

## **Determination of the Proper Distance between the Absorber Plate and One-layer Cover in Flat-plate Solar Collectors Using Numerical Method**

**ROUHOLLAH FARHADI<sup>1\*</sup>, MORTEZA TAKI<sup>1</sup>**

1. Department of Agricultural Machinery and Mechanization, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Mollasani, Iran

(Received: March. 24, 2020- Revised: June. 19, 2020- Accepted: Aug. 18, 2020)

### **ABSTRACT**

The Maximum energy loss in flat-plate solar collectors is due to top heat loss. The variables of absorber plate temperature, ambient temperature, wind speed, the distance between the absorber plate and the cover, collector length, and tilt angle are effective. In this research, considering the long-term meteorological data and developed relations for the top loss in flat-plate solar collectors in previous researches, including convection, conduction and radiation losses, calculations were performed in the form of Fortran codes. Results showed that the proper value for the distance between the absorber plate and one-layer cover has the range of 11 to 38 mm for some cities of the country. In addition, the sensitivity analysis of the top loss showed that the order of variables from maximum to minimum is wind speed, the distance between the absorber plate and the cover, collector tilt angle, collector length, absorber plate temperature and ambient temperature.

Keywords: Air gap, Renewable energies, Sensitivity analysis, Shadow, Top loss.

---

\*Corresponding author: Farhadi@Asnrkh.ac.ir

## تعیین فاصله مناسب بین صفحه جاذب و پوشش یک لایه در جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت به روش عددی

روح اله فرهادی<sup>\*</sup>، مرتضی تاکی<sup>۱</sup>

۱. گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، ملاتانی، ایران  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱/۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۳/۳۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۵/۲۸)

### چکیده

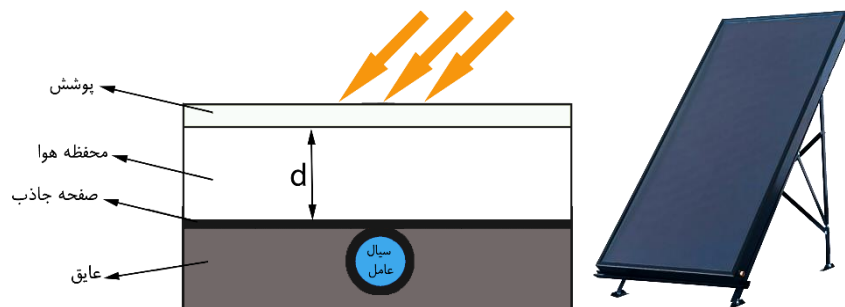
بیشترین اتلاف انرژی در جمع‌کننده‌های صفحه تخت مربوط به افت گرمایی از بالاست. متغیرهای دمای سطح جاذب، دمای محیط، سرعت وزش باد، فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش، طول و زاویه جمع‌کننده بر این افت تأثیرگذار هستند. در این پژوهش با در نظر گرفتن اطلاعات بلند مدت هواشناسی و روابط توسعه داده شده در پژوهش‌های گذشته برای افت از بالا در جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت شامل افت‌های همرفت، هدایتی و تابشی، محاسبات در قالب کدهای فرترن انجام شد. نتایج نشان داد مقدار مناسب فاصله بین صفحه جاذب و پوشش تک لایه در محدوده ۱۱ تا ۳۸ میلی‌متر برای چند شهر کشور است. همچنین تحلیل حساسیت متغیرها بر افت از بالا نشان داد، ترتیب آنها از بیشترین به کمترین عبارت است از: سرعت وزش باد، فاصله پوشش تا صفحه جاذب، زاویه شیب جمع‌کننده، طول جمع‌کننده، دمای صفحه جاذب و دمای محیط.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی‌های تجدیدپذیر، افت از بالا، تحلیل حساسیت، سایه، فاصله هوایی.

### مقدمه

می‌گیرد. از آنجایی که جمع‌کننده‌های صفحه تخت در دماهای میانی و تا حدود ۱۰۰ درجه سلسیوس کار می‌کنند (Duffie & Beckman, 2013) و دماهای بالا برای آنها مناسب نیست، پوشش یک لایه در این جمع‌کننده‌ها ترجیح داده می‌شود (Akhtar & Mullick, 2007). شکل (۱) نمونه‌ای از جمع‌کننده‌های صفحه تخت را با اجزاء مختلف نشان می‌دهد.

جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت، ساختار ساده‌تری نسبت به دیگر جمع‌کننده‌های خورشیدی دارند (Subiantoro & Ooi, 2013) و بر این اساس ارزان‌تر هستند و به طور گسترده استفاده می‌شوند. برای کاهش افت انرژی روی صفحه جاذب، پوششی قرار



شکل ۱- نمایی کلی و مقطع برش یافته از یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت با یک لایه پوشش که در آن  $d$  فاصله بین صفحه جاذب و پوشش است.

در بین افت‌های کنار، بالا و پشت جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت، افت از بالا غالب است و بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد (Muneer & Hawas, 1981; Pourfayaz et al., 2020). برای تعیین این افت، روش‌های نیمه تجربی (Klein, 1975; Malhotra et al., 1981; Garg & Datta, 1984) و تحلیلی (Mullick & Samdarshi, 1988; Akhtar & Mullick, 2007; Eismann, 2015) ارائه شده است. محاسبه افت از بالا در جمع‌کننده‌های صفحه تخت به دو صورت عددی به صورت فرآیندهای تکراری (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2014) و روش غیر تکراری (Agarwal & Larson, 1981; Akhtar & Mullick, 1999) انجام می‌گیرد. روش غیر تکراری بسیار مفید و کاربرد آن برای طراحان

در بین افت‌های کنار، بالا و پشت جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت، افت از بالا غالب است و بیشترین مقدار را به خود اختصاص می‌دهد (Muneer & Hawas, 1981; Pourfayaz et al., 2020). برای تعیین این افت، روش‌های نیمه تجربی (Klein, 1975; Malhotra et al., 1981; Garg & Datta, 1984) و تحلیلی (Mullick & Samdarshi, 1988; Akhtar & Mullick, 2007; Eismann, 2015) ارائه شده است. محاسبه افت از بالا در جمع‌کننده‌های صفحه تخت به دو صورت عددی به صورت فرآیندهای تکراری (Duffie & Beckman, 2013; Kalogirou, 2014) و روش غیر تکراری (Agarwal & Larson, 1981; Akhtar & Mullick, 1999) انجام می‌گیرد. روش غیر تکراری بسیار مفید و کاربرد آن برای طراحان

تا ۴۱ میلی‌متر گزارش شد (Eismann, 2015). در پژوهشی به منظور افزایش انرژی کسب شده در جمع‌کننده خورشیدی صفحه و کمینه کردن افت از بالا، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده و فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر توصیه شد (Pourfayaz *et al.* 2020).

