترین سامانه جذب انرژی خورشیدی برای استفاده در گلخانه انجام شد. برای این منظور ۵ گلخانه هر کدام با مساحت ۱۰ مترمربع در شهرستان ایذه ساخته شد. ۵ سامانه مجزا شامل سامانه‌های رایج، آبگرمکن خورشیدی، دیوار آبی، بستر سنگی و مواد تغییر فاز دهنده هر کدام در یک واحد گلخانه پیاده‌سازی شده و پژوهش در مدت شش ماه انجام گردید. عوامل فنی از جمله ایمنی کاربرد، عمر مفید، قابلیت اطمینان، سهولت نگهداری و تعمیرات در کنار عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی با آزمون دانکن مقایسه شده و در نهایت برای معرفی بهترین سامانه از تحلیل سلسه مراتبی استفاده شد. نتایج نشان داد که سامانه آبگرمکن خورشیدی هزینه و جذب انرژی بیشتر و متوسط زمان تعمیر کمتری داشته و روش مواد تغییر فاز دهنده کمترین فرکانس خرابی را داشته است. تحلیل سلسله مراتبی مناسب‌ترین سامانه را دیوار آبی و پس از آن آبگرمکن خورشیدی مشخص کرد. آبگرمکن خورشیدی اگرچه مصرف سوخت کمتری داشته، اما هزینه بالاتر، خدمات پس از فروش پایین‌تر و فرکانس خرابی و ضریب تکرار حادثه بیشتری از دیوار آبی داشته است. این روش می‌تواند با کاهش هزینه‌ها و بهبود خدمات پس از فروش برای استفاده در رتبه نخست قرار گیرد. قرار گرفتن روش سنتی در رتبه آخر نشان می‌دهد که این روش مناسب نبوده و در استفاده از آن باید تجدید نظر شود.

واژه‌های کلیدی: اقتصادی، انرژی خورشیدی، تحلیل سلسله مراتبی، زیست محیطی، فنی، گلخانه.

۱- دانشجوی دکتری مکانیزاسیون کشاورزی، گروه مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲- دانشیار گروه مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۳- استاد گروه مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۴- دانشیار گروه مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز.

* نویسنده مسئول: sh.kiani@izehiau.ac.ir

مقدمه

جمعیت جهان تا سال ۲۰۴۰، ده میلیارد نفر پیش‌بینی می‌شود (Mansoob & Abrishami, 2010). روند روزافزون جمعیت از سوئی و محدودیت منابع آب و خاک از سوی دیگر همواره توجه مسئولین را به یافتن راه‌حل‌هایی جدید برای تولید هرچه بیشتر محصولات کشاورزی در واحد سطح جلب کرده است. طبیعت تولید فصلی محصولات کشاورزی مشکل دیگری است که باعث ناهماهنگی زمانی در عرضه و تقاضای این محصولات می‌شود (Mansoob & Abrishami, 2012). گلخانه به دلیل توانایی افزایش طول زمان بهره‌برداری از زمین به ۱۲ ماه به جای یک فصل زراعی و همچنین توان کنترل بهتر عدم قطعیت‌های محیطی مانند عوامل اقلیمی مورد نیاز گیاه و رفع محدودیت‌ها، عملکرد محصول و کیفیت تولیدات را به نحو مؤثری بهبود بخشیده است (Taki et al 2012). صنعت گلخانه چند دهه است که به طور وسیع وارد ایران شده است و نسبت به تولید در فضای باز مزرعه سبب مصرف آب و نهاده‌های کمتر و افزایش تولید در واحد سطح شده است (Haj Seghti, 2011). با این حال مصرف بیشتر سوخت و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از عیب‌های تولید در گلخانه است (Mohammadi & Omid, 2010). آزادسازی قیمت سوخت‌های فسیلی رایج، پایان‌پذیری این نوع سوخت‌ها، موضوع آلودگی محیط‌زیست و نیاز روزافزون به تولید محصولات خارج از فصل، عوامل و محرک‌هایی هستند که ضرورت انجام پژوهش در خصوص انرژی جایگزین یا مکمل را برای تولید محصولات گلخانه‌ای نشان می‌دهد. پس در این پژوهش چهار سامانه ذخیره انرژی خورشیدی در کنار روش مرسوم گرم کردن گلخانه خیارسیز ساخته و از نظر اقتصادی، فنی و زیست‌محیطی ارزیابی شد. در نهایت برای معرفی بهترین روش ذخیره انرژی با توجه به همه عوامل فنی، اقتصادی و زیست محیطی مورد بررسی از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد.

مواد و روش‌ها

محل انجام آزمایش

این پژوهش در محوطه گلخانه‌های ساخته شده از سوی پژوهشگران در شهرستان ایذه اجرا شد (شکل ۱). شهرستان ایذه با ارتفاع ۸۳۵ متر از سطح دریا در شمال

شرق استان خوزستان قرار دارد. این شهرستان دارای زمستان به نسبت سرد است که دمای زیر صفر نیز در اواسط زمستان در آن ثبت شده است. بر اساس آمارهای هواشناسی سال ۱۳۸۹ تعداد روزهای بارندگی ۵۴ روز در سال و ساعت‌های آفتابی ۳۱۱۵ ساعت در سال بوده است. بر اساس آماربخش باغبانی اداره کشاورزی شهرستان ایذه تمام گلخانه‌های ساخته شده در این منطقه از نوع سازه تونلی بلند بوده و انرژی مرسوم مورد استفاده برای گرمایش گلخانه، انرژی حاصل از سوزاندن گازوییل است.



