دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

مطالعه آزمایشگاهی، مدلسازی و بهینه‌سازی عملکرد یک سامانه آبگرمکن خورشیدی

استاد راهنما:

دکتر تورج توکلی قینانی

استاد مشاور:

دکتر امیر رحیمی

پژوهشگر:

سیده سارا قاری‌زاده

اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه اصفهان است.

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی

خانم سیّده سارا قاری‌زاده

تحت عنوان:

مطالعه آزمایشگاهی، مدلسازی و بهینه سازی عملکرد یک سامانه آبگرمکن خورشیدی

در تاریخ ۱۳۹۲/۲/۳۱ توسط هیئت داوران زیر بررسی و با درجه‌ی بسیار خوب به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر تورج توکلی قینانی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۲- استاد مشاور پایان‌نامه دکتر امیر رحیمی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر محمد صادق حاتمی‌پور با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر نسرین اعتصامی با مرتبه علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

زندگی صحنه یکتای هنرمندی ماست

هر کسی نغمه خود خواند و از صحنه رود

صحنه پیوسته به جاست

خرم آن نغمه که مردم بسپارند به یاد

سپاسگزاری:

من به سر چشمه خورشید نه خود بردم راه ذره ای بودم و مهر تو مرا بالا برد

موفقیت خود را در به پایان رساندن این رساله مدیون الطاف خداوند، صبر و فداکاری پدر و مادرم، حمایت های یگانه تکیه گاه روزهای پر فراز و نشیب مسیر انجام این رساله، همسرم و مهربانی های خواهر و برادرم هستم. لذا بر خود لازم می دانم کمال تشکر و قدردانی را از ایشان به جای آورم.

از آنجا که عمر ما آنقدر طولانی نیست که مسیر زندگی را یک بار برای کسب تجربه بپیماییم و بار دیگر برای به کار بردن تجربه ها در زندگی، یا باید دل به دریا زده و با هراس قدم بر جاده زندگی بگذاریم - مسیری که در طول آن نه راهنمایی حضور دارد و نه چراغی - و یا ابتدا خود را به چراغ روشن و آگاهی مجهز نماییم و سپس با ایمان و اطمینان پا در راه بگذاریم. از اساتید گرامی که چراغ های روشن و آگاه این رساله بودند کمال تشکر را دارم؛ از جناب آقای دکتر توکلی که راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند سپاسگزارم. همچنین بر خود لازم می دانم از استاد مشاور محترم، جناب آقای دکتر رحیمی، که حقیقتا بسیار دلسوزانه تر از یک استاد مشاور مرا همراهی نمودند نهایت تشکر و سپاسگزاری را به جای آورم.

در پایان از دوستان و همکاران دلسوزم سرکار خانم مهندس فاطمه سیدباقری و جناب آقای مهندس محمود زنده دل و کلیه دوستانی که در طول سه سال تحصیل در شهر اصفهان با الطاف خود باعث دلگرمی من بودند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم.

تقدیم به:

همسر دلسوز و صبورم

و وطن همیشه سرفرازم، ایران

چکیده

در این تحقیق یک سامانه آبگرمکن خورشیدی با جمع‌کننده سهموی خطی در شهر اصفهان مورد مطالعه آزمایشگاهی و تئوری قرار گرفته است. وجه تمایز این تحقیق در بخش مطالعات تجربی در نوع جمع‌کننده بکار برده شده در سامانه (متشکل از تعدادی جمع‌کننده سهموی خطی) و در بخش مدلسازی در نحوه محاسبه ضرایب شکل لوله‌های حامل جریان آب می‌باشد.

