دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی گرایش پیشرفته

طراحی، ساخت، مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی ریاضی یک دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی

استادان راهنما:

دکتر تورج توکلی قینانی

دکتر امیر رحیمی

پژوهشگر:

فرهاد نعمت‌اللهی

فروردین ماه ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکـــارات و نـــوآوری‌هـــای ناشـــی از تحقیـــق موضوع این پایان نامـــه متعلـــق بـــه دانشـــگاه اصفهان است.

دانشگاه اصفهان

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی گرایش پیشرفته

آقای فرهاد نعمت‌اللهی تحت عنوان

طراحی، ساخت، مطالعه آزمایشگاهی و مدل‌سازی ریاضی یک دستگاه آب شیرین‌کن خورشیدی

در تاریخ ..... توسط هیئت داوران زیر بررسی و با درجه ..... به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر تورج توکلی قینانی با مرتبه‌ی علمی دانشِار امضا

۲- استاد راهنمای پایان نامه دکتر امیر رحیمی با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا

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

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر سید محمد قریشی با مرتبه‌ی علمی استاد امضا

امضای مدیر گروه

سپاسگزاری

که یکی هست و هیچ نیست جز او وحده لااله الاهو

بر خود لازم می‌دانم که از پدر و مادر عزیزم، آنان که وجودشان همه برایم مهر و وجودم همه برایشان رنج بوده است و همچنین همسر، برادر و خواهر گرامی‌ام که در این راه مرا یاری نمودند سپاسگزاری نمایم.

از اساتید محترم، جناب آقای دکتر تورج توکلی و جنای آقای دکتر امیر رحیمی که در مدت انجام پروژه برایم اساتیدی بزرگوار و دوستانی گرامی بودند نیز کمال تشکر را دارم.

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

چکیده

در این تحقیق یک آب شیرین‌کن خورشیدی که بر مبنای فرآیندهای رطوبت‌زنی و رطوبت‌گیری کار می‌کند، طراحی و ساخته شده است و عملکرد آن در دو حالت برج آکنده رطوبت‌زنی و برج پاششی رطوبت‌زنی بصورت تجربی مطالعه می‌شود. با انجام آزمایش‌های اولیه مقادیر بهینه بعضی متغیرهای عملیاتی جهت حصول بالاترین راندمان تولید آب شیرین در برج آکنده بدست آمده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقادیر بهینه مربوط به دبی هوا و آب به ترتیب ۰/۰۳۶ و ۰/۱۱۴ کیلوگرم بر ثانیه می‌باشند. با این دبی‌های بهینه یک تست روزانه در روز ۲۳ شهریور ۹۰ برای برج آکنده انجام شده است. آزمایش‌های مربوط به برج پاششی در فصل پاییز انجام شده است. به منظور شبیه سازی شرایط فصل تابستان از یک گرم‌کن جهت گرم کردن هوای ورودی تا حدی که در فصل تابستان می‌توان به آن رسید استفاده شده است. همچنین آزمایش‌های مربوط به برج پاششی در دو دمای متوسط هوای ورودی برابر ۵۵ و ۶۵ درجه سانتیگراد، سه دبی آب ورودی برابر ۰/۱۲۵، ۰/۱۶۷ و ۰/۲۵ کیلوگرم بر ثانیه، سه صفحه با قطر سوراخ‌های ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر و دبی ثابت هوا برابر ۰/۰۳۶ کیلوگرم بر ثانیه انجام شده است. به دلیل اینکه آزمایش‌های مربوط به برج آکنده در فصل تابستان (شهریور ماه) و آزمایش‌های مربوط به برج پاششی در فصل پاییز (آبان ماه) انجام شده است، برای حالتی که دمای هوای ورودی به برج رطوبت‌زنی در دو برج تقریباً یکسان و تولید آب شیرین حداکثر است، بازدهی کندانسور محاسبه شده است. بازدهی کندانسور در فصل تابستان و پاییز به ترتیب برابر ٪۱۶ و ٪۵۸ می‌باشد. به منظور ارزیابی عملکرد گرم‌کن خورشیدی و برج رطوبت‌زنی، بازده حرارتی آن‌ها محاسبه شده است. همچنین یک آنالیز اکسرژی بر روی برج رطوبت‌زنی جهت تعیین میزان اتلافات اکسرژی برج انجام شده است. به منظور بررسی عوامل اثر گذار بر تولید آب شیرین، یک مدل ریاضی برای آب شیرین‌کن استخراج شده است. دقت و صحت این مدل با مقایسه نتایج مدل با نتایج آزمایشگاهی با حداقل خطا به مقدار٪۱/۶۵ و حداکثر خطا به مقدار ٪۱۴/۶، تأیید شده است. از مدل ریاضی جهت بررسی عواملی نظیر دبی جرمی هوای ورودی، سطح گرم‌کن خورشیدی و شدت تابش خورشیدی در برج آکنده و همچنین دبی جرمی آب ورودی، قطر قطرات ورودی و دمای هوای ورودی در برج پاششی در میزان تولید آب شیرین استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی ریاضی سیستم نشان می‌دهد که با افزایش دمای هوای ورودی و دبی بهینه هوا بازدهی آب شیرین‌کن افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: آب شیرین‌کن خورشیدی، فرآیند رطوبت‌زنی، فرآیند رطوبت‌گیری، آنالیز اکسرژی، بازده حرارتی، مدل‌سازی ریاضی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- مقدمه‌ای بر روش‌های شیرین سازی آب