شکل ۱- نمای گلخانه‌های ساخته شده در پژوهش

این پژوهش به مدت شش ماه از تاریخ ۱۵ مهرماه ۱۳۹۲ تا ۱۵ فروردین ۱۳۹۳ اجرا شده که ساخت سازه‌ها، نصب تجهیزات و تهیه ابزار، مواد و آزمایش‌های مقدماتی تا ۱۵ آذرماه ۱۳۹۲ طول کشید. از ۱۵ آذر تا ۱۵ فروردین به مدت سه ماه انجام آزمایش‌ها و ثبت داده‌ها انجام و به طور کلی ۲۴ داده (هر هفته دوبار) جمع‌آوری شد. مقایسه‌ها و تحلیل آماری نیز با استفاده از طرح کاملاً تصادفی و آزمون دانکن انجام شد. بدین ترتیب انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی تیمارها را تشکیل می‌دهند.

روش‌های مورد بررسی در ذخیره انرژی

در راستای کاهش مصرف گازوییل و بهره‌برداری بیشتر از انرژی گرمایشی خورشید، چهار روش متفاوت علاوه بر روش رایج برای جذب و ذخیره انرژی خورشید برای گرمایش گلخانه استفاده شد. این روش‌ها عبارتند از:

- ۱- روش رایج با استفاده از گرمکن با سوخت گازوییل (شاهد)
- ۲- استفاده از آبگرمکن خورشیدی با مخزن و رادیاتور
- ۳- استفاده از دیوارهای آبی
- ۴- استفاده از بستر سنگی
- ۵- استفاده از ماده تغییر فاز دهنده.

تشعشع گرما از سنگ پس از شروع جذب گرما شروع می‌شود، سنگ‌های مورد استفاده در طول روز زیر پوشش تونل کوتاه از پلاستیک شفاف قرار گرفتند. در این پژوهش سنگ‌ها در فضای کف گلخانه به مساحت ۱۰ مترمربع و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر فرش شدند (شکل ۲). در روش مواد تغییر فاز دهنده از مواد گوناگونی مانند موم، فسفات سدیم دودکاهیدرات، تیوسولفات سدیم پنتاهیدرات، پارافین، سولفات سدیم دکاهیدرات و کلرید کلسیم هگزاهایدرات می‌توان استفاده کرد (Gitz & Bartuk, 2000) ولی این مواد دارای قیمت بالا بوده و دسترسی به آن‌ها برای کشاورزان مشکل است. پس از بررسی‌های زیاد برای تهیه جایگزین این مواد که هم خاصیت جذب و ذخیره‌سازی گرمای بالایی داشته باشد و هم با محیط‌زیست سازگار باشد، موم زنبور عسل انتخاب شد. شهرستان ایذه از نظر زنبورداری و تولید عسل رتبه اول را در استان خوزستان دارد بنابراین سالیانه حجم قابل توجهی از موم در این منطقه تولید می‌شود. شایان ذکر است که موم در ابتدا ذوب شده و سپس در ظروف سیاه رنگی ریخته شده و در ظروف مسدود شد. ظروف دارای موم که دیواره بیرونی آن‌ها برای جذب بهتر گرما با رنگ سیاه پوشش داده شده بود در فضای خالی گلخانه و بین ردیف‌های گلدان چیده شد (شکل ۲).



شکل ۲- سامانه ذخیره انرژی خورشیدی. از راست: الف) آبگرمکن خورشیدی، ب) بستر سنگی، ج) دیوار آبی، د) مواد تغییر فاز دهنده

جذب انرژی لحاظ شد. به عبارت دیگر، مصرف سوخت کمتر در یک سامانه نسبت به سامانه دیگر در شرایط مشابه نشان دهنده ذخیره‌سازی گرمای بیشتر به وسیله آن سامانه است. برای بررسی ایمنی کاربرد از شاخص "ضریب تکرار حادثه" استفاده شد که عبارت است از (Kazemi, 2010):

= ضریب تکرار حادثه

$$(1) \quad \frac{\text{تعداد کل حوادث زمان در معین} \times 1000}{\text{مجموع ساعات کار کلیه کارکنان در همان زمان}}$$

لازم به توضیح است در تمام این روش‌ها، بخاری گازیول سوز وجود داشت تا در صورت نیاز، کمبود احتمالی را در روزهایی که هوا ابری بود یا هنگام اتمام گرمای ذخیره شده جبران کند. تمام گلخانه‌ها علاوه بر تجهیزات اصلی مربوط به هر روش مجهز به تجهیزات مورد نیاز پژوهش مانند دماسنج و رطوبت سنج نیز بودند.

در روش رایج از یک دستگاه بخاری گازیول سوز مرسوم در گلخانه‌ها استفاده شد. سیستم آبگرمکن خورشیدی نصب شده (شکل ۲) در زمان تابش خورشید، انرژی گرمایی خورشید را جذب کرده و در آب ذخیره می‌کند. سپس در طول شب یا روزهای ابری و سرد، بر حسب نیاز و با توجه به تنظیمات از قبل انجام شده، انرژی گرمایی ذخیره شده را از طریق رادیاتور آزاد کرده و سبب گرمایش فضای گلخانه می‌شود.

