



مروری جامع بر سیستم‌های ذخیره‌سازی خورشیدی بستر متراکم مبتنی بر حرارت محسوس

رضا زاغری^۱، ناصر بهارلو هوره^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی: ۱۶۷۸۵-۱۶۳، nasser.baharloo@sru.ac.ir

چکیده

انرژی حرارتی خورشیدی منبع فراوان و بی‌نظیر تجدیدپذیر است که اگر با واحدهای ذخیره‌سازی ترکیب شود به عنوان گزینه‌ای جذاب و قابل رقابت با تجهیزات متعارف مطرح می‌شود. سیستم ذخیره‌سازی بستر متراکم (PBSS) یکی از روش‌های ذخیره انرژی گرمایی خورشیدی است که به دلیل سادگی و مقرون به صرفه بودن، برای کاربردهای گرمایش گلخانه‌ها، خشک‌کردن محصول و گرمایش فضا استفاده می‌شود. در این مطالعه پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد PBSSها و پارامترهای استفاده شده برای ارزیابی عملکرد آنها شرح داده شده‌اند. در ادامه به ارزیابی اقتصادی و برخی از کاربردهای PBSS پرداخته شده است. از میان دو نوع بستر ثابت و بستر سیال، اگرچه سیستم‌های بستر سیال بالاتری از انتقال گرما و جرم را ارائه می‌کنند اما مشکلات فنی بیشتری در طراحی و ساخت دارند. از میان دو نوع جریان شعاعی و جریان محوری، سیستم شعاعی می‌تواند بازدهی مشابه سیستم محوری را با هزینه بیشتر بدست آورد. از میان مواد جامد مورد استفاده در بستر ثابت، چدن بالاترین سطح چگالی انرژی را داراست، اما سنگریزه‌ها به دلیل دوره برگشت هزینه کمتر نسبت به چدن، توصیه می‌شوند. برخی مقالات، عملکرد ماسه را از بقیه مواد بهتر دانستند. هندسه مستطیلی برای سطح مقطع مخزن ذخیره‌سازی کمترین هزینه واحد ذخیره‌سازی را دارد، اما افت فشار زیادی را به علت اثرات گوشه‌ای ایجاد می‌کند. در یک مطالعه که از PBSS برای کشت گلخانه‌ای در طول شب استفاده کردند، به این نتیجه رسیده‌اند که اگر سیستم سه ماه در سال کار کند، دوره بازپرداخت هزینه پنج سال خواهد بود.

کلیدواژگان: ذخیره‌سازی حرارت خورشیدی، انرژی حرارتی محسوس، بستر متراکم، هوا گرم‌کن خورشیدی



A Comprehensive review of sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system

Reza Zaghari¹, Nasser Baharloo-Houreh^{2*}

1- BSc Student, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran

* Tehran, P.O.B Box: 163-16785, nasser.baharloo@sru.ac.ir

Received: 11 February 2022 Accepted: 17 May 2022

Abstract

Solar thermal energy is an abundant and unique source of renewable energy and it will become an attractive and competitive option with the common equipment's if these systems are incorporated with storage units. Packed bed storage system is one of the techniques to store the solar thermal energy which can be used for greenhouses heating, crop drying and space heating due to its simple mechanism and economic feasibility. In this study parameters affecting on PBSS performance and parameters which used for their performance evaluation has been explained. After that we focused on economic evaluation and some of PBSS applications. Between two types of stationary beds and fluidized beds; although the fluidized beds have higher rate of heat and mass transfer but they have more technical problems in design and construction. Between two types of radial flow and axial flow; the radial flow systems can achieve the same efficiency as axial flow system at higher cost. Among solid materials which can be used in stationary beds; cast iron has the highest level of energy density but gravel has recommended because of less refund return period than cast iron. Some of articles mentioned that sand performance is better than the others. Rectangular geometry for cross section of storage unit provides the lowest cost, but it makes high-pressure drop due to corner effects. In a study which use PBSS

for greenhouse planting during the night; they see that if the system works for three months, refund return period will be five years.

Keywords: Solar Thermal Storage, Sensible Thermal Energy, Packed Bed, Solar Air Heater

۱- مقدمه

حرارت خورشید می‌تواند در بیشتر فرآیندهای صنعتی استفاده شود تا جایگزین سوخت‌های فسیلی باشد. اکثر انتشار کربن که باعث گرم شدن کره زمین و تهدید آینده جهان می‌شود از سوزاندن سوخت‌های فسیلی تولید می‌شود. از چند دهه گذشته، انرژی خورشیدی به عنوان یک جایگزین مهم، به ویژه برای کاربردهای حرارتی در حال ظهور است. ادغام انرژی خورشیدی در فرآیندهای صنعتی یک راه‌حل موثر برای کاهش قیمت سوخت و کاهش انتشار CO_2 است. توسعه روش‌های ذخیره‌سازی انرژی به اندازه روش‌های تبدیل انرژی مهم است. ذخیره‌سازی انرژی نه تنها برای نگهداری انرژی، بلکه برای بهبود بازدهی و اطمینان‌پذیری سیستم‌های تبدیل انرژی هم مهم است. بیشتر فرآیندهای صنعتی به جریان مداوم انرژی به مدت ۲۴ ساعت شبانه‌روز و ۳۶۵ روز سال نیاز دارند. این را نمی‌توان به طور مداوم با انرژی خورشیدی فراهم کرد. انرژی خورشیدی اضافی از روز یا تابستان باید برای استفاده در طول شب یا زمستان ذخیره شود [۱]. روش‌های ذخیره انرژی حرارتی^۱ (TES) راه‌حل‌های انعطاف‌پذیری ارائه می‌دهند که باعث می‌شود سیستم‌های انرژی خورشیدی پایدار باشند و میزان انتشار CO_2 بیشتر کاهش یابد [۲]. ما نمی‌توانیم چرخش زمین را متوقف کنیم تا دائماً به طور مستقیم از انرژی خورشید استفاده کنیم، بنابراین TES نامزد اصلی برای حل مشکل تأمین انرژی متناوب از خورشید است. ادغام TES در سیستم‌های گرمایشی موجود می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی را رقم بزند و بازده انرژی را افزایش دهد.

از TES از انرژی داخلی مواد برای ذخیره حرارت محسوس، نهان و شیمیایی-گرمایی استفاده می‌کند [۳]. در روش ذخیره حرارت محسوس، از انرژی حرارتی ناشی از تغییر دما در ماده ذخیره‌سازی استفاده می‌شود. در روش ذخیره‌سازی حرارت نهان، انرژی در طی فرآیند تغییر فاز مواد ذخیره می‌شود که اصطلاحاً به آن مواد تغییر فاز^۲ (PCM) می‌گویند [۴]. روش ذخیره‌سازی ترموشیمیایی از واکنش‌های شیمیایی برگشت‌پذیر برای ذخیره گرما استفاده می‌کند [۵]. دوره استفاده، هزینه، دامنه دما، ظرفیت ذخیره‌سازی، موجودی مواد ذخیره‌سازی، میزان اتلاف حرارت و منطقه نصب معیارهایی کلیدی برای انتخاب روش ذخیره‌سازی مناسب هستند [۶]. سیستم‌های انرژی خورشیدی در شب‌ها - مگر در نزدیکی قطب‌ها - کارآمد نیستند. اگر انرژی خورشیدی با یک فناوری ذخیره‌سازی مناسب به کار برده نشود، نمی‌تواند نیازهای انرژی مورد انتظار را برآورده کند. این امر مستلزم مصرف انرژی‌های تجدیدناپذیر توسط سیستم‌های پشتیبان با بار زیست-محیطی بالا و هزینه‌های انرژی اضافی خواهد بود [۷].

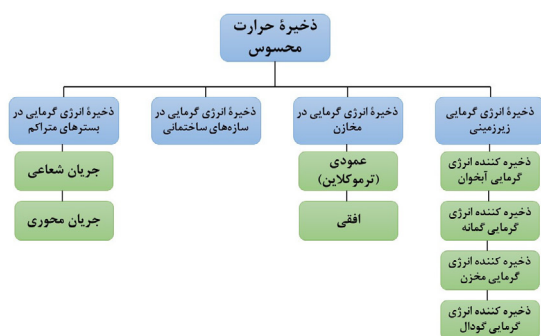
۲- فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی محسوس

ذخیره‌سازی انرژی گرمایی محسوس، ساده‌ترین و بالغ‌ترین روش ذخیره گرما است [۸]. انرژی محسوس با تغییر درجه حرارت مواد ذخیره‌کننده انرژی

حرارتی محسوس^۳ (STESM) مانند آب، روغن، تخت سنگ، آجر، ماسه یا خاک و غیره ذخیره می‌شود. در هنگام تغییر دمای STESM هیچ تغییر فازی وجود نخواهد داشت [۹]. عملکرد سیستم ذخیره‌سازی گرمای محسوس با توجه به تعاریف گونزالز-روباود و همکاران [۱۰] ارزیابی می‌شود:

- ظرفیت ذخیره‌سازی [کیلووات ساعت یا کیلوژول]: انرژی ذخیره شده در سیستم که وابسته به روند ذخیره‌سازی، مواد و اندازه سیستم است.
- توان [کیلووات]: انرژی ذخیره شده در واحد زمان و تعیین‌کننده سرعت شارژ و تخلیه شارژ است.
- بازده [درصد]: نسبت انرژی تحویلی هنگام تخلیه به انرژی مورد نیاز برای شارژ مجدد سیستم ذخیره‌سازی.
- زمان شارژ و تخلیه [ساعت]: چه مدت برای شارژ و تخلیه سیستم مورد نیاز است.
- هزینه [دلار بر کیلووات یا دلار بر کیلووات ساعت]: به ظرفیت (دلار بر کیلووات ساعت) یا قدرت (دلار بر کیلووات) سیستم ذخیره‌سازی اشاره دارد. مواد ذخیره‌سازی، مبدل حرارتی برای شارژ و تخلیه سیستم و هزینه فضا و یا محفظه برای ذخیره‌سازی انرژی گرمایی را شامل می‌شود.