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ نمک زدایی ۲

۱-۳ انواع روش‌های شیرین سازی آب ۲

۱-۳-۱ فرآیندهای غشایی ۳

۱-۳-۱-۱ اسمز معکوس ۴

۱-۳-۱-۲ الکترودیالیز ۴

۱-۳-۲ روش‌های حرارتی ۵

۱-۳-۲-۱ تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای ۵

۱-۳-۲-۲ تقطیر چند مرحله‌ای ۶

۱-۳-۲-۳ تراکم بخار ۷

۱-۳-۲-۴ انجماد (سرد کردن) ۸

۱-۳-۲-۵ رطوبت‌زنی- رطوبت‌گیری ۸

۱-۳-۲-۶ تبخیر خورشیدی ۹

فصل دوم- انواع آب شیرین‌کن‌های خوشیدی

۲-۱ مقدمه ۱۱

۲-۲ جایگاه و قابلیت ایران در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی ۱۲

۲-۳ سیستم آب شیرین‌کن خورشیدی و انواع آن ۱۲

۲-۳-۱ تقطیر حوضچه‌ای ۱۳

۲-۳-۲ دستگاه‌های تقطیر خورشیدی چند حوضچه‌ای ۱۵

عنوان **صفحه**

۲-۳-۳ دستگاه‌های تقطیر خورشیدی مایل ۱۷

۲-۳-۴ آب شیرین‌کن خورشیدی با فیلم آب سرد در سرتاسر پوشش شیشه‌ای ۱۹

۲-۳-۵ دستگاه‌های تقطیر خورشیدی عمودی ۲۰

۲-۳-۶ آب شیرین‌کن نفوذی چند اثره ۲۰

۲-۳-۷ آب شیرین‌کن‌های خورشیدی فعال ۲۲

۲-۴ اصول انتقال حرارت و انتقال جرم در آب شیرین‌کن‌های خورشیدی ۲۳

۲-۵ مروری بر کارهای انجام شده ۲۴

فصل سوم- طراحی، ساخت و مطالعه آزمایشگاهی یک آب شیرین‌کن خورشیدی

۳-۱ مقدمه ۳۴

۳-۲ طراحی و ساخت آب شیرین‌کن خورشیدی ۳۴

۳-۲-۱ لیست تجهیزات و وسایل مورد نیاز در ساخت آب شیرین‌کن خورشیدی ۳۶

۳-۳ طرز کار دستگاه ۳۸

۳-۴ مطالعات آزمایشگاهی ۳۹

۳-۴-۱ مواد و روش‌ها ۳۹

۳-۴-۲ انجام آزمایش با برج آکنده رطوبت‌زنی ۴۰

۳-۴-۳ انجام آزمایش با برج پاششی رطوبت‌زنی ۴۴

فصل چهارم- مدلسازی ریاضی

۴-۱ مقدمه ۴۸

۴-۲ مدل ریاضی ۴۸

۴-۲-۱ مدل ریاضی گرم‌کن خورشیدی ۴۹

۴-۲-۱-۱ معادله موازنه انرژی برای جریان هوا ۵۰

عنوان **صفحه**

۴-۲-۱-۲ معادله موازنه انرژی برای پوشش شیشه‌ای ۵۱

۴-۲-۱-۳ معادله موازنه انرژی برای صفحه جاذب ۵۲

۴-۲-۱-۴ پارامترهای مورد نیاز در حل مدل گرم‌کن خورشیدی..... ۵۳

۴-۲-۲ مدل ریاضی برج آکنده رطوبت‌زنی..... ۵۵