در روش دیوار آبی برای ساخت دیوار آبی از مخازن پلاستیکی تیره‌رنگ پر از آب برای ذخیره انرژی خورشیدی استفاده شد (شکل ۲). برای جلوگیری از منتشر شدن گرمای جذب شده در مخازن در طول روز یک لایه پوشش پلاستیکی در اطراف دیوار آبی قرار گرفت و در هنگام شب یا وقت نیاز کنار زده می‌شد. در روش بستر سنگی برای ایجاد بستر سنگی و افزایش میزان جذب گرما از سنگ‌های تیره‌رنگ استفاده شد. به دلیل اینکه

بررسی روش‌های ذخیره انرژی از نظر فنی، اقتصادی

و زیست‌محیطی

بررسی فنی

شش ظرفیت جذب و ذخیره‌سازی گرما، ایمنی کاربرد، عمر مفید، قابلیت اطمینان، سهولت نگهداری و تعمیرات و خدمات پس از فروش، نقش جنبه فنی می‌باشند که در بررسی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفته شد.

برای بررسی ظرفیت جذب و ذخیره‌سازی گرما مصرف سوخت گازیول در هر روش مبنای توانایی سامانه برای

پرداخت شده برای سرمایه‌گذاری و تولید در یک پروژه هستند.

در انواع تولیدات صنعتی و کشاورزی مقدار کربن معادل منتشر شده به عنوان یکی از عوامل مهم مورد نظر قرار می‌گیرد (Tzanidakis et al. 2013). بدین ترتیب در این پژوهش در بررسی زیست محیطی همه روش‌ها از نظر میزان تولید CO₂ مورد بررسی و با حالت مرسوم که استفاده از گرمکن گازییل سوز است، مقایسه شدند.

معرفی مناسب‌ترین روش ذخیره انرژی با استفاده از

تحلیل سلسله مراتبی

پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی در تمام روش‌ها، در راستای معرفی مناسب‌ترین روش باید تصمیم‌گیری شود. با توجه به پیچیدگی و زیاد بودن عامل‌ها نمی‌توان به طور دقیق مشخص کرد که کدام روش بهتر است. زیرا ممکن است یک روش صرفه اقتصادی بهتر و دیگری ایمنی بیشتری داشته باشد. تحلیل سلسله مراتبی روشی است که امکان تصمیم‌گیری صحیح با حضور معیارهای کیفی و کمی و ترکیبی را فراهم می‌کند (Forman & Gass, 2001). در این روش یک مسئله پیچیده و گسترده به صورت سلسله مراتبی به معیارها و زیرمعیارها شکسته می‌شود (Tivari et al. 1999 and Saaty et al. 1994). شکل ۳ تصویر گرافیکی ارتباط سطوح و گزینه‌های این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است انتخاب مناسب‌ترین روش به عنوان سطح هدف و عوامل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی به عنوان معیارها در سطح اول قرار گرفته‌اند. عامل فنی دارای چند عامل دیگر است که به عنوان زیرمعیارها در سطح دوم قرار گرفته‌اند. در آخرین سطح لیست سامانه‌های مورد بررسی به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد. در این پژوهش میزان اهمیت هر خصوصیت با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و مصاحبه با متخصصین سازمان‌های کشاورزی و اساتید دانشکده‌های کشاورزی (متخصص در کشاورزی و انرژی) به دست آمد. برای دستیابی به وزن هر عامل از دید متخصصان در مرحله اول با پرسش‌نامه‌هایی از آن‌ها خواسته شد که ماتریس‌های مقایسه‌های زوجی هر سطح را تکمیل کنند (Turban, 1995). با جمع‌آوری مقایسه‌ها و میانگین‌گیری از هر سلول، عدد نهایی هر ماتریس به

هرچه ضریب تکرار حادثه کمتر باشد روش مورد استفاده ایمن‌تر خواهد بود.

عمر مفید عبارت است از محدوده زمانی که استفاده از یک سامانه از جنبه‌های مختلف اقتصادی و زیست‌محیطی باصرفه باشد. این فاکتور در این پژوهش بر اساس نظر سازندگان سامانه‌ها و استانداردهای حاکم بر آن‌ها ارزیابی شد. بدین ترتیب با استفاده از طیف لیکرت برای عمر مفید ۱-۳ سال (ضعیف) عدد ۱، ۳-۶ سال (متوسط) عدد ۲، ۶-۹ سال (خوب) عدد ۳، ۹-۱۲ سال (خیلی خوب) عدد ۴ و بیشتر از ۱۲ سال (عالی) عدد ۵ در نظر گرفته شد. برای سنجش قابلیت اطمینان از شاخص "فرکانس یا سرعت خرابی" استفاده شد که عبارت است از تعداد خرابی‌ها در واحد زمان یا به عبارتی (HajShirMohammadi, 2014):