فناوری‌های ذخیره‌سازی حرارت محسوس را می‌توان طبق شکل ۱ طبقه‌بندی کرد.



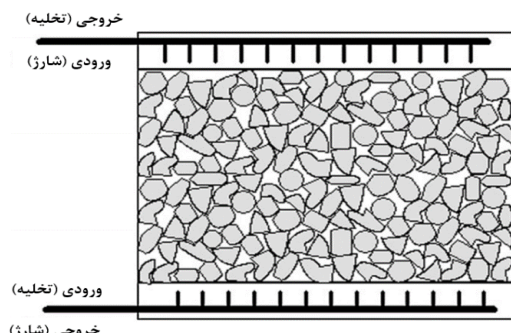
شکل ۱ طبقه‌بندی فناوری‌های ذخیره‌سازی حرارت محسوس

۱-۲- ذخیره انرژی گرمایی زیرزمینی

خاک زیرزمینی و یا سنگ، حجم ذخیره‌سازی نامرئی و ایزوله بزرگی را فراهم می‌کند. سیستم‌هایی که از این محیط استفاده می‌کنند زمین گرمایی کم‌عمق نامیده می‌شوند که یکی از انواع ذخیره‌سازی انرژی گرمایی زیرزمینی^۴ (UTES) هستند. سیستم‌های زمین گرمایی کم‌عمق از دماهای نسبتاً کم در

3. Sensible Thermal Energy Storage Media
4. Underground thermal energy storage

1. Thermal Energy Storage (TES)
2. Phase Change Material



شکل ۲ سیستم ذخیره‌سازی بستر سنگ [۱۱].

تا به امروز، بسترهای ثابت به طور گسترده‌تری نسبت به بسترهای سیال، مورد تحقیق قرار گرفته‌اند. به این دلیل که اگرچه سیستم‌های بستر سیال نرخ‌های بالاتری از انتقال گرما و جرم را نسبت به بسترهای ثابت برای کاربردهای پردازش شیمیایی و خشک کردن ارائه می‌کنند اما چالش‌های فنی بیشتری را، هم در طراحی و هم در بهره‌برداری دارند [۱۸].

شیوه کار PBSSها به این شکل است که گرما با گردش سیال انتقال حرارت^۲ (HTF) از طریق حفره‌های موجود بین PBSS به مواد بسته‌بندی منتقل شده و از مواد بسته‌بندی خارج می‌شود. آب و روغن حرارتی، سیالات معمول انتقال حرارت هستند که در دمای بالا روغن‌های حرارتی و بخار برای این کار ترجیح داده می‌شوند. روغن‌های معدنی هم از این لحاظ که در هوای سرد یا شبها در سیستم منجمد نمی‌شوند [۹]، می‌توانند مناسب باشند اما، به دلیل هزینه بالای روغن معدنی، محققان بر روی مواد ذخیره انرژی گرمایی کم‌هزینه تمرکز کرده‌اند [۱۹]. اساس دیگر دسته‌بندی PBSSها جهت جریان HTF آنها است که به عنوان PBSS جریان محوری و PBSS جریان شعاعی طبقه‌بندی می‌شوند [۲۰]. PBSS جریان محوری به بستر متراکمی گفته می‌شود که سیال موازی محور وارد می‌گردد و به طور موازی نسبت به محور از خارج می‌گردد و به سیستم ذخیره‌سازی بستر متراکمی، PBSS شعاعی می‌گویند که در آن سیال موازی محور وارد شده و عمود بر آن خارج می‌گردد. PBSS شعاعی می‌تواند بازدهی مشابه PBSS جریان محوری را با هزینه بیشتر بدست آورد. به این دلیل که جریان شعاعی به فضای نسبتاً بزرگی برای پلنای (فضای اشغال شده به وسیله ماده) داخلی و خارجی نیاز دارد. هزینه جریان شعاعی PBSS را می‌توان با کاهش حجم آن کاهش داد. بنابراین، استفاده از PBSS جریان محوری برای سیستم‌های حرارتی خورشیدی با دمای پایین توصیه می‌شود. شکل ۳ شماتیک PBSS جریان شعاعی را نشان می‌دهد که در آن گاز از طریق مرکز بستر متراکم وارد می‌شود، در جهت شعاعی جریان می‌یابد و از پلنوم خارجی، خارج می‌شود [۲۱].

۱۰۰ متری یا بیشتر پوسته زمین استفاده می‌کنند. در نزدیکی سطح، تا حدود ۱۰ متر، دمای زمین بدلیل تغییرات دمای فصلی از کنترل خارج می‌شود، اما در زیر این عمق، تا حدود ۱۰۰ متر ثابت می‌ماند. این دمای ثابت به عنوان دمای دست‌نخورده شناخته می‌شود و این قسمت از زمین اصطلاحاً "منطقه خنثی" نامیده می‌شود. دمای زمین دست‌نخورده که بین ۲ تا ۲۰ درجه سانتیگراد متغیر است، بسته به شرایط آب و هوایی منطقه، اساس ذخیره‌سازی انرژی گرمایی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی گرمایی زیرزمینی است.

۲-۲- ذخیره انرژی گرمایی در مخازن

مخازن آب، شناخته‌شده ترین و پرکاربردترین سیستم در ذخیره حرارت محسوس هستند. طراحی مخازن به منابع گرما و سرمای موجود و نیاز و تقاضا و در دسترس بودن فضا بستگی دارد. مخازن ممکن است از فولاد، فولاد ضد زنگ، بتن یا پلاستیک ساخته شده باشند. تجهیزات مختلفی مانند مبدل‌های حرارتی و بخاری برقی در مخازن قابل نصب است. استفاده از این طرح‌ها، باعث یکنواخت شدن دمای مخزن می‌شود و باعث بهبود عملکرد و مقرون به صرفه بودن فرایند ذخیره‌سازی می‌شود [۱۱]. افزایش سطح هم باعث افزایش سرعت انتقال حرارت می‌شود اما هر چقدر به سمت طراحی ویژه مخازن حرکت کنیم، هزینه‌ها افزایش پیدا خواهد کرد [۱۲]. مخازن عایق‌بندی شده‌اند تا با به حداقل رساندن اتلاف حرارت، انرژی گرمایی ذخیره شده را برای مدت طولانی‌تری حفظ کنند، عایق‌بندی بهتر باعث کاهش حجم و فضای مورد نیاز مخزن خواهد شد.

۳-۲- ذخیره انرژی گرمایی در سازه‌های ساختمانی

گرمای محسوس ماده به جرم و گرمای ویژه آن بستگی دارد. ذخیره انرژی گرمایی در سازه‌های ساختمانی با یک اشکال عمده که چگالی انرژی کم آن است، مواجه خواهد بود که این تکنیک را برای ذخیره‌سازی زیاد گرما و برای مدت طولانی‌تر نامناسب می‌کند. مواد متداول مورد استفاده برای ذخیره حرارت محسوس در ساختمان‌ها؛ آب، فولاد، گرانیت و آجر است.

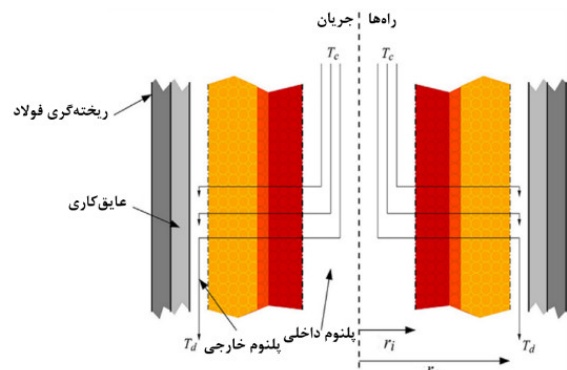
۳-۳- ذخیره انرژی گرمایی در بسترهای متراکم

بستر متراکم، شامل مخزنی است که با مواد بسته‌بندی و سیال انتقال حرارت که از طریق بستر برای ذخیره یا بازیابی حرارت گردش می‌کند، پر شده است. مواد بسته‌بندی سیستم‌های ذخیره‌سازی بستر متراکم^۱ (PBSS) موادی با حرارت ویژه بالا هستند که می‌توانند مقدار قابل توجهی از انرژی حرارتی را با افزایش دمای خود ذخیره کنند. بسترهای متراکم از نظر نوع ماده بسته‌بندی به دو دسته بستر سیال و بستر ثابت تقسیم‌بندی می‌شوند؛ مواد جامد بستر ثابت؛ مانند سنگ [۱۳]، سنگریزه‌ها [۱۴]، فلزات [۱۵]، سرامیک [۱۶] ماسه و مواد بازیافت‌شده [۱۷]، می‌توانند به عنوان مواد بسته‌بندی استفاده شوند. ماسه از بین سایر مواد برای ماده پرکردن، عملکرد بهتری دارد. بستر سنگی که در شکل ۲ نشان داده شده، ارزاترین بستر متراکم بستر ثابت است.

استوانه‌های با نسبت ابعاد بیشتر از ۱ ($L/D > 1$) متداول‌ترین طرحی است که بسیار کارآمد گزارش شده است [۲۹].

از تنظیمات مختلف مخازن و بستر متراکم می‌توان برای کاربردهای مختلف حرارتی خورشیدی استفاده کرد. در کارخانه‌های CSP، از سیستم دو مخزنی با نمک مذاب به عنوان STESM استفاده می‌شود (شکل ۵ الف)). به یکی از مخازن سرد و به دیگری گرم گفته می‌شود. در [۳۰] یک کارخانه آزمایشی نمک مذاب در اسپانیا دمای مخزن سرد ۲۸۶ درجه سانتی‌گراد و دمای مخزن گرم ۳۸۶ درجه سانتی‌گراد است، ذوب‌شدن نمک مذاب چند روز طول می‌کشد.