پارامترهای زیادی بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده و نتیجتاً کارایی آن تأثیر می‌گذارد که در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی اثر پارامترهای شدت جریان آب ورودی به جمع‌کننده، زاویه شیب جمع‌کننده، شرایط فصلی و وضعیت جمع-کننده از لحاظ ثابت یا متحرک بودن پرداخته شده است. سامانه مذکور در زاویه شیب ۳۳ درجه و در شرایطی که دنبال-کننده موقعیت خورشید نسبت به زمین در طول روز است بالاترین کارایی را دارد و بدیهی است که در فصل تابستان به دلیل بیشتر بودن شدت تشعشع خورشید، مقادیر به دست آمده برای دمای آب خروجی از جمع‌کننده بالاتر است. همچنین در شدت جریان آب ml/min ۳۵۰ در سیستم مذکور پدیده دو فازی شدن رخ می‌دهد و مناسب است که شدت جریان آب ورودی به سامانه بیشتر از این مقدار باشد و شدت جریان ml/min ۵۰۰ به دلیل بازدهی حدود ۸۰% توصیه می‌شود.

از آنجا که مکان قرارگیری لوله‌ها نسبت به شیشه و نسبت به یکدیگر متفاوت است و این تفاوت در مکان قرارگیری، منجر به متفاوت بودن ضریب شکل هر لوله می‌گردد، در مدل ریاضی توسعه داده شده ضرایب شکل تشعشعی مربوط به هر لوله با لوله دیگر متفاوت در نظر گرفته شده و این مسئله دقت مدل ریاضی توسعه داده شده را افزایش داده است. به طور کلی می‌توان گفت که نتایج به دست آمده از مدلسازی تطابق خوبی با نتایج حاصل از آزمایش‌ها دارد.

بازده سامانه در بهترین شرایط در فصل تابستان حدود ۸۰٪ و در فصل پاییز حدود ۵۵٪ است.

کلید واژه‌ها: آبگرمکن خورشیدی، جمع‌کننده سهموی خطی، ضریب شکل، مدلسازی ریاضی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: کلیات و مفاهیم اولیه ۱

۱-۱ مقدمه:..... ۱

۱-۲ ویژگی‌های فیزیکی خورشید..... ۴

۱-۳ زوایای خورشیدی:..... ۵

۱-۳-۱ زاویه میل (δ):..... ۵

۱-۳-۲ زاویه ساعتی (h):..... ۵

۱-۳-۳ زاویه اوج (α_s) و زاویه زنیث(ϑ_z):..... ۶

۱-۳-۴ زاویه آزیموث سطح (γ):..... ۶

۱-۳-۵ زاویه آزیموث خورشیدی (γ_s):..... ۷

۱-۳-۶ زاویه برخورد(ϑ):..... ۷

۱-۳-۷ زاویه شیب(β):..... ۷

۱-۴ وضعیت انرژی خورشیدی در ایران..... ۸

۱-۵ کاربردهای انرژی خورشیدی..... ۹

۱-۵-۱ استفاده از انرژی حرارتی خورشید برای مصارف خانگی، صنعتی و نیروگاهی..... ۱۰

۱-۵-۱-۱ کاربردهای نیروگاهی:..... ۱۰

۱-۵-۱-۲ کاربردهای غیر نیروگاهی:..... ۱۳

۱-۵-۲ تبدیل مستقیم پرتوهای خورشید به الکتریسیته، به وسیله تجهیزات فتوولتائیک..... ۱۷