پژوهش‌های مذکور طیفی از مقادیر مختلف را برای فاصله بین صفحه جاذب و پوشش در جمع‌کننده‌های خورشیدی صفحه تخت بیان نمودند. همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، متغیرهای محیطی مثل سرعت وزش باد و دمای محیط در کنار دیگر شرایط مکانی مانند زاویه شیب، تابش خورشید و دمای صفحه جاذب بیانگر این مطلب هستند که انتخاب فاصله مناسب لازم است به صورت منطقه‌ای صورت پذیرد. نظر به نبود اطلاعاتی در این زمینه برای ایران، در پژوهش حاضر مقدار مناسب فاصله بین صفحه جاذب و پوشش با توجه به اطلاعات بلند مدت هواشناسی محاسبه می‌شود. برای این منظور تعدادی از شهرهای واقع در مناطق دارای تابش خورشیدی مناسب و همچنین مناطقی که با توجه به شرایط آب و هوایی مثل دمای محیط و سرعت وزش باد، در محدوده ابتدایی و انتهایی بازه تغییرات افت از بالا در جمع‌کننده خورشیدی قرار دارند، انتخاب می‌شود. همچنین تحلیل حساسیت برای تعیین شدت تأثیر متغیرهای منتخب بر افت از بالا در جمع‌کننده انجام می‌گیرد.

### مواد و روش‌ها

نخست چگونگی محاسبه افت در بخش بالایی جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت بیان می‌شود. سپس نحوه تأثیر متغیرهای دخیل در مسئله مطرح می‌گردد. تنها افت از بالا در این پژوهش مدنظر قرار گرفت زیرا بیشترین افت مربوط به این بخش است (Muneer & Hawas, 1981)، همچنین فاصله بین صفحه جاذب و پوشش بر این قسمت تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که سایه تشکیل شده در جمع‌کننده به واسطه دیوارهای جانبی نیز موجب کاهش انرژی دریافتی می‌شود، محاسبات مربوط مدنظر قرار گرفت و مقدار انرژی قابل استفاده با کسر افت و اثر سایه به دست آمد. در نهایت مقدار بهینه فاصله بین صفحه جاذب و پوشش به عنوان یکی از متغیرهای مؤثر برای دستیابی به بیشینه مقدار انرژی قابل استفاده، پیشنهاد شد.

### محاسبه فاکتور افت از بالا در جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت

در بخش بالایی جمع‌کننده صفحه تخت سه نوع انتقال حرارت هدایت، همرفت و تابش وجود دارد. ضریب بهبود یافته افت از بالا شامل هر سه شکل انتقال حرارت از معادله (۱) محاسبه شد. این

سامانه‌های حرارتی انرژی خورشیدی راحت و بین پژوهشگران پذیرفته شده است (Francey & Paraioannou, 1985; El- (Sebah, 1997; Akhtar & Mullick, 2007).

افت از بالا در جمع‌کننده‌های صفحه تخت تابعی از جنس صفحه جاذب و پوشش، دمای محیط و صفحه جاذب، سرعت وزش باد، ضخامت عایق و پوشش، طول جمع‌کننده، زاویه شیب آن و فاصله بین صفحه جاذب با پوشش است (Kalogirou, 2014). تعدادی از این متغیرها با توجه به انتخاب مواد مرسوم کاسته می‌شوند مثل: ضخامت پوشش، جنس صفحه جاذب و پوشش. در این میان، دیگر متغیرها باقی می‌مانند که تعدادی از آنها به شرایط آب و هوایی و محیط بر می‌گردد و قابل تنظیم و به عنوان ابزاری قابل کنترل برای طراح نیست مثل: دمای محیط و سرعت وزش باد. برخی متغیرها به جنبه‌های دیگر جمع‌کننده مربوط می‌شوند مانند زاویه شیب جمع‌کننده که برای کسب بیشینه انرژی برای خود ملاحظاتی دارد. اما متغیر فاصله بین صفحه جاذب و پوشش به طور مستقیم به انتخاب مناسب طراح وابسته است و طبق آنچه در بخش‌های بعدی بیان می‌شود، بهینه‌سازی لازم دارد.

اندازه‌گیری‌های انجام شده در جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت نشان می‌دهد چنانچه فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش ۵۰ میلی‌متر باشد به ترتیب ۱۱/۶۴ و ۷/۷۲ درصد انرژی بیشتری در مقایسه با فواصل ۲۵ و ۱۵۰ میلی‌متر برای موقعیت جغرافیایی هند کسب می‌شود (Nahar & Gupta, 1989). این مطلب میزان تأثیر انتخاب فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش را در بهبود انرژی کسب شده نشان می‌دهد.

برای متغیر فاصله بین صفحه جاذب و پوشش در پژوهش‌های گذشته، دامنه‌ای از مقادیر گزارش شده است که به آن پرداخته می‌شود. در یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت دو لایه پوشش، برای لایه داخلی ۱۰ تا ۹۰ میلی‌متر و برای لایه بیرونی ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد (Akhtar & Mullick, 2007). فاصله ۳ تا ۱۰ میلی‌متر برای یک جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت پر از گاز (هوا، آرگون، دی‌اکسید کربن، کریبتون و زنون) گزارش شد (Vestlund *et al.* 2009). برای جمع‌کننده صفحه تخت یک لایه پوشش و نزدیک به حالت عمودی، این فاصله ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر انتخاب گردید (Kumar & Mullick, 2012). بررسی یک جمع‌کننده خورشیدی تک لایه پوشش در هند نشان داد از میان فواصل ۲ تا ۱۰۰ میلی‌متر، بهینه مقدار مربوط به ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر است (Nahar & Garg, 1980). به منظور محاسبه افت حرارتی همرفتی در ۲۲ جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت، فاصله بین صفحه جاذب با پوشش ۲۵

حساب  $\frac{W}{m^2 K}$  ،  $T_p$ : دمای سطح جاذب به کلوین،  $T_g$ : دمای شیشه به کلوین،  $\beta$ : زاویه شیب جمع کننده،  $d$ : فاصله بین پوشش و صفحه جاذب بر حسب متر،  $h_w$ : ضریب انتقال حرارت باد بر حسب  $\frac{W}{m^2 K}$  ،  $T_s$ : دمای آسمان به کلوین،  $T_a$ : دمای محیط بر حسب کلوین و دیگر متغیرها در جدول (۱) ارائه شده است.

معادله نسبت به روش‌های نیمه تجربی بیش از ۵ برابر دقت دارد (Mullick & Samdarshi, 1988).

(رابطه ۱)

$$U_t = \left[ \left\{ \frac{12.75 \left( (T_p - T_g) \cos \beta \right)^{0.264}}{(T_p + T_g)^{0.46} d^{0.21}} + \frac{\sigma (T_p^2 + T_g^2) (T_p + T_g)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_g - 1} \right\}^{-1} + \left\{ h_w + \frac{\sigma \epsilon_g (T_g^4 - T_s^4)}{(T_g - T_a)} \right\}^{-1} + \frac{t_g}{k_g} \right]^{-1}$$

که در  $U_t$ : ضریب افت از بالا در جمع کننده صفحه تخت بر

جدول ۱- مقادیر مختلف انتخاب شده برای متغیرهای موجود در معادلات.