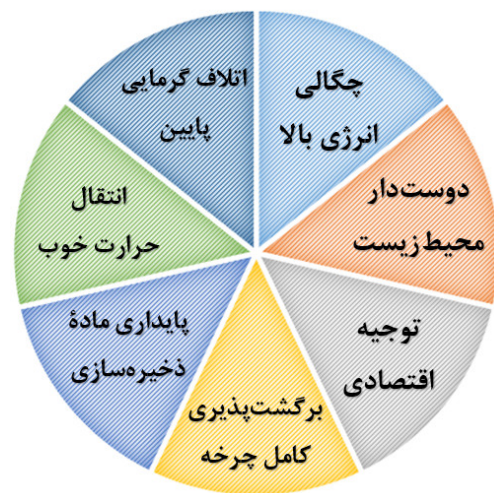
سیستم‌های ذخیره‌سازی از وابستگی دما به چگالی آب استفاده می‌کنند تا هم آب گرم و هم آب سرد را در یک مخزن ذخیره کنند. یک گرادیان درجه حرارت بزرگ در خط اتصال جداکننده آب گرم و سرد وجود دارد. منطقه واسط آب گرم و سرد در مخزن ذخیره‌سازی که دارای گرادیان دمای زیادی است، ترموکلاین نامیده می‌شود. در شکل ۵ ب)، سیستم ترموکلاین بستر متراکم تک‌مخزن نشان داده شده است. در طول ذخیره‌سازی، HTF همراه با انرژی خورشیدی که از بالای مخزن وارد می‌شود و مواد ذخیره‌کننده، حرارت را از HTF جذب می‌کنند. در تخلیه، HTF سرد به ته مخزن وارد می‌شود و مواد ذخیره‌سازی، حرارت را به HTF منتقل می‌کنند [۳۱]. سیستم‌های ترموکلاین تک‌مخزن ۷۵٪ مزیت بیشتری در هزینه سرمایه‌گذاری در مقایسه با دومخزنه‌ها دارند [۳۲].



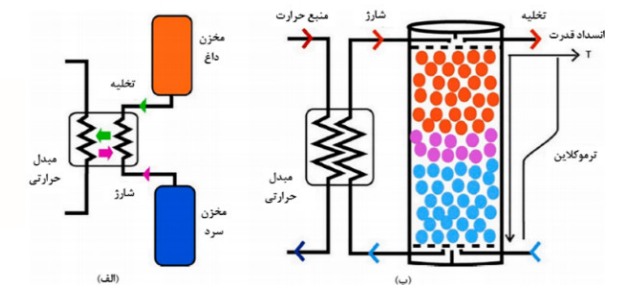
شکل ۳ شماتیک جریان شعاعی HTF در بستر متراکم [۲۲]

سرعت حداکثر HTF باید براساس عدد رینولدز^۱ ذره (Rep) تعیین شود که نشان‌دهنده نوع جریان در مخزن ذخیره است. انواع جریان براساس Rep عبارتند از: کاملاً آرام ($Rep < 10$), غیرخطی ($10 < Rep < 150$), آرام ناپایدار ($150 < Rep < 300$), کاملاً آشفته ($Rep > 300$) [۲۳]. بازده ذخیره‌سازی بالاتر می‌تواند در جریان کاملاً آرام با انتخاب ذراتی با Rep کمتر از ۱۰ بدست آید [۲۴].

PBSS به دلیل مکانیزم ساده و امکان اقتصادی آن روش مناسبی برای ذخیره انرژی حرارتی است [۲۵]. مشخصات مورد نیاز یک PBSS کارآمد برای کاربردهای دما پایین در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴ ویژگی‌های اساسی یک PBSS کارآمد [۲۵]



شکل ۵ سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارت محسوس الف) سیستم ذخیره‌سازی دومخزنه ب) سیستم ذخیره‌سازی ترموکلاین تک‌مخزن [۳۱]

۳-۱- پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد PBSS

عملکرد PBSS تحت تأثیر طراحی‌های مختلف و پارامترهای عملیاتی قرار می‌گیرد و انتخاب هر پارامتر بستگی به کاربرد خاصی دارد که برای آن طراحی شده است. در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

۳-۱-۱- نسبت ابعاد و قطر ذره

نسبت قطر مخزن به قطر بسته‌بندی، یک پارامتر مهم برای به حداقل رساندن اثرات دیواره است. به گفته بروخ و همکاران [۳۳]، نسبت قطر مخزن به قطر بسته‌بندی باید بیشتر از ۳۰ باشد. اثر قطر ذره و نسبت ابعاد را می‌توان با ثابت نگه‌داشتن دمای کار، سرعت جریان جرم و حجم ذخیره‌سازی مورد بررسی قرار داد. کاهش قطر ذره و افزایش نسبت ابعاد همیشه باعث افزایش مقدار ضریب اصطکاک می‌شود. از آنجا که قطر ذره و نسبت ابعاد بر افت فشار نامطلوب و ضریب انتقال حرارت مطلوب تأثیر می‌گذارد، توصیه می‌شود اندازه‌ای از ذره انتخاب شود که بین این دو پارامتر عملکرد تعادل ایجاد کند [۳۴].

سیستم‌های ذخیره‌سازی بستر متراکمی که در چند دهه گذشته استفاده شده‌اند فقط دارای ذخیره حرارت محسوس بوده‌اند [۲۶]. ذخیره حرارت محسوس با دمای بین ۵۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد در بستر متراکم، بسته به خصوصیات حرارتی مواد بسته‌بندی امکان‌پذیر است [۲۷]. سه هندسه مختلف از مخزن ذخیره‌سازی برای ذخیره انرژی حرارتی محسوس^۲ (STES) براساس سطح مقطع آن‌ها؛ مستطیل، مخروط بریده یا استوانه‌ای است. هندسه مستطیلی کمترین هزینه واحد ذخیره‌سازی را دارد، اما افت فشار زیاد آن به دلیل اثرات گوشه‌ای باعث عملکرد ناکارآمد آن می‌شود [۲۸].

1. Reynolds Number
2. Sensible Thermal Energy Storage



۳-۱-۲- مواد ذخیره‌سازی

سرباره‌های کوره القایی به عنوان مواد زائد می‌توانند به عنوان STESM ارزان با ظرفیت حرارتی $kJ / m^3 K$ ۱۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سلسیوس برای کاربرد TES استفاده شوند. تیسکاتین و همکاران [۴۴] خواص ۵۲ نوع سنگ مورد استفاده در سیستم‌های TES با درجه حرارت بالا برای کاربردهای صنعتی را بررسی کردند. ظرفیت گرمایی آن‌ها بین ۲۰۵۰ و $kJ / m^3 K$ ۲۵۵۰ بدست آمد. همه نمونه‌های سنگ برای کاربرد ذخیره‌سازی در دمای بالا برای سیستم‌های خورشیدی مبتنی بر هوا مناسب تعریف شده‌اند.

۳-۱-۳- کسر حجمی

کسر حجمی، نسبت خلأ موجود در بستر متراکم به حجم کل بستر است. این پارامتر که بر الگوی جریان و تلاطم تأثیر می‌گذارد. گزارش شده است که مقادیر کمتر کسر حجمی منجر به تماس تعداد زیادی نقطه بین عناصر بسته‌بندی می‌شود. چنین شرایطی باعث افزایش انتقال حرارت از طریق رسانایی در بستر متراکم و در نتیجه بهبود عملکرد حرارتی واحد ذخیره‌سازی می‌شود. با این حال، در بستر متراکم با کسر حجمی کم، قدرت پمپاژ بیشتری برای گردش HTF مورد نیاز است [۴۵]. در مقایسه با آن، بستر متراکم با مقادیر بیشتر کسر حجمی منجر به افت فشار کمتر و همچنین انتقال حرارت کمتر می‌شود. بنابراین، مقدار بهینه کسر حجمی باید انتخاب شود که بستگی به کاربردهای خاص و محدودیت‌های مربوط به آن دارد.

۳-۱-۴- کرویت

شکل ذرات بر فضای خالی بستر و نفوذپذیری آن تأثیر می‌گذارد. شکل ذره با استفاده از کرویت در معادله ارگون گنجانده می‌شود که به عنوان نسبت بین سطح یک کره به سطح یک ذره با حجم مشابه کره تعریف می‌شود [۴۶]. بنابراین، برای یک کره کرویت (ϕ) برابر یک و برای ذرات غیر کروی $0 < \phi < 1$. بسیاری از مطالعات تجربی و مدل سازی برای یافتن ارتباط بین فضای خالی بستر و خواص ذرات انجام شده است [۴۷]. برای بستری با اندازه ذرات یکنواخت، جاهای خالی با کاهش کرویت افزایش می‌یابد.

۳-۲- ارزیابی عملکرد PBSSها

پارامترهای مختلفی جهت ارزیابی عملکرد سیستم‌های PBSS وجود دارد که در برخی از مطالعات به یک یا چند مورد آن اشاره شده است. هرچه تعداد پارامترهای مورد ارزیابی بیشتر باشد، مقایسه و در نتیجه انتخاب بهتری برای استفاده از این سیستم‌ها می‌توان انجام داد.

۳-۲-۱- ارزیابی عملکرد بر اساس تجزیه و تحلیل انرژی^۱

تجزیه و تحلیل انرژی، از بین رفتن آن را در حین انتقال آن بین مواد و HTF در طول فرایند در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، برای به دست آوردن تجزیه و تحلیل جامع آن، باید برگشت‌ناپذیری را در بخش‌های مختلف PBSS در نظر گرفت. در تجزیه و تحلیل انرژی، دمایی که در آن انتقال حرارت در فرآیندهای مختلف اتفاق می‌افتد، در نظر گرفته می‌شود. در نهایت، تجزیه و تحلیل عملکرد PBSS با تجزیه و تحلیل دقیق انرژی بدست آمد. بنابراین، تجزیه و تحلیل انرژی، عملکرد PBSS را از نظر تعادل انرژی ارزیابی می‌کند و همچنین پتانسیل تولید کار مکانیکی را فراهم می‌کند [۴۸].