۴-۲-۲-۱ معادله موازنه جرم جزء بخار آب در فاز گاز ۵۶

۴-۲-۲-۲ معادله موازنه انرژی برای فاز مایع..... ۵۷

۴-۲-۲-۳ معادله موازنه انرژی برای فاز گاز..... ۵۸

۴-۲-۲-۴ پارامترهای مورد نیاز در حل مدل برج آکنده رطوبت‌زنی..... ۵۹

۴-۲-۳ مدل ریاضی برج پاششی رطوبت‌زنی..... ۵۹

۴-۲-۳-۱ معادله موازنه جرم جزء بخار آب در فاز گاز ۶۱

۴-۲-۳-۲ معادله موازنه جرم برای قطره..... ۶۲

۴-۲-۳-۳ معادله موازنه انرژی برای قطره..... ۶۳

۴-۲-۳-۴ معادله موازنه مومنتم برای قطره..... ۶۳

۴-۲-۳-۵ معادله موازنه انرژی برای فاز گاز..... ۶۴

۴-۲-۳-۶ پارامترهای مورد نیاز در حل مدل برج پاششی رطوبت‌زنی ۶۵

۴-۲-۴ حل مدل..... ۶۶

۴-۳ آنالیز اکسرژی..... ۶۷

فصل پنجم- نتایج و بحث

۵-۱ مقدمه..... ۷۰

۵-۲ بررسی دقت مدل ریاضی..... ۷۰

۵-۲-۱ بررسی دقت مدل گرم‌کن خورشیدی..... ۷۱

۵-۲-۲ بررسی دقت مدل برج آکنده رطوبت‌زنی..... ۷۲

عنوان **صفحه**

۵-۲-۳ بررسی دقت مدل برج پاششی رطوبت‌زنی ۷۴

۵-۳ بررسی کارایی کندانسور ۷۷

۵-۴ بازده حرارتی ۷۸

۵-۴-۱ بازده حرارتی گرم‌کن خورشیدی ۷۸

۵-۴-۲ بازده حرارتی برج آکنده ۷۹

۵-۴-۳ بازده حرارتی برج پاششی ۸۰

۵-۵ آنالیز اکسرژی ۸۱

۵-۶ بررسی عملکرد دمایی گرم‌کن خورشیدی در شرایط معین ۸۴

۵-۷ بررسی تأثیر دبی جرمی هوا بر عملکرد دستگاه ۸۶

۵-۸ بررسی تأثیر سطح گرم‌کن خورشیدی بر عملکرد دستگاه ۹۰

۵-۹ پیش‌بینی عملکرد دستگاه در فصل زمستان ۹۳

۵-۹-۱ بهبود عملکرد دستگاه در فصل زمستان ۹۵

۵-۱۰ بررسی نمودارهای برج پاششی رطوبت‌زنی ۹۸

۵-۱۰-۱ بررسی اثر قطرهای مختلف روی تغییرات دمای هوا در طول برج ۹۸

۵-۱۰-۲ بررسی اثر قطرهای مختلف روی تغییرات رطوبت هوا در طول برج ۱۰۰

۵-۱۰-۳ بررسی اثر قطرهای مختلف روی تغییرات دمای قطره در طول برج ۱۰۲

۵-۱۰-۴ بررسی اثر قطرهای مختلف روی تغییرات سرعت قطره در طول برج ۱۰۳

۵-۱۰-۵ بررسی اثر دبی‌های مختلف آب روی تغییرات قطر قطره در طول برج ۱۰۵

