

## بررسی فناوری نیروگاه‌های دودکش خورشیدی

**چکیده:** امروزه با توجه به مشکلات سوخت‌های فسیلی از قبیل تجدیدنپذیر بودن، آلودگی زیست‌محیطی و... انرژی‌های تجدیدپذیر اهمیت بالایی پیدا کرده‌اند. فناوری دودکش خورشیدی یکی از زمینه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر است که قابلیت استفاده در نیروگاه را دارد. افزایش استفاده از انرژی خورشیدی در سال‌های اخیر علاقه شدیدی به توسعه فناوری دودکش خورشیدی ایجاد کرده است. در این مقاله به بررسی اجزای نیروگاه دودکش خورشیدی که شامل سه بخش اصلی کلکتور، واحد انتقال توان و دودکش است می‌پردازیم. با توجه به بازدهی بسیار پایین نیروگاه‌های دودکش خورشیدی ترکیب این نیروگاه با فناوری‌های دیگر مانند نمک‌زدایی و خشک‌کن پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فناوری دودکش خورشیدی ترکیبی با نمک‌زدایی بررسی شده است. در ادامه امکان‌سنجی نصب نیروگاه دودکش خورشیدی در نقاط مختلف کشور ایران بررسی می‌شود. در پایان نتایج مطالعات تجربی انجام‌شده در زمینه دودکش خورشیدی از زمان پیدایش این فناوری در مانزاترس اسپانیا تا سال‌های اخیر بیان شده است.

**واژه‌های راهنما:** انرژی خورشیدی، دودکش خورشیدی، نمک‌زدایی خورشیدی، خشک‌کن خورشیدی، نیروگاه دودکش خورشیدی

مهدی چهابی بوشه‌ری\*

دانشجوی کارشناسی

سید علی امامی نجفی

سید محمد ذوالفقاری

مجید عمیدپور

استاد

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۱

## A review on solar chimney power plants

**Mehdi Chahabi  
Bushehri**

BSc Student

**S. Ali Emami Najafi**

BSc Student

**S. Mohammad  
Zolfaghari**

BSc student

**Majid Amidpour**

Professor, School of  
Mechanical Engineering,  
K. N. Toosi University of  
Technology, Tehran, Iran

**Abstract:** Nowadays, due to the problems of fossil fuels such as Non-renewability, environmental pollution, etc., renewable energies have become very important. Solar chimney is one of the renewable energy fields that can be used in power plants. The increasing use of solar energy in recent years has aroused great interest in the development of solar chimney technology. In this article, we study the components of a solar chimney power plant, which includes three main parts: collector, power conversion unit and chimney. Solar chimney power plants have low efficiency. Therefore, combining them with other technologies such as desalination and drying is recommended. Also, the optimization of effective parameters in Combined solar chimney system for power generation and seawater desalination has been investigated. Then, the results of experimental studies performed on solar chimneys from 1981 are reviewed. Also, The feasibility of installing a solar chimney power plant in different regions of Iran has been studied.

**Keywords:** Solar energy, Solar chimney, Solar desalination, Solar dryer, Solar chimney power plant

## ۱- مقدمه

یکی از راه‌های دستیابی به آب شیرین استفاده از نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی نمک‌زدایی و تولید توان<sup>۳</sup> (نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی) برای تصفیه آب شور دریا است [۱۰].

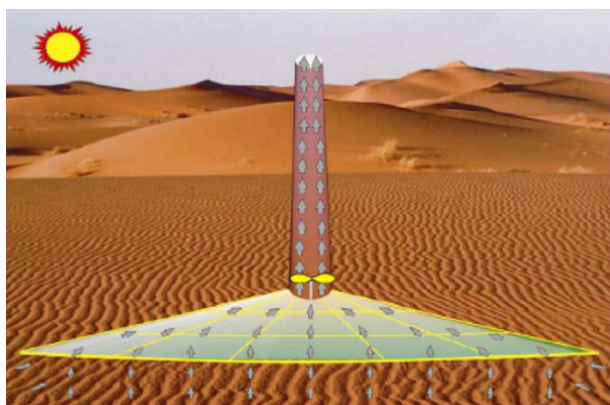
در این مقاله ابتدا به بررسی اجزای نیروگاه دودکش خورشیدی که شامل سه بخش اصلی کلکتور، دودکش و PCU است و سپس به بررسی و توضیح قسمت‌ها و طرح‌های مختلف ارائه شده برای هر قسمت می‌پردازیم. در ادامه ترکیب نیروگاه دودکش خورشیدی با فناوری‌های دیگر را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. یکی از فناوری‌های ترکیبی با نیروگاه دودکش خورشیدی فناوری نمک‌زدایی است. در این مقاله به بررسی فناوری‌های دودکش خورشیدی ترکیبی و همچنین تحلیل اقتصادی این نوع نیروگاه‌ها می‌پردازیم. همچنین با بهینه‌سازی نیروگاه مناسب‌ترین اندازه برای قطر کلکتور، ارتفاع دودکش و محل قرارگیری سیستم نمک‌زدایی را پیدا می‌کنیم.

## ۲- اجزای نیروگاه دودکش خورشیدی

نیروگاه‌های دودکش خورشیدی از سه بخش اصلی، شامل کلکتور خورشیدی، واحد انتقال توان و دودکش خورشیدی (برج خورشیدی) تشکیل شده‌اند که در ادامه به توضیح هر بخش می‌پردازیم.

## ۲-۱- کلکتور خورشیدی

کلکتورهای خورشیدی از سه قسمت عمده سقف شفاف، سازه ستونی<sup>۴</sup> و شبکه نگهدارنده<sup>۵</sup> تشکیل شده‌اند. در کلکتور خورشیدی، سقف شفاف (شیشه‌ای یا پلاستیکی) توسط سازه ستونی، بالاتر از سطح زمین نگه داشته می‌شود و سقف توسط شبکه نگهدارنده تا چندین متر در جهت افقی کشانده می‌شود، تا یک کلکتور بزرگ خورشیدی شکل بگیرد (شکل ۱).



شکل ۱ نیروگاه دودکش خورشیدی

ارتفاع سقف کلکتور به آرامی در امتداد شعاع از حاشیه به سمت مرکز افزایش می‌یابد تا جریان هوای داخل کلکتور با کمترین تلفات اصطکاک به سمت مرکز هدایت شود. سقف شفاف کلکتور باعث جذب تابش‌های مستقیم و غیرمستقیم خورشید می‌شود و همچنین تابش‌های موج بلند<sup>۶</sup> که از زمین گرم بازتاب

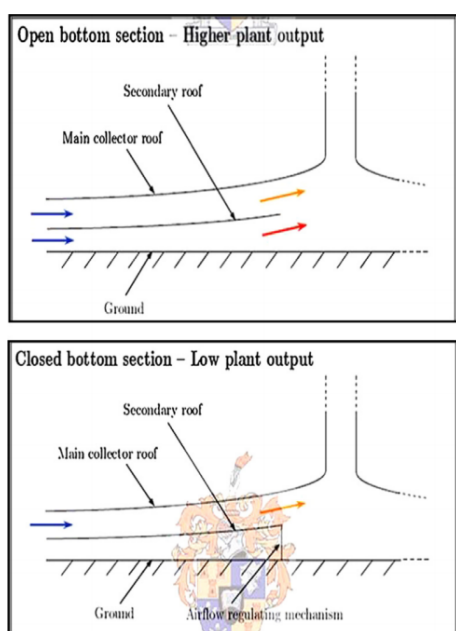
در سال‌های اخیر، تحولات سریع اقتصاد جهانی و افزایش جمعیت و سطح زندگی تهدید بزرگی برای منابع طبیعی ایجاد کرده‌است [۱]. سوخت‌های فسیلی با سرعت زیادی در حال اتمام هستند [۲]. استفاده از سوخت‌های فسیلی همراه با جنگل‌زدایی باعث ایجاد تغییرات قابل توجهی در گرم شدن جو از طریق انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌است که ممکن است اثرات منفی زیادی از جمله آب شدن یخچال‌ها، از بین رفتن تنوع زیستی، انقراض حیوانات، اسیدی شدن اقیانوس‌ها و از بین رفتن جنگل‌ها ایجاد کند [۳]. منابع انرژی تجدیدپذیر می‌توانند در حل مشکلات فوق نقش زیادی داشته باشند. فناوری نیروگاه دودکش خورشیدی یک فناوری مؤثر برای تولید برق در مقیاس بزرگ است که تابش مستقیم خورشید را جذب می‌کند و قسمت‌هایی از انرژی خورشید را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند [۴]. نیروگاه دودکش خورشیدی<sup>۱</sup> از سه جزء اصلی تشکیل شده است: کلکتور، دودکش واقع در مرکز کلکتور و واحد تبدیل توان<sup>۲</sup> که شامل یک یا چند مولد توربین است.

هوا در کلکتور به وسیله انرژی خورشیدی گرم شده و در دودکش به دلیل اثر دودکشی به سمت بالا حرکت می‌کند. در مصارف نیروگاهی هوای گرم و سبک در دودکش به سمت بالا حرکت کرده و با چرخش توربین در دودکش منجر به تولید برق می‌شود [۵]. نیروگاه‌های دودکش خورشیدی می‌توانند کمک قابل توجهی در تأمین انرژی کشورهایی کنند که تابش خورشید و زمین بیابانی بسیاری دارند [۶]. در حال حاضر، انرژی خورشیدی هنوز به میزانی که پتانسیل آن در کره زمین است مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و متأسفانه بخش کوچکی از کل تقاضای انرژی را تأمین می‌کند. با توجه به کاهش روزافزون سوخت‌های فسیلی، انرژی خورشیدی بسیار مهم و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. برای مثال اتحادیه اروپا قصد دارد میزان استفاده خود از سوخت‌های فسیلی را به میزان قابل توجهی کاهش دهد [۷]. همچنین، برای تأمین تقاضای انرژی الکتریکی در آینده، قصد دارند نیروگاه‌های خورشیدی را در کشورهای دیگر مانند مدیترانه و کشورهای خاورمیانه توسعه دهند تا از پتانسیل‌های جغرافیایی این مناطق در جهت تأمین برق در اروپا استفاده شود. مطالعات نشان می‌دهد که خاورمیانه می‌تواند بخشی از زنجیره تولید انرژی خورشیدی در سال ۲۰۵۰ برای تأمین تقاضای برق از اروپا باشد. علاوه بر تولید برق، می‌توان از SCPP برای اهداف کشاورزی در این مناطق کمتر توسعه یافته استفاده کرد [۸]. ظرفیت تولید برق به شرایط مختلف محیطی و ابعاد ساختاری مانند تابش خورشید، دمای محیط، ارتفاع دودکش، قطر جمع‌کننده و ... بستگی دارد. با افزایش ارتفاع دودکش و کلکتور، ظرفیت تولید برق افزایش می‌یابد. با این حال، تولید انرژی با تغییر دمای محیط، خیلی کم تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

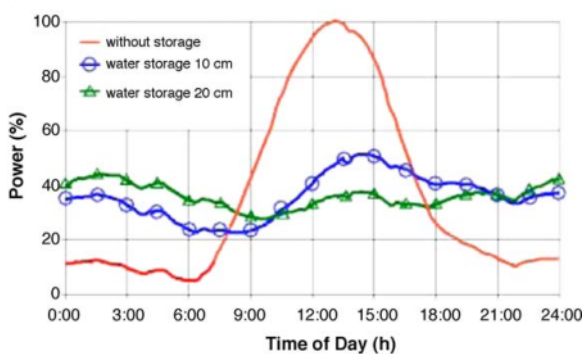
با افزایش سریع جمعیت کره زمین، نیاز به آب شیرین نیز به همین نسبت افزایش پیدا می‌کند. یکی از معایب نیروگاه‌های دودکش خورشیدی در مقایسه با نیروگاه‌های تجدیدپذیر دیگر بازده پایین آن است [۹]. زیرا بخش اعظمی از حرارت جذب شده در کلکتور، توسط دودکش خارج می‌شود [۶].