۱-۶ آبگرمکن خورشیدی:..... ۱۸

۱-۶-۱ سامانه‌های منفعل:..... ۱۹

۱-۶-۱-۱ سامانه‌های ترموسیفون:..... ۲۰

۱-۶-۱-۲ سامانه‌های ICS:..... ۲۰

۱-۶-۲ سامانه‌های فعال:..... ۲۱

۱-۶-۲-۱ سامانه‌های مستقیم:..... ۲۱

۱-۶-۲-۲ سامانه‌های غیرمستقیم:..... ۲۲

عنوان **صفحه**

۱-۶-۲-۳ سامانه‌های هوایی:..... ۲۲

۱-۶-۲-۴ سامانه‌های پمپ حرارتی:..... ۲۳

۱-۶-۲-۵ سامانه‌های گرمایش استخر:..... ۲۳

۱-۶-۳ ساختار آبگرمکن‌های خورشیدی..... ۲۳

۱-۶-۳-۱ جمع‌کننده‌ها..... ۲۴

۱-۶-۳-۲ مخزن ذخیره..... ۲۸

۱-۶-۳-۳ سیال انتقال دهنده گرما (سیال عامل)..... ۲۸

فصل دوم: مروری بر مطالعات پیشین ۳۰

۲-۱ مقدمه:..... ۳۰

۲-۲ مروری بر مطالعات پیشین:..... ۳۰

فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی ۴۰

۳-۱ مقدمه:..... ۴۰

۳-۲ شرح مشخصات دستگاه:..... ۴۰

۳-۲-۱ جمع‌کننده مورد مطالعه:..... ۴۲

۳-۳ مکانیسم عمل دستگاه:..... ۴۳

۳-۴ مواد و روش‌ها:..... ۴۴

۳-۵ شرح آزمایش‌ها:..... ۴۶

فصل چهارم: مدلسازی ریاضی ۴۸

۴-۱ مقدمه:..... ۴۸

۴-۲ مدلسازی ریاضی جمع‌کننده سهموی خطی:..... ۴۹

۴-۲-۱ فرضیات مدل:..... ۴۹

۴-۲-۲ تحلیل شبکه‌ای سامانه:..... ۴۹

۴-۲-۳ معادلات حاکم و کمکی:..... ۵۲

۴-۲-۴ محاسبه ضرایب شکل:..... ۵۶

۴-۲-۵ الگوریتم حل مدل:..... ۵۹

عنوان **صفحه**

۴-۳ بازده جمع‌کننده: ۶۱
۴-۴ تخمین شدت تابش خورشیدی: ۶۱
۴-۴-۱ محاسبه شدت تابش خورشید روی سطوح شیب دار با استفاده از شدت تابش خورشید روی سطوح افقی ۶۲
فصل پنجم: نتایج و بحث ۶۵
۵-۱ مقدمه: ۶۵
۵-۲ بررسی تأثیر شدت جریان بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده: ۶۶
۵-۳ بررسی تأثیر پارامتر زاویه شیب بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده: ۶۷
۵-۴ مقایسه تأثیر شرایط فصلی بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده: ۶۹
۵-۵ مقایسه تأثیر ثابت یا متحرک بودن جمعکننده سهموی خطی بر دمای آب خروجی: ۷۰
۵-۶ توزیع دما در طول لوله در بازه زمانی مشخص: ۷۱
۵-۷ بررسی کارایی جمع‌کننده: ۷۳
۵-۸ بررسی دقت مدل ریاضی توسعه داده شده: ۷۴
۵-۹ بررسی نتایج حاصل از مدل ریاضی: ۷۸
۵-۹-۱ بررسی عملکرد دمایی جمع‌کننده: ۷۸
۵-۹-۲ بررسی تأثیر شدت جریان آب ورودی به جمع‌کننده بر دمای آب خروجی: ۸۰
۵-۹-۳ پیش‌بینی طول لوله مورد نیاز جهت افزایش شدت جریان آب ورودی به جمع‌کننده با حفظ کارایی سامانه: ۸۱
۵-۹-۴ پیش‌بینی عملکرد سامانه در فصل زمستان ۸۲
۵-۹-۵ بهبود عملکرد سامانه در فصل زمستان ۸۳
۵-۹-۶ پیش‌بینی تعداد جمع‌کننده مورد نیاز برای مصرف خانگی یک خانواده ۶ نفره ۸۴
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۵
۶-۱ نتیجه‌گیری: ۸۵
۶-۲ پیشنهادها: ۸۶
منابع و مآخذ ۸۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ روابط خورشید- زمین (Kalogirou, 2009)..... ۴

شکل ۱-۲- زوایای میل(δ) و ساعتی(h) (Kalogirou, 2009)..... ۶

شکل ۱-۳ زوایای اوج(α_s)، زنیث(θ_z)، آزیموث سطح(γ) و آزیموث خورشیدی (γ_s) (Foster et al., 2010) ۷