نام و نماد متغیر	مقدار	واحد	مرجع
ثابت استفان بولتزمن ( $\sigma$ )	$5/6697 \times 10^{-8}$	$\frac{W}{m^2 K^4}$	Kalogirou, 2014
ضریب انتشار شیشه ( $\epsilon_g$ )	۰/۹۲۵	-	Bergman <i>et al.</i> 2011
ضریب انتشار صفحه جاذب ( $\epsilon_p$ )	۰/۵	-	Subiantoro & Ooi, 2013
ضریب انتقال حرارت هدایت شیشه ( $k_g$ )	۱/۰۵	$\frac{W}{m K}$	Subiantoro & Ooi, 2013
ضخامت شیشه ( $t_g$ )	۴	mm	(Sharafeldin <i>et al.</i> 2017)

کمینه دما در زمستان، بیشینه دما در تابستان، میانگین دمای سالانه، بیشینه سرعت باد در زمستان و بیشینه سرعت باد به صورت سالانه به عنوان طیفی از شرایط مختلف به گونه‌ای در نظر گرفته شد که برای مناطق مختلف ایران وجود داشته باشد و گویای شرایط مختلف واقعی ایران براساس داده‌های بلند مدت هواشناسی باشد. این گزینه‌ها مقادیر ابتدایی و انتهایی بازه تغییرات افت از بالا در جمع کننده خورشیدی برای ایران را ارائه می‌کنند. همچنین تعدادی از شهرهای واقع در مناطق مختلف جغرافیایی و دارای تابش مناسب خورشید (اصفهان، تهران، زاهدان، شیراز، کرمان، مشهد، یزد) نیز انتخاب شده‌اند.

زاویه جمع کننده در محاسبات برای همدان در زمستان ۵۱/۸ (Sadri, 2014)، اصفهان ۳۲، تهران ۳۳، زاهدان ۲۹، شیراز ۲۹، کرمان ۳۰، مشهد ۳۳، یزد ۳۱ (Jafarkazemi *et al.* 2012) و برای اهواز ۳۱/۳، اردبیل ۳۸/۲ و منجیل ۳۶/۷ درجه برابر با عرض‌های جغرافیایی انتخاب شد زیرا برای عملکرد مناسب جمع کننده خورشیدی صفحه تخت در کل سال، زاویه جمع کننده تقریباً برابر با عرض جغرافیایی توصیه می‌شود (Duffie & Beckman, 2013).

با وجود اطلاعات مذکور می‌توان فاصله بین صفحه جاذب و پوشش (شیشه) ( $d$ ) را با توجه به حالت‌های مختلف موجود محاسبه نمود.

$h_w$ : ضریب انتقال حرارت باد، از معادله (۲) به دست می‌آید (Duffie & Beckman, 2013):

$$h_w = \frac{8.6V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در آن  $V$ : سرعت وزش باد بر حسب متر بر ثانیه و  $L$ : طول جمع کننده به متر است.

برای برآورد دمای شیشه ( $T_g$ ) معادله تجربی (۳) استفاده شد (Mullick & Samdarshi, 1988):

(رابطه ۳)

$$T_g = T_a + h_w^{-0.42} (0.6336 \epsilon_p - 0.6547 + \frac{T_p}{346} - 1.16 e^{-0.072(T_p - T_a)}) (T_p - T_a)$$

در ادامه متغیرهای معادله (۱)، برای محاسبه دمای آسمان ( $T_s$ )، معادله (۴) پیشنهاد شده است (Swinbank, 1963):

(رابطه ۴)

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5}$$

دمای صفحه جاذب در محدوده ۵۰ تا ۱۵۰ درجه سلسیوس (Samdarshi & Mullick, 1990; Subiantoro & Ooi, 2013) مد نظر قرار گرفت. با این دمای حداقل و حداکثر، دامنه تغییرات افت از بالا پوشش داده خواهد شد و دیگر دماهای صفحه جاذب در این محدوده قرار می‌گیرند. دمای محیط و سرعت وزش باد، ارائه شده در جدول‌های (۲)، (۳) و (۴) از میانگین بلند مدت (۱۷ تا ۵۳ سال) داده‌های هواشناسی (Chaharmahal va Bakhtiari Meteorological Administration, 2018) استخراج گردید.

جدول ۲- شرایط محیطی و مقادیر دما برای حالت‌هایی که می‌تواند منجر به تعیین مقادیر ابتدایی و انتهایی بازه تغییرات ضریب افت از بالا شود.

شرح	شهر	مقدار متوسط دما (°C)
کمینه دما در زمستان (ژانویه: دی- بهمن ماه)	همدان	-۲/۶
کمینه دمای سالانه	اردبیل	۹/۲
بیشینه دما در تابستان (ژوئیه: تیر-مرداد)	اهواز	۳۷/۳
بیشینه دمای سالانه	بوشهر	۲۷
بیشینه سرعت باد در زمستان (ژانویه: دی- بهمن ماه)	اردبیل	-۲/۴
میانگین دمای در سال	منجیل	۱۷/۷

جدول ۳- شرایط محیطی و مقادیر سرعت وزش باد برای حالت‌هایی که می‌تواند منجر به تعیین مقادیر ابتدایی و انتهایی بازه تغییرات ضریب افت از بالا شود.

شرح	شهر	سرعت باد (m/s)
متوسط سرعت باد در زمستان (ژانویه: دی- بهمن ماه)	همدان	۱/۲۳
متوسط سرعت باد در سال	اردبیل	۳/۹۶
متوسط سرعت باد در تابستان (ژوئیه: تیر-مرداد)	بوشهر	۲/۹۸
بیشینه سرعت باد در زمستان (ژانویه: دی- بهمن ماه)	اهواز	۳/۳۴
بیشینه سرعت باد در زمستان (ژانویه: دی- بهمن ماه)	اردبیل	۳/۹۶
بیشینه سرعت باد (میانگین سالانه)	منجیل	۵/۸۶

جدول ۴- داده‌های هواشناسی مربوط به تعدادی از شهرهای منتخب واقع در مناطق مختلف جغرافیایی.