<sup>۱</sup>Solar chimney power plant (SCPP) <sup>۲</sup>Power conversion unit (PCU) <sup>۳</sup>Combined solar chimney system for power generation and seawater desalination (CSCSPD) <sup>۴</sup>Column structure <sup>۵</sup>Support matrix <sup>۶</sup>Long-wave

و از نظر همرفت طبیعی، انتقال حرارت بین آب در لوله و دیواره لوله بسیار کارآمدتر از انتقال حرارت بین سطح زمین و لایه‌های خاک زیر آن است. طرز کار این سیستم به این صورت است که در طول روز، مقداری از گرما در سیستم ذخیره حرارتی که شامل مخازن کوچک یا لوله‌هایی پر از آب هستند ذخیره می‌شود. آب داخل مخازن در این سیستم در طول شب، هنگامی که هوای داخل کلکتور شروع به خنک شدن می‌کند، گرمای ذخیره‌شده در طول روز را آزاد می‌کند تا هوای داخل کلکتور را گرم نگاهدارد. همان‌طور که در شکل ۳ می‌بینیم مخازن به صورت بسته‌هایی پر از آب هستند، جایی که هیچ‌گونه تبخیری در آن اتفاق نمی‌افتد. سطح بالایی مخازن آب (بسته‌های آب) شفاف است تا بتواند انرژی تابشی خورشید را به آب منتقل کند و سطح پایین آن را سیاه رنگ می‌کنند تا تابش خورشید را به طور مؤثر جذب کند. حجم مخازن آب با توجه به ضخامت آن‌ها متناسب با مشخصات مطلوب و مورد نظر خروجی برق نیروگاه در طول شبانه‌روز انتخاب می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ می‌بینیم، که با استفاده از مخازن آب برای ذخیره انرژی در طول روز، می‌توان در شب نیز توان تولید کرد، اما این ذخیره‌سازی باعث کاهش میزان تولید در طول روز و ساعات آفتابی می‌شود.



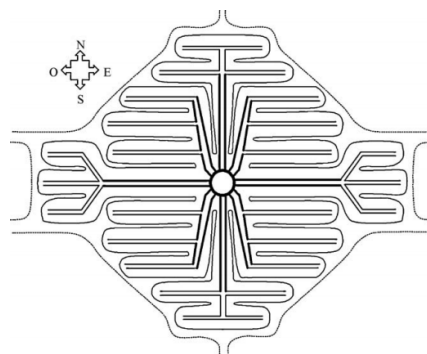
شکل ۳ سقف ثانویه برای افزایش ذخیره گرما در کلکتور خورشیدی [۱۳]



شکل ۴ تفاوت توان تولیدی بین کلکتور بدون ذخیره‌ساز انرژی کلکتور همراه با کیسه آب [۱۴]

می‌شوند را نگه‌داشته و بازایی می‌کند. جذب این تابش‌ها در کلکتورها باعث گرم شدن زمین زیر سقف کلکتور می‌شود، بنابراین هوای بالای زمین و داخل کلکتور گرم و باعث ایجاد اثر گلخانه‌ای در آن می‌شود. لذا هوای گرم‌شده داخل کلکتور به سمت مرکز آن حرکت می‌کند [۱۱].

به منظور کاهش تلفات اصطکاک جریان متلاطم، یک کلکتور جدید با ضلع‌ها و گوشه‌هایی شامل شاخه‌هایی داخل آن‌ها توسط بونل [۱۲] پیشنهاد شد (شکل ۲). در مقایسه با کلکتورهای معمولی، این طرح جدید در مقایسه با دایره‌ای با همان مساحت، مساحت ورودی بیشتری دارد. این امر منجر به کاهش سرعت هوا و در نتیجه از بین رفتن اصطکاک ناشی از جریان آشفته می‌شود. بر این اساس، سقف کمتری مورد نیاز است که باعث کاهش در هزینه ساخت می‌شود.



شکل ۲ پیکربندی نامنظم کلکتور خورشیدی [۱۲]

معمولاً خاک طبیعی ظرفیت ذخیره حرارتی مشخص و محدودی دارد، به همین دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی خاک نمی‌تواند نیاز SCPP را در طول شب و روزهای ابری برطرف کند. به منظور بهبود عملکرد عملیاتی SCPP نیروگاه دودکشی در طول شب، برخی اقدامات ارائه شده‌است، که به توضیح مختصری از آن‌ها می‌پردازیم.

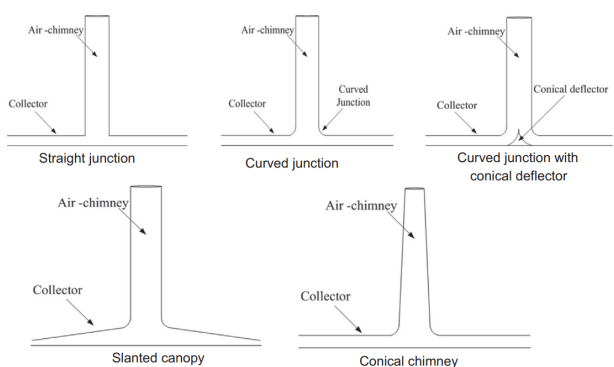
استفاده از سقف ثانویه در کلکتورها یکی از روش‌هایی است که برای ذخیره انرژی در کلکتور توسط پرتوریوس [۱۳] معرفی شده‌است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، سقف ثانویه، کلکتور را به دو قسمت بالا و پایین تقسیم می‌کند. یک مکانیسم تنظیم جریان هوا در خروجی قسمت پایینی کلکتور برای کنترل جریان هوا در آن قسمت تعبیه شده است که با افزایش یا کاهش فشار در آن قسمت توسط مکانیزم تنظیم‌کننده، جریان هوا در قسمت پایینی کنترل می‌شود. این امر توانایی ذخیره و آزادسازی انرژی از زمین را به نیروگاه می‌دهد تا نیروگاه بتواند توان تولیدی برق خود را تنظیم کند. در صورت نیاز به برق کمتر، قسمت پایین بسته و انرژی در زمین ذخیره می‌شود. در غیر این صورت، قسمت پایین به صورت کنترل‌شده باز می‌شود تا هوا در زیر سقف ثانویه جریان یابد تا انرژی ذخیره‌شده در زمین آزاد شود.

یکی از اولین پیشرفت‌های پیشنهادی برای بهبود کارایی SCPP در شب، استفاده از لوله‌ها یا کیسه‌هایی پر از آب در کلکتورهای دودکش خورشیدی برای ذخیره‌سازی گرما است. لوله‌های محکم پر از آب شکل ۳ به‌عنوان ذخیره‌ساز حرارتی توسط کریترز [۱۴] معرفی شد. این ایده بر این اصل استوار است که ظرفیت حرارتی ویژه آب بسیار بیشتر از خاک است

پیکربندی هندسی ممکن برای HTVTS شامل اتصال مستقیم، اتصال منحنی، اتصال مورب، دودکش مخروطی و اتصال منحنی با مخروط راهنما مطابق شکل ۷ توسط براندز و همکاران ارائه و مقایسه شده است [۱۶]. میزان جریان گرمی برای پیکربندی‌های مختلف شبیه‌سازی و در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱ مقدار جریان گرمی برای مدل‌های مختلف HTVTS

مدل	$H_{c1}$	$R_{t1}$	$R_{in}$	$R_{ex}$	$\dot{m}_f (kgs^{-1})$
اتصال مستقیم	۰/۰۲	۰/۰۵	-	-	$۸/۳۱ \times ۱۰^{-۴}$
اتصال منحنی	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱	-	$۱/۰۸ \times ۱۰^{-۳}$
اتصال مورب	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۱	-	$۱/۲۹ \times ۱۰^{-۳}$
دودکش مخروطی	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱	-	$۱/۹۲ \times ۱۰^{-۳}$
اتصال منحنی با مخروط راهنما	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۲	$۱/۱ \times ۱۰^{-۳}$

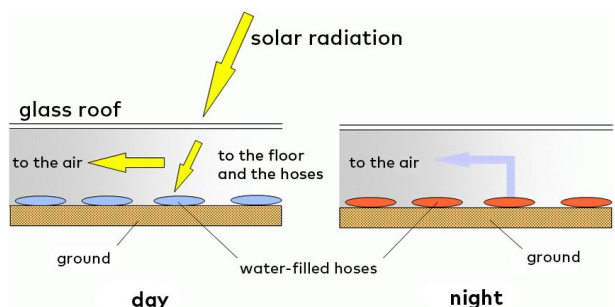


شکل ۷ پیکربندی‌های مربوط به گذرگاه جریان هوا [۱۶]

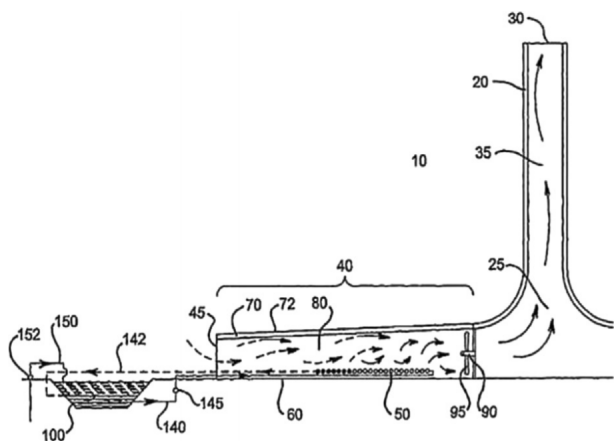
پیکربندی‌های هندسی HTVTS می‌توانند باعث ایجاد آشفتگی در جریان شوند که این آشفتگی در رفتار آیرودینامیکی جریان تأثیر می‌گذارد. مطالعات براندز [۱۶] نشان داد که بیشترین میزان جریان گرمی و دمای هوای کلکتور در پیکربندی دودکش مخروطی اتفاق می‌افتد. درحالی‌که، جریان جرم هوا ( $\dot{m}_f$ ) برای پیکربندی اتصال مستقیم به علت ایجاد گردش مجدد جریان در محل اتصال نیز کمترین مقدار است. استفاده از اتصال منحنی، باعث ایجاد جریان گرمی بیشتری در کلکتور می‌شود. توربوژنراتورها از اجزای اصلی هر نیروگاه دودکش خورشیدی هستند. کار اصلی توربین در دودکش، تبدیل کارآمد توان سیال به توان شفت است. توربین‌های معمولی در دودکش خورشیدی از نوع توربین‌های با جریان محوری هستند که مشخصات و خصوصیات آن‌ها (از قبیل تعداد پره‌های روتور، سرعت خاص پره‌ها و قطر توربین) بین خصوصیات توربین بادی و توربین گاز است. پره‌های آن مانند توربین بادی قابل تنظیم است، اما همانند توربین گاز، هوا در حصار و در محیطی دیوارچین شده جریان دارد و همچنین توربین‌های دودکش مطابق شکل ۸ ممکن است دارای IGV در ورودی شعاعی خود باشند.

پیشنهادهای مختلفی برای پیکربندی‌ها، مکان‌های نصب و چیدمان‌های توربین‌ها ارائه شده است. توربین‌ها در نیروگاه با دودکش معمولی، معمولاً در پایه دودکش قرار می‌گیرند. پاسومارثی و شریف [۱۷، ۱۸] توربین‌هایی را برای نصب در بالای دودکش پیشنهاد دادند. در بیشتر تحقیقات انجام شده مرتبط با

استفاده از حوضچه‌های خورشیدی به عنوان انرژی حرارتی مکمل و برای ذخیره‌سازی حرارتی SCPP توسط دیوی [۱۵] ارائه شد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، حوضچه‌های خورشیدی در خارج از کلکتور قرار می‌گیرند. این حوضچه‌ها گرما را در روز در لایه‌های آب شور به دام می‌اندازند تا در شب این گرما را آزاد کنند و هوا را گرم کنند تا بتوانیم با هوای گرم تولید شده، در شب نیز توربین‌ها را تغذیه کنیم. تابش خورشید در این استخرها جذب شده و در سطح پایین استخرها ذخیره می‌شود، با گرمای جذب شده توسط تابش خورشید می‌توان آب نمکی با دمای حدود ۳۵ تا ۵۰ درجه سانتیگراد بالاتر از دمای محیط با استفاده از مبدل حرارتی استخراج کرد تا با گرم شدن هوا توسط مبدل‌ها نیروگاه بتواند در شب‌ها و روزهای ابری نیز برق تولید کند.