بازده انرژی عبارت است از نسبت کل انرژی بازبازی شده از واحد ذخیره‌سازی به کل انرژی داده شده به واحد ذخیره‌سازی. میزان جریان جرمی، مخصوصاً برای نرخ جریان جرم کمتر از ۱۰۰ لیتر در ساعت، تأثیر

انتخاب مواد ذخیره‌سازی برای PBSS، یک مشخصه تأثیرگذار است [۳۵] این مواد باید دارای مقاومت فشاری کافی باشند تا بتواند در برابر نیروی ناشی از وزن خود مقاومت کنند. جدا از این ویژگی‌ها، مواد باید مقرون به صرفه، دوستدار محیط‌زیست، ارزان و در دسترس باشند. مواد ذخیره‌سازی نیاز به برخی از خواص اساسی دارند؛ مثلاً نقطه ذوب مطلوب برای یک کاربرد خاص، رسانایی حرارتی بالا و مقدار بالای ظرفیت گرمایی مخصوص [۳۶]. علی‌رغم این ویژگی‌های اساسی، مواد باید دارای ویژگی‌های مطلوبی مانند پایداری شیمیایی، اشتعال‌پذیری کم، خنک‌کنندگی کم، ذوب همسان، غیر سمی بودن، کم‌هزینه بودن و دسترسی آسان باشند [۹]. خواص برخی از موادی که می‌توانند به عنوان مواد بسته‌بندی برای ذخیره انرژی حرارتی خورشیدی در PBSS استفاده شوند در جدول ۱ آورده شده است.

به گفته خاره و همکاران [۲۷]، ذخیره گرمای محسوس بین ۵۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد در ستون بستر متراکم با مواد کامپوزیت سیلیکات آلومینیوم امکان پذیر است. بروخ و همکاران [۲۹]، بطور گسترده استفاده از سنگ‌های سیلیس و مخلوط شن و ماسه سیلیس را به عنوان مواد ذخیره‌کننده حرارت گرمایی در بستر متراکم برای افزایش کارایی نیروگاه CSP مطالعه کرده‌اند. مرتنز و همکاران [۳۷] از سنگ کوارتزیت در سیستم ذخیره انرژی گرمایی بستر متراکم برای نیروگاه خورشیدی در مقیاس نیمه صنعتی (۱/۵ مگاوات) استفاده کردند. مواد زائد/بی‌اثر نیز با کمترین هزینه، مواد ذخیره‌سازی جایگزین ایجاد می‌کنند. محصولات غیرفعال شده مانند محصولات جانبی حاصل از صنعت معدن و متالورژی [۱۷]، زباله‌های حاوی آربست (بنیة نسوز) [۳۸]، خاکستر مایع را از زباله‌های جامد شهری [۳۸]، سرامیک فراصنعتی [۳۹]، الیاف بازیافتی نایلون از صنعت نساجی [۴۰] را می‌توان به عنوان STESM برای ذخیره‌سازی حرارت در دمای بالا در نیروگاه‌های خورشیدی استفاده کرد. وانگ و همکاران [۴۱] خصوصیات حرارتی کوره قوس الکتریکی (EAF) را بررسی کردند. نمونه‌های سرباره (خاکستر) از فولاد هستند. نمونه‌ها تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد پایدار بودند. نمونه‌های سرباره به عنوان کاندیداهای خوب ذخیره مواد با ظرفیت حرارتی بالای $kJ / m^3 K$ ۳/۶ پیشنهاد شدند.

جدول ۱ برخی مواد مورد استفاده برای ذخیره گرمای محسوس در PBSS [۳۶،۴۲]

ماده	رسانایی حرارتی (W / mK)	چگالی (kg / m^3)	حرارت مخصوص (kJ / kgK)
آلومینا	۱۱	۴۰۰۰	۰/۹۰۰
بازالت	۳/۲	۲۶۱۰-۲۶۷۰	۱/۴۷۰
آجر	۰/۶۹	۱۶۹۸	۰/۸۴۰
چدن	۲۹/۳	۷۹۰۰	۰/۸۲۷
سرامیک	۱/۳	۳۵۵۰	۰/۹۰۰
بتن	۰/۹ - ۱/۳	۲۲۴۰	۱/۱۳۰
گرانیت	۱/۷۳ - ۳/۹۸	۲۶۴۰	۰/۸۲۰
سنگ مرمر	۲/۰۷ - ۲/۹۴	۲۶۰۰	۰/۸۰۰
کوارتز	۲	۲۲۱۰-۲۷۷۰	۰/۸۰۰
ماسه سنگ	۱/۸۳	۲۲۰۰	۰/۷۱۰

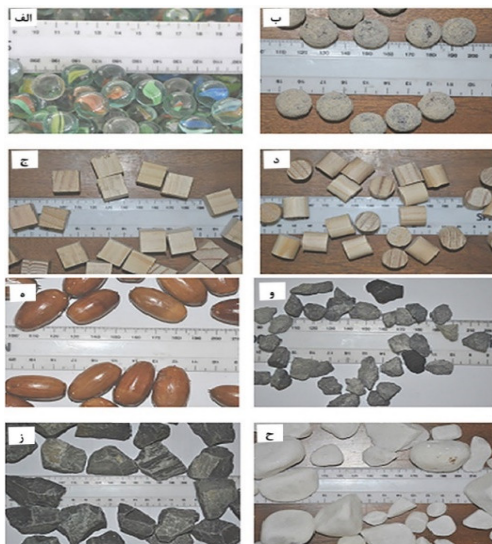
آگالیت و همکاران [۴۳] سرباره‌های کوره القایی را که در آن ضایعات فلزات آهنی و شارها را بررسی کرده بودند، مطالعه کردند. مشخص شد که

1. exergy analysis

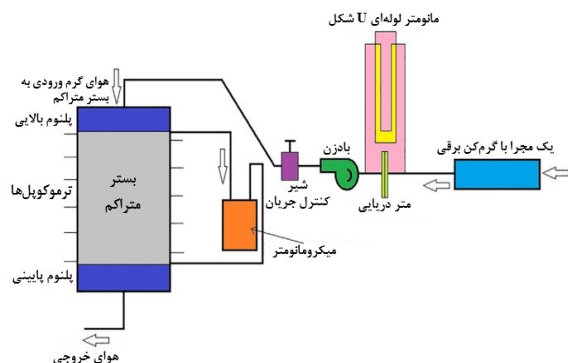
کسر حجمی به دست آمده است. شماتیک آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق در شکل ۸ نشان داده شده است.

۳-۲-۳- ارزیابی عملکرد بر اساس انرژی حرارتی ذخیره شده

انتخاب مواد و اندازه محیط ذخیره‌سازی بستگی به مقدار انرژی ذخیره شده دارد. آئودی [۵۵] گزارش داد که ژئولیت در مقایسه با تارسند، سنگ آهک و بازالت، سنگ بسیار مطلوبی برای ذخیره گرمای محسوس در بستر متراکم است. در این مطالعه، معادلات راندمان جمع‌کننده، ظرفیت حرارتی سنگ‌های انتخاب شده و پارامترهای طراحی سیستم برای واحد ذخیره‌سازی تعیین شد که برای گرمایش فضای خانه‌ای با مساحت ۲۰ مترمربع در عمان اجرا شد. نتیجه این شد که در صورت استفاده از مساحت جمع‌کننده ۵۰ مترمربعی، ۵۱ درصد از انرژی مطلق توسط انرژی خورشیدی تامین می‌شود و اگر از جمع‌کننده‌ای با مساحت ۱۰۰ مترمربع استفاده شود، سهم انرژی خورشیدی ۸۱ درصد خواهد بود. حجم ذخیره‌سازی مورد نیاز برای مساحت جمع‌کننده ۵۰ مترمربعی ۸/۹ مترمکعب ژئولیت بود، درحالی‌که در مورد تارسند به ۳/۵ مترمکعب کاهش می‌یافت.



شکل ۷ تصاویری از عناصر مختلف بسته‌بندی (الف) کروی شیشه‌ای صاف، (ب) سنگ مرمر پوشیده از ماسه، (ج) مکعب‌های چوبی، (د) استوانه‌های چوبی، (ه) بیضی شکل، (و) سنگ‌های خردشده و (ز) سنگ‌های گردشده [۵۶]

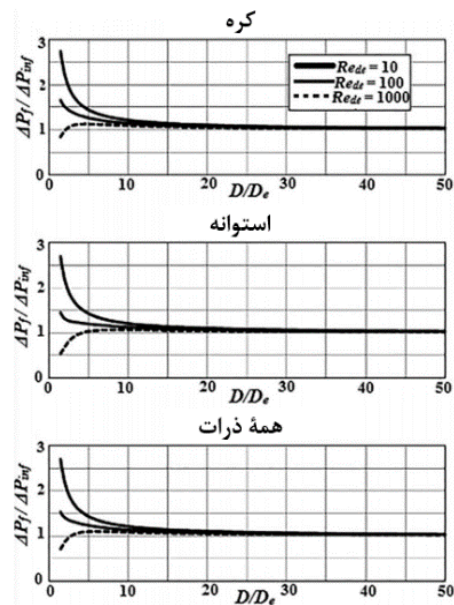


شکل ۸ شماتیک تنظیمات تجربی مورد استفاده توسط سینگ و همکاران [۵۴]
سینگ و همکاران [۵۷] بازده جمع‌کننده خورشیدی و بازده بازیابی حرارت یک PBSS را برای ذخیره انرژی حرارتی خورشیدی در سنگ‌ها به

قابل توجهی بر بازده انرژی PBSS دارد. با افزایش نرخ جریان جرم از ۵۰ لیتر در ساعت به ۲۵۰ لیتر در ساعت، بازده انرژی ۱۰ درصد کاهش یافت [۴۹]. نسبت ابعاد مخزن ذخیره و اندازه عناصر بسته‌بندی نیز بر بازده انرژی PBSS تأثیر می‌گذارد. برای ذخیره‌سازی طولانی مدت و برای بازده بهینه انرژی PBSS، نسبت ابعاد باید از ۰/۵ تا ۰/۸ باشد. آتالای [۵۰] کارایی انرژی خشک‌کن خورشیدی فعال شده با PBSS را بررسی کرد که در آن خشک‌شدن تکه‌های پرتقال برای نمونه در نظر گرفته شد. بازده انرژی برای ساعات آفتابی و ساعات غیرآفتابی ارزیابی شد و به ترتیب در محدوده ۵۰/۱۸ تا ۶۶/۵۸ درصد و ۵۴/۷۱ تا ۶۸/۳۷ درصد بود.