شهر	متوسط دما در سال (°C)	متوسط سرعت باد در سال (m/s)
اصفهان	۱۶/۳	۲/۰۶
تهران	۱۷/۴	۲/۶۸
زاهدان	۱۸/۵	۳/۳۴
شیراز	۱۷/۸	۲/۲۶
کرمان	۱۵/۹	۳/۱۴
مشهد	۱۴/۳	۲/۱۱
یزد	۱۹/۲	۲/۶۲

### اثر سایه و محاسبه انرژی

از آنجایی که فاصله بین صفحه جاذب و شیشه در جمع‌کننده‌های صفحه تخت علاوه بر تأثیرگذاری روی افت از بالا، بر تشکیل سایه و میزان انرژی دریافت شده نهایی نیز مؤثر است، لذا بهینه مقدار فاصله بین صفحه جاذب و شیشه با مدنظر قرار دادن همزمان این موارد محاسبه شد. طول و عرض جمع‌کننده به ترتیب ۲ و ۱ متر متناسب با آنچه در کارخانه‌ها تولید می‌شود، انتخاب گردید. نخست، مقدار افت انرژی از بالا در جمع‌کننده برآورد شد. دیگر افت‌ها در جمع‌کننده صفحه تخت، وارد این محاسبات نشدند زیرا متغیر فاصله بین صفحه جاذب و پوشش در آنها مطرح نیست. میزان انرژی کسب شده و کسر انرژی ناشی از سایه مطابق پژوهش (۲۰۲۰) Farhadi & Taki محاسبه گردید. در این پژوهش مقدار سایه با توجه به رابطه پیشنهادی توسط (Nahar ۱۹۸۰) & Garg برآورد گردید. مقدار انرژی دریافت شده روی یک صفحه

مایل با زاویه نسبت به افق از روش مدل آسمان ایزوتروپیک با در نظر گرفتن انعکاس زمین محاسبه گردید (Duffie & Beckman, 2013). در نهایت میزان انرژی خالص نهایی (پس از کسر افت و سایه) بر حسب فاصله‌های مختلف بین صفحه جاذب و شیشه تعیین شد.

### انتخاب فاصله بین صفحه جاذب تا شیشه

ملاک انتخاب مقدار مناسب فاصله بین صفحه جاذب و شیشه، دریافت بیشینه مقدار انرژی به وسیله جمع‌کننده خورشیدی است. برای این منظور مقدار انرژی خالص دریافتی پس از کسر افت و اثرات سایه مطابق توضیحات بخش «اثر سایه و محاسبه انرژی» برای فواصل مختلف صفحه جاذب تا شیشه به دست آمد. این فاصله از مقدار یک میلی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر با گام‌های یک میلی‌متر بررسی شد. فاصله‌ای که در آن مقدار خالص انرژی

دریافتی بیشینه گردید به عنوان فاصله مناسب در نتایج ارائه شده است.

### تحلیل حساسیت

با توجه به رابطه (۱) مشخص می‌شود که افت از بالا در جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت تابعی از شش متغیر دمای صفحه جاذب ( $T_p$ )، دمای محیط ( $T_a$ )، سرعت وزش باد ( $v$ )، فاصله بین پوشش و صفحه جاذب ( $d$ )، طول جمع‌کننده ( $l$ ) و زاویه شیب جمع‌کننده ( $\beta$ ) است. چنانچه برخی متغیرها مربوط به پوشش مانند ضخامت، ضریب انتقال حرارت هدایت و ضریب گسیل ثابت در نظر گرفته شوند (در بخش محاسبه فاکتور افت از بالا در جمع‌کننده خورشیدی صفحه تخت بیان گردید)، افت را می‌توان به صورت تابع زیر نوشت:

$$U_t = f(T_p, T_a, v, d, l, \beta) \quad (\text{رابطه ۵})$$

در این قسمت، بررسی می‌شود کدام متغیرها تأثیر بیشتری بر افت دارند و ترتیب تأثیر آنها چگونه است. برای این منظور با استفاده از نرم افزار

متلب نسخه ۲۰۱۸ محاسبه شدند.

### نتایج و بحث

نخست تأثیر دما و سرعت باد بر افت از بالا در جمع‌کننده با لحاظ شرایط ایران (جدول ۱) در مقادیر مختلف فاصله بین صفحه جاذب و شیشه (۱ mm تا ۱۰ cm) بررسی می‌شود. سپس با اعمال افت ناشی از سایه و در نظر گرفتن انرژی خالص دریافتی، فاصله بهینه پیشنهاد می‌گردد.

#### تأثیر فاصله بین صفحه جاذب و شیشه بر افت

##### اثر دما

شکل (۲) - (الف) میانگین کمینه دما در زمستان مربوط به شهر همدان و قسمت (ب) میانگین بیشینه دما در تابستان برای اهواز را نشان می‌دهد. دمای ۱۵۰ در زمستان همدان و ۵۰ درجه در تابستان اهواز برای صفحه جاذب اعمال نشده زیرا احتمال وقوع آن کم است (برای اهواز در تابستان وقتی دمای محیط به ۵۰ درجه سلسیوس برسد به طور حتم دمای صفحه جاذب بیشتر خواهد شد). روند تغییرات ضریب افت با فاصله بین صفحه جاذب و شیشه به صورت نزولی است. زیرا با افزایش این فاصله، ضریب انتقال حرارت همرفتی کاهش می‌یابد (Nahar & Garg. 1980) که منجر به کاهش افت از بالا در جمع‌کننده می‌شود. چنانچه فقط ضریب افت برای انتخاب مناسب فاصله  $d$  در

نظر گرفته شود آنگاه هرچه فاصله بیشتر، ضریب افت کمتر خواهد بود. اما افزایش فاصله موجب سایه‌اندازی و کاهش انرژی می‌شود. لذا بهینه مقدار حاصل بررسی توأم این دو موضوع را می‌طلبد.

نکته قابل ذکر دیگر در شکل (۲)، افزایش ضریب افت با افزایش فاصله در دماهای مختلف صفحه جاذب است. به عبارت دیگر وقتی فاصله  $d$  کم است، تغییرات ضریب افت بین دو دما، کمتر از زمانی است که فاصله زیادتر باشد. این مطلب ناشی از آن است که در فواصل کم بین صفحه جاذب با شیشه، انتقال حرارت بیشتر از نوع هدایت است تا همرفت (Nahar & Garg. 1980; Subiantoro & Ooi. 2013) لذا برای مقادیر مختلف دمای صفحه جاذب، میزان تفاوت بین مقادیر افت از بالا در جمع‌کننده، اختلاف کمی را نشان می‌دهد.

همچنین مقادیر ضریب افت نشان می‌دهد، در یک دمای مشخص (۱۰۰ درجه سلسیوس) ضریب افت اهواز در تابستان بیشتر از ضریب افت همدان در زمستان است. زیرا با توجه به جدول (۳) متوسط سرعت باد در اهواز ۲/۷ برابر همدان است و همچنین از نتایج بخش تحلیل حساسیت نیز این مطلب تأیید می‌شود که سرعت وزش باد اثرگذارترین متغیر بر افت از بالا در جمع‌کننده است.

شکل (۳) ضریب افت از بالا را برای کمترین و بیشترین دما در سال (میانگین سالانه) نشان می‌دهد. برای دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس در سطح جاذب، مقادیر افت تقریباً مشابه هستند. افت از بالا به ترتیب  $5/86 \text{ W/m}^2\text{K}$  و  $5/82$  برای اردبیل و بوشهر به دست آمد. اردبیل علاوه بر وجود اختلاف دمای بیشتر سطح جاذب با دمای محیط، دارای متوسط سرعت باد بیشتری است.

#### اثر سرعت باد

شکل (۴) نشان می‌دهد مقادیر افت در منجیل بیشتر از اردبیل است (به صورت میانگین ۵/۵ درصد برای دمای  $100^\circ\text{C}$  در صفحه جاذب). میانگین سالانه سرعت باد در منجیل به صورت تقریبی ۱/۵ برابر سرعت متوسط باد برای زمستان در اردبیل است. در بیان نتایج، کمینه سرعت باد مطرح نشد زیرا چالشی در افزایش افت از بالا در جمع‌کننده به وجود نمی‌آورد.