شکل ۵ استفاده از کیسه‌های آب برای افزایش ذخیره گرما در کلکتور خورشیدی [۱۴]



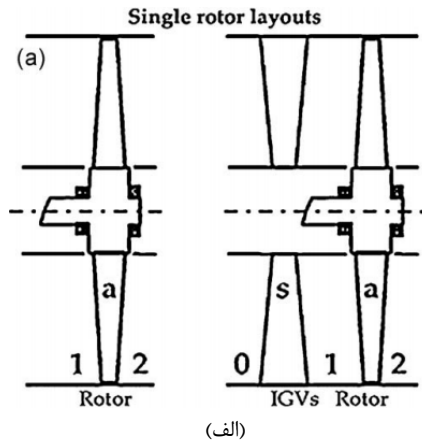
شکل ۶ استفاده از استخر خورشیدی برای تأمین گرما در شب در کلکتور خورشیدی [۱۵]

## ۲-۲-۱ واحد تبدیل توان

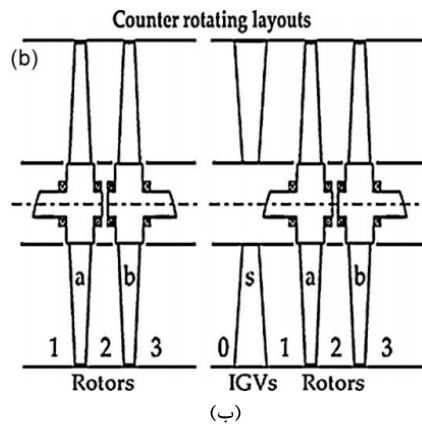
واحد تبدیل توان<sup>۱</sup> در یک نیروگاه بزرگ دودکش خورشیدی، متشکل از یک یا چند توربوژنراتور، رابط شبکه و یک واحد انتقال جریان افقی به عمودی<sup>۲</sup> است که در قسمت خروجی جریان از کلکتور به دودکش<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. این بخش انتقال، شامل پره‌های راهنما<sup>۴</sup> در ورودی توربین است که جریان را از افقی به عمودی هدایت می‌کند. یک پخش‌کننده<sup>۵</sup> نیز معمولاً در پشت توربین‌ها در دودکش قرار می‌گیرد که این پیکربندی پیچیده در HTVTS باعث کاهش فشار جریان می‌شود. پنج

<sup>۱</sup>PCU <sup>۲</sup>HTVTS <sup>۳</sup>SC <sup>۴</sup>IGV <sup>۵</sup>Diffuser

توربین ضد چرخش با IGV بررسی کرده‌است (شکل ۱۰). او دریافت که طرح تک روتور بدون IGV ساده‌ترین و ارزان‌ترین طرح است اما بازده کلی استاتیکی<sup>۲</sup> آن پایین است، زیرا چرخش در خروجی توربین قابل بازیابی نیست. اما برای سه طرح دیگر، بازده کلی استاتیکی آن بسیار بهتر است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰ توربین تک‌روتور و توربین با روتور چندگانه [۲۱]

به طور کلی شش نوع توربین را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت [۲۲]:

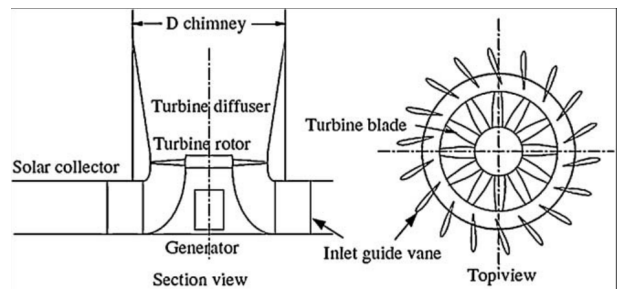
۱. توربین تک‌روتور تک‌محوره عمودی با یا بدون IGV (SVST (a یا b))
۲. توربین ضد چرخش تک‌محوره عمودی با یا بدون IGV (SVCT (a یا b))
۳. توربین چندمحوره عمودی تک‌روتور با یا بدون IGV (MVST (a یا b))
۴. توربین ضد چرخش چندمحوره عمودی با یا بدون IGV (MVCT (a یا b))
۵. توربین تک‌روتور چندمحوره افقی با یا بدون IGV (MHST (a یا b))
۶. توربین ضد چرخش چندمحوره افقی با یا بدون IGV (MHCT (a یا b))

### ۲-۳- دودکش

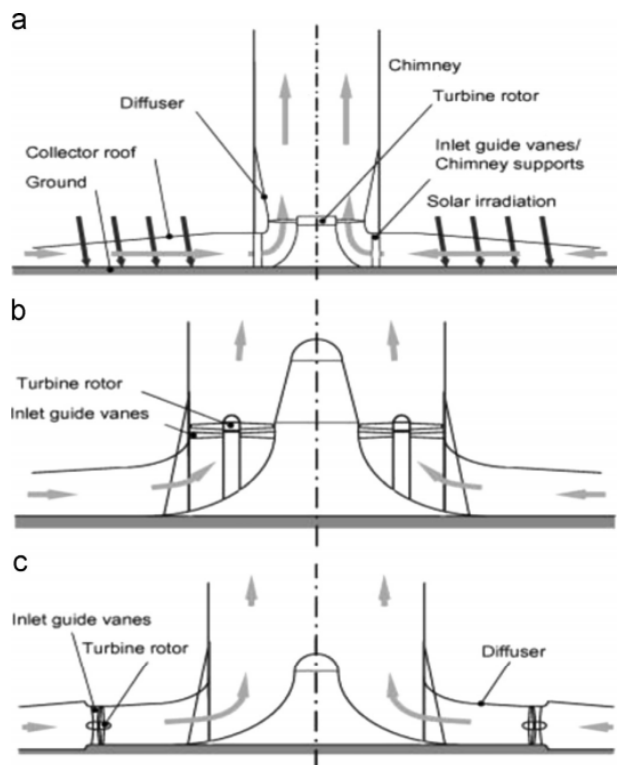
دودکش مستقر در مرکز کلکتور، نقش موتور حرارتی را در نیروگاه دودکش خورشیدی ایفا می‌کند که باعث ایجاد مکش در دودکش

<sup>1</sup>IGV <sup>2</sup>Total to static

SCPP توربین‌های دودکش خورشیدی در نیروگاه‌های بزرگ، به دلیل دشواری‌های ناشی از نصب و نگهداری ژنراتورهای توربین در بالای دودکش، پیشنهاد می‌شود که در پایه دودکش قرار گیرند. طرح‌های مختلفی برای توربین‌های دودکش خورشیدی ارائه شده‌است که به بررسی اجمالی از آن‌ها می‌پردازیم. شلیچ [۱۹] سه طرح پیکربندی برای توربین‌های دودکش خورشیدی، شامل محور عمودی تکی، محور عمودی چندگانه و محور افقی چندگانه را ارائه داده است (شکل ۹).



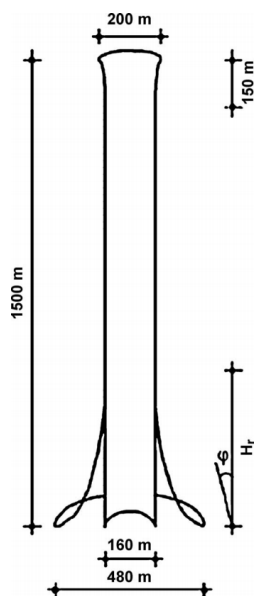
شکل ۸ طرح دودکش با پیکربندی (SVSTa) [۲۰].



شکل ۹ (a) تک‌محوره عمودی؛ (b) محور عمودی چندگانه؛ (c) محور افقی چندگانه [۱۹]

هدایت جریان هوای گرم تولید شده در کلکتور به توربین (انتقال افقی به عمودی) در SCPP به منظور کاهش تلفات انرژی که از گردش مجدد هوای گرم در خروجی کلکتور ناشی شود، امر بسیار مهمی است. برای دستیابی به راهنمای مناسب جهت هدایت هوای گرم به توربین‌ها، پره‌های راهنما در ورودی توربین‌ها لازم است. فلوری [۲۱] تأثیر IGVها را بر روی توربین‌های با محور افقی در چهار پیکربندی (توربین تک روتور بدون IGV، توربین تک روتور با IGV، توربین ضد چرخش بدون IGV و

به ۲۵٪ متر در نیمه راه کاهش می‌یابد و سپس تا انتها ثابت باقی می‌ماند. سخت‌کننده‌های حلقوی با فاصله عمودی نصب می‌شوند تا از ساختار بالایی دودکش پشتیبانی کنند [۲۳]. یک طرح با پوسته دوتایی توسط ساکا [۲۶] برای بهبود سختی و پایداری دینامیکی دودکش ارائه شده است (شکل ۱۲). یک پوسته بتونی هذلولی به قسمت تحتانی پوسته استوانه‌ای اضافه شده و خروجی دودکش به شکل یک زنگوله باز می‌شود. این ساختار مفهومی برای توربین‌های چند محور افقی مناسب‌تر است.



شکل ۱۲ دودکش خورشیدی با پوسته دوتایی [۲۶]

### ۳- ترکیب دودکش خورشیدی با فناوری‌های دیگر

#### ۳-۱- نمک‌زدایی

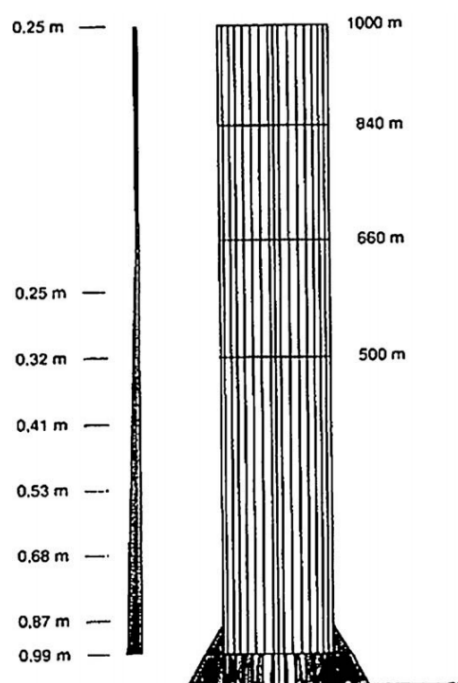
یکی از معایب نیروگاه‌های دودکش خورشیدی بازدهی پایین آن‌ها است؛ به همین دلیل ترکیب سیستم تولید توان با سیستم نمک‌زدایی در این فناوری می‌تواند بازدهی کل SCPP را به طرز چشم‌گیری افزایش دهد. تحقیقات انجام شده در مورد ترکیب نیروگاه دودکش خورشیدی با فناوری‌های دیگر هنوز سهم بسیار کمی در مجموعه مطالعات مربوط به SCPP دارد. در این قسمت تحقیقات مربوط به نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ژو و همکاران [۱۱] یک مدل ریاضی برای SCPP و یکی برای نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی ارائه کردند که در شمال غرب چین مورد مطالعه قرار گرفت. در این مدل نیروگاه دودکش خورشیدی دارای سیستم نمک‌زدایی، شامل اجزای زیر است:

۱. کلکتور
۲. دودکش
۳. توربین
۴. لایه ذخیره‌کننده انرژی
۵. حوضچه آب شیرین‌کن

در نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی، ساختار کلکتور، دودکش و توربین تفاوت چندانی با نیروگاه دودکش خورشیدی کلاسیک ندارد (شکل ۱۳). لایه ذخیره‌کننده انرژی و حوضچه

می‌شود که این مکش باعث کشیده شدن هوای محیط به داخل کلکتور می‌شود. دودکش همانند یک لوله فشار است که به دلیل نسبت سطح به حجم، اصطکاک کمتری دارد [۲۲] همچنین جریان جرمی هوا در دودکش، متناسب با افزایش دمای هوای کلکتور و ارتفاع دودکش است. ارتفاع دودکش SCPP تا حد زیادی به بازده دودکش و بازده کل سیستم کمک می‌کند. برای یک SCPP تجاری مناسب، ارتفاع دودکش باید به طرز معقولی بلند و تا حدود ۱۰۰۰ متر بلندی داشته باشد اما با کاهش ارتفاع، افزایش مساحت در منطقه کلکتور می‌تواند به عنوان جبران‌کننده ارتفاع دودکش باشد [۲۳-۲۵].