۵-۱۰-۶ بررسی اثر دما روی پارامترهای مختلف ۱۰۷

فصل ششم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۱۰

عنوان **صفحه**

۶-۲ پیشنهادات ۱۱۱

منابع و مآخذ ۱۱۲

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: شماتیکی از روش اسمز معکوس(کردوانی, ۱۳۸۷)..... ۴
شکل ۱-۲: شماتیکی از روش الکترودیالیز(کردوانی, ۱۳۸۷)..... ۵
شکل ۱-۳: شماتیکی از روش تبخیر ناگهانی چند مرحله‌ای(Soteris & Kalogirou, 2009)..... ۶
شکل ۱-۴: شماتیکی از روش تراکم بخار(Soteris & Kalogirou, 2009)..... ۸
شکل ۱-۵: شماتیکی از روش رطوبت‌زنی- رطوبت‌گیری(Bourouni et al., 2001)..... ۹
شکل ۲-۱: سیستم طبیعت برای تولید باران(Narayan et al., 2010)..... ۱۳
شکل ۲-۲: آب شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای یک شیبه (Arjunan, 2009)..... ۱۴
شکل ۲-۳: آب شیرین‌کن خورشیدی حوضچه‌ای دو شیبه(A.Eltawil et al., 2009)..... ۱۵
شکل ۲-۴: شماتیکی از دستگاه تقطیر خورشیدی دو حوضچه‌ای (کردوانی, ۱۳۸۷)..... ۱۶
شکل ۲-۵: آب شیرین‌کن چند حوضچه‌ای مایل (Kalogirou S. A., 2005)..... ۱۸
شکل ۲-۶: آب شیرین‌کن کف پله‌ای (FarshchiTabrizi et al., 2010)..... ۱۸
شکل ۲-۷: آب شیرین‌کن با فیلم آب سرد (Bassam & Mousa, 1997)..... ۱۹
شکل ۲-۸: دستگاه تقطیر خورشیدی عمودی (کردوانی, ۱۳۸۷)..... ۲۰
شکل ۲-۹: آب شیرین‌کن نفوذی چند اثره (Kaushal & Varun, 2010)..... ۲۱
شکل ۲-۱۰: دستگاه تقطیر خورشیدی فعال (کردوانی, ۱۳۸۷)..... ۲۳
شکل ۳-۱: شماتیکی از آب شیرین‌کن خورشیدی..... ۳۵
شکل ۳-۲: نمایی از گرم‌کن خورشیدی..... ۳۷
شکل ۳-۳:نمایی از آب شیرین‌کن ساخته شده..... ۳۷
شکل ۳-۴: شماتیکی از فرآیند انجام شده در دستگاه..... ۳۸
شکل ۳-۵: دماسنج(P 300W Temp)..... ۴۰
شکل ۳-۶: سرعت سنج (Testo 425)..... ۴۰
شکل ۳-۷: رطوبت سنج (Kat. Nr. 30.5013)..... ۴۰
شکل ۳-۸: نمونه‌ای از پکینگ مورد استفاده درون برج آکنده..... ۴۱
شکل ۳-۹: نمودار تغییرات آب شیرین تولیدی بر حسب دبی هوای ورودی..... ۴۲