= فرکانس خرابی

$$(۲) \quad \text{تعداد خرابی‌ها در یک سیکل زمانی}$$

جمع زمان سیکل

هرچه فرکانس خرابی بیشتر باشد، قابلیت اطمینان سیستم پایین‌تر خواهد بود. در این پژوهش با توجه به مدت زمان آزمایش‌ها، جمع سیکل زمان ۶ ماه در نظر گرفته شد. سهولت نگهداری و تعمیرات (نت) در بهره‌برداری از هر سامانه مکانیکی مزیت ارزشمندی محسوب می‌شود. یکی از شاخص‌های مهمی که در این رابطه استفاده شد، عبارت است از "متوسط زمان لازم برای تعمیر اضطراری" (HajShirMohammadi, 2014):

$$(۳) \quad Te = \frac{\sum_1^n T_i \lambda_i}{\sum_1^n \lambda_i}$$

که در آن Te متوسط زمان لازم برای تعمیر اضطراری، λ_i فرکانس (مثلاً بار در ماه) خرابی عنصر i و T_i متوسط زمان لازم برای تعمیر جزء یا عنصر i.

خدمات پس از فروش با توجه به نظر کارشناسان و تجربه کسب شده از سوی پژوهش‌گران در طول زمان آزمایش به هر سامانه، بررسی شد. برای ارزیابی این عامل با استفاده از طیف لیکرت برای خدمات پس از فروش عالی عدد ۵، خوب عدد ۴، به نسبت خوب عدد ۳، متوسط عدد ۲ و ضعیف عدد ۱ در نظر گرفته شد.

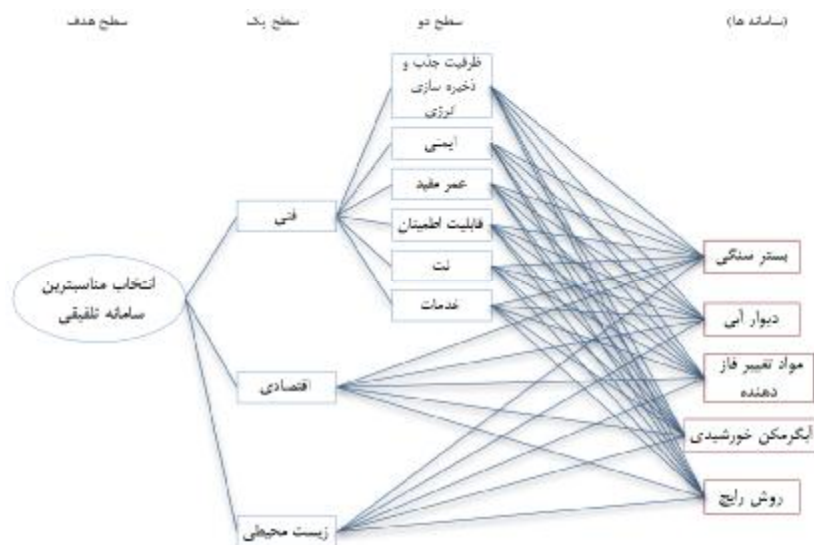
بررسی اقتصادی و زیست‌محیطی

برای مقایسه اقتصادی روش‌های ذخیره انرژی، مقدار و هزینه‌های مربوط به ورودی‌های لازم برای تولید محصول در نظر گرفته شد. در حقیقت این هزینه‌ها بیانگر مبالغ

عوامل فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی) ادغام شده و گزینه برتر که در حقیقت بهترین روش تولید انرژی برای گلخانه است مشخص می‌شود. با توجه به اینکه نظر متخصصان اهمیت هر معیار یا زیرمعیار را تحت تأثیر قرار می‌دهد، میزان حساسیت ارجحیت برترین روش به نظر متخصصان از طریق تحلیل حساسیت کنترل شد. در حقیقت تحلیل حساسیت میزان حساسیت برتری روش‌ها را نسبت به تغییر در وزن (تغییر در نظر متخصصان) معیارها و زیرمعیارها را نشان می‌دهد.

نرم‌افزار Expert Choice وارد شده و در نهایت وزن هر عامل به دست آمد. برای جلوگیری از مقایسه‌های متناقض و ناسازگار در ماتریس‌ها از ضریب ناسازگاری بهره گرفته شد. ساتی در سال ۱۹۸۰ مقدار قابل قبول آن را کمتر از ۰/۱ پیشنهاد می‌دهد (Saaty, 1980). اگر ضریب ناسازگاری بالاتر از ۰/۱ باشد از متخصص مذکور خواسته می‌شود که با دقت بیشتری مقایسه‌ها را انجام دهد و این عمل تا زمان رسیدن ضریب ناسازگاری به زیر ۰/۱ تکرار می‌شود.