شکل ۱-۴ زوایای برخورد و شیب (Kalogirou, 2009)..... ۸

شکل ۱-۵ نقشه تابش خورشیدی ایران..... ۹

شکل ۱-۶ نمایی از تجهیزات یک نیروگاه سهموی خطی..... ۱۱

شکل ۱-۷ یک نیروگاه دریافت‌کننده مرکزی..... ۱۲

شکل ۱-۸ یک نیروگاه دیش استرلینگ..... ۱۲

شکل ۱-۹ شماتیکی از یک آب‌شیرین‌کن خورشیدی(Eltawil et al., 2009) ۱۴

شکل ۱-۱۰ خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با دودکش (Jairaj et al., 2009) ۱۵

شکل ۱-۱۱ نمایی از یک اجاق خورشیدی..... ۱۶

شکل ۱-۱۲ نمایی از خانه خورشیدی ساخته شده در دانشگاه علم و صنعت..... ۱۷

شکل ۱-۱۳ شماتیکی از آبگرمکن‌های ترموسیفون (Kalogirou, 2009)..... ۲۰

شکل ۱-۱۴ شماتیکی از آبگرمکن‌های ICS (Kumar & Rosen, 2011) ۲۱

شکل ۱-۱۵ شماتیکی از سامانه‌های مستقیم (Kalogirou, 2009)..... ۲۱

شکل ۱-۱۶ شماتیکی از سامانه‌های غیر مستقیم (Kalogirou, 2009)..... ۲۲

شکل ۱-۱۷ شماتیکی از سامانه‌های هوایی (Kalogirou, 2009)..... ۲۲

شکل ۱-۱۸ نمایی از یک جمع‌کننده تخت (Foster et al., 2010) ۲۵

شکل ۱-۱۹ نمایی از مقطع یک جمع‌کننده لوله خلأ (Foster et al., 2010)..... ۲۵

شکل ۱-۲۰ جمع‌کننده سهموی ترکیبی (Kalogirou, 2009)..... ۲۶

شکل ۱-۲۱ جمع‌کننده سهموی با کانون خطی (Kalogirou, 2009)..... ۲۷

شکل ۱-۲۲ جمع‌کننده سهموی با کانون نقطه‌ای (Kalogirou, 2009)..... ۲۸

شکل ۲-۱ شماتیکی از آبگرمکن‌های خورشیدی مورد مطالعه توسط عماری، ۲۰۰۳ (Ammari & Namir, 2003)..... ۳۶