عنوان **صفحه**

شکل ۳-۱۰: نمودار تولید آب شیرین بر حسب زمان ۴۴
شکل ۳-۱۱: دوش مورد استفاده در برج پاششی ۴۵
شکل ۳-۱۲: تولید آب شیرین بر حسب دبی آب ورودی ۴۶
شکل ۳-۱۳: تولید آب شیرین بر حسب دبی آب ورودی ۴۷
شکل ۴-۱: شماتیکی از المان گرم‌کن خورشیدی ۴۹
شکل ۴-۲: شماتیکی از المان برج آکنده رطوبت‌زنی ۵۵
شکل ۴-۳: شماتیکی از برج پاششی و المان مربوطه ۶۰
شکل ۵-۱: تغییرات دمای هوای خروجی از گرم‌کن بر حسب دبی هوای ورودی ۷۱
شکل ۵-۲: تغییرات دمای هوای خروجی از گرم‌کن بر حسب زمان ۷۲
شکل ۵-۳: تغییرات دمای هوای خروجی از برج آکنده بر حسب زمان ۷۲
شکل ۵-۴: تغییرات دمای آب خروجی از برج آکنده بر حسب زمان ۷۳
شکل ۵-۵: تغییرات رطوبت هوای خروجی از برج آکنده بر حسب زمان ۷۳
شکل ۵-۶: تغییرات دمای هوای خروجی از برج پاششی بر حسب دبی آب ورودی ۷۴
شکل ۵-۷: تغییرات دمای آب خروجی از برج پاششی بر حسب دبی آب ورودی ۷۴
شکل ۵-۸: تغییرات رطوبت هوای خروجی از برج پاششی بر حسب دبی آب ورودی ۷۵
شکل ۵-۹: تغییرات دمای هوای خروجی از برج پاششی بر حسب قطر قطرات ورودی ۷۵
شکل ۵-۱۰: تغییرات دمای آب خروجی از برج پاششی بر حسب قطر قطرات ورودی ۷۶
شکل ۵-۱۱: تغییرات رطوبت هوای خروجی از برج پاششی بر حسب قطر قطرات ورودی ۷۶
شکل ۵-۱۲: تغییرات بازده حرارتی گرم‌کن خورشیدی بر حسب زمان ۷۹
شکل ۵-۱۳: تغییرات بازده حرارتی برج آکنده بر حسب زمان ۸۰
شکل ۵-۱۴: تغییرات بازده حرارتی برج پاششی بر حسب دبی آب ورودی ۸۰
شکل ۵-۱۵: تغییرات بازده حرارتی برج پاششی بر حسب قطر قطرات ورودی ۸۱
شکل ۵-۱۶: تغییرات اختلاف اکسرژی هوای ورودی و خروجی برج آکنده بر حسب زمان ۸۱
شکل ۵-۱۷: تغییرات اختلاف اکسرژی آب ورودی و خروجی برج آکنده بر حسب زمان ۸۲
شکل ۵-۱۸: تغییرات اتلاف اکسرژی برج آکنده بر حسب زمان ۸۲