۳-۲-۳- ارزیابی عملکرد حرارتی-هیدرولیکی

کولبرن [۵۱] ضریب انتقال حرارت هوا را که از طریق یک لوله بستر متراکم پر از مواد گرانول، گلوله‌های چینی، سنگریزه و توپ‌های روی که در اندازه‌های مختلف پر می‌شود، بررسی کرد. مشخص شد که ضریب انتقال حرارت به مقدار هشت برابر لوله خالی افزایش یافته و ضریب ایجاد شده برای آن بستگی به سرعت جریان جرمی هوا و نسبت قطر ذره به قطر لوله دارد. ایسفلد و شنیتزلین [۵۲]، تأثیر دیواره‌های ظرف را بر افت فشار بستر متراکم گزارش کردند و با استفاده از مقادیر تجربی مطالعات قبلی، رابطه‌ای را بدست آوردند. با توجه به اثر دیوار، افت فشار در عدد رینولدز کم و متوسط افزایش یافت. فقط در عدد رینولدز بالا همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، کاهش یافته است.



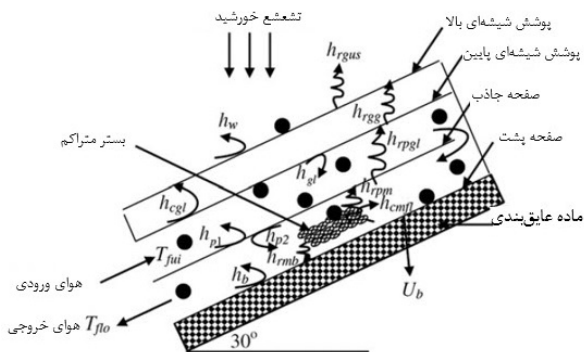
شکل ۶ نتیجه بازیابی شده توسط ایسفلد و شنیتزلین [۵۲]

در مطالعه نیک و لوک [۵۳] از سه نوع بسته‌بندی متنوع، شش ضلعی بسته و مکعب ساده استفاده شد که از آن‌ها مکعب ساده با ۰/۴۸ کسر حجمی دارای کمترین مقدار ضریب اصطکاک بود. ضریب اصطکاک با افزایش ناهمواری عناصر ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد. عناصر بسته‌بندی مختلف مورد استفاده در این مطالعه در شکل ۷ نشان داده شده است. سینگ و همکاران [۵۴] رفتار حرارتی-هیدرولیکی پنج شکل متمایز را بررسی کردند که عبارتند از: آجرهای کاشی سنگ تراشی با مفصل T شکل، آجرهای استاندارد کاشی، آجرهای بنایی استاندارد، مکعب‌های بتنی و کره‌های بتنی مورد استفاده در PBSS. مطابق نتایج بالاترین عملکرد حرارتی هیدرولیکی برای کره با کمترین

PBSS را می‌توان با ادغام آن با گرمایش گلخانه‌ها برای کشت، خشک کردن محصول، گرمایش فضا، خشک‌کن خورشیدی و همچنین برای حفظ انرژی در خانه‌های مسکونی استفاده کرد. چند نمونه با کاربرد متفاوت در مورد PBSS ادغام شده با سیستم‌های حرارتی خورشیدی با درجه حرارت پایین در جدول ۲ ارائه شده است.

۳-۵- ذخیره‌سازی حرارت خورشیدی در بستر متراکم برای هوا گرم‌کن‌های خورشیدی

هوا گرم‌کن‌های خورشیدی در زمینه گرمایش فضا، خشک کردن سبزیجات، میوه‌ها، گوشت‌ها، خشک‌کردن چوب و فرآیندهای صنعتی که به حرارت نیاز دارند، کاربرد دارند. مدت زمان خشک شدن محصول در هوا گرم‌کن خورشیدی با ذخیره‌سازی بستر سنگریزه، کوتاه‌تر از خشک‌کن خورشیدی باز است. بر اساس تحقیق ساکسنا و همکاران [۶۶]، حجم $0.125 m^3$ از سنگریزه به ازای واحد سطح از جمع‌کننده خورشیدی، ظرفیت استاندارد است. یک هوا گرم‌کن خورشیدی با ماده ذخیره‌سازی آلومینا α بر روی صفحه جذب، بررسی شد [۶۷]. آزمایش‌های دمابالا در دو وضعیت دمایی، که دما در رنج -های ۲۰ تا ۱۲۰ و ۲۰ تا ۷۰۰ (درجه سلسیوس) بود، انجام شد. السبای و همکاران [۶۸] یک هوا گرم‌کن خورشیدی دوگذره با ذخیره‌سازی انرژی حرارتی را با استفاده از بستر متراکم طراحی و بررسی کردند. (شکل ۱۰)

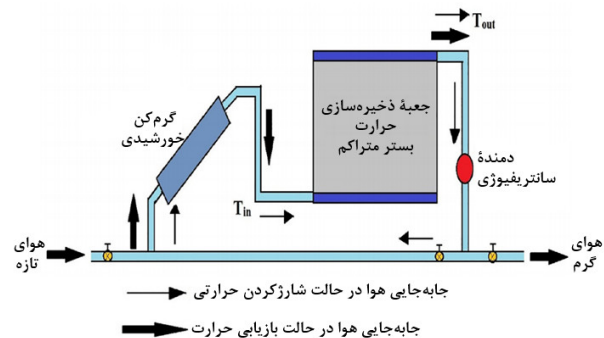


شکل ۱۰ نمایی از هوا گرم‌کن خورشیدی دوگذره با بستر متراکم [۶۸]

هنگامی که از ماسه به عنوان ماده ذخیره‌سازی استفاده می‌کنیم، بهترین عملکرد حرارتی زمانی حاصل می‌شود که دبی جرمی برای هوا $0.150 kg/s$ باشد و بازدهی سیستم حدود ۲۲ تا ۲۷ درصد بالاتر از گرم‌کن هوا خورشیدی بدون ذخیره‌سازی حرارت می‌شود.

ساکسنا و همکاران [۶۹]، کربن گرانول را به عنوان ماده ذخیره‌سازی حرارت در سیستم هوا گرم‌کن خورشیدی آزمایش کردند. نتایج با هوا گرم‌کن خورشیدی که سیستم ذخیره‌سازی حرارت ندارد، مقایسه شد. مطالعات نشان داد که هوا گرم‌کن خورشیدی با کربن گرانول بیش‌ترین بازدهی حرارتی (۷۳/۶۵ درصد) را می‌دهد و حرارت را برای مدت بیش‌تری ذخیره می‌کند. یک مطالعه تجربی بر روی هوا گرم‌کن‌های خورشیدی با بستر متراکم توسط بینگا و همکاران انجام شد [۵۶]. برای راه‌اندازی آزمایشی از $8500 kg$ سنگریزه در یک سیستم ذخیره‌سازی حرارت عایق شده استفاده شد. بازدهی بازایی حرارت این سیستم در رنج ۷۵ تا ۷۷ درصد است. نتایج نشان می‌دهد که بازدهی هوا گرم‌کن خورشیدی با واحد ذخیره‌سازی بستر سنگی بالاتر از یک واحد بستر متراکم PCM است.

کمک آزمایش تجربی مورد بررسی قرار دادند که شماتیک آن در شکل ۹ نشان داده شده است. PBSS، حاوی 8500 کیلوگرم سنگ بود که برای آن کسر حجمی 0.47 و قطر معادل 50 میلی‌متر ثابت نگه داشته شد. داده‌های تجربی برای بین ساعات $9:00$ تا $17:30$ برای هر ماه از سال به دست آمد. در حین شارژ، دمای بستر تا $49-34$ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته بود و دمای هوای جاری بین $41/5$ درجه سانتی‌گراد تا 44 درجه سانتی‌گراد به مدت 13 ساعت پس از غروب آفتاب ارزیابی شد، سپس از طریق روابط مناسب، بازده جمع‌کننده خورشیدی بین 36 تا 51 درصد و بازده بازایی حرارت بین 75 تا 77 درصد ارزیابی شد.



شکل ۹ شماتیک تنظیمات تجربی مورد استفاده توسط سینگ [۵۷]

۳-۳- جنبه‌های اقتصادی بسترهای متراکم

علی‌رغم مزایای فنی، فناوری‌های TES مزایای اقتصادی را در ادغام خود با سیستم‌های حرارتی خورشیدی ارائه می‌دهند. ذخیره انرژی در قالب گرمای محسوس باعث می‌شود سیستم‌های حرارتی خورشیدی در مقایسه با سایر سیستم‌های ذخیره انرژی با هزینه کمتر به طور موثرتری کار کنند [۵۸]. مزایای اقتصادی باید با کمک صرفه‌جویی در چرخه عمر یا سایر روش‌های مناسب به عنوان ابزاری برای مقایسه اقتصادی بین گزینه‌های موجود تجزیه و تحلیل شود [۵۹]. سرمایه و هزینه‌های عملیاتی کمتر دو مزیت عمده هستند که TES را برای نصب توجیه‌پذیر می‌کنند [۶۰]. چنین مطالعاتی در زمینه امکان‌سنجی اقتصادی و پارامترهای مربوطه در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرد. جنبه‌های اقتصادی معمولاً با ویژگی‌های فنی واحد ذخیره‌سازی در ارتباط هستند. نرخ انتقال حرارت مطلوب و مواد ذخیره‌سازی پیشرفته می‌تواند منجر به اندازه کمتر واحد ذخیره‌سازی و در نتیجه کاهش هزینه شود [۶۱]. چدن بهترین ماده برای ذخیره گرمای محسوس است، زیرا سطح چگالی انرژی آن بیشتر از آب است [۶۲]. با وجود این، شمع‌ها و سنگریزه‌ها به دلیل هزینه کم و دوره برگشت پول نسبتاً کمتری نسبت به چدن، توصیه می‌شوند [۶۳].