بر اساس ارتفاع زیاد دودکش‌های خورشیدی، ساختار دودکش با تهدید نیروهای خارجی روبرو می‌شود که ممکن است این تهدیدها در اثر طوفان، باد و یا سایر نیروهای طبیعی به وجود بیاید. به همین ترتیب، برای غلبه بر چنین تهدیدهایی، دودکش باید طراحی و ساختاری مناسب داشته باشد. بسیاری از طرح‌های سازه دودکش خورشیدی برای مقابله با اثرات نیروهای طبیعی با برخی ملاحظات اقتصادی بر روی هزینه ساخت، ارائه شده‌اند، بدون آنکه یکپارچگی و مقاومت سازه‌ای به خطر بیفتد.



شکل ۱۱ دودکش خورشیدی با ارتفاع ۱۰۰۰ متر و قطر ۱۷۰ متر [۲۳]

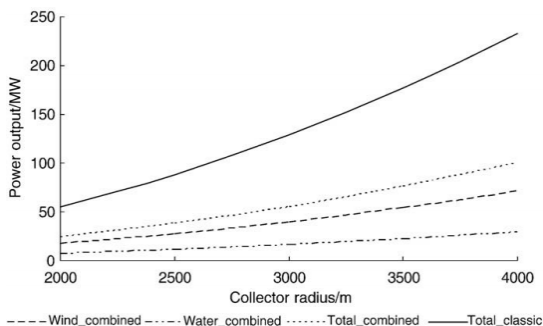
طراحی ساختار و ساخت یک دودکش بزرگ برای یک نیروگاه بزرگ SCPP امر بسیار مهمی است. شلیچ [۲۳] فکر کرد که بهترین انتخاب برای ساختار دودکش خورشیدی، ساختار بتن مسلح است، چرا که دارای طولانی‌ترین طول عمر همراه با مناسب‌ترین هزینه در بین بسیاری از روش‌های ساختاری ممکن و مصالح ساختمانی دودکش است. آن‌ها مجموعه‌ای از دودکش‌های استوانه‌ای بتن‌آرمه را برای SCPP‌های تجاری طراحی کردند. بالاترین ارتفاع این دودکش‌ها به ۱۰۰۰ متر رسیده است. شلیچ [۲۳] ساختار یک مورد بزرگ دودکش، به ارتفاع ۱۰۰۰ متر و قطر خارجی ۱۷۰ متر را نیز طراحی کرده است (شکل ۱۱). ضخامت پوسته دودکش از ۹۹٪ متر (درست در بالای تکیه‌گاه)

شیرین استخراج شده از کندانسور از بالا به سمت پایین آمده و وارد توربین آبی می‌شود. این توربین پتانسیل گرانشی آب را به برق تبدیل می‌کند. در حقیقت در این نیروگاه به دو طریق توان تولید می‌شود. ابتدا تبدیل انرژی جنبشی هوای گرم به انرژی الکتریکی و سپس تبدیل انرژی گرانشی آب شیرین به انرژی الکتریکی صورت می‌گیرد.

با تجزیه و تحلیل ریاضی این دو نیروگاه دودکش خورشیدی نتایج به دست آمده به شرح زیر هستند:

۱. دمای هوای خروجی در نیروگاه دودکش خورشیدی کلاسیک ۲۶/۸ درجه سانتی‌گراد از دمای هوای خروجی در دودکش خورشیدی ترکیبی بالاتر است که علت آن صرف مقداری از انرژی حرارتی خورشید برای غلبه بر گرمای نهان تبخیر آب در نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی است.

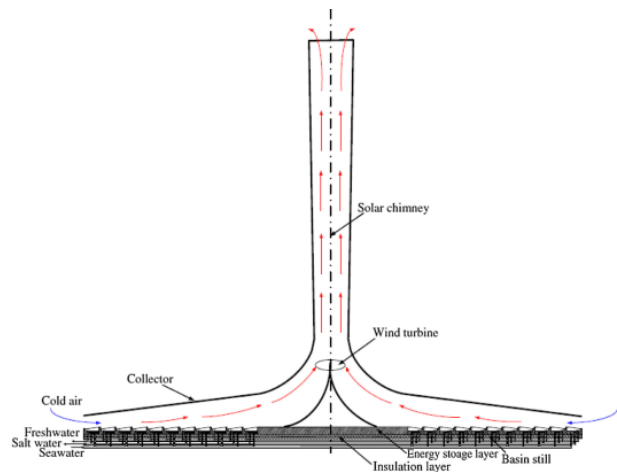
۲. در نمودار شکل ۱۴ توان خروجی کل نیروگاه بر حسب شعاع کلکتور برای چهار حالت رسم شده است. توان خروجی کل در SCPP از سه حالت دیگر به ازای هر مقدار شعاع کلکتور بیشتر است. همچنین در دو حالت، توربین‌های آبی و هوا به صورت انفرادی در سیستم مورد بررسی قرار گرفته‌اند که توربین هوا توان بیشتری را به ازای هر شعاع کلکتور نسبت به توربین آبی تولید می‌کند. بدیهی است که توان خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی با هر دو توربین از دو حالت توربین انفرادی بالاتر است.



شکل ۱۴ نمودار توان خروجی بر حسب شعاع کلکتور [۲۷]

۳. در نمودار شکل ۱۵ توان خروجی کل نیروگاه بر حسب ارتفاع برج دودکش برای چهار حالت رسم شده است. توان خروجی کل در SCPP از سه حالت دیگر به ازای هر مقدار ارتفاع برج بیشتر است. همچنین شیب تغییرات توان نسبت به ارتفاع برج در SCPP نسبت به سه حالت دیگر بیشتر است. در دو حالت، توربین‌های آبی و هوا به صورت انفرادی در سیستم مورد بررسی قرار گرفته‌اند که توربین هوا توان بیشتری را به ازای هر ارتفاع برج نسبت به توربین آبی تولید می‌کند. بدیهی است که توان خروجی نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی با هر دو توربین، از دو حالت توربین انفرادی بالاتر است. همچنین شیب تغییرات توان بر حسب ارتفاع برج در حالت کارکرد توربین آبی به صورت انفرادی از حالت‌های دیگر بسیار کمتر و تقریباً نزدیک به صفر است که به معنای وابستگی بسیار پایین توربین آبی به ارتفاع دودکش است.

آب شیرین‌کن در زیر کلکتور قرار دارند. یک لایه از جنس سنگ به عنوان بستر جاذب عمل می‌کند. اشعه خورشید وارد کلکتور شده و بخش قابل توجهی از آن توسط بستر جاذب، جذب آب شور می‌شود. آب شور گرم شده و تبخیر می‌شود. بخار آب شیرین در محفظه شیشه‌ای چگالش شده و به بیرون از سیستم هدایت می‌شود. در این سیستم ارتفاع دودکش ۲۰۰ متر، قطر دودکش ۱۰ متر، قطر کلکتور ۲۵۰ متر، ارتفاع کلکتور ۲ متر و قطر لایه ذخیره ساز ۴۰ متر است. به ازای ۶ ساعت کار روزانه، خروجی این سیستم ۲۸۳ مگاوات ساعت انرژی و ۶۹۵۰۰ تن آب شیرین در هر سال تخمین زده شده است. همچنین نکته قابل توجه این است که دمای هوای خروجی در نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی کمتر از SCPP است که علت آن صرف مقداری از انرژی خورشید برای غلبه بر گرمای نهان تبخیر آب است. همچنین توان تولیدی در دودکش خورشیدی ترکیبی از SCPP پایین‌تر است که علت آن صرف مقداری از انرژی خورشید برای نمک‌زدایی در دودکش خورشیدی ترکیبی است.



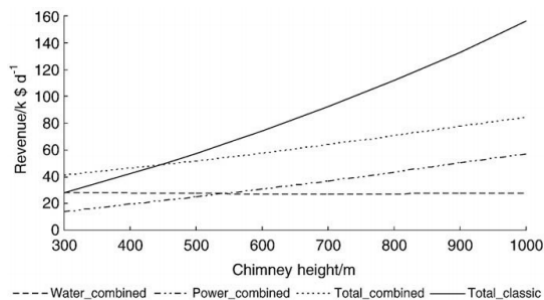
شکل ۱۳ نمونه دودکش خورشیدی ترکیبی بررسی شده در شمال غرب چین [۱۱]

ژو و همکاران [۲۷] دو نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی و کلاسیک را در دالبان چین با یکدیگر مقایسه کردند. در این مدل نیروگاه دودکش خورشیدی دارای سیستم نمک‌زدایی، شامل اجزای زیر است:

۱. کلکتور
۲. دودکش
۳. توربین آبی و هوا
۴. چگالنده با بازده بالا

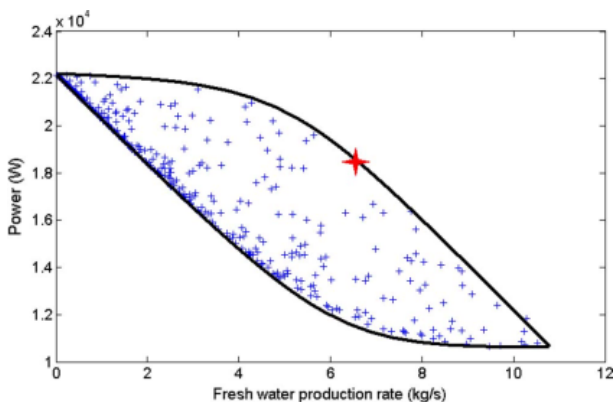
در این سیستم هوای ورودی در تماس مستقیم با آب دریا قرار می‌گیرد. آب با جذب حرارت خورشید گرم شده و هوا با عبور از سطح آب، گرم و اشباع می‌شود. هوای گرم شده به سمت دودکش حرکت می‌کند. توربین هوا در پایین برج نصب شده است و با عبور هوای گرم اشباع برق تولید می‌کند. هوا پس از عبور از توربین هوا به سمت بالا حرکت کرده و وارد چگالنده می‌شود. هوای سرد اطراف نیز به علت اختلاف فشار بین کندانسور و محیط بیرون، وارد کندانسور می‌شود. در کندانسور، هوای گرم اشباع توسط هوای سرد وارد شده از اطراف به کندانسور دچار چگالش شده و آب شیرین از آن استخراج می‌گردد. این نوع چگالش نیاز به اعمال نیروی خارجی ندارد و به طور طبیعی انجام می‌شود. آب

نیروگاه دودکش خورشیدی در حالت کارکرد توربین آبی و کندانسور برای نمک‌زدایی با افزایش ارتفاع برج نزول پیدا می‌کند.



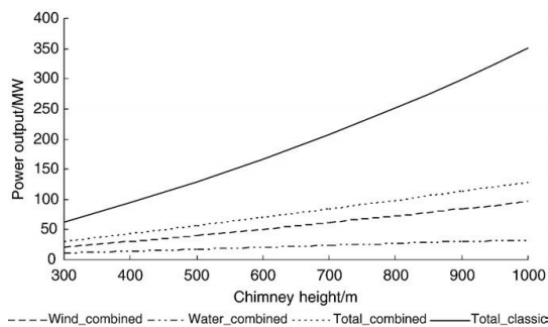
شکل ۱۷ نمودار درآمد نیروگاه دودکش خورشیدی بر حسب ارتفاع برج [۲۷]

برای دستیابی به بالاترین بازده ممکن در یک نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی باید با تغییر فاکتورهای مختلف از جمله ارتفاع برج، شعاع کلکتور، محل قرارگیری سیستم نمک‌زدایی و... به ایده آل‌ترین حالت ممکن برسیم. آسایش و همکاران [۲۸] نمونه‌های مختلف نیروگاه دودکش خورشیدی را بررسی و بهینه‌سازی کرده‌اند. در شکل ۱۸ دیاگرام پارتو<sup>۱</sup> برای ارزیابی بهترین حالت تولید برق به همراه نمک‌زدایی، رسم شده است. نمودار پارتو نموداری معروف و پرکاربرد در مسائل مدیریتی است که به وسیله فاکتورهای موجود در سیستم به تجزیه و تحلیل سیستم می‌پردازد.