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۱۹: تغییرات اتلاف اکسرژی برج پاششی بر حسب دبی آب ورودی ۸۳
شکل ۵-۲۰: تغییرات اتلاف اکسرژی برج پاششی بر حسب فطر قطرات ورودی..... ۸۴
شکل ۵-۲۱: تغییرات دمای پوشش شیشه‌ای بر حسب طول گرم‌کن ۸۵
شکل ۵-۲۲: تغییرات دمای صفحه جاذب بر حسب طول گرم‌کن ۸۵
شکل ۵-۲۳: تغییرات دمای هوا بر حسب طول گرم‌کن ۸۶
شکل ۵-۲۴: تغییرات دمای هوای خروجی از گرم کن خورشیدی بر حسب زمان برای سه دبی جرمی مختلف هوا..... ۸۷
شکل ۵-۲۵: تغییرات دمای هوا بر حسب طول برج رطوبت‌زنی آکنده برای سه دبی جرمی مختلف هوا..... ۸۷
شکل ۵-۲۶: تغییرات رطوبت هوا بر حسب طول برج رطوبت‌زنی آکنده برای سه دبی جرمی مختلف هوا.. ۸۸
شکل ۵-۲۷: تغییرات دمای آب بر حسب طول برج رطوبت‌زنی آکنده برای سه دبی جرمی مختلف هوا ۸۸
شکل ۵-۲۸: تغییرات دمای هوای خروجی از گرم‌کن بر حسب زمان برای سه سطح مختلف از گرم‌کن..... ۹۰
شکل ۵-۲۹: تغییرات دمای هوا بر حسب طول برج رطوبت‌زنی آکنده برای سه سطح مختلف از گرم‌کن... ۹۱
شکل ۵-۳۰: تغییرات رطوبت هوا بر حسب طول برج رطوبت‌زنی آکنده برای سه سطح مختلف از گرم‌کن ۹۲
شکل ۵-۳۱: تغییرات دمای آب بر حسب طول برج رطوبت‌زنی آکنده برای سه سطح مختلف از گرم‌کن... ۹۲
شکل ۵-۳۲: تغییرات دمای هوای خروجی از گرم‌کن بر حسب زمان برای دو فصل مختلف از سال ۹۴
شکل ۵-۳۳: تغییرات دمای هوای خروجی از برج آکنده بر حسب زمان برای دو فصل مختلف از سال..... ۹۴
شکل ۵-۳۴: تغییرات رطوبت هوای خروجی از برج آکنده بر حسب زمان برای دو فصل مختلف از سال.... ۹۵
شکل ۵-۳۵: تغییرات دمای آب خروجی از برج آکنده بر حسب زمان برای دو فصل مختلف از سال..... ۹۵
شکل ۵-۳۶: تغییرات دمای هوای خروجی از گرم‌کن بر حسب زمان برای سه سطح مختلف از گرم‌کن در فصل زمستان ۹۶
شکل ۵-۳۷: تغییرات دمای هوا بر حسب طول برج آکنده برای سه سطح مختلف از گرم کن در فصل زمستان ۹۷
شکل ۵-۳۸: تغییرات رطوبت هوا بر حسب طول برج آکنده برای سه سطح مختلف از گرم‌کن در فصل زمستان ۹۷
شکل ۵-۳۹: تغییرات دمای آب بر حسب طول برج آکنده برای سه سطح مختلف از گرم کن در فصل زمستان ۹۸

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۴۰: شکل‌های الف، ب و ج تغییرات دمای هوا در طول برج رطوبت‌زنی برای سه دبی مختلف آب ۹۹
شکل ۵-۴۱: شکل‌های الف، ب و ج تغییرات رطوبت هوا بر حسب طول برج برای سه دبی مختلف آب....۱۰۱
شکل ۵-۴۲: شکل‌های الف، ب و ج تغییرات دمای قطره بر حسب طول برج برای سه دبی مختلف آب ...۱۰۳
شکل ۵-۴۳: شکل‌های الف، ب و ج تغییرات سرعت قطره بر حسب طول برج برای سه دبی مختلف آب.۱۰۴
شکل ۵-۴۴: شکل های الف، ب و ج تغییرات قطر قطره بر حسب طول برج برای سه قطر قطره ورودی مختلف ۱۰۶
شکل ۵-۴۵: تغییرات دمای هوا در طول برج رطوبت‌زنی.....۱۰۷
شکل ۵-۴۶: تغییرات رطوبت هوا در طول برج رطوبت‌زنی.....۱۰۸
شکل ۵-۴۷: تغییرات دمای قطره در طول برج رطوبت‌زنی ۱۰۸
شکل ۵-۴۸: تغییرات قطر قطره در طول برج رطوبت‌زنی.....۱۰۹
شکل ۵-۴۹: تغییرات سرعت قطره در طول برج رطوبت‌زنی ۱۰۹