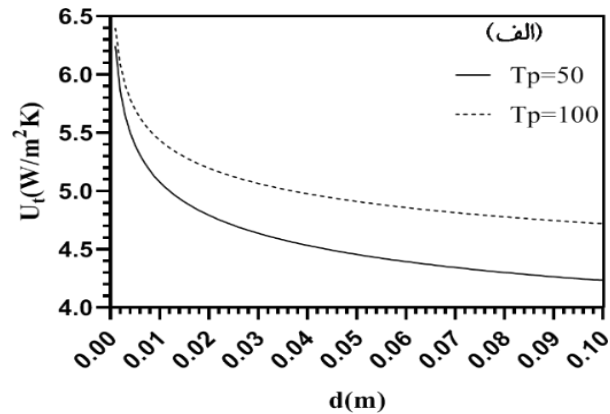
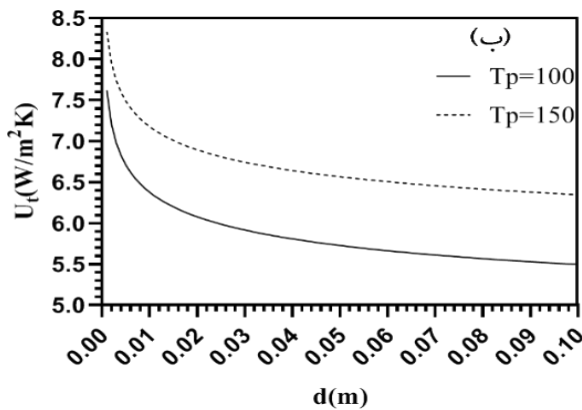
#### بهینه فاصله بین صفحه جاذب و شیشه

در شکل‌های (۲) تا (۴) مشاهده شد وقتی مقدار ضریب افت از بالا بر حسب فاصله  $d$  رسم شود، رابطه‌ای نزولی به دست می‌آید که از آن نتیجه شد هرچه فاصله بیشتر باشد مقدار افت از بالا کاسته می‌شود. اما با توجه به ایجاد سایه دیواره‌ها روی صفحه جاذب، انرژی کسب شده کاسته می‌گردد. در شکل (۵) این مطلب به وضوح دیده می‌شود. یعنی با افزایش فاصله  $d$ ، مقدار انرژی

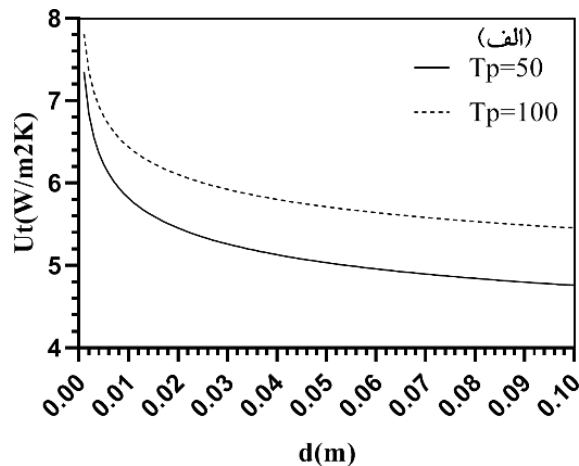
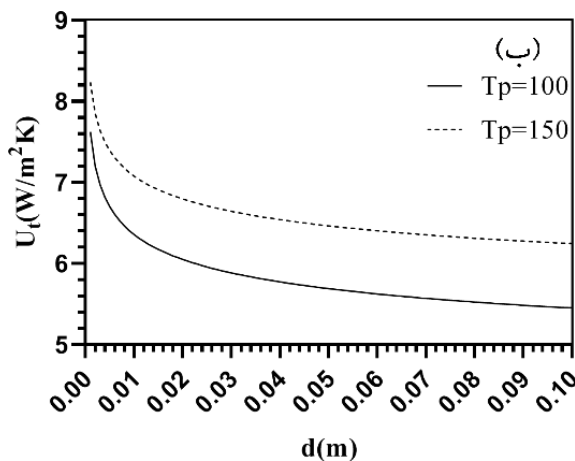
زیرا با افزایش دمای صفحه جاذب در صورت کم بودن فاصله  $d$ ، افت از بالا افزایش خواهد یافت که از نمودارهای شکل (۵) استنباط می‌شود در این شرایط وزنه افت از بالا سنگینی بیشتری در مقابل افت از سایه دارد.

کسب شده به واسطه کاهش افت از بالا، افزایش می‌یابد و به بیشینه مقدار خود می‌رسد، سپس به واسطه افزایش سایه، روندی کاهشی به خود می‌گیرد.

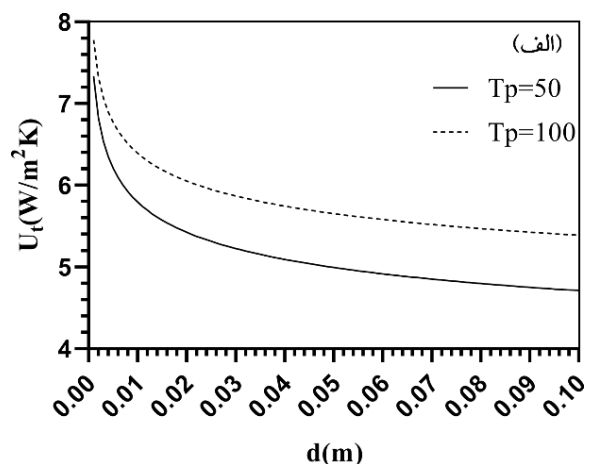
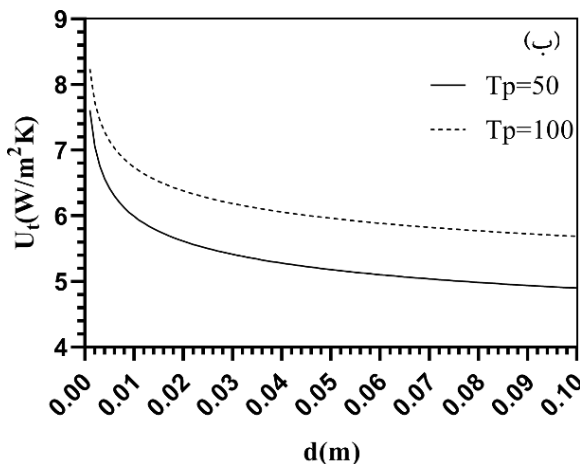
مطلب دیگری که در تمامی نمودارهای شکل (۵) مشهود است، افزایش بهینه فاصله  $d$  با افزایش دمای صفحه جاذب است.