گالیون و همکاران [۶۴] مشاهده کردند که استفاده از مواد خاکی مانند سنگ، سنگریزه و ماسه همراه با HTF ارزان می‌تواند هزینه PBSS را تا 70 درصد کاهش دهد. بوعدایلا و همکاران [۶۵] با استفاده از تجزیه و تحلیل چرخه عمر، امکان اقتصادی گرم‌کن خورشیدی مجهز به PBSS را برای کشت گلخانه‌ای در طول شب در شرایط تونس ارزیابی کردند. نتیجه تجزیه و تحلیل آن‌ها این بود که اگر سیستم 3 ماه در سال کار کند، دوره بازپرداخت 5 سال خواهد بود.

۳-۴- برخی از کاربردهای فناوری‌های PBSS



جدول ۲ چند نمونه با کاربرد متفاوت در مورد PBSS برای دمای پایین

منبع	مشخصات	کاربرد	نتیجه
[۷۰]	<ul style="list-style-type: none"> • PBSS مد نظر با مقطع مستطیل بود. • عناصر بسته‌بندی مواد آتشفشانی بودند. 	گرمایش گلخانه	<ul style="list-style-type: none"> • در حین شارژ، بازده انرژی ۲۷/۶ درصد و بازده انرژی ۲/۰۳ درصد به دست آمد. • از کل انرژی مورد نیاز، حدود ۱۸ درصد از طریق PBSS تأمین می‌شد.
[۷۱]	<ul style="list-style-type: none"> • عملکرد PBSS، سیستم هوا گرم‌کن خورشیدی^۱ (SAHS) را با هدف خشک کردن محصول به صورت تحلیلی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. • PBSS از سنگ گرانیات در بستر عمیق تشکیل شده بود. 	خشک کردن محصول	<ul style="list-style-type: none"> • به دلیل تبخیر کمتر رطوبت، میزان خشک شدن به صورت خطی کاهش می‌یابد. • به دلیل وجود رطوبت بیشتر، میزان خشک شدن با افزایش عمق بستر افزایش می‌یابد.
[۷۲]	<ul style="list-style-type: none"> • مقایسه عملکرد از نظر تجزیه و تحلیل انرژی SAHS با و بدون PBSS به عنوان واحد ذخیره سازی گزارش شد. • SAHS بدون واحد ذخیره‌سازی، SAHS با واحد ذخیره‌گرمای نهان و SAHS با واحد ذخیره‌سازی حرارت محسوس سه سیستم در نظر گرفته شده بودند. 	گرم‌کن	<ul style="list-style-type: none"> • سیستم‌های دارای واحد ذخیره‌سازی در مقایسه با سیستم بدون واحد ذخیره‌سازی بهتر یافت شد. • عملکرد ذخیره‌گرمای نهان در مقایسه با سیستم ذخیره‌سازی حرارت محسوس بهتر است. • بازده انرژی هر دو سیستم در مقایسه با بازده انرژی بسیار بالا بود زیرا برگشت‌ناپذیری در تجزیه و تحلیل انرژی در نظر گرفته نشد.
[۶۵]	<ul style="list-style-type: none"> • عملکرد حرارتی SAHS ادغام شده با PBSS، در طول شب برای گلخانه‌ای با جهت شرق به غرب، مورد ارزیابی قرار گرفت. 	گرمایش گلخانه	<ul style="list-style-type: none"> • ۳۱ درصد از کل انرژی مورد نیاز در گرمایش گلخانه از طریق PBSS در طول شب تأمین می‌شد.
[۷۳]	<ul style="list-style-type: none"> • عملکرد PBSS یکپارچه‌شده با SAHS برای گرم‌کن خورشیدی با درجه حرارت پایین تجزیه و تحلیل شد. 	گرم‌کن	<ul style="list-style-type: none"> • مساحت انتقال حرارت جابجایی، ضریب انتقال حرارت جابجایی و تفاوت دما بین مواد بسته‌بندی و هوا به طور قابل توجهی از طریق جریان جرمی هوا، دمای ورودی آن و قطر معادل عنصر آب‌بندی تحت تأثیر قرار گرفت.
[۷۴]	<ul style="list-style-type: none"> • سیستم PV مستقل یکپارچه شده با PBSS عناصر بسته بندی در نظر گرفته شده سنگریزه، سنگ، شیشه، فولاد، چینی هستند. 	گرمایش هوا و آب	<ul style="list-style-type: none"> • بهترین عملکرد با فولاد و بدترین عملکرد با سنگریزه به دست آمد. • ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی PBSS با افزایش ارتفاع بستر افزایش می‌یابد و می‌توان در زمان در دسترس نبودن انرژی خورشیدی از آن استفاده کرد.
[۷۵]	<ul style="list-style-type: none"> • یک مدل تحلیلی برای خشک کردن محصول با PBSS و صفحه جاذب معکوس گزارش شد. • اعتبار سنجی مدل توسعه یافته برای دهلی هند در ماه اکتبر انجام شد. 	خشک کردن محصول	<ul style="list-style-type: none"> • ارتفاع بهینه برای سیستم در نظر گرفته شده ۰/۱۵ متر گزارش شد. • شنهایی در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر قطر به عنوان مواد بسته‌بندی با پوشش پلی‌اتیلن توصیه می‌شود.
[۷۶]	<ul style="list-style-type: none"> • گرمایش گلخانه ادغام شده با PBSS مورد بررسی قرار گرفت و با سایر فناوری‌های ذخیره انرژی حرارتی مقایسه شد. 	گرمایش گلخانه	<ul style="list-style-type: none"> • انرژی انرژی حرارتی سالانه $157/28 \text{ kJ} / \text{m}^2 / \text{C}$ است.
[۷۷]	<ul style="list-style-type: none"> • از تفاله و پوست پرتقال (OPP)، باگاس نیشکر (SCB) و سبوس گندم (WB) به عنوان عناصر بسته بندی در PBSS استفاده شد. 	بیوراکتورها برای تخمیر حالت جامد	<ul style="list-style-type: none"> • مقادیر کمتر هدایت حرارتی مؤثر و ضریب انتقال حرارت همرفتی ضایعات کشاورزی دلیل کارکرد PBSS بود.



- ذخیره‌سازی انرژی گرمایی خورشید مبتنی بر حرارت محسوس، ساده‌ترین روش ذخیره گرما است. در این میان، نوع بستر متراکم به دلیل ساده و کم‌هزینه بودن، به عنوان یک روش مناسب برای ذخیره انرژی حرارتی مطرح شده است.
- از PBSS می‌توان برای گرمایش گلخانه‌ها، خشک کردن محصول و گرمایش فضا استفاده کرد.
- اگرچه سیستم‌های بستر سیال نرخ‌های بالاتری از انتقال گرما و جرم را نسبت به بسترهای ثابت ارائه می‌کنند اما چالش‌های فنی بیشتری را، هم در طراحی و هم در بهره‌برداری دارند.
- از میان مواد جامد مورد استفاده در بستر ثابت، چدن بالاترین سطح چگالی انرژی را داراست، اما سنگ‌ریزه‌ها به دلیل هزینه کم و دوره برگشت هزینه کمتر نسبت به چدن، توصیه می‌شوند. برخی مقالات، عملکرد ماسه را از بقیه مواد بهتر دانستند.
- PBSS شعاعی می‌تواند بازدهی مشابه PBSS جریان محوری را با هزینه بیشتر بدست آورد. با این حال هزینه جریان شعاعی PBSS را می‌توان با کاهش حجم آن کاهش داد.
- هوا گرم‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی بستر متراکم، در ساختار جریان مخالف ۱۱ تا ۱۷ درصد بازدهی بالاتری نسبت به ساختار جریان موازی فراهم می‌کند.
- نسبت قطر مخزن به قطر بسته‌بندی بهتر است بیشتر از ۳۰ باشد. کاهش قطر ذره و افزایش نسبت ابعاد باعث افزایش مقدار ضریب اصطکاک می‌شود.
- هندسه مستطیلی برای سطح مقطع مخزن ذخیره‌سازی کمترین هزینه واحد ذخیره‌سازی را دارد، اما افت فشار زیاد آن به دلیل اثرات گوشه‌ای باعث عملکرد ناکارآمد آن می‌شود.
- در یک مطالعه که از PBSS برای کشت گلخانه‌ای در طول شب استفاده کردند، به این نتیجه رسیده‌اند که اگر سیستم ۳ ماه در سال کار کند، دوره بازپرداخت ۵ سال خواهد بود.

۵- مراجع

- [1] M. A. Boda, R. V. Phand, A. C. Kotali, Various Applications of Phase Change Materials: Thermal Energy Storing Materials, *International Journal of Emerging Research in Management and Technology*, Vol. 6, No. 4, pp. 167-171, 2017.
- [2] H. Ö. Paksoy, Thermal energy storage for sustainable energy consumption, *fundamentals, case studies and design*, Vol. 234. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] J. Romani, J. Gasia, A. Solé, H. Takasu, Y. Kato, L. F. Cabeza, Evaluation of energy density as performance indicator for thermal energy storage at material and system levels, *Applied Energy*, Vol. 235, pp. 954-962, 2019.
- [4] Z. Y. Xu, R. Z. Wang, Absorption seasonal thermal storage cycle with high energy storage density through multi-stage output, *Energy*, Vol. 167, pp. 1086-1096, 2019.
- [5] M. Liu, N.H. Steven Taya, Stuart Bell, Review on concentrating solar power plants and new developments in high temperature thermal energy storage technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 53, pp. 1411-1432, 2016.
- [6] J. A. Almendros-Ibáñez, M. Fernández-Torrijos, M. Díaz-Heras, J. F. Belmonte, C. Sobrino, A review of solar thermal energy storage in beds of particles: Packed and fluidized beds, *Solar Energy*, Vol. 192, pp. 193-237, 2019.
- [7] C. Lauterbach, B. Schmitt, U. Jordan, K. Vajen, The potential of solar heat for industrial processes in Germany, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 7, pp. 5121-5130, 2012.
- [8] V. Becattini, T. Motmans, A. Zappone, C. Madonna, A. Haselbacher, A. Steinfeld, Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature

بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی و طراحی هوا گرم‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی بسترسنگی توسط چودهاردی و همکاران [۷۸] مطالعه شد. پارامترهایی مثل، سطح مقطع، سایز بسترسنگی، دبی جرمی هوا و کسر حجمی بهینه شدند. زمان شارژ بهینه برای سیستم ذخیره‌سازی حرارتی بستر متراکم با هوا گرم‌کن خورشیدی دوگذره، ۸ ساعت تعیین گردیده است. یک سیستم گرمایش هوای خورشیدی برای خشک کردن گشنیز توسط چاوهان و همکاران ابداع شد که از سیستم ذخیره‌سازی بسترمتراکم استفاده کرده بودند [۷۹]. سیستم گرمایش هوای خورشیدی بدون واحد ذخیره‌سازی بسترمتراکم برای کاهش رطوبت از ۲۸/۲ درصد به ۱۱/۴ درصد، سه روز تابش آفتاب دریافت می‌کند. در طرف دیگر، هوا گرم‌کن خورشیدی با واحد ذخیره‌سازی بسترمتراکم برای کاهش همان میزان رطوبت، دو روز و یک شب زمان می‌گیرد. کالرا و همکاران [۸۰] سیستم ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی با ذخیره‌سازی حرارت محسوس بستر متراکم را بررسی کردند.