پس از جمع‌آوری مقایسه‌های زوجی وزن عامل‌ها در سطوح مختلف (داده‌های قرار گرفته در سطوح مختلف



شکل ۳- تصویرگرافیکی ساختار درختی تحلیل سلسله مراتبی برای انتخاب مناسب‌ترین روش ذخیره انرژی. منبع داده پژوهش

جدول ۱- هزینه سامانه‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی

سامانه ذخیره انرژی	هزینه (ریال)
رایج	۲۳۰۱۴۷۵
آبگرمکن خورشیدی	۳۰۲۳۱۱۲۵
بستر سنگی	۳۸۱۱۶۹۰
دیوار آبی	۱۰۱۰۹۲۷۵
مواد تغییر فاز دهنده	۱۲۸۱۰۰۸۰

ارزیابی فنی

در جدول ۲ میانگین مصرف سوخت (میانگین حاصل از ۲۴ بار تکرار) در هر روش نشان داده شده است. بیشترین میزان روشن بودن بخاری مربوط به روش مرسوم و پس از آن دیوار آبی بوده است. روش آبگرمکن خورشیدی با

نتایج و بحث

ارزیابی اقتصادی

هزینه اولیه روش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که آبگرمکن خورشیدی با حدود ۳۰ میلیون ریال بیشترین هزینه و پس از آن مواد تغییر فاز دهنده و دیوار آبی به ترتیب با حدود ۱۲ و ۱۰ میلیون ریال بیشترین هزینه را دارند. کمترین هزینه متعلق به روش مرسوم است. شایان ذکر است که حدود ۶۰٪ از هزینه پرداخت شده در روش آبگرمکن خورشیدی به مخزن تعلق گرفته است که بیانگر این نکته است که در صورت عرضه این قسمت از دستگاه با قیمت پایین‌تر اثر چشم‌گیری در کاهش هزینه‌ها خواهد داشت.

نظرات کارشناسی و تجربیات پژوهشگر در طول پژوهش ارزیابی شد. بدین ترتیب خدمات پس از فروش روش‌های مرسوم، بستر سنگی و دیوار آبی "بهترین" و برای آبرگرمکن خورشیدی و مواد تغییر فاز دهنده "متوسط" بوده است. البته باید توجه شود که با توجه به تجهیزات مختلف مورد استفاده در آبرگرمکن خورشیدی، لزوم حمایت بیشتر شرکت‌های فروشنده این تجهیزات ضروری بوده و سبب استقبال بیشتری از آن خواهد شد.

ضریب تکرار حادثه نشان می‌دهد که روش‌های مرسوم، بستر سنگی و دیوار آبی کمترین ضریب تکرار حادثه را داشته و بنابراین ایمنی کاربرد بیشتری دارند. آبرگرمکن خورشیدی حوادث بیشتری از جمله رسیدگی‌های مکرر به لوله‌ها و رادیاتور داشته و بنابراین از نظر ایمنی کاربرد در رتبه آخر قرار دارد. فرکانس خرابی نشان می‌دهد که تعدد خرابی و لزوم بازرسی در روش آبرگرمکن خورشیدی با میزان ۱/۱۷ خرابی در ماه بیشتر از بقیه بوده است و کمترین آن (۰/۱۶۷ خرابی در ماه) به روش مواد تغییر فاز دهنده تعلق گرفته است. بنابراین میزان فرکانس خرابی بیانگر آن است که قابلیت اعتماد آبرگرمکن خورشیدی پایین‌تر از دیگر روش‌ها است. متوسط زمان تعمیر نشان می‌دهد که بیشترین زمان تعمیر مورد نیاز به روش‌های بستر سنگی و دیوار آبی به مقدار ۵۲ و ۴۵ دقیقه تعلق داشته است. شایان توجه است که روش آبرگرمکن خورشیدی کمترین متوسط زمان تعمیر را نیاز دارد. در حقیقت اگرچه فرکانس خرابی این روش بیشتر از بقیه بوده است، اما زمان به‌کار رفته در هر تعمیر زمان به نسبت کمی بوده است. البته باید توجه کرد که وجود نیروی متخصص و تعمیرکاران ماهر سبب می‌شود متوسط زمان مورد نیاز تعمیر کاهش یابد.

کمترین مدت زمان روشن بودن بخاری و در نتیجه کمترین میزان مصرف سوخت، حکایت از آن دارد که بیشترین ظرفیت جذب انرژی خورشیدی متعلق به این سامانه است.

نتایج تحلیل آماری با آزمون دانکن نشان می‌دهد که شرایط میزان ساعت‌های آفتابی، رطوبت داخل گلخانه برای تمامی روش‌ها یکسان بوده است. چون میزان روشن بودن بخاری با میزان مصرف سوخت در ارتباط است، نتایج تحلیل آماری آن‌ها نیز مشابه است. نتایج نشان می‌دهد که میزان مصرف سوخت در روش‌های سنتی و آبرگرمکن خورشیدی در هر دو سطح ۰/۰۵ و ۰/۰۱ با بقیه روش‌ها متفاوت بوده و در گروه‌های جداگانه‌ای قرار می‌گیرند. روش دیوار آبی و مواد تغییر فاز دهنده نیز در سطح ۰/۰۵ با یکدیگر تفاوتی ندارند. با این حال روش مواد تغییر فاز دهنده با بستر سنگی نیز در سطح ۰/۰۱ تفاوت معنی‌داری ندارد. نکته مهم در این قسمت این است که روش آبرگرمکن خورشیدی در عین حال که کمترین میزان مصرف سوخت (و کمترین ساعت‌های روشن بودن بخاری) و در نتیجه بیشترین ظرفیت جذب انرژی خورشیدی را دارد، با دیگر روش‌ها تفاوت کاملاً معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ داشته و در یک گروه جداگانه قرار گرفته است.

