





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

مدل سازی عملکرد محفظه خشک کن خورشیدی با کمک مواد تغییر فاز دهنده

نگارنده: نیما حق بیان

استاد راهنما:

دکتر علی سر رشته داری

شهریور ۱۴۰۰

شماره: ۲۰/۲۴-۱۹۱

تاریخ: ۱۴۰۸/۸/۱۸

شماره:

تاریخ:

ویرایش:

باسمه تعالی

فرمهای ارزشیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
مربوط به ورودی‌های ۹۴ به بعد



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای نیما حق‌بیان با شماره دانشجویی ۹۷۰۶۰۷۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی تحت عنوان مدل‌سازی عملکرد محفظه خشک‌کن خورشیدی با کمک مواد تغییر فاز دهنده که در تاریخ ۱۴۰۰/۰۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار شد به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

☐ الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸-۱۸/۹۹
☒ ج) درجه خوب: نمره ۱۶-۱۷/۹۹	☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۴-۱۵/۹۹
☐ ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد	
☒ نوع تحقیق: نظری	☐ عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علی سررشته‌داری	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	-----	-----	-----
۳- استاد مشاور	-----	-----	-----
۴- استاد داور اول	دکتر محمد ضامن	استادیار	
۵- استاد داور دوم	دکتر محسن نظری	دانشیار	
۶- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی خالقی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر مهدی گردویی

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



۱۴۰۸/۸/۱۸

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم که هر لحظه وجودم را از چشمه‌سار پر از عشق چشمانشان، سیراب می‌کنند.
آن دو عزیزی که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی، همواره یاورانی دلسوز، فداکار و پشتیبان‌هایی
محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

و تقدیم به

همسر عزیزتر از جانم که مهربانی‌اش، سایه‌سار زندگیم می‌باشد. او که اسوه صبر و تحمل بوده و
مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود. وجودش شادی‌بخش و صفایش، مایه آرامش من است.

تقدیر و تشکر

انجام این پروژه را مدیون زحمات استاد محترم، جناب آقای دکتر سررشته‌داری هستم. چرا که بدون راهنمایی‌های ایشان، تأمین این پایان‌نامه بسیار مشکل می‌بود. لذا، از زحمات ایشان تشکر می‌نمایم و طول عمر باعزت را برایشان از درگاه هستی، آرزو می‌نمایم.

معلما مقامت ز عشق برتر باد همیشه توسن اندیشه‌ات مظفر باد

و در پایان، از تمام کسانی که (دوستان و آشنایان) در انجام این پروژه، موجب دلگرمی بنده بوده‌اند؛ تشکر می‌نمایم.

تعمدنامه

اینجانب نیما حق‌بیان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه مدل‌سازی عملکرد محفظه خشک‌کن خورشیدی با کمک مواد تغییر فاز دهنده تحت راهنمایی جناب آقای دکتر علی سررشته‌داری متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به افزایش مصرف جهانی انرژی در بخش‌های مختلف، به خصوص در خشک‌کن‌ها، جهت خشک کردن محصولات کشاورزی، همچنین محدود بودن منابع انرژی‌های تجدیدناپذیر، استفاده از انرژی خورشیدی به دلیل ارزان بودن، دارای اهمیت می‌باشد. اما، ماهیت متناوب خورشید در شبانه روز و عدم موجود بودن آن در شب، باعث عدم ثابت ماندن و کاهش دمای خشک‌کن و در نتیجه، کاهش کیفیت محصول می‌شود. ذخیره‌سازی حرارتی گرمای نهان به کمک مواد تغییر فاز دهنده در طول روز و آزادسازی حرارت، در ساعاتی که خورشید در دسترس نمی‌باشد؛ باعث ثبات دمای خشک‌کن در شب و حفظ کیفیت محصولات می‌شود.