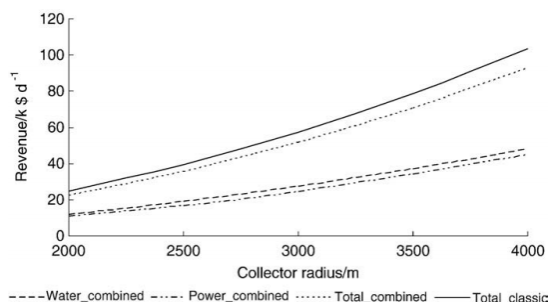
شکل ۱۸ دیاگرام پارتو [۲۸]

همان‌طور که در نمودار نشان داده شده است، در حالتی که تمام انرژی گرمایی اشعه خورشید برای تولید توان استفاده شود، توان تولیدی ۲۲ کیلووات و آب شیرین خروجی صفر است. همچنین در حالتی که تمام انرژی گرمایی اشعه خورشید برای نمک‌زدایی استفاده شود، توان خروجی ۱۱ کیلووات و نرخ دریافت آب شیرین ۱۰/۴ کیلوگرم بر ثانیه است. بهترین حالت با علامت ستاره نشان داده شده است که برابر دریافت ۱۸/۵ کیلووات انرژی به همراه ۶/۵ کیلوگرم بر ثانیه آب شیرین است. ارتفاع بهینه برای برج ۲۰۰ متر و قطر کلکتور ۲۵۰ متر است. با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>۲</sup> بهترین محل قرارگیری سیستم نمک‌زدایی (برای دریافت انرژی و آب شیرین بهینه مطابق دیاگرام پارتو) در شعاع ۸۵ تا ۱۲۵ متری کلکتور است.



شکل ۱۵ نمودار توان خروجی بر حسب ارتفاع برج [۲۷]

۴. یکی از مباحث مهم در مقایسه نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی با SCPP بحث اقتصادی است. در نمودار شکل ۱۶ درآمد حاصل (دلار آمریکا/روز) بر حسب شعاع کلکتور برای چهار حالت رسم شده است. مبنای محاسبه درآمد برای رسم این نمودار قیمت آب و برق در چین است (قیمت آب شیرین برابر ۰/۴ دلار آمریکا/تن و قیمت برق برابر ۰/۰۹ دلار آمریکا/کیلووات ساعت). درآمد حاصل از SCPP از سه حالت دیگر به ازای هر مقدار شعاع کلکتور بیشتر است. در دو حالت، درآمد حاصل از کارکرد توربین آبی و کندانسور برای تولید توان و نمک‌زدایی و توربین هوا برای تولید توان به صورت انفرادی در سیستم مورد بررسی قرار گرفته‌اند که درآمد حاصل از کارکرد توربین آبی و کندانسور برای تولید توان و نمک‌زدایی نسبت به توربین هوا برای تولید توان بالاتر است. همچنین درآمد حاصل از نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی پایین‌تر از درآمد حاصل از SCPP است. البته این اختلاف در شعاع‌های پایین کلکتور ناچیز است.



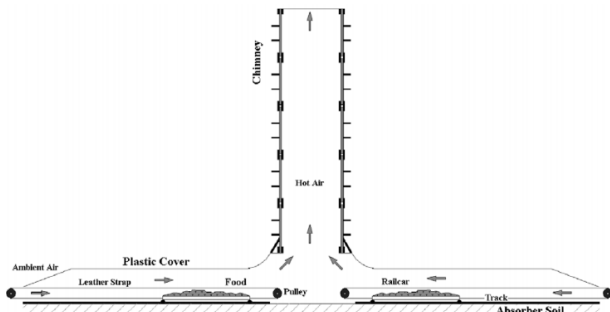
شکل ۱۶ نمودار درآمد نیروگاه دودکش خورشیدی بر حسب شعاع کلکتور [۲۷]

۵. در نمودار شکل ۱۷ درآمد حاصل (دلار آمریکا / روز) بر حسب ارتفاع دودکش برای چهار حالت رسم شده است. مبنای محاسبه درآمد برای رسم این نمودار قیمت آب و برق در چین است. با افزایش ارتفاع درآمد حاصل در هر دو نمونه افزایش پیدا می‌کند. تا ارتفاع ۴۴۵ متر درآمد حاصل از نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی بالاتر است و در ارتفاعات بالاتر از آن درآمد SCPP بیشتر از نمونه ترکیبی است. با افزایش ارتفاع سرعت هوای خروجی افزایش و دمای آن کاهش پیدا می‌کند. این امر باعث افزایش توان خروجی توربین‌های هوا و آبی و کاهش اندکی در میزان آب شیرین دریافتی از سیستم می‌شود. بدین ترتیب درآمد

<sup>1</sup>Pareto <sup>2</sup>Particle swarm optimization

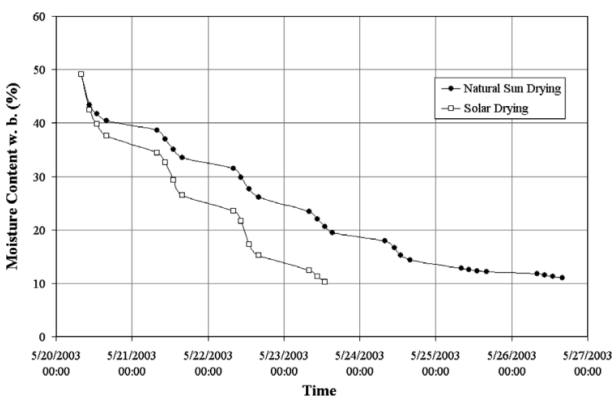


در یک آزمایش، خشک کردن دانه‌های قهوه و موز کامل (پوست گرفته‌شده) انجام شد. برای ارزیابی و مقایسه بازدهی نیروگاه دودکش خورشیدی (ترکیبی با خشک‌کن) با خشک‌کن ساده خورشیدی محصولات به دو نمونه تقسیم شدند. یک نمونه در معرض آفتاب طبیعی قرار گرفت و نمونه دیگر در داخل نیروگاه دودکش خورشیدی خشک شد. با اندازه‌گیری و مقایسه رطوبت نسبی هوای محیط (۶۳٪) با جریان هوای درون نیروگاه (۵۴٪)، به مزیت نیروگاه دودکش خورشیدی پی می‌بریم. دلیل این اختلاف بالاتر بودن دمای هوای درون نیروگاه به علت جذب گرمای بیشتر توسط جاذب است که منجر به کاهش رطوبت نسبی هوای درون نیروگاه می‌شود. با اندازه‌گیری دمای هوای درون کلکتور پی می‌بریم که بیشترین مقدار دما در مرکز نیروگاه (زیر برج) است. همچنین به علت بالاتر بودن دمای هوا در این ناحیه سرعت هوا نیز بالاتر است. در نتیجه برای خشک کردن محصولات کشاورزی بهترین مکان مرکز کلکتور در زیر دودکش است.



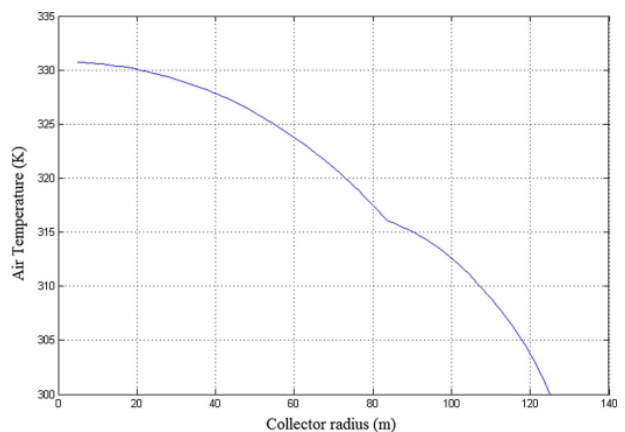
شکل ۲۰ نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی با خشک‌کن [۲۹]

آزمایش خشک کردن دانه‌های قهوه و موز انجام شد. در تمام آزمایشات، زمان لازم برای خشک شدن در داخل دودکش خورشیدی کمتر از زمان لازم برای خشک شدن در معرض آفتاب طبیعی بود. همچنین میزان رطوبت نهایی قابل قبول برای محصولات خشک شده در دودکش خورشیدی بدست آمده است. در نمودار شکل ۲۱ میزان رطوبت دانه‌های قهوه بر حسب زمان برای دو نمونه بررسی شده در آزمایش رسم شده است. در این آزمایش رطوبت اولیه دانه‌های قهوه ۵۰ درصد و رطوبت نهایی ۱۱ درصد بوده است. همان‌طور که می‌بینیم زمان لازم برای خشک شدن دانه‌های قهوه در روش خشک کردن با نور مستقیم آفتاب ۱۵۲ ساعت و در روش خشک کردن در نیروگاه دودکش خورشیدی ۷۶ ساعت است.



شکل ۲۱ میزان رطوبت دانه‌های قهوه بر حسب زمان [۲۹]

با قرار گیری سیستم نمک‌زدایی در این ناحیه (ابتدای کلکتور) ابتدا با استفاده از انرژی گرمایی هوای ورودی و همچنین گرم تر شدن این هوا با دریافت اشعه خورشیدی، نمک‌زدایی صورت گرفته و پس از آن اشعه خورشید صرفاً باعث گرم شدن هوای کلکتور برای تولید برق می‌شود. در نمودار شکل ۱۹ دمای هوای کلکتور بر حسب شعاع کلکتور در نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی بهینه سازی شده، رسم شده است. در شعاع ۸۵ متری کلکتور با پایان بخش نمک‌زدایی شیب نمودار دچار یک افزایش شدید می‌شود. در این ناحیه افزایش دمای هوای کلکتور با سرعت بیشتری انجام می‌شود که علت آن جذب تمامی انرژی تشعشعی توسط هوا است.