همان‌گونه که از قبل بحث شد عمر مفید با توجه به اطلاعات داده شده از سوی سازنده و نظرات کارشناسان (با استفاده از طیف لیکرت) محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که عمر مفید بستر سنگی و مواد تغییر فاز دهنده بیشتر از بقیه بوده و با این حال "عالی" نیست. در حقیقت عمر مفید داده شده برای این دو روش "متوسط" است. عمر مفید آبرگرمکن خورشیدی "ضعیف" و روش مرسوم و دیوار آبی "خیلی ضعیف" است. خدمات پس از فروش با توجه به

جدول ۲- عوامل مورد بررسی در ارزیابی فنی

عوامل	مرسوم	آبرگرمکن خورشیدی	دیوار آبی	بستر سنگی	مواد تغییر فاز دهنده
مدت زمان روشن بودن بخاری (h)	۱۳/۵ ^{a-A}	۵/۸۲ ^{b-B}	۸/۹۴ ^c	۱۱/۲ ^d	۹/۶۱ ^c
میزان مصرف سوخت (L)	۴/۰۵ ^{a-A}	۱/۷۵ ^{b-B}	۲/۶۵ ^{c-C}	۳/۳۴ ^{d-D}	۲/۸۸ ^{c-CD}
عمر مفید	۱	۲	۱	۳	۳
خدمات پس از فروش	۵	۴	۵	۵	۳
ضریب تکرار حادثه	۰/۱۱	۰/۴	۰/۲۷	۰/۲	۰/۳۲
فرکانس خرابی	۰/۵	۱/۱۷	۰/۳۳۳	۰/۳۳۳	۰/۱۶۷
متوسط زمان تعمیر (دقیقه)	۲۲	۱۵	۴۵	۵۲	۲۰

حروف کوچک مقایسه در سطح ۵ درصد و حروف بزرگ مقایسه در سطح ۱ درصد را نشان می‌دهند.

ارزیابی زیست محیطی

میزان گازهای منتشر شده بر اثر مصرف سوخت در روش‌های مختلف با توجه به میزان سوخت مصرف شده متفاوت است. بدین ترتیب بیشترین دی‌اکسید کربن معادل منتشر شده از روش مرسوم با میزان $20/53 \text{ kg}$ و کمترین آن با میزان $8/87 \text{ kg}$ از روش آبگرمکن خورشیدی بوده است. پس از آن بیشترین گاز منتشر شده به ترتیب از بستر سنگی و مواد تغییر فاز دهنده است. پس از نظر اثرات زیست‌محیطی، کمترین اثر را روش آبگرمکن خورشیدی دارد.

ارزیابی مناسب‌ترین روش ذخیره انرژی خورشیدی با به‌کارگیری تحلیل سلسله مراتبی

همان‌طور که مشخص است نتایج تا این مرحله نشان می‌دهد که روش‌های مورد بررسی از نظر فنی، اقتصادی و

زیست‌محیطی با یکدیگر متفاوت بوده و هر کدام در یک یا چند عامل بهتر از بقیه بوده‌اند. به عبارت دیگر در حال حاضر نمی‌توان یک روش را بهتر از بقیه معرفی کرد. بنابراین در اینجا از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده تا بتوان روش برتر برای ذخیره انرژی را شناسایی کرد. همان‌گونه که پیش از این بحث شد، در روش تحلیل سلسله مراتبی برای به دست آوردن بهترین گزینه (روش ذخیره انرژی) به عوامل مورد بررسی وزن داده می‌شود که این وزن‌ها بر اساس نظر متخصصان به دست می‌آید. بدین ترتیب پس از جمع‌آوری نظرات متخصصان وزن عامل فنی $0/391$ ، زیست‌محیطی $0/320$ و اقتصادی $0/289$ به دست آمد (شکل ۴). وزن‌ها نشان می‌دهند که عوامل فنی بیشترین اهمیت را از دید متخصصان داشته است و پس آن عامل زیست‌محیطی قرار گرفته است.

Priorities with respect to:
Goal: The Best Energy Method



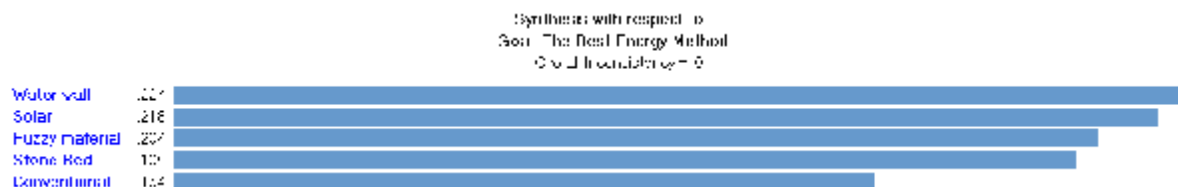
شکل ۴- وزن داده شده به عوامل فنی، زیست محیطی و اقتصادی با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی با اعمال نظر متخصصان

آبگرمکن خورشیدی در برخی فاکتورها ضعیف‌تر از روش دیوار آبی است و به نظر می‌رسد که این عوامل سبب شده‌اند که این روش در مکان دوم قرار گیرد. آبگرمکن خورشیدی اگرچه مصرف سوخت کمتری داشته، اما هزینه بالاتر، خدمات پس از فروش پایین‌تر و فرکانس خرابی و ضریب تکرار حادثه بیشتری داشته است. این روش می‌تواند با کاهش هزینه‌ها و بهبود خدمات پس از فروش در رتبه نخست استفاده قرار گیرد.