در این پژوهش، به شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی به کمک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، جهت: محاسبه انرژی ذخیره شده در بخش ذخیره‌سازی و بررسی توزیع حرارتی و انرژی وارد شده به خشک‌کن خورشیدی، به کمک نرم‌افزار فلوئنت پرداخته شد. با بررسی تحقیقات گذشته، معادلات مربوط به هر دو بخش استخراج شد. جهت شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی، از مخزن استوانه‌ای به همراه کویل مارپیچ، حاوی پارافین استفاده شد. آب با دمای وابسته به داده‌های آزمایشگاهی، از کلکتور خورشیدی، برای هر ساعت محلی ۷ صبح تا ۱۹ عصر، وارد مخزن و پس از تبادل حرارتی با پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، از مخزن خارج شد. حداکثر گرمای ذخیره شده در مخزن، مربوط به ساعت ۱۴ عصر بود که مقدار آن، ۰/۴۰۶ مگاژول بود. میانگین دمای پارافین در این ساعت، ۳۵۱ کلوین بود. آب خروجی از مخزن، وارد مبدل حرارتی شده و پس از تبادل با هوا که از محیط وارد می‌شود؛ به کلکتور برمی‌گردد. بررسی مبدل حرارتی، به شکل آزمایشگاهی توسط محققین انجام شد. جهت شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، از اتاق مکعبی با ورودی انبساطی، به همراه سه سینی مستطیلی شکل سوراخ‌دار، استفاده شد. هوای خروجی از مبدل حرارتی، برای هر ساعت محلی ۷ صبح تا ۲۴ شب، وارد خشک‌کن خورشیدی شده و پس از تبادل حرارتی با دیواره‌ها و سینی‌ها، از اتاق خشک‌کن خارج می‌شود. حداکثر انرژی

گرمایی ورودی به خشک‌کن، در ساعت محلی ۱۴ عصر که بیشترین تابش خورشید وجود دارد؛ رخ داد که مقدار آن، ۱/۰۳۹ مگاژول بود. مقادیر انرژی ذخیره شده در مخزن و مقادیر انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن، برای هر ساعت محلی، با پژوهش‌های گذشته اعتبارسنجی شد.

شبیه‌سازی بخش ذخیره‌سازی، به علت: استفاده از مدل ذوب و انجماد و حجم پیچیده محاسبات، باعث صرف زمان زیاد می‌شود و برای انجام آن، نیاز به رایانه‌های قوی می‌باشد. بکارگیری اثرات دمایی بخش ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، به فرم توابع ریاضی برای هر ساعت، جایگزین مناسبی برای شبیه‌سازی این بخش‌ها می‌باشد. مقدار میانگین خطای نسبی، بین شبیه‌سازی خشک‌کن به کمک توابع ریاضی ورودی و شبیه‌سازی به کمک داده‌های ورودی، ۰/۴۱٪ بود. با ارائه توابع ریاضی منحصر به فرد برای هر ماده تغییر فاز دهنده، با توجه به شرایط و هندسه مخزن و مبدل، همچنین بکارگیری آن در خشک‌کن خورشیدی، می‌توان با صرف زمان کم و کاهش حجم محاسبات، عملکرد خشک‌کن را برای هر ماده تغییر فاز دهنده‌ای بررسی و پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: خشک‌کن خورشیدی، کوئل مارپیچ، پارافین، مخزن ذخیره‌سازی استوانه‌ای، جایگزینی توابع ریاضی.

فهرست مطالب

صفحه	عناوین
۱	فصل ۱ خشک کن های خورشیدی.....
۱-۱	مقدمه.....
۲-۱	کاربرد انرژی تجدیدپذیر در بخش کشاورزی.....
۳-۱	کاربرد انرژی خورشیدی در خشک کردن محصولات کشاورزی.....
۱-۳-۱	خشک کردن محصولات در زیر نور مستقیم خورشید.....
۴-۱	خشک کن های خورشیدی و انواع آن.....
۱-۴-۱	خشک کن خورشیدی مستقیم.....
۲-۴-۱	خشک کن خورشیدی غیرمستقیم.....
۳-۴-۱	خشک کن خورشیدی هیبریدی.....
۵-۱	مقایسه انواع خشک کن های خورشیدی با یکدیگر.....
۶-۱	نتیجه گیری.....
۲۵	فصل ۲ ذخیره سازی انرژی در خشک کن های خورشیدی.....
۱-۲	مقدمه.....
۲-۲	ذخیره سازی انرژی خورشیدی.....
۳-۲	کاربرد ذخیره سازی حرارتی در خشک کن خورشیدی.....
۴-۲	مزایا ذخیره سازی گرمای نهان به ذخیره سازی گرمای محسوس.....
۵-۲	مواد تغییر فاز دهنده.....
۱-۵-۲	ذخیره سازی گرمای نهان در مواد تغییر فاز دهنده.....
۶-۲	خواص مواد تغییر فاز دهنده.....

۷-۲ طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده.....	۴۰
۱-۷-۲ مواد تغییر فاز دهنده آلی.....	۴۲
۱-۱-۷-۲ پارافین‌ها.....	۴۲
۲-۱-۷-۲ غیر پارافین‌ها.....	۴۳
۲-۷-۲ مواد تغییر فاز دهنده معدنی.....	۴۳
۱-۲-۷