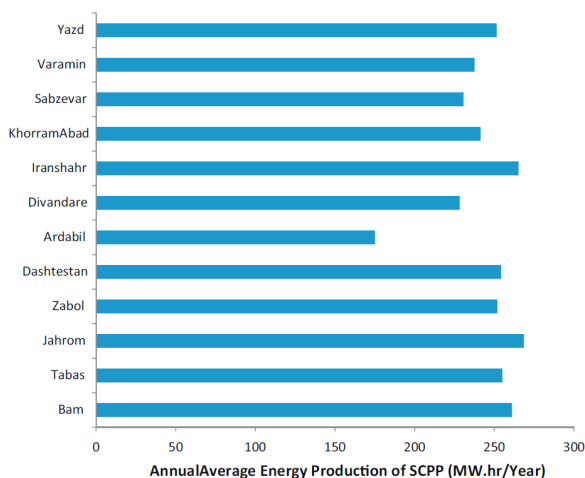


شکل ۱۹ دمای هوای کلکتور بر حسب شعاع کلکتور [۲۸]

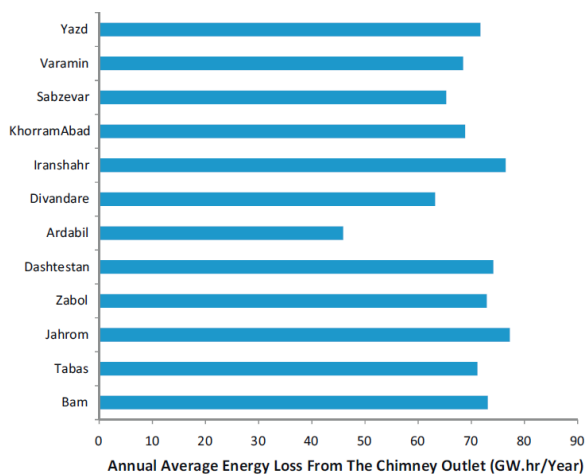
### ۳-۲- خشک‌کن

یکی دیگر از فناوری‌های نیروگاه دودکش خورشیدی، ترکیب این نیروگاه با سیستم خشک‌کن غذایی است. با توجه به افزایش جمعیت کره زمین نیاز به غذا نیز افزایش می‌یابد. برای کاهش تلفات تولید محصولات کشاورزی باید آن‌ها را رطوبت زدایی کنیم. با خشک کردن محصولات کشاورزی عمر آن‌ها افزایش پیدا می‌کند و محصول دیرتر خراب می‌شود. شیوه کارکرد نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیب شده با سیستم خشک‌کن بسیار شبیه به نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیب شده با سیستم نمک‌زدایی است. در این سیستم نیز هوا وارد کلکتور شده و با جذب حرارت از خورشید گرم می‌شود. این هوای گرم با عبور از روی محصولات کشاورزی قرار داده شده در مسیر، مقداری از گرمای خود را صرف رطوبت زدایی از محصولات کشاورزی می‌کند و سپس وارد برج شده و با چرخش توربین هوا برق تولید می‌کند. در مقاله فیرا و همکاران [۲۹] یک نمونه نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیب شده با سیستم خشک‌کن در کشور برزیل مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این نیروگاه برجی به ارتفاع ۱۲/۳ متر از جنس چوب ساخته شده و یک شیشه فایبر گلاس به قطر ۱ متر آن را می‌پوشاند. همچنین از یک کاور پلاستیکی با قطر ۲۵ متر به عنوان کلکتور استفاده شده است. زمین جاذب نیز از بتن ساخته شده و با رنگ سیاه مات پوشانده شده است. با استفاده از گرمای جذب شده توسط جاذب بتنی نیروگاه در شب نیز می‌تواند به فعالیت خود ادامه دهد. برای قرار دادن و انتقال محصولات کشاورزی نیز از ماشین‌های ریلی استفاده شده است (شکل ۲۰).

ارائه شده است. در مقایسه از دست دادن انرژی سالانه، با تولید سالانه انرژی SCPP، در می‌یابیم که SCPP دارای بازده کلی کمتر از ۴٪ است. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً ۹۶٪ انرژی جذب شده توسط تابش خورشید از دهانه دودکش از بین می‌رود.



شکل ۲۳ میزان برق تولیدی از SCPP در نقاط مختلف ایران [۶]

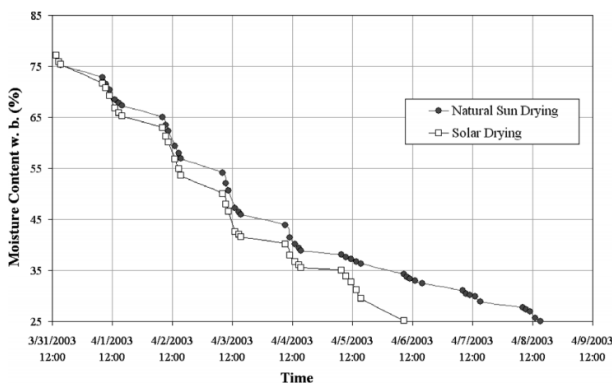


شکل ۲۴ تلفات انرژی سالانه از محل خروجی دودکش در نقاط مختلف ایران [۶]

برای تجزیه و تحلیل جزئی‌تر عملکرد SCPP، چهار منطقه بهم، جهرم، ایرانشهر و دشتستان انتخاب شده است که بر اساس شکل ۲۳ تولید برق سالانه بالاتری دارند. میانگین تابش ماهانه خورشیدی در چهار مکان نسبت به ماه میلادی در شکل ۲۵ نشان داده شده است. از میان این چهار منطقه، ایرانشهر دارای تابش خورشید بیشتری است در حالی که سه مورد دیگر تغییرات مشابهی را در طول سال دارند. همچنین تغییرات دمایی محیط در این چهار منطقه رفتارهای مشابهی را نشان می‌دهد و حداکثر دمایی محیط در ژوئن، جولای و آگوست مشاهده می‌شود (شکل ۲۶).

به طور کلی تولید برق در نیروگاه‌های دودکش خورشیدی متناسب با میزان دبی جرمی دودکش و مدت زمان تابش خورشید است. دبی جرمی در خروجی دودکش در ماه‌های مختلف میلادی در شکل ۲۷ ارائه شده است.

در شکل ۲۲ میزان رطوبت موزهای مورد آزمایش بر حسب زمان برای دو نمونه بررسی شده است. در این آزمایش رطوبت اولیه موزها حدود ۷۵ درصد و رطوبت نهایی حدود ۲۵ درصد بوده است. زمان لازم برای خشک کردن موزها در روش نیروگاهی حدود ۳۰ درصد کمتر از زمان لازم در روش ساده است.



شکل ۲۲ میزان رطوبت موزها بر حسب زمان [۲۹]

#### ۴- دودکش خورشیدی در ایران

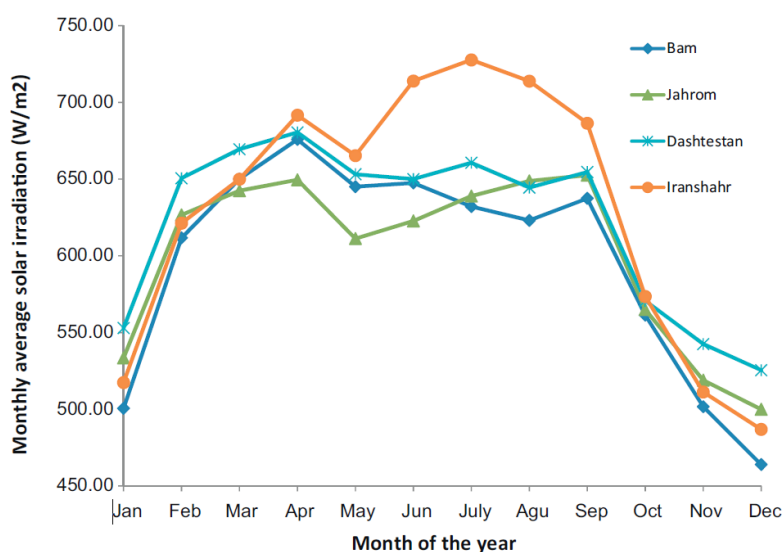
در این قسمت از مقاله به امکان‌سنجی نصب نیروگاه‌های دودکش خورشیدی در مناطق مختلف ایران می‌پردازیم. ایران دارای تابش مستقیم خورشید و زمین‌های بیابانی فراوان است؛ به همین دلیل توسعه نیروگاه‌های خورشیدی برای کاربردهای حرارتی و الکتریکی مهم است. منطقه مرکزی ایران به دلیل بیشتر بودن انرژی تابش خورشید بسیار بهتر از مناطق دیگر برای نصب SCPP است.

اسنقی و همکاران [۶] برای ارزیابی عملکرد SCPP و تولید برق در ایران، ۱۲ منطقه مختلف را در سراسر کشور در نظر گرفتند. در مطالعات این مقاله از نرم افزار NRI برای استخراج محاسبه تابش متوسط ماهانه خورشید، سرعت باد، مدت زمان آفتاب و سایر اطلاعات جغرافیایی استفاده می‌شود. اطلاعات مربوط به این مناطق در جدول ۲ ارائه شده است. تابش سالانه خورشیدی عمده مناطق انتخاب شده، بیش از ۶۵۰۰ مگاژول بر متر مربع و مدت زمان تابش آفتاب بین ۲۴۰۰ ساعت تا ۳۴۰۰ ساعت در سال است. ایرانشهر، جهرم، بهم، زابل و دشتستان در مقایسه با سایر مناطق انتخاب شده دارای تابش سالانه خورشیدی بیشتری هستند. زابل دارای سرعت باد متوسط سالانه بالاتری است که ممکن است منجر به افزایش اتلاف گرما از سقف کلکتور شود. اردبیل کمترین تابش سالانه خورشید و مدت زمان سالانه آفتاب را دارد.

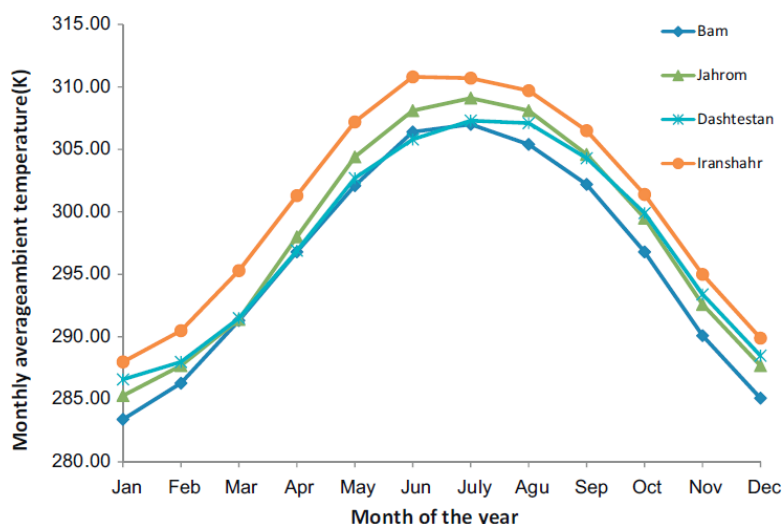
شکل ۲۳، میزان خروجی سالانه برق از SCPP در نقاط مختلف ایران را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود، برق تولیدی با میزان تابش خورشید متناسب است. از بین مناطق در نظر گرفته شده، بهم، جهرم، دشتستان و ایرانشهر تولید برق بالاتری در سال دارند. نتایج نشان می‌دهد که SCPP می‌تواند از ۱۷۵ تا ۲۶۵ مگاوات ساعت در سال در مناطق انتخاب شده برق تولید کند. دمایی هوا در خروجی دودکش با دمایی محیط حدود ۳۰ - ۲۰ درجه سانتی‌گراد اختلاف دارد. در شکل ۲۴، تلفات انرژی سالانه از محل خروجی دودکش برای مناطق انتخاب شده،

جدول ۲ تابش سالانه خورشیدی و شرایط جوی ۱۲ منطقه انتخاب شده در ایران [۶]

شهر	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	میانگین دمای سالانه (K)	میانگین سرعت باد سالانه (m/s)	مدت زمان تابش سالانه (h)	تشنش سالانه خورشید ( $MJ/m^2$ )
بم	۵۸°۲۱'	۲۹°۶'	۲۳/۰۸	۲/۹۲	۳۳۸۱/۶	۷۳۰۷/۹۱
طبس	۵۶°۵۵'	۳۳°۳۵'	۲۲/۴۲	۱/۵۱	۳۳۲۲/۳	۶۸۴۳/۱۴۲
چهرم	۵۳°۳۳'	۲۸°۳۰'	۲۵/۰۴	۲/۰۷	۳۳۹۸/۴	۷۴۰۴/۱۹۷
زابل	۶۱°۲۹'	۳۱°۰۱'	۲۲/۷۳	۵/۲۳	۳۱۸۰/۸	۷۲۱۸/۵۹۷
دشتستان	۵۱°۱۲'	۲۹°۱۶'	۲۴/۶۷	۲/۷۸	۳۱۷۲/۳	۷۱۵۵/۹۴۴
اردبیل	۴۸°۱۸'	۳۸°۱۵'	۹/۸۷	۳/۲۲	۲۴۰۰/۹	۴۶۵۰/۱۰۳
دیوان دره	۴۷°۰۱'	۳۵°۵۴'	۱۱/۰۶	۲/۵۸	۲۹۴۰/۷	۶۲۷۴/۶۹۶
ایرانشهر	۶۰°۴۱'	۲۷°۱۲'	۲۷/۵۲	۲/۰۵	۳۲۷۹/۲	۷۴۸۱/۰۱۲
خرم آباد	۴۸°۲۱'	۳۳°۲۹'	۱۶/۹۸	۲/۰۰	۳۰۴۴	۶۶۵۱/۰۸۷
سبزواری	۵۷°۴۰'	۳۶°۱۲'	۱۷/۱۸	۲/۸۶	۳۰۲۶/۱	۶۲۹۵/۴۲۶
ورامین	۵۱°۳۹'	۳۵°۱۹'	۱۶/۷۶	۱/۵۷	۳۰۳۸/۹	۶۴۳۱/۶۰۷
یزد	۵۲°۲۲'	۳۱°۵۳'	۱۹/۵۸	۲/۶۸	۳۲۵۲/۷	۶۸۹۰/۸۲۳