شکل ۲-۲ آبگرمکن خورشیدی با دریافت‌کننده استوانه‌ای (Al-Madani, 2006)..... ۳۷

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۳ سمت راست: غرب-شرق، سمت چپ: شمال-جنوب (Nkwetta & Smyth, 2011) ۳۸
شکل ۲-۴ شماتیکی از جمع کننده Vشکل (Chong et al., 2012) ۳۸
شکل ۳-۱ آبگرمکن خورشیدی ساخته شده در دانشگاه اصفهان ۴۱
شکل ۳-۲جمع‌کننده سهموی آبگرمکن خورشیدی ساخته شده در دانشگاه اصفهان ۴۲
شکل ۳-۳ تصویری دیگر از جمع‌کننده ساخته شده در دانشگاه اصفهان ۴۲
شکل ۳-۴ شماتیک سامانه آبگرمکن خورشیدی مورد مطالعه ۴۳
شکل ۳-۵ شماتیکی از محفظه سامانه آبگرمکن خورشیدی مورد مطالعه (نمای جانبی) ۴۴
شکل ۴-۱ مدار الکتریکی معادل سامانه تشعشعی مربوط به آبگرمکن خورشیدی مورد مطالعه ۵۰
شکل ۴-۲ المان دیفرانسیلی طولی برای آب درون لوله در راستای z ۵۲
شکل ۴-۳ گره‌های اصلی در مدار تشعشعی سامانه مورد مطالعه ۵۵
شکل ۴-۴ موقعیت مکانی لوله‌ها و قطاع‌های استوانه‌ای نسبت به شیشه ۵۷
شکل ۴-۵ نحوه قرارگیری لوله نسبت به پوشش شیشه‌ای ۵۸
شکل ۴-۶ نمایی از یک استوانه در مجاورت یک صفحه (Feingold & Gupta, 1970) ۵۸
شکل ۴-۷ الگوریتم حل مدل ۶۰
شکل ۵-۱ تأثیر پارامتر شدت جریان بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده سهموی خطی در زاویه شیب ۲۵ درجه نسبت به سطح افق، تاریخ انجام آزمایش‌ها: ۲۱، ۲۲ و ۲۴ مرداد ۱۳۹۱ ..... ۶۶
شکل ۵-۲ تأثیر پارامتر شدت جریان بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده سهموی خطی در زاویه شیب ۳۳ درجه نسبت به سطح افق، تاریخ انجام آزمایش‌ها: ۵، ۷ و ۸ شهریورماه ۱۳۹۱ ..... ۶۶
شکل ۵-۳ تأثیر پارامتر زاویه شیب جمع‌کننده سهموی خطی بر دمای آب خروجی از آن در سه شدت جریان ml/min ۳۵۰، ۵۰۰، ۶۵۰ ، روزهای انجام آزمایش: ۲۱، ۲۲ و ۲۴ مرداد ماه و ۵، ۷ و ۸ شهریور ماه ۶۷۱۳۹۱
شکل ۵-۴ تأثیر پارامتر زاویه شیب جمع‌کننده سهموی خطی بر دمای آب خروجی از آن در شدت جریان ml/min ۳۵۰. روزهای انجام آزمایش: ۶ و ۱۰ مهر ماه ۱۳۹۱ ..... ۶۸
شکل ۵-۵ تأثیر شرایط فصلی بر دمای آب خروجی از جمع‌کننده سهموی خطی در دو زاویه شیب ۲۵ و ۳۳ درجه، شدت جریان آب ورودی: ml/min ۳۵۰ ..... ۶۹
شکل ۵-۶ تأثیر ثابت یا متحرک بودن جمع‌کننده بر دمای آب خروجی در دو زاویه شیب ۲۵ و ۳۳ درجه، شدت جریان ml/min۳۵۰ و در فصل پاییز. تاریخ انجام آزمایش‌ها: ۶، ۷، ۱۰ و ۱۱ مهرماه ۱۳۹۱ ..... ۷۱