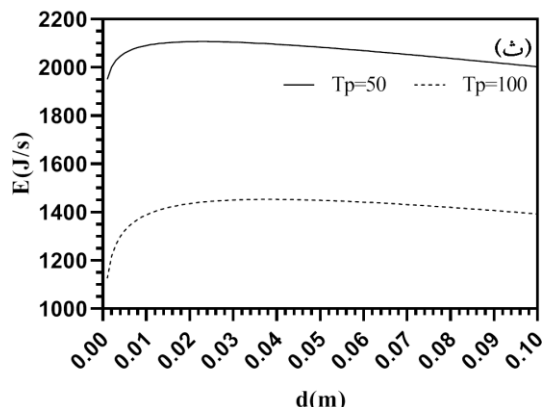
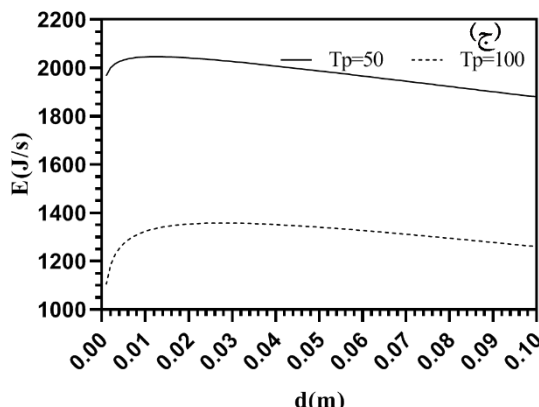
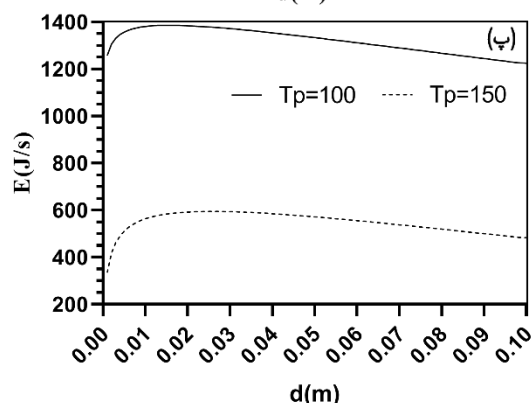
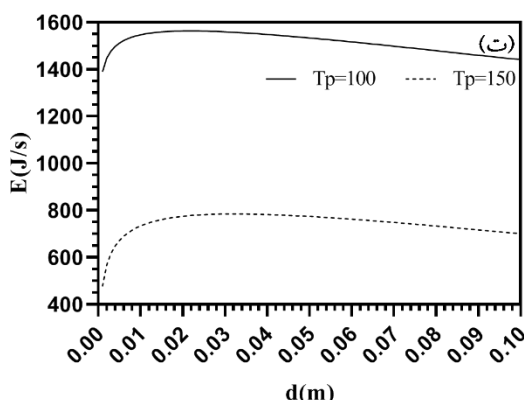
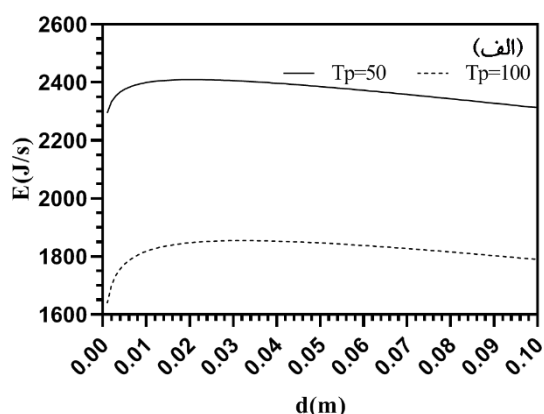
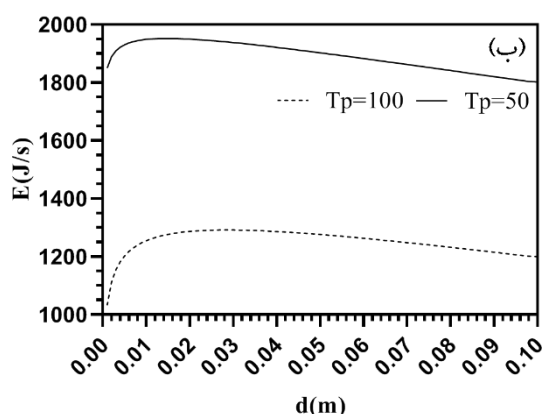
شکل ۲- ضریب افت از بالا ( $U_t$ ) در جمع‌کننده صفحه تخت بر حسب فاصله بین صفحه جاذب و شیشه ( $d$ ) و دمای صفحه جاذب ( $T_p$ ), (الف) برای کمینه دما در زمستان مربوط به همدان و (ب) بیشینه دما در تابستان مربوط به اهواز.



شکل ۳- ضریب افت از بالا ( $U_t$ ) در جمع‌کننده صفحه تخت بر حسب فاصله بین صفحه جاذب و شیشه ( $d$ ) و دمای صفحه جاذب ( $T_p$ ), (الف) برای کمینه دما در سال مربوط به اردبیل و (ب) بیشینه دما در سال مربوط به بوشهر.



شکل ۴- ضریب افت از بالا ( $U_t$ ) در جمع‌کننده صفحه تخت بر حسب فاصله بین صفحه جاذب و شیشه ( $d$ ) و دمای صفحه جاذب ( $T_p$ ), (الف) برای بیشینه سرعت باد در زمستان مربوط به اردبیل و (ب) بیشینه سرعت باد در سال مربوط به منجیل.



شکل ۵- انرژی خالص دریافتی در واحد زمان ( $E$ ) بر حسب فاصله بین صفحه جاذب و شیشه ( $d$ ) و دمای صفحه جاذب ( $T_p$ ) در (الف): کمینه دما در زمستان مربوط به همدان، (ب): کمینه دما در سال مربوط به اردبیل، (پ): بیشینه دما در تابستان مربوط به اهواز، (ت): بیشینه دما در سال مربوط به بوشهر، (ث): بیشینه سرعت باد در زمستان مربوط به اردبیل و (ج): بیشینه سرعت باد در سال مربوط به منجیل.

جدول (۵) بهینه مقادیر فاصله بین صفحه جاذب و شیشه را بر اساس اطلاعات هواشناسی جدول (۲) و (۳) نشان می‌دهد. این مقادیر از ۱۲ تا ۳۸ میلی‌متر متغیر است. شکل (۶) بهینه مقدار فاصله  $d$  را برای میانگین داده‌های هواشناسی (میانگین دمای محیط:  $18.1^{\circ}\text{C}$ ، سرعت باد:  $3.5\text{ m/s}$ ، عرض جغرافیایی:  $32.5$  درجه، طول جغرافیایی:  $48.7$  درجه، میانگین زاویه جمع‌کننده خورشیدی:  $30.8$  درجه (Jafarkazemi et al. 2012; Duffie & Beckman. 2013; Abdolzadeh et al. 2014)) ۲۵ میلی‌متر نشان می‌دهد.

فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش در جدول (۶) ارائه گردیده است. دامنه تغییرات در این شهرها از ۱۱ تا ۳۶ میلی‌متر متغیر است و هنگامی که دمای صفحه جاذب ۱۰۰ درجه سلسیوس باشد، تغییرات در محدوده ۲۳ تا ۲۵ میلی‌متر قرار دارد که با مقدار متوسط محاسبه شده (۲۵ میلی‌متر) نزدیک است. فاصله بهینه  $d$  برای هند ۴۰ تا ۵۰ میلی‌متر (Nahar & Garg. 1980) و برای جمع‌کننده‌های نزدیک به حالت عمودی ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متر (Kumar & Mullick. 2012) توصیه شده‌است. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد برای کمینه کردن افت از بالا در جمع‌کننده‌های صفحه تخت با یک یا دو لایه پوشش، عدد رایلی باید در نزدیکی ۱۷۰۸ باشد که متناظر با فاصله ۱۰ میلی‌متر به

را برای شهرهایی از نقاط مختلف جغرافیایی و دارای تابش مناسب خورشیدی که در جدول (۴) لیست شده‌اند، مقدار مناسب

را برای شهرهایی از نقاط مختلف جغرافیایی و دارای تابش مناسب خورشیدی که در جدول (۴) لیست شده‌اند، مقدار مناسب



بیشترین به کمترین عبارت است از: سرعت وزش باد، فاصله پوشش تا صفحه جاذب، زاویه شیب جمع کننده، طول جمع کننده، دمای صفحه جاذب و دمای محیط. سرعت وزش باد روی ضریب انتقال حرارت همرفتی در صفحه بالایی جمع کننده صفحه تخت بیشترین اثر را دارد. اثرگذاری این متغیر بر افت نشان می دهد اتلاف انرژی و حرارت از طریق همرفتی در جمع کننده صفحه تخت چقدر می تواند مهم باشد. در این راستا تأثیر قابل ملاحظه همرفت در افت از بالا در جمع کننده صفحه تخت گزارش شده است (Deng *et al.* 2012). این مطلب تأیید می کند انتخاب فاصله بین پوشش تا صفحه جاذب به عنوان پارامتری مهم برای تعیین اندازه مناسب آن لازم و ضروری است.

چنانچه میانه مقادیر معرفی شده در جدول (۷) برای متغیرها در نظر گرفته شود ترتیب تأثیر از بیشینه به کمینه به صورت: فاصله پوشش تا صفحه جاذب، زاویه شیب جمع کننده، طول جمع کننده، سرعت وزش باد، دمای صفحه جاذب و دمای محیط است.

اگر دامنه تغییر متغیرها را در محدوده میانه به اضافه و منهای یک چهارم دامنه تغییر هر متغیر در نظر گرفته شوند آنگاه ترتیب تأثیر، مشابه حالت میانه مقدار برای متغیرها به دست آمد.

دست آمده است (Subiantoro & Ooi. 2013). در یک ارزیابی عملی گزارش شد چنانچه فاصله  $d$ ، ۵۰ میلی متر باشد به ترتیب ۱۱/۶۴ و ۷/۷۲ درصد انرژی بیشتری در مقایسه با فواصل ۲۵ و ۱۵۰ میلی متر برای موقعیت جغرافیایی هند کسب می شود (Nahar & Gupta. 1989). در پژوهش دیگری برای ۲۲ جمع کننده صفحه تخت با مشخصات مختلف، فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش ۲۵ تا ۴۱ میلی متر (Eismann. 2015) گزارش شده است. همچنین در پژوهش دیگری که از روش بهینه سازی ازدحام ذرات استفاده شده بود، فاصله ۲۰ تا ۲۵ میلی متر پیشنهاد شد (Pourfayaz *et al.* 2020). محدوده تغییرات  $d$  در پژوهش های ذکر شده از ۱۰ تا ۵۰ میلی متر توصیه شده است. برای حالت بحرانی با توجه به شرایط مذکور در جدول (۲) و (۳) محدوده ۱۲ تا ۳۸ میلی متر به دست آمد و برای چند شهر دیگر که در جدول (۴) به آنها اشاره شد، مقدار ۱۱ تا ۳۶ میلی متر حاصل شد که در بازه پژوهش های دیگر محققان قرار دارد و با آنها به خوبی هماهنگ است.

#### نتایج تحلیل حساسیت

جدول (۷) دامنه تغییر متغیرها را نشان می دهد. بر اساس این دامنه تغییر، ترتیب تأثیر متغیرها بر افت از بالای جمع کننده از

جدول ۵- بهینه مقادیر فاصله بین صفحه جاذب و شیشه برای شرایط مختلف بر حسب میلی متر.

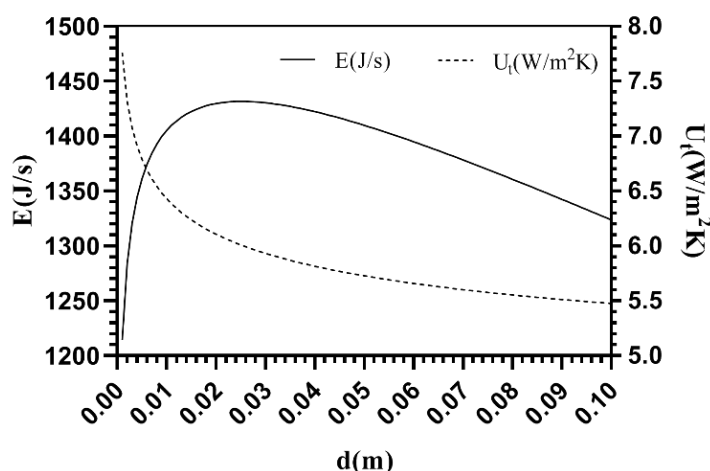
دمای صفحه جاذب ( $T_p$ )			وضعیت
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	
-	۳۲	۲۱	کمینه دما در زمستان
-	۲۹	۱۵	کمینه دمای سالانه
۲۶	۱۵	-	بیشینه دما در تابستان
۳۲	۲۲	-	بیشینه دمای سالانه
-	۳۸	۲۳	بیشینه سرعت باد در زمستان
-	۲۸	۱۲	بیشینه سرعت باد در سال

جدول ۶- بهینه مقادیر فاصله بین صفحه جاذب و شیشه برای چندین شهر منتخب بر حسب میلی متر.

دمای صفحه جاذب ( $T_p$ )			شهر
۱۵۰	۱۰۰	۵۰	
-	۲۳	۱۲	اصفهان
-	۲۴	۱۲	تهران
۳۶	۲۵	۱۲	زاهدان
۳۳	۲۳	۱۱	شیراز
-	۲۵	۱۲	کرمان
-	۲۴	۱۲	مشهد
۳۳	۲۳	۱۱	یزد

جدول ۷- دامنه تغییرات متغیرها برای بررسی تحلیل حساسیت افت جمع کننده خورشیدی

متغیر	بیشینه	کمینه
دمای صفحه جاذب	۱۵۰ °C	۵۰ °C
دمای محیط	۴۰ °C	-۵ °C
سرعت وزش باد	۷ m/s	۰
فاصله پوشش تا صفحه جاذب	۰/۱ m	۰/۰۰۱ m
طول جمع کننده	۲ m	۱ m
زاویه شیب جمع کننده	۰°	۰



شکل ۶- ضریب افت از بالا و انرژی خالص دریافتی در واحد زمان برای میانگین شرایط آب و هوایی.