شکل ۲۵ میانگین تابش ماهانه خورشیدی در مناطق منتخب برحسب ماه میلادی [۶]



شکل ۲۶ تغییرات میانگین دمای محیط در مناطق منتخب برحسب ماه میلادی [۶]

آن کمتر است. دلیل اصلی آن این است که مدت زمان آفتاب در طول ماه‌های ذکر شده در سه مکان دیگر بیشتر است. با افزایش تابش‌های خورشیدی و کاهش تلفات انتقال حرارت از سقف دودکش، میزان جریان جرم و در نتیجه تولید برق بیشتر

در ۸ ماه از سال، دبی جرمی SCPP مقادیر تقریباً مشابهی دارد؛ در حالی که در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، اوت و سپتامبر ایرانشهر مقادیر بسیار بالاتری را نشان می‌دهد. اگرچه دبی جرمی SCPP در ایرانشهر بیشتر است، اما نتایج تحقیق نشان می‌دهد تولید برق

متر و کلکتور به مساحت ۹ متر مربع در ازمیت ترکیه ساخت. در سال ۱۹۹۷، یک مدل جدید نیروگاه دودکش خورشیدی توسط پاسورمارتی و شریف در فلوریدا ساخته شد. دو خلاقیت جدید این کار گسترش پایه کلکتور و قرار دادن یک جاذب میانی روی کلکتور برای افزایش توان تولیدی بود [۱۷، ۱۸]. در سال ۲۰۰۲، در چین یک دودکش خورشیدی ۵ وات بر روی سقف یک ساختمان توسط ژو ساخته شد که دارای دودکش به طول ۸ متر و کلکتور به قطر ۱۰ متر بود [۳۲].

جدول ۳ مشخصات نیروگاه مانزانارس [۲۵]

مقدار	مشخصات
۱۹۴/۶	ارتفاع دودکش (m)
۵/۰۸	شعاع دودکش (m)
۱۲۲	میانگین شعاع کلکتور (m)
۱/۸۵	میانگین ارتفاع سقف (m)
۲۰	میانگین افزایش دما در کلکتور (K)
۵۰	ظرفیت نامی نیروگاه (kW)

یک سیستم دودکش خورشیدی آزمایشی توسط کتوجتسو در بوتسوانا در سال ۲۰۰۵ ساخته شد [۳۳]. این سیستم دارای یک دودکش پلی استر شیشه‌ای با قطر داخلی ۲ متر و ارتفاع ۲۲ متر و کلکتور به مساحت ۱۶۰ متر مربع بود. مشاهده شد که حداکثر دمای اوج پس از حداکثر تشعشع است؛ زیرا زمین بخشی از انرژی خورشیدی ورودی جذب شده را بعد از زمان حداکثر تشعشع آزاد می‌کند.

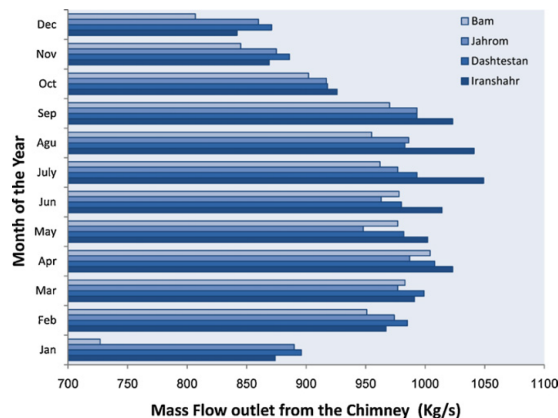
در سال ۲۰۱۱ در پردیس دانشگاه زنجان، یک نمونه دودکش خورشیدی توسط کسایبان ساخته شد [۳۴]. در این نمونه قطر کلکتور ۱۰ m و ارتفاع دودکش از لوله پلی اتیلن، ۱۲ m بود. با توجه به مقادیر دما و سرعت هوا در موقعیت‌های مختلف کلکتور، حداکثر سرعت هوا و حداکثر دمای دودکش بدست آمد. بررسی‌ها نشان داد که وارونگی هوا در پایین دودکش در هر دو روز سرد و گرم پس از طلوع خورشید ظاهر می‌شود، اما با افزایش دمای روز، اثرات وارونگی برطرف، و جریان مداوم هوا در داخل دودکش ایجاد می‌شود.

در سال ۲۰۱۱ در کرمان، دودکشی خورشیدی در مقیاس کوچک توسط نجمی ساخته شد [۳۵]. در این مقاله پارامترهای مؤثر برای بهینه‌سازی عملکرد دودکش خورشیدی بررسی و یک تحلیل اقتصادی نیز انجام شد. پیشنهاد شد که استفاده از آسفالت یا لاستیک در پایین کلکتور، شیشه‌های دوجداره روی سقف کلکتور، کاهش ارتفاع کلکتور به ۳/۱ m و نصب شکل مخروطی در ورودی دودکش می‌تواند تولیدی را افزایش دهد.

به منظور بهبود عملکرد دودکش خورشیدی اثرات قطر کلکتور و قطر و ارتفاع دودکش بر روی توان تولید شده توسط غلامعلی زاده بررسی شد [۳۶]. یک دودکش خورشیدی متشکل از یک کلکتور به قطر ۱/۴ متر و دودکش به ارتفاع ۸۰ سانتی متر توسط مهلا و همکاران در هند ساخته شد [۳۷]. این مقاله گزارش داد که دودکش خورشیدی با قطر ۸ سانتی متر زمانی حداکثر سرعت را خواهد داشت که نسبت قطر دودکش به ارتفاع آن ۰/۸ باشد.

بوگوتکین [۳۸] برای بررسی تأثیر قطر کلکتور بر میزان جریان هوا و درجه حرارت دودکش، یک SCPP در منطقه جنوب شرقی آنتولی ترکیه ساخت. نتایج نشان داد که با افزایش سطح کلکتور، دمای زمین افزایش یافته و بنابراین دمای هوا و میزان

می‌شود. لذا نتیجه می‌گیریم که برق تولیدی SCPP در مناطق مرکزی و جنوبی به مراتب بیشتر از برق تولیدی در دیگر مناطق کشور است. برق تولیدی برای تأمین نیازهای روستاهای خارج از شبکه کافی خواهد بود. به علاوه می‌توان از کلکتور به عنوان گلخانه برای مصارف کشاورزی در این منطقه استفاده کرد.



شکل ۲۷ مقایسه میزان دبی جرمی در خروجی دودکش در ماه‌های مختلف در مناطق منتخب [۶]

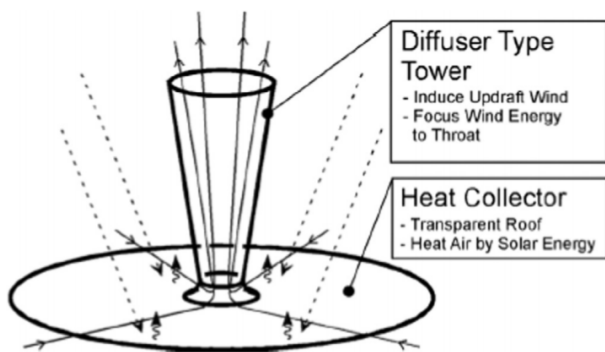
سنگی و همکاران [۳۰] پنج منطقه را در ایران مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. پنج شهر آبادان، اراک، تهران، یزد و زنجان که تابش خورشیدی بیشتری نسبت به سایر مناطق دارند جهت تحقیق انتخاب شدند (۶۶۶۵-۷۴۳۶ مگاژول بر مترمربع در سال). میانگین دمای محیط هر شهر با شهرهای دیگر کاملاً متفاوت بود. این امر کمک کرد تا تأثیر دمای محیط بر تولید برق در هر شهر با وضوح بیشتری دیده شود. یزد بهترین تابش خورشید (۷۴۳۶ مگاژول بر مترمربع در سال) و زنجان کمترین تابش (۶۶۶۵ مگاژول بر مترمربع در سال) را داشت. همچنین دیده شد که همه شهرها بهترین تابش خورشید را در ماه ژوئن دارند. آبادان گرم‌ترین و زنجان سردترین شهرهای انتخاب شده بودند. عملکرد نیروگاه دودکش خورشیدی واقع در پنج شهر نشان داد که آبادان در مقایسه با سایر مکان‌ها ظرفیت تولید انرژی بیشتری دارد. علی‌رغم اینکه کمترین میزان تابش خورشید در زنجان بود، نتایج نشان داد که می‌توان همان میزان برق دیگر شهرها را در زنجان هم تولید کرد که این یعنی تولید برق با تغییر دمای محیط کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد. از نتایج درمی‌یابیم که نیروگاه دودکش خورشیدی می‌تواند از مارس تا سپتامبر انرژی بیشتری تولید کند، زیرا تابش خورشید بسیار قوی است. همچنین نتیجه‌گیری شد که یک نیروگاه دودکش خورشیدی با ۳۵۰ متر ارتفاع دودکش و قطر جمع‌کننده ۱۰۰۰ متر قادر به تولید متوسط الکتریکی ماهانه ۱-۲ مگاوات در طول یک سال است.

##### ۵- بررسی مطالعات تجربی

اولین نمونه نیروگاه دودکش خورشیدی با حداکثر توان خروجی ۵۰ کیلووات در مانزانارس اسپانیا در سال ۱۹۸۱ ساخته شد [۲۵]. مشخصات اصلی دودکش خورشیدی مانزانارس در جدول ۳ گزارش شده است [۷]. این نمونه اولیه از سال ۱۹۸۲ تا ۱۹۸۹ در حال کار بود و برق تولیدشده در شبکه برق محلی ادغام می‌شد. کولونک [۳۱] در سال ۱۹۸۵ یک نیروگاه در مقیاس کوچک ۰/۱۴ وات با دودکش خورشیدی به ارتفاع ۲ متر، قطر ۷ سانتی

توسط تابش خورشید از دهانه دودکش از بین می‌رود؛ لذا برای افزایش بازدهی SCPP، ترکیب نیروگاه با فناوری‌های نمک‌زدایی و خشک‌کن پیشنهاد شد. ترکیب SCPP با سیستم نمک‌زدایی باعث کاهش برق تولیدی در نیروگاه می‌گردد. درآمد حاصل از نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی با شعاع کلکتور و ارتفاع دودکش رابطه مستقیم دارد. به ازای هر شعاع کلکتور درآمد حاصل از SCPP بیشتر از نیروگاه است؛ همچنین تا حد ارتفاع ۴۴۵ متر برای دودکش، درآمد حاصل از نیروگاه ترکیبی بالاتر از SCPP است و در ارتفاع‌های بالاتر درآمد SCPP بیشتر از حالت ترکیبی است. در بخش بهینه‌سازی نیروگاه دودکش خورشیدی ترکیبی نتیجه‌گیری شد که بهترین مکان قرار گیری آب شور جهت نمک‌زدایی ابتدای کلکتور در محل ورود جریان هوا است.

ترکیب نیروگاه دودکش خورشیدی با سیستم خشک‌کن باعث کاهش زمان لازم برای خشک شدن محصولات کشاورزی می‌شود. در بخش بررسی SCPP در ایران از بین ۱۲ منطقه مختلف کشور ۴ شهر ابرانشهر، زابل، جهرم، دشتستان که دارای میانگین تابش سالانه خورشیدی بیشتر و در نتیجه برق تولیدی بیشتری بودند انتخاب شدند. همچنین در بررسی تأثیر دمای محیط بر تولید برق دیده شد که دمای محیط تأثیر چندانی در برق تولیدی ندارد؛ مانند شهر زنجان که با وجود میانگین دمای پایین تر نسبت به مناطق دیگر امکان تولید برق به اندازه شهرهای با میانگین دمای بالاتر را دارد.