تیواری و همکاران [۸۱] یک هوا گرم‌کن خورشیدی با خشک‌کنی با سیستم ذخیره‌سازی حرارت بسترسنگی را مورد بررسی قرار دادند. مدل-سازی‌های ریاضی برای تعیین تحلیلی دمای محصول و میزان رطوبت، انجام شده است. نتایج نشان داد که اثر ذخیره‌سازی حرارت در آب، در عمق بیشتر از ۰/۱ m، از عمق آب متاثر نیست. هوا گرم‌کن خورشیدی با ساختار جریان مخالف و موازی با مکانیزم ذخیره‌سازی حرارت محسوس بستر متراکم توری آهنی به صورت تجربی مطالعه شد [۸۲]. مطالعه نشان داد که هوا گرم‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی بستر متراکم، در ساختار جریان مخالف ۱۱ تا ۱۷ درصد بازدهی بالاتری نسبت به ساختار جریان موازی فراهم می‌کند. روش ذخیره‌سازی حرارت محسوس از سنگ‌ریزه‌ها در دو سایز مختلف با روغن آفتابگردان، به عنوان سیال‌های انتقال حرارت استفاده می‌کند [۸۳]. سنگ‌های گرانیت با قطر متوسط ۱۰/۵ mm و ۳۱/۹ mm به ترتیب به عنوان سنگ‌ریزه کوچک و سنگ‌ریزه بزرگ استفاده شدند.

آتالای و همکاران [۸۴] سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بستر متراکم را برای خشک‌کردن برش‌های سیب بین ۴۵ تا ۵۵ درجه‌سانتیگراد با ۷۶/۸ درصد انرژی کمتر، با خشک‌کن خورشیدی ادغام کردند. این سیستم از دو جمع‌کننده هوا، یک کابین خشک‌کن، فن‌ها، یک کابین بستر متراکم مستطیلی با ارتفاع ۲ متر، طول ۱ متر و ضخامت ۱ متر تشکیل شده است. کابین ذخیره‌سازی با دو تن سنگ‌ریزه پر شده است. از هوا به عنوان سیال انتقال گرما استفاده می‌شود که از جمع‌کننده خورشیدی می‌آید و مستقیماً وارد کابین ذخیره می‌شود. در طول مدت شارژ، هوای گرم دمای کابین ذخیره‌سازی را تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. در برخی موارد، می‌توان از انرژی خورشیدی، پمپ حرارتی و TES برای افزایش سطح دما برای تأمین نیازهای فرآیند و بهینه‌سازی عملکرد سیستم استفاده کرد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی مبتنی بر حرارت محسوس معرفی شدند. سپس از میان انواع سیستم‌های ذخیره‌سازی، روش ذخیره بستر متراکم (PBSS) به طور مفصل معرفی شده است. در ادامه پارامترهای تاثیرگذار بر عملکرد PBSS ها و پارامترهای استفاده شده برای ارزیابی عملکرد آن‌ها معرفی و شرح داده شدند. ارزیابی اقتصادی و اشاره به برخی کاربردهای PBSS بخش‌های پایانی مقاله را تشکیل می‌دهد. برخی از نتایج مهم در زیر به طور خلاصه بیان می‌شود:

- plants; heat losses evaluation and correction, *Renewable Energy*, Vol. 94, pp. 175–185, 2016.
- [31] B. Stutz, N Le Pierrès, F Kuznik, Storage of thermal solar energy, *Comptes Rendus Physique*, Vol. 18, No. 7–8, pp. 401–414, 2017.
- [32] Z. Yang and S. V. Garimella, Molten-salt thermal energy storage in thermoclines under different environmental boundary conditions, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 11, pp. 3322–3329, 2010.
- [33] A. Bruch, J. F. Fourmigué, and R. Couturier, Experimental and numerical investigation of a pilot-scale thermal oil packed bed thermal storage system for CSP power plant, *Solar Energy*, Vol. 105, pp. 116–125, 2014.
- [34] A. Gautam and R. P. Saini, Experimental investigation of heat transfer and fluid flow behavior of packed bed solar thermal energy storage system having spheres as packing element with pores, *Solar Energy*, Vol. 204, pp. 530–541, 2020.
- [35] A. Gautam and R. P. Saini, Thermal and hydraulic characteristics of packed bed solar energy storage system having spheres as packing element with pores, *Journal of Energy Storage*, Vol. 30, p. 101414, 2020.
- [36] G. Alva, Y. Lin, and G. Fang, An overview of thermal energy storage systems, *Energy*, Vol. 144, pp. 341–378, 2018.
- [37] N. Mertens, F. Alobaid, L. Frigge, and B. Epple, Dynamic simulation of integrated rock-bed thermocline storage for concentrated solar power, *Solar Energy*, Vol. 110, pp. 830–842, 2014.
- [38] A. Faik, S Guillot, J Lambert, E Véron, Thermal storage material from inertized wastes: Evolution of structural and radiative properties with temperature, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 1, pp. 139–146, 2012.
- [39] F. Motte, Q. Falcoz, E. Veron, and X. Py, Compatibility tests between Solar Salt and thermal storage ceramics from inorganic industrial wastes, *Applied Energy*, Vol. 155, pp. 14–22, 2015.
- [40] O. B. Ozger, F Girardi, GM Giannuzzi, VA Salomoni, Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems, *Materials & Design*, Vol. 51, pp. 989–997, 2013.
- [41] Y. Wang, X. Li, M. Sun, H. Yu, Managing urban ecological land as properties: Conceptual model, public perceptions, and willingness to pay, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 133, pp. 21–29, 2018.
- [42] H. Singh, R. P. Saini, J. S. Saini, A review on packed bed solar energy storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 3, pp. 1059–1069, 2010.
- [43] H. Agalit, N. Zari and M. Maaroufi, Thermophysical and chemical characterization of induction furnace slags for high temperature thermal energy storage in solar tower plants, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 172, pp. 168–176, 2017.
- [44] R. Tiskatine, R Oaddi, RA El Cadi and A Bazgaou, Suitability and characteristics of rocks for sensible heat storage in CSP plants, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 169, pp. 245–257, 2017.
- [45] H. W. Zhang, Q. Zhou, H. L. Xing and H. Muhlhaus, A DEM study on the effective thermal conductivity of granular assemblies, *Powder Technology*, Vol. 205, No. 1–3, pp. 172–183, 2011.
- [46] M. J. Rhodes, *Introduction to particle technology*, Second Edition, p. 33, New York: Wiley, 2008.
- [47] J. Eastwood, Random loose porosity of packed beds, *British Chemical Energy*, Vol. 14, No. 11, pp. 1542–1545, 1969.
- [48] S. A. Kalogirou, S. Karellas, K. Braimakis, C. Stanciu, and V. Badescu, Exergy analysis of solar thermal collectors and processes, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 56, pp. 106–137, 2016.
- [49] X. Cheng and X. Zhai, Thermal performance analysis and optimization of a cascaded packed bed cool thermal energy storage unit using multiple phase change materials, *Applied Energy*, Vol. 215, pp. 566–576, 2018.
- [50] H. Atalay, Performance analysis of a solar dryer integrated with the packed bed thermal energy storage (TES) system, *Energy*, Vol. 172, pp. 1037–1052, 2019.
- [51] A. P. Colburn, Heat Transfer and Pressure Drop in Empty, Baffled, and Packed Tubes1, *Industrial & Engineering Chemistry*, Vol. 23, No. 8, pp. 910–913, 1931.
- [52] B. Eisfeld and K. Schnitzlein, The influence of confining walls on the pressure drop in packed beds, *Chemical Engineering Science*, Vol. 56, No. 14, pp. 4321–4329, 2001.
- thermal-energy storage, *Applied Energy*, Vol. 203, pp. 373–389, 2017.
- [9] G. Alva, L. Liu, X. Huang, G. Fang, Thermal energy storage materials and systems for solar energy applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68. Elsevier Ltd, pp. 693–706, 01, 2017.
- [10] E. González-Roubaud, D. Pérez-Osorio, C. Prieto, Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs. molten salts, *Renewable and sustainable energy reviews*, Vol. 80, pp. 133–148, 2017.
- [11] P. Pinel, C. A. Cruickshank, I. Beausoleil-Morrison, A. Wills, A review of available methods for seasonal storage of solar thermal energy in residential applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 7, pp. 3341–3359, 2011.
- [12] S. Haehnlein, P. Bayer, P. Blum, International legal status of the use of shallow geothermal energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, No. 9, pp. 2611–2625, 2010.
- [13] G. Zanganeh, A. Pedretti, S. Zavattoni, M. Barbato, A. Steinfeld, Packed-bed thermal storage for concentrated solar power – Pilot-scale demonstration and industrial-scale design, *Solar Energy*, Vol. 86, No. 10, pp. 3084–3098, 2012.
- [14] S. A. Zavattoni, M. C. Barbato, A. Pedretti, G. Zanganeh, CFD simulations of a pebble-bed Thermal Energy Storage system accounting for porosity variations effects, *Solar PACES*, 2011.
- [15] R. Anderson, S. Shiri, H. Bindra, J. F. Morris, Experimental results and modeling of energy storage and recovery in a packed bed of alumina particles, *Applied Energy*, Vol. 119, pp. 521–529, 2014.
- [16] S. Zunft, M. Hänel, M. Krüger, V. Dreißigacker, F. Göhring, E. Wahl, Jülich solar power tower—experimental evaluation of the storage subsystem and performance calculation, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 133, No. 3, 2011.
- [17] M. E. Navarro, M Martínez, A Gil, AI Fernández, Selection and characterization of recycled materials for sensible thermal energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 107, pp. 131–135, 2012.
- [18] H. Groenewold, E. Tsotsas, Drying in fluidized beds with immersed heating elements, *Chemical Engineering Science*, Vol. 62, No. 1, pp. 481–502, 2007.
- [19] R. G. Emerson, Institutionalising a Radical Region: The Bolivarian Alliance for the Peoples of Our America, *Journal of Iberian and Latin American Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 194–210, 2013.
- [20] L. Chai, L. Wang, J. Liu, L. Yang, H. Chen, C. Tan, Performance study of a packed bed in a closed loop thermal energy storage system, *Energy*, Vol. 77, pp. 871–879, 2014.
- [21] J. P. Coutier, E. A. Farber, Two applications of a numerical approach of heat transfer process within rock beds, *Solar Energy*, Vol. 29, No. 6, pp. 451–462, 1982.
- [22] J. McTigue, A. White, A comparison of radial-flow and axial-flow packed beds for thermal energy storage, *Energy Procedia*, Vol. 105, pp. 4192–4197, 2017.
- [23] X. He, S. Apte, K. Schneider, and B. Kadoch, Angular multiscale statistics of turbulence in a porous bed, *Physical Review Fluids*, Vol. 3, No. 8, p. 84501, 2018.
- [24] B. Koçak and H. Paksoy, Packed-bed sensible thermal energy storage system using demolition wastes for concentrated solar power plants, *E3S Web of Conferences*, Vol. 113, pp. 1–9, 2019.
- [25] S. Kuravi, J. Trahan, D. Y. Goswami, M. M. Rahman, and E. K. Stefanakos, Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 39, No. 4, pp. 285–319, 2013.
- [26] A. Gautam and R. P. Saini, A review on sensible heat based packed bed solar thermal energy storage system for low temperature applications, *Solar Energy*, Vol. 207, pp. 937–956, 2020.
- [27] S. Khare, M. Dell’Amico, C. Knight, and S. McGarry, Selection of materials for high temperature sensible energy storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 115, pp. 114–122, 2013.
- [28] A. Gautam and R. P. Saini, A review on technical, applications and economic aspect of packed bed solar thermal energy storage system, *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, p. 101046, 2020.
- [29] A. Bruch, J. F. Fourmigué, R. Couturier, and S. Molina, Experimental and Numerical Investigation of Stability of Packed Bed Thermal Energy Storage for CSP Power Plant, *Energy Procedia*, Vol. 49, pp. 743–751, 2014.
- [30] C. Prieto, R. Osuna, A. I. Fernández, and L. F. Cabeza, Molten salt facilities, lessons learnt at pilot plant scale to guarantee commercial