### نتیجه گیری

در راستای یافتن فاصله مناسب بین صفحه جاذب و پوشش یک لایه در جمع کننده خورشیدی صفحه تخت برای ایران با توجه به داده های هواشناسی جمع بندی نتایج زیر حاصل شد:

فاصله مناسب بین صفحه جاذب تا پوشش برای ایران در محدوده میانگین متغیرها، ۲۵ میلی متر به دست آمد و دامنه آن ۱۲ تا ۳۸ میلی متر با توجه به شرایط مختلف آب و هوایی است. در فواصل کمتر بین صفحه جاذب تا پوشش، تغییرات ضریب افت بین دو دمای متفاوت صفحه جاذب، کمتر از زمانی است که فاصله زیادتر باشد.

با افزایش دمای صفحه جاذب، بهینه فاصله بین صفحه جاذب تا پوشش افزایش می یابد.

چنانچه هر متغیر را در دامنه تغییرات بین کمینه و بیشینه در نظر گرفت، ترتیب تأثیر متغیرها بر افت از بالای جمع کننده از

بیشترین به کمترین عبارت است از: سرعت وزش باد، فاصله پوشش تا صفحه جاذب، زاویه شیب جمع کننده، طول جمع کننده، دمای صفحه جاذب و دمای محیط.

چنانچه میانه مقادیر متغیرها یا میانه به اضافه و منهای یک چهارم دامنه تغییر هر متغیر در نظر گرفته شود، ترتیب تأثیر از بیشینه به کمینه به صورت: فاصله پوشش تا صفحه جاذب، زاویه شیب جمع کننده، طول جمع کننده، سرعت وزش باد، دمای صفحه جاذب و دمای محیط است.

### سپاسگزاری

از حمایت های مادی و معنوی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان در اجرای این پژوهش سپاسگزاری می شود. هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد.

### REFERENCES

Abdolzadeh, Z., Abdolzadeh, M., Fadaeinedjad, R. (2014). Optimum slope angles and the corresponding uncertainties for a solar collector. International Journal of Ambient Energy. 37(1). 46-54.

Agarwal, V.K., Larson, D.C. (1981). Calculation of the top loss coefficient of a flat-plate collector. Solar Energy. 27(1). 69-71.  
Akhtar, N., Mullick, S. (2007). Computation of glass-cover temperatures and top heat loss coefficient of

- flat-plate solar collectors with double glazing. *Energy*. 32(7). 1067-1074.
- Akhtar, N., Mullick, S.C. (1999). Approximate method for computation of glass cover temperature and top heat-loss coefficient of solar collectors with single glazing. *Solar Energy*. 66(5). 349-354.
- Chaharmahal va Bakhtiari Meteorological Administration. 2018. Monthly Data of country. <http://www.chbmet.ir>. (Accessed November 6 2018).
- Deng, Y.-c., Zhao, Y.-h., Quan, Z.-h., Wang, L.-c. (2012). Numerical Study on Natural Convection Heat Transfer of Air Layer Inside the Flat Plate Solar Collector. *Building Science*. 28(10). 84-87.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Eismann, R. (2015). Accurate analytical modeling of flat plate solar collectors: Extended correlation for convective heat loss across the air gap between absorber and cover plate. *Solar Energy*. 122. 1214-1224.
- El-Sebah, A. (1997). Thermal performance of a box-type solar cooker with outer-inner reflectors. *Energy*. 22(10). 969-978.
- Farhadi, R., Taki, M. (2020). The energy gain reduction due to shadow inside a flat-plate solar collector. *Renewable Energy*. 147. 730-740.
- Francey, J.L.A., Paraiouannou, J. (1985). Wind-related heat losses of a flat-plate collector. *Solar Energy*. 35(1). 15-19.
- Garg, H.P., Datta, G. (1984). The top loss calculation for flat plate solar collectors. *Solar Energy*. 32(1). 141-143.
- Jafarkazemi, F., Saadabadi, S.A., Pashdarshahri, H. (2012). The optimum tilt angle for flat-plate solar collectors in Iran. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. 4(1). 1-15.
- Kalogirou, S.A. (2014). *Solar Energy Engineering: processes and systems*, Second Edition ed. California: Academic Press.
- Klein, S.A. (1975). Calculation of flat-plate collector loss coefficients. *Solar Energy*. 17(1). 79-80.
- Kumar, S., Mullick, S.C. (2012). Glass cover temperature and top heat loss coefficient of a single glazed flat plate collector with nearly vertical configuration. *Ain Shams Engineering Journal*. 3(3). 299-304.
- Malhotra, A., Garg, H., Palit, A. (1981). Heat loss calculation of flat plate solar collectors. *Journal of Thermal Engineering*. 2(2). 59-62.
- Mullick, S.C., Samdarshi, S.K. (1988). An Improved Technique for Computing the Top Heat Loss Factor of a Flat-Plate Collector With a Single Glazing. *Journal of Solar Energy Engineering*. 110(4). 262-267.
- Muneer, T., Hawas, M. (1981). Calculation of the top loss coefficient by the network method and applications to solar collectors. *Energy*. 6(10). 971-981.
- Nahar, N.M., Garg, H.P. (1980). Free convection and shading due to gap spacing between an absorber plate and the cover glazing in solar energy flat-plate collectors. *Applied Energy*. 7(1). 129-145.
- Nahar, N.M., Gupta, M.P. (1989). Studies on gap spacing between absorber and cover glazing in flat plate solar collectors. *International Journal of Energy Research*. 13(6). 727-732.
- Pourfayaz, F., Shirmohammadi, R., Maleki, A., Kasaeian, A. (2020). Improvement of solar flat-plate collector performance by optimum tilt angle and minimizing top heat loss coefficient using particle swarm optimization. *Energy Science & Engineering*.
- Sadri, M.S., 2014. Evaluation of solar radiation, clearness index and determining the optimum tilt angle in flat-plate solar collector in Hamedan, Department of Mechanical Engineering. Kashan University, Kashan.
- Samdarshi, S.K., Mullick, S.C. (1990). Analysis of the top heat loss factor of flat plate solar collectors with single and double glazing. *International Journal of Energy Research*. 14(9). 975-990.
- Sharafeldin, M.A., Gróf, G., Mahian, O. (2017). Experimental study on the performance of a flat-plate collector using WO<sub>3</sub>/Water nanofluids. *Energy*. 141. 2436-2444.
- Subiantoro, A., Ooi, K.T. (2013). Analytical models for the computation and optimization of single and double glazing flat plate solar collectors with normal and small air gap spacing. *Applied Energy*. 104. 392-399.
- Swinbank, W.C. (1963). Long-wave radiation from clear skies. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 89(381). 339-348.
- Vestlund, J., Rönnelid, M., Dalenbäck, J.-O. (2009). Thermal performance of gas-filled flat plate solar collectors. *Solar Energy*. 83(6). 896-904.