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۷ توزیع دما در نقاط مختلف در طول لوله حامل جریان در ساعات قبل از ظهر، شدت جریان ml/min ۳۵۰، زاویه شیب ۳۳ درجه، تاریخ انجام آزمایش: ۵ شهریور ماه ۱۳۹۱..... ۷۲
شکل ۵-۸ توزیع دما در نقاط مختلف در طول لوله در ساعات بعد از ظهر، شدت جریان ml/min ۳۵۰، زاویه شیب ۳۳ درجه، تاریخ انجام آزمایش: ۵ شهریور ماه ۱۳۹۱..... ۷۲
شکل ۵-۹ مقایسه میزان انرژی تجمعی در سامانه مورد مطالعه در سه شدت جریان ml/min ۳۵۰، ۵۰۰ و ۶۵۰ و دو زاویه شیب ۲۵ و ۳۳ درجه، تاریخ انجام آزمایش‌ها: ۲۱، ۲۲ و ۲۴ مرداد ماه و ۵، ۷ و ۸ شهریور ماه ۱۳۹۱..... ۷۳
شکل ۵-۱۰ تغییرات دمای آب خروجی از جمع‌کننده بر حسب شدت جریان آب ورودی، زاویه شیب:۳۳ درجه، ساعت ۱۲ ظهر، دمای متوسط آب ورودی: ۴۴°C، دمای متوسط هوای محیط: ۳۱°C، سرعت متوسط باد: ۲ m/s، خطای نسبی=٪۸/۱۶..... ۷۵
شکل ۵-۱۱ تغییرات دمای آب خروجی از جمع‌کننده بر حسب زمان در زاویه شیب ۳۳ درجه، شدت جریان ml/min ۵۰۰، دمای متوسط آب ورودی: ۴۲/۳ C، دمای متوسط هوای محیط: ۳۰/۸ C، سرعت متوسط باد: ۲m/s، خطای نسبی=٪۶/۳۷..... ۷۶
شکل ۵-۱۲ نحوه توزیع دما در طول جمع‌کننده در زاویه شیب ۳۳ درجه، ساعت ۱۲ ظهر، شدت جریان ml/min ۵۰۰، دمای متوسط آب ورودی: ۴۵ C، دمای متوسط هوای محیط: ۳۰/۲ C، سرعت متوسط باد: ۲m/s، خطای نسبی=٪۱/۸۲..... ۷۸
شکل ۵-۱۳ تغییرات دمای جمع‌کننده سهموی خطی در طول جمع‌کننده، ساعت ۱۲ ظهر، شدت جریان ورودی ml/min ۵۰۰، زاویه شیب ۳۳ درجه، دمای متوسط آب ورودی ۴۴ C، دمای متوسط هوای محیط C ۳۱، شدت جریان متوسط باد ۲ m/s..... ۷۹
شکل ۵-۱۴ تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای در طول جمع‌کننده، ساعت ۱۲ ظهر، شدت جریان ورودی ml/min ۵۰۰، زاویه شیب ۳۳ درجه، دمای متوسط آب ورودی ۴۴ C، دمای متوسط هوای محیط ۳۱ C، شدت جریان متوسط باد ۲ m/s..... ۷۹
شکل ۵-۱۵ تغییرات دمای آب در طول جمع‌کننده، ساعت ۱۲ ظهر، شدت جریان ورودی ml/min ۵۰۰، زاویه شیب ۳۳ درجه، دمای متوسط آب ورودی ۴۴ C، دمای متوسط هوای محیط ۳۱ C، شدت جریان متوسط باد ۲m/s..... ۸۰

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۱۶ تغییرات دمای آب خروجی از جمع‌کننده بر حسب زمان در زاویه شیب ۳۳ درجه، دمای متوسط آب ورودی ۴۲/۳ C، دمای متوسط هوای محیط ۳۰/۸ C، شدت جریان متوسط باد ۲ m/s..... ۸۰
شکل ۵-۱۷تغییرات دمای آب خروجی از جمع‌کننده در شدت جریان ۱۳۰۰ ml/min ، طول هر لوله: ۳m، فصل تابستان، متوسط دمای آب ورودی به جمع‌کننده: ۴۲/۳، متوسط دمای هوای محیط: ۳۰/۸ C، سرعت متوسط باد: ۲ m/s..... ۸۲
شکل ۵-۱۸ مقایسه تغییرات دمای آب خروجی از جمع‌کننده در دو فصل مختلف از سال در شدت جریان ۵۰۰ ml/min..... ۸۳
شکل ۵-۱۹ مقایسه تغییرات دمای آب ورودی: خروجی از جمع‌کننده در دو طول لوله متفاوت، شدت جریان آب ورودی: ۵۰۰ ml/min، دمای متوسط آب ورودی: ۵ C، دمای متوسط هوای محیط: ۱۵ C، سرعت متوسط باد: ۲ m/s..... ۸۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱- تقسیم‌بندی آبگرمکن‌های خورشیدی (Kalogirou, 2009)..... ۱۹
جدول ۲-۱ مروری بر مطالعات پیشین..... ۳۱
جدول ۳-۱ مشخصات دستگاه‌های اندازه‌گیری..... ۴۵
جدول ۳-۲ شرایط عمومی انجام آزمایش‌ها..... ۴۶
جدول ۴-۱ ضریب شکل هر لوله نسبت به شیشه ($F_{tg}(i)$)..... ۵۰
جدول ۴-۲ محاسبه مقادیر DN..... ۶۳
جدول ۵-۱ مقادیر بازده روزانه (٪)..... ۷۴
جدول ۵-۲ مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی برای دمای آب خروجی بر حسب شدت جریان آب ورودی..... ۷۵
جدول ۵-۳ مقایسه نتایج حاصل از مدل با نتایج آزمایشگاهی برای دمای آب خروجی از جمع‌کننده در طول یک روز(در شرایط ذکر شده در زیرنویس شکل (۵-۱۱))..... ۷۷
جدول ۵-۴ نتایج حاصل از مدل ریاضی جهت پیش‌بینی تعداد جمع‌کننده مورد نیاز برای یک خانواده ۶ نفره ۸۴