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: مرسوم‌ترین روش‌های شیرین‌سازی آب (Soteris & Kalogirou, 2009) ۳
جدول ۲-۱: کارهای انجام شده در زمینه آزمایشگاهی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی ۲۵
جدول ۲-۲: کارهای انجام شده در زمینه مدلسازی ریاضی آب شیرین‌کن‌های خورشیدی ۳۰
جدول ۳-۱: نتایج آزمایش‌های انجام شده با برج آکنده جهت تعیین شرایط بهینه ۴۱
جدول ۳-۲: نتایج آزمایش‌های انجام شده جهت تصدیق دبی بهینه هوا ۴۲
جدول ۳-۳: نتایج آزمایش روزانه انجام شده با برج آکنده ۴۳
جدول ۳-۴: نتایج آزمایش های مربوط به برج پاششی برای دمای هوای ورودی به برج برابر ۵۵ درجه سانتیگراد ۴۵
جدول ۳-۵: نتایج آزمایش های مربوط به برج پاششی برای دمای هوای ورودی به برج برابر ۶۵ درجه سانتیگراد ۴۶
جدول ۴-۱: پارامترهای مورد نیاز در حل مدل گرم‌کن خورشیدی ۵۳
جدول ۴-۲: مقادیر ثابت‌های به کار برده شده در مدل ریاضی گرم‌کن خورشیدی ۵۴
جدول ۴-۳: پارامترهای مورد نیاز در حل مدل برج آکنده رطوبت‌زنی ۵۹
جدول ۴-۴: مقادیر ثابت‌های به کار برده شده در مدل ریاضی برج آکنده رطوبت‌زنی ۵۹
جدول ۴-۵: پارامترهای مورد نیاز در حل مدل برج پاششی رطوبت‌زنی ۶۵
جدول ۴-۶: مقادیر ثابت‌های به کار برده شده در مدل ریاضی برج پاششی رطوبت‌زنی ۶۶

عنوان	واحد	نماد
سطح به ازای واحد حجم بستر	m^2/m^3	a
سطح مقطع	m^2	A
گرمای ویژه	$j/kg.K$	C_p
ضریب دراگ	بی بعد	C_D
فاصله‌ی بین شیشه و صفحه جاذب	m	D
قطر قطره	m	D_{d}
قطر هیدرولیکی	m	D_h
شتاب گرانش زمین	m^2/s	G
فلاکس جرمی هوا	$kg/m^2.s$	$G^{'}$
فلاکس مولی هوا	$mol/m^2.\mathrm{s}$	G
ضریب انتقال حرارت داخل بر ج آکنده	$\mathrm{mol}/m^2.\mathrm{s}$	h_y
ضریب انتقال حرارت جابجایی	$W/m^2.K$	h
آنتالپی	$j/kg\ dry\ mass$	H
شدت تابش خورشیدی	W/m^2	$\mathrm{I_t}$
دبی حجمی آب	m^3/s	L
ضریب انتقال جرم داخل برج آکنده		k_y
ضریب انتقال حرارت هدایتی	$W/m\,.K$	K
جرم	kg	m

$\dot{m}$	kg/s	**دبی جرمی هوا**
M	kg/mol	**جرم مولکولی**
Nu	بی بعد	**عدد ناسلت**
N	$mol/m^2.s$	**فلاکس مولی انتقال جرم**
Nu	بی بعد	**عدد ناسلت**
P	kg/hr	**آب شیرین تولیدی**
Pr	بی بعد	**عدد پرانتل**
Re	بی بعد	**عدد رینولدز**
R	$j/mol.K$	**ثابت جهانی گازها**
Sc	بی بعد	**عدد اشمیت**
Sh	بی بعد	**عدد شروود**
t	s	**زمان**
T	K	**دما**
T_0	K	**دمای مرجع**
U	m/s	**سرعت**
W	m	**عرض گرم‌کن**
X	w	**اکسرژی**
$y^{'}$	$kg\ water/kg\ dry\ air$	**رطوبت مطلق هوا**
z	m	**عمق بستر محصول**

زیر نویس‌ها

عنوان	نماد
محیط	$\mathrm{A}m$
هوا	A
گرم‌کن	C
نماد انتقال حرارت جابجایی	c
قطره	d
مؤثر	eff
پوشش شیشه‌ای	g
شمارنده	i
ورودی	$\mathrm{I}n$
مقدار اندازه‌گیری شده	m
خروجی	out
حالت مرجع	o
صفحه جاذب	p
نماد oانتقال حرارت تشعشعی	r
آسمان	$s\mathrm{ky}$
محاسبه شده در شرایط اشباع	sat
برج آکنده	t
کل	tot
بخار آب	v
آب	w