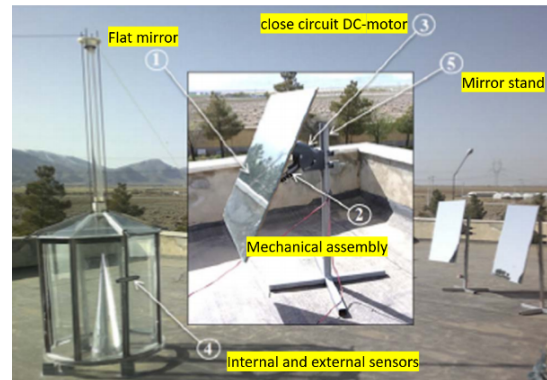


شکل ۲۹ دودکش خورشیدی با برج دیفیوز [۴۲]

#### مراجع

- [1] Service, Robert F. Is it time to shoot for the sun? *Science*, 309(5734):548–551, 2005.
- [2] Gullison, Raymond E, Frumhoff, Peter C, Canadell, Josep G, Field, Christopher B, Nepstad, Daniel C, Hayhoe, Katharine, Avissar, Roni, Curran, Lisa M, Friedlingstein, Pierre, Jones, Chris D, et al. Tropical forests and climate policy. *Science*, 2007.
- [3] Kerr, Richard A. Global warming is changing the world. *Science*, 316(5822):188–190, 2007.
- [4] Schiel, W and Schlaich, J. The solar chimney: electricity from the sun. *Schlaich Eergermann und Partner, Germany: Stuttgart, Axel Menges*, pp. 245–267, 1995.

جریان هوا در دودکش به سرعت افزایش می‌یابد. در سال ۲۰۱۵ ایمانی [۳۹] دودکشی خورشیدی با دو آینه تخت طراحی کرد تا تشعشع خورشید را در اطراف دودکش خورشیدی تقویت کند. نتیجه‌گیری شد که استفاده از این تقویت‌کننده‌ها در اطراف دودکش خورشیدی باعث بالا رفتن سرعت هوا و در نتیجه افزایش تولید برق می‌شود. تصویری از دودکش خورشیدی و تقویت‌کننده در شکل ۲۸ نشان داده شده است.



شکل ۲۸ دودکش خورشیدی همراه با آینه تخت [۳۹]

در سال ۲۰۱۴، پارامترهای هندسی دودکش خورشیدی توسط کسایان و همکاران به صورت تحلیلی و عددی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت [۴۰]. آن‌ها دریافتند که دودکش خورشیدی با ارتفاع ورودی کلکتور ۶ سانتی متر، ارتفاع دودکش ۳ متر و قطر دودکش ۱۰ سانتی متر بهترین عملکرد را دارد. در کار دیگری توسط آن‌ها در سال ۲۰۱۵، یک دودکش خورشیدی با ارتفاع ۲ متر و قطر کلکتور ۳ متر ساخته و بررسی شد. توزیع سرعت و دمای هوا مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که کاهش اندازه ارتفاع ورودی کلکتور تأثیر مثبتی بر عملکرد تولید برق دودکش خورشیدی دارد؛ همچنین وارونگی هوا در دودکش اخیر مشاهده نشد لذا این پدیده مستقیماً با هندسه ارتباط دارد [۴۱].

در سال ۲۰۱۵، اوکادا و همکاران [۴۲] برای افزایش سرعت هوا در توربین از یک برج دیفیوز به جای برج استوانه‌ای استفاده کردند (شکل ۲۹). نتایج نشان داد که این مدل سرعت هوا را تقریباً  $1/44 - 1/38$  بار افزایش داده و بنابراین میزان خروجی برق  $3 - 2/6$  برابر بیشتر از نوع استوانه‌ای است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

نیروگاه دودکش خورشیدی یک نیروگاه ساده برای تولید برق است که از سه جزء اصلی کلکتور، PCU و دودکش تشکیل شده است. در این مقاله به بررسی اجزای اصلی SCPP پرداختیم. با توجه به طرح‌ها و پیشنهادهای مطرح‌شده برای افزایش کارایی SCPP در بخش‌های مختلف، نتیجه گرفته می‌شود که بهتر است در نیروگاه از ذخیره‌کننده ثانویه انرژی استفاده شود تا نیروگاه بتواند در شب و روزهای ابری نیز برق تولید کند. همچنین در قسمت اتصال کلکتور به دودکش به علت ایجاد جریان بازگشتی در دودکش‌های با اتصال مستقیم بهتر است از دودکش‌های با اتصال منحنی و مخروطی استفاده شود تا جریان جرمی بیشتری در دودکش‌ها جریان یابد تا بتوانیم بازده نیروگاه را بالا ببریم. همچنین نتیجه‌گیری شد که تقریباً ۹۶ درصد انرژی جذب‌شده

- [18] Pasumarthi, N and Sherif, SA. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—part ii: experimental and theoretical results and economic analysis. *International Journal of Energy Research*, 22(5):443–461, 1998.
- [19] Fluri, TP and Von Backström, TW. Performance analysis of the power conversion unit of a solar chimney power plant. *Solar Energy*, 82(11):999–1008, 2008.
- [20] Von Backström, TW and Gannon, AJ. Solar chimney turbine characteristics. *Solar energy*, 76(1-3):235–241, 2004.
- [21] Fluri, Thomas Peter. *Turbine layout for and optimization of solar chimney power conversion units*. Ph.D. thesis, Stellenbosch: Stellenbosch University, 2008.
- [22] Zhou, Xinping, Wang, Fang, and Ochieng, Reccab M. A review of solar chimney power technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8):2315–2338, 2010.
- [23] Schlaich, Jörg. Tension structures for solar electricity generation. *Engineering structures*, 21(8):658–668, 1999.
- [24] Schlaich, Jörg, Bergermann, Rudolf, Schiel, Wolfgang, and Weinrebe, Gerhard. Design of commercial solar updraft tower systems—utilization of solar induced convective flows for power generation. *J. Sol. Energy Eng.*, 127(1):117–124, 2005.
- [25] Schlaich, Jörg. *The solar chimney: electricity from the sun*. Edition Axel Menges, 1995.
- [26] Sawka, M. Solar chimney—untersuchungen zur strukturintegrität des stahlbetonturms. *Bergische Universität Wuppertal*, 2004.
- [27] Zhou, Xinping, Xiao, Bo, Liu, Wanchao, Guo, Xianjun, Yang, Jiakuan, and Fan, Jian. Comparison of classical solar chimney power system and combined solar chimney system for power generation and seawater desalination. *Desalination*, 250(1):249–256, 2010.
- [28] Asayesh, Mohammad, Kasaeian, Alibakhsh, and Ataie, Abtin. Optimization of a combined solar chimney for desalination and power generation. *Energy Conversion and Management*, 150:72–80, 2017.
- [29] Ferreira, André G, Maia, Cristiana B, Cortez, Márcio FB, and Valle, Ramón M. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. *Solar Energy*, 82(3):198–205, 2008.
- [30] Sangi, Roozbeh. Performance evaluation of solar chimney power plants in iran. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 16(1):704–710, 2012.
- [31] Kulunk, H. A prototype solar convection chimney operated under izmit conditions. in *Proceedings of the 7th Miami international conference on alternative energy sources*, vol. 162, 1985.
- [5] Zhou, Xinping, Yang, Jiakuan, Xiao, Bo, and Shi, Xiaoyan. Special climate around a commercial solar chimney power plant. *Journal of Energy Engineering*, 134(1):6–14, 2008.
- [6] Asnaghi, A and Ladjevardi, SM. Solar chimney power plant performance in iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5):3383–3390, 2012.
- [7] Nizetic, S, Ninic, N, and Klarin, Branko. Analysis and feasibility of implementing solar chimney power plants in the mediterranean region. *Energy*, 33(11):1680–1690, 2008.
- [8] Kasaeian, AB, Molana, Sh, Rahmani, Kiana, and Wen, Dongsheng. A review on solar chimney systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 67:954–987, 2017.
- [9] Maia, Cristiana B, Silva, Felipe VM, Oliveira, Vinicius LC, and Kazmerski, Lawrence L. An overview of the use of solar chimneys for desalination. *Solar Energy*, 183:83–95, 2019.
- [10] Alkaisi, Ahmed, Mossad, Ruth, and Sharifian-Barforoush, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. *Energy Procedia*, 110:268–274, 2017.
- [11] Zuo, Lu, Zheng, Yuan, Li, Zhenjie, and Sha, Yujun. Solar chimneys integrated with sea water desalination. *Desalination*, 276(1-3):207–213, 2011.
- [12] Bonnelle, Denis. Solar chimney, water spraying energy tower, and linked renewable energy conversion devices: presentation, criticism and proposals. *PhD, University Claude Bernard-Lyon*, 2004.
- [13] Pretorius, Johannes Petrus. *Optimization and control of a large-scale solar chimney power plant*. Ph.D. thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2007.
- [14] Kreetz, H. Theoretische untersuchungen und auslegung eines temporären wasserspeichers für das aufwindkraftwerk. *Diploma, Energieverfahrenstechnik und Umwandlungstechniken regenerativer Energien-EVUR, Technical University Berlin, Berlin, Germany*, 1997.
- [15] Davey, RC. Device for generating electricity from solar power. *WO*, 22372:A1, 2008.
- [16] dos Santos Bernardes, Marco Aurelio, Valle, Ramon Molina, and Cortez, Márcio Fonte-Boa. Numerical analysis of natural laminar convection in a radial solar heater. *International journal of thermal sciences*, 38(1):42–50, 1999.
- [17] Pasumarthi, N and Sherif, SA. Experimental and theoretical performance of a demonstration solar chimney model—part i: mathematical model development. *International Journal of Energy Research*, 22(3):277–288, 1998.

- [38] Bugutekin, Abdulcelil. Effect of the collector diameter on solar chimney power plants. *Energy education science and technology part A-energy science and research*, 27(1):155–168, 2011.
- [39] Shahreza, Amir Rezaei and Imani, Hadi. Experimental and numerical investigation on an innovative solar chimney. *Energy Conversion and Management*, 95:446–452, 2015.
- [40] Kasaeian, Alibakhsh, Ghalamchi, Mehran, and Ghalamchi, Mehrdad. Simulation and optimization of geometric parameters of a solar chimney in tehran. *Energy conversion and management*, 83:28–34, 2014.
- [41] Ghalamchi, Mehran, Kasaeian, Alibakhsh, and Ghalamchi, Mehrdad. Experimental study of geometrical and climate effects on the performance of a small solar chimney. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43:425–431, 2015.
- [42] Okada, Shinsuke, Uchida, Takanori, Karasudani, Takashi, and Ohya, Yuji. Improvement in solar chimney power generation by using a diffuser tower. *Journal of Solar Energy Engineering*, 137(3), 2015.
- [32] Zhou, XP and Yang, JK. Temperature field of solar collector and application potential of solar chimney power systems in china. *Journal of the Energy Institute*, 81(1):25–30, 2008.
- [33] Ketlogetswe, Clever, Fiszdon, Jerzy K, and Seabe, Omphemetse O. Retracted: Solar chimney power generation project—the case for botswana, 2008.
- [34] Kasaeian, AB, Heidari, E, and Vatan, Sh Nasiri. Experimental investigation of climatic effects on the efficiency of a solar chimney pilot power plant. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 15(9):5202–5206, 2011.
- [35] Najmi, Mohsen, Nazari, Ali, Mansouri, Hossein, and Zahedi, Ghazzanfar. Feasibility study on optimization of a typical solar chimney power plant. *Heat and Mass Transfer*, 48(3):475–485, 2012.
- [36] Gholamalizadeh, E and Mansouri, SH. A comprehensive approach to design and improve a solar chimney power plant: A special case—kerman project. *Applied Energy*, 102:975–982, 2013.
- [37] Mehla, Neeraj, Makade, Rahul, and Thakur, NS. Experimental analysis of a velocity field using variable chimney diameter for solar updraft tower. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(4):3167–3171, 2011.