این رتبه‌بندی نشان می‌دهد که روش‌های مواد تغییر فاز دهنده و بستر سنگی قابلیت چندان برای استفاده ندارند. با توجه به اینکه هم اکنون بیشتر گلخانه‌های منطقه از روش سنتی بهره می‌برند در آخرین رتبه قرار گرفتن روش سنتی نشان می‌دهد که این روش مناسب نبوده و در استفاده از آن باید تجدید نظر شود.

به همین ترتیب وزن زیرگزینه‌های عامل فنی عبارتند از: مصرف سوخت $0/358$ ، فرکانس خرابی $0/173$ ، خدمات پس از فروش $0/156$ ، متوسط زمان تعمیر $0/120$ ، ضریب تکرار حادثه $0/117$ و عمر اقتصادی $0/076$. بدین ترتیب از دید متخصصان از بین عوامل فنی مهم‌ترین آن مصرف سوخت یا به عبارتی ظرفیت جذب انرژی بیشتر و کم اهمیت‌ترین آن عمر اقتصادی روش بوده است.

پس از اعمال نظرات متخصصان و ترکیب وزن‌ها با داده‌های واقعی هر روش، شکل ۵ از نرم‌افزار Expert Choice در نظر گرفته شد. در این شکل ترتیب (اولویت) روش‌ها از بهترین به بدترین مشخص شده است. بهترین گزینه به عنوان اولویت اول روش دیوار آبی و پس از آن آبگرمکن خورشیدی است. انتخاب هر یک از این دو گزینه می‌تواند مفید باشد. البته باید توجه کرد که

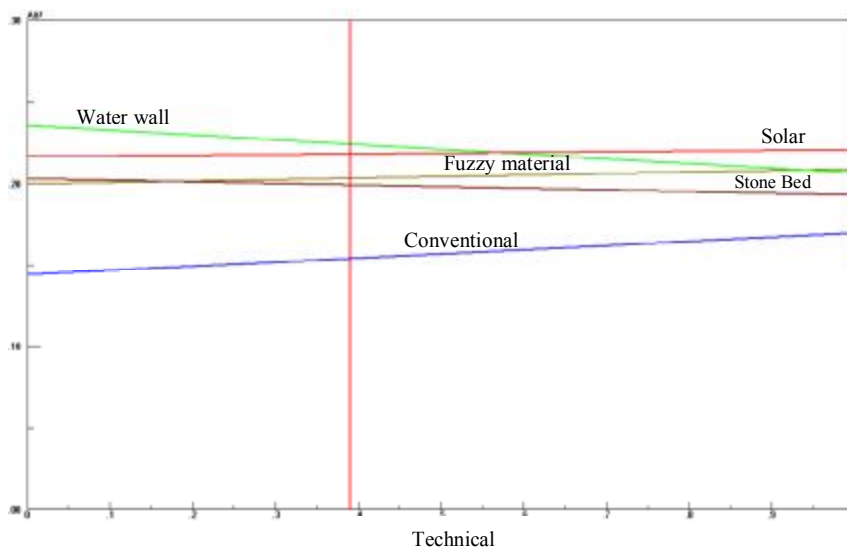


شکل ۵- اولویت روش‌های ذخیره انرژی با روش تحلیل سلسله مراتبی: دیوار آبی، آبگرمکن خورشیدی، مواد تغییر فاز دهنده، بستر سنگی، سنتی

تحلیل حساسیت ترتیب تیمارها به وزن عوامل اقتصادی و زیست‌محیطی نیز نشان داد که ترتیب روش‌های ذخیره انرژی به وزن‌های کنونی حساسیت نداشته و اگر وزن‌ها به ترتیب از ۰/۲۸۹ به حدود ۰/۳۲۰ و از ۰/۳۱۸ به ۰/۲۷۰ تغییر کند ترتیب روش‌ها تغییر خواهد کرد. به صورت مشابه حساسیت ترتیب روش‌های ذخیره انرژی خورشیدی نسبت به وزن هر یک از زیرمعیارهای عامل فنی نیز سنجیده شده و حساسیت قابل مشاهده‌ای پیدا نشد. عدم حساسیت نتایج تحلیل سلسله مراتبی و ترتیب روش‌ها به نظر متخصصان بیانگر آن است که اگر متخصصان دیگری نظرات کاملاً متفاوت داشته و وزن‌های متفاوتی ارائه کنند، تا جایی که وزن‌ها تغییر نکنند، نتایج ثابت خواهد بود. بنابراین با توجه به فاصله زیاد وزن‌های کنونی و وزنی که سبب تغییر اولویت روش‌ها می‌شود می‌توان انتظار داشت که در صورت دریافت نظرات به طور کامل کارشناسی و حتی متفاوت تغییری در اولویت روش‌ها رخ نخواهد داد. بدین ترتیب می‌توان به نتایج اطمینان کافی داشته و به این ترتیب دو روش دیوار آبی و آبگرمکن خورشیدی را به عنوان گزینه‌های مناسب معرفی کرد.