- International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 60, No. 1, pp. 8–16, 2013.
- [70] H. H. Öztürk and A. Başçetinçelik, Energy and Exergy Efficiency of a Packed-bed Heat Storage Unit for Greenhouse Heating, *Biosystems Engineering*, Vol. 86, No. 2, pp. 231–245, 2003.
- [71] D. Jain and R. K. Jain, Performance evaluation of an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage on deep-bed drying application, *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, No. 4, pp. 497–509, 2004.
- [72] V. V. Tyagi, A. K. Pandey, G. Giridhar, B. Bandyopadhyay, S. R. Park, and S. K. Tyagi, Comparative study based on exergy analysis of solar air heater collector using thermal energy storage, *International Journal of Energy Research*, Vol. 36, No. 6, pp. 724–736, 2012.
- [73] S. Karthikeyan, G. Ravikumar Solomon, V. Kumaresan, and R. Velraj, Parametric studies on packed bed storage unit filled with PCM encapsulated spherical containers for low temperature solar air heating applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 78, pp. 74–80, 2014.
- [74] F. H. Fahmy and Z. S. Abdel-Rehim, Novel Design of Photovoltaic System Coupled with Packed Bed Thermal Energy Storage, *Energy Sources*, Vol. 19, No. 10, pp. 1031–1041, 1997.
- [75] D. Jain, Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer, *Journal of Food Engineering*, Vol. 78, No. 2, pp. 637–647, 2007.
- [76] V. P. Sethi and S. K. Sharma, Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications, *Solar Energy*, Vol. 82, No. 9, pp. 832–859, 2008.
- [77] F. P. Casciadori and J. C. Thoméo, Heat transfer in packed-beds of agricultural waste with low rates of air flow applicable to solid-state fermentation, *Chemical Engineering Science*, Vol. 188, pp. 97–111, 2018.
- [78] C. Choudhury, P. M. Chauhan, and H. P. Garg, Economic design of a rock bed storage device for storing solar thermal energy, *Solar Energy*, Vol. 55, No. 1, pp. 29–37, 1995.
- [79] P. M. Chauhan, C. Choudhury, and H. P. Garg, Comparative performance of coriander dryer coupled to solar air heater and solar air-heater-cum-rockbed storage, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 16, No. 6, pp. 475–486, 1996.
- [80] J. Kalra, G. Raghav, and M. Nagpal, Parametric study of stratification in packed bed sensible heat, solar energy storage system, *Applied Solar Energy*, Vol. 52, No. 4, pp. 259–264, 2016.
- [81] G. N. Tiwari, P. S. Bhatia, A. K. Singh, and R. K. Goyal, Analytical studies of crop drying cum water heating system, *Energy Conversion and Management*, Vol. 38, No. 8, pp. 751–759, 1997.
- [82] P. Dhiman, N. S. Thakur, and S. R. Chauhan, Thermal and thermohydraulic performance of counter and parallel flow packed bed solar air heaters, *Renewable Energy*, Vol. 46, pp. 259–268, 2012.
- [83] R. Lugolole, A. Mawire, K. A. Lentswe, D. Okello, and K. Nyeinga, Thermal performance comparison of three sensible heat thermal energy storage systems during charging cycles, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 30, pp. 37–51, 2018.
- [84] H. Atalay, M. Turhan Çoban, and O. Kincay, Modeling of the drying process of apple slices: Application with a solar dryer and the thermal energy storage system, *Energy*, Vol. 134, pp. 382–391, 2017.
- [53] D. Nemeć and J. Levec, Flow through packed bed reactors: Single-phase flow, *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No. 24, pp. 6947–6957, 2005.
- [54] R. Singh, R. P. Saini, and J. S. Saini, Nusselt number and friction factor correlations for packed bed solar energy storage system having large sized elements of different shapes, *Solar Energy*, Vol. 80, No. 7, pp. 760–771, 2006.
- [55] M. S. Audi, Experimental study of a solar space heating model using Jordanian rocks for storage, *Energy Conversion and Management*, Vol. 33, No. 9, pp. 833–842, 1992.
- [56] K. G. Allen, T. W. von Backström, and D. G. Kröger, Packed bed pressure drop dependence on particle shape, size distribution, packing arrangement and roughness, *Powder Technology*, Vol. 246, pp. 590–600, 2013.
- [57] P. L. Singh, S. D. Deshpandey, and P. C. Jena, Thermal performance of packed bed heat storage system for solar air heaters, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 29, pp. 112–117, 2015.
- [58] C. Suresh and R. P. Saini, Review on solar thermal energy storage technologies and their geometrical configurations, *International Journal of Energy Research*, Vol. 44, No. 6, pp. 4163–4195, 2020.
- [59] I. Dincer, S. Dost and X. Li, Performance analyses of sensible heat storage systems for thermal applications, *International Journal of Energy Research, Fuel and Energy Abstracts*, Vol. 38, No. 6, p. 435, 1997.
- [60] I. Dincer, S. Dost, and X. Li, Thermal energy storage systems and energy savings, *International Energy and Environment Symptom*, pp. 373–379, 1996.
- [61] P. Agrawal, A. Gautam, A. Kunwar, M. Kumar and S. Chamoli, Performance assessment of heat transfer and friction characteristics of a packed bed heat storage system embedded with internal grooved cylinders, *Solar Energy*, Vol. 161, pp. 148–158, 2018.
- [62] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part II: cool thermal storage, *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 11, pp. 1139–1153, 1998.
- [63] S. M. Hasnain, Review on sustainable thermal energy storage technologies part I: Heat storage materials and techniques, *Energy Conversion and Management*, Vol. 39, No. 11, pp. 1127–1138, 1998.
- [64] O. Maaliou and B. J. McCoy, Optimization of thermal energy storage in packed columns, *Solar Energy*, Vol. 34, No. 1, pp. 35–41, 1985.
- [65] S. Bouadila, M. Lazaar, S. Skouri, S. Kooli, and A. Farhat, Assessment of the greenhouse climate with a new packed-bed solar air heater at night, in Tunisia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 35. Elsevier Ltd, pp. 31–41, 01, 2014.
- [66] A. Saxena, V. Tirth, and G. Srivastava, Design and Performance Analysis of a Solar Air Heater With High Heat Storage, *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, Vol. 29, No. 3, pp. 35–55, 2014.
- [67] R. Anderson, L. Bates, E. Johnson, and J. F. Morris, Packed bed thermal energy storage: A simplified experimentally validated model, *Journal of Energy Storage*, Vol. 4, pp. 14–23, 2015.
- [68] A. A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, and E. El-Bialy, Year round performance of double pass solar air heater with packed bed, *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 3, pp. 990–1003, 2007.
- [69] A. Saxena, N. Agarwal, and G. Srivastava, Design and performance of a solar air heater with long term heat storage,