فهرست نمادها:

الف- جدول نشانه‌ها

کمیت	نماد	واحد SI
شدت تابش خارج از جو زمین	G_{on}	W/m^2
شدت تابش متوسط وارد بر سطح	G_{avg}	W/m^2
شدت تابش کلی وارد بر سطح افقی	G	W/m^2
شدت تابش کلی وارد بر سطح شیبدار	G_{tot}	W/m^2
عرض جغرافیایی	φ	درجه
زاویه میل	δ	درجه
زاویه ساعتی	h	درجه
زاویه اوج	α_s	درجه
زاویه زنیث	θ_z	درجه
زاویه آزیموث خورشیدی	γ_s	درجه
زاویه آزیموث سطح	γ	درجه
زاویه برخورد	θ	درجه
زاویه شیب	β	درجه
ضریب جذب	α	بدون بعد
ضریب گسیل	ε	بدون بعد

کمیت	نماد	واحد SI
ضریب عبور	τ	بدون بعد
ضریب شکل	F	بدون بعد
ضریب شکل لوله یا جمع‌کننده i ام	f(i)	بدون بعد
توان تابشی جسم سیاه	E_b	W/m^2
رادیوسیتی	J	W/m^2
رادیوسیتی شیشه در مجاورت محیط بیرون	J_g	W/m^2
رادیوسیتی شیشه در مجاورت هوای محبوس درون محفظه	J_g'	W/m^2
سطح مقطع	A	m^2
سطح جانبی لوله	A_t	m^2
ضریب انتقال حرارت تابشی	h_{rad}	$W/m^2.K$
ضریب انتقال حرارت جابجایی	h_{conv}	$W/m^2.K$
ضریب انتقال حرارت هدایتی	K	W/m.°C
انرژی حرارتی	Q	J
طول	Z	M
دما	T	K
زمان	t	S

کمیت	نماد	واحد SI
ظرفیت گرمایی ویژه جرمی	C_p	J/kg.K
شدت جریان جرمی	$\dot{m}$	kg/s
آنتالپی ورودی	h_{in}	kJ/kg
آنتالپی خروجی	h_{out}	kJ/kg
سرعت جریان	V	m/s
ارتفاع	H	m
نرخ انتقال گرما بین حجم کنترل و محیط	$\dot{Q}$	W
نرخ خالص انتقال انرژی مربوط به کار	$\dot{W}$	W
شعاع	R	m
بازده	η	بدون بعد
انرژی تجمعی	Q_{acc}	J
شمارنده	i	بدون بعد
لزجت دینامیکی	ν	m/s^2
عدد پرانتل	Pr	بدون بعد
عدد رایلی	Ra	بدون بعد
بعد مشخصه صفحه	L	m

ب- جدول زیروندها

عنوان	نماد
شیشه	g
لوله	t
جمع کننده	c
محیط اطراف	a
جریان	F
خورشیدی	sol
مرجع	ref
خروجی	out
ورودی	in
مربوط به انتقال حرارت تشعشعی	rad
مربوط به انتقال حرارت جابجایی	conv
متوسط	avg