تحلیل حساسیت اولویت تیمارها به نظر متخصصان

تحلیل حساسیت میزان حساسیت برتری تیمارها را نسبت به تغییر در وزن معیارها و زیرمعیارها نشان می‌دهد. شکل ۶ حساسیت اولویت روش‌ها را به وزن داده شده به عامل فنی نشان می‌دهند. خط قرمز رنگ (خط پر عمودی) در این شکلوزن کنونی عامل فنی را نشان می‌دهد. اگر در نزدیکی این خط و با کم و زیاد شدن وزن این عامل، ترتیب اولویت تیمارها تغییر کند، می‌توان چنین برآورد کرد که ترتیب تیمارها به وزن داده شده به عامل حساس است و ممکن است با اندکی تغییر در نظر متخصصان و به تناسب آن تغییر در وزن عامل ترتیب روش ذخیره انرژی نیز تغییر کند. اما این شکل به خوبی نشان می‌دهد که در فاصله زیادی از وزن کنونی ترتیب روش‌ها ثابت مانده و اگر وزن شاخص از ۰/۳۹۱ به ۰/۱۰ تغییر کند (خط چین عمودی)، ترتیب روش‌ها تغییر می‌کند. در حقیقت می‌توان چنین برآورد کرد که ترتیب روش‌ها به وزن کنونی هیچ حساسیتی نداشته و به ترتیب کنونی با فاصله اطمینان زیادی می‌توان اعتماد کرد.



شکل ۶- تحلیل حساسیت نتایج تحلیل سلسله مراتبی به وزن داده شده به عامل فنی

energy inputs and yield of greenhouse cucumber production in Iran. *Applied Energy*, 87: 191-196.

8. Saaty T. L. 1994. How to make a decision: The analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24: 19-43.
9. Saaty T. L. 1980. *The Analytical hierarchy processes*. McGraw Hill, New York. 287 p.
10. Taki, M. AjabShirchi, Y. Abdi R. and Akbarpoor M. 2012. Analyzing efficiency of greenhouse cucumber using data envelopment analysis (Shahrreza case study). *Journal of farm machinery, Ferdosi University of Mashhad*, 2(1): 28-37. (In Farsi).
11. Tiwari, D. N. Loof, R. and Paudyal, G. N. 1999. Environmental-economic decision-making in lowland irrigated agriculture using multi-criteria analysis techniques. *Agricultural Systems*, 60: 99-112.
12. Turban, E. 1995. *Decision support and expert sustams*. Prentice-hall, Englewood Cliffs, NJ.
13. Tzanidakis, K. Oxley, T. Cockerill, T. and ApSimon, H. 2013. Illustrative national scale scenarios of environmental and human health impacts of carbon capture and storage. *Environ. Int.*, 56: 48e64.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج آبرگمکن خورشیدی بیشترین هزینه سرمایه‌گذاری را نیاز دارد و با این حال بیشترین ظرفیت جذب انرژی و کمترین دی‌اکسیدکربن معادل از این روش منتشر می‌شود. از نظر فنی بستر سنگی بیشترین عمر مفید و خدمات پس از فروش را داشته و البته بیشترین متوسط زمان تعمیر را نیز داشته است.

نتایج تحلیل سلسله مراتبی بهترین گزینه به عنوان اولویت اول روش دیوار آبی و پس از آن آبرگمکن خورشیدی را معرفی کرد. نکته مهم این است که آبرگمکن خورشیدی نسبت به دیوار آبی مصرف سوخت کمتر، اما هزینه بالاتر، خدمات پس از فروش پایین‌تر و فرکانس خرابی و ضریب تکرار حادثه بیشتری داشته است. بنابراین با توجه به اینکه این روش بیشترین ظرفیت جذب انرژی و همچنین کمترین متوسط زمان تعمیر را نیاز داشته با بهبود عواملی مانند خدمات پس از فروش و ارتقای کیفیت در جهت کاهش خرابی‌ها و در کنار آن کاهش قیمت تمام شده تجهیزات می‌توان این روش را به عنوان گزینه برتر معرفی کرد.

باید توجه شود که تحلیل سلسله مراتبی نشان داد که روش‌های مرسوم، بستر سنگی و مواد تغییر فاز دهنده مزیت خاصی برای استفاده ندارند.

منابع

1. Forman, E. H. and Gass, S. I. 2001. The analytical hierarchy process—an exposition. *Operations Research*, 49(4): 469-487.
2. Haj Seghti, A. 2011. *Principles and applications of solar energy*. Forth edition. University of science and industry, Tehran. (In Farsi).
3. Haj ShirMohammadi, A. 2014. *Maintenance and Repair*. ArkanDanesh. (In Farsi).
4. Kazemi, B. 2010. *Safety and work health: Industrial safety*. Baray and Pooshesh. (In Farsi).
5. Mansoob, A. and Abrishami, H. 2010. *Financial and economic assessment of solar greenhouses in comparison to greenhouses heating conventional methods*. Faculty of economic. Tehran University. (In Farsi).
6. Mirbod, M. and doroodian H. 2012. *Economic assessment of projects in COMFAR and using it in research proposals*. First edition. NoAvar. Tehran.
7. Mohammadi, A. and Omid, M. 2010. *Economical analysis and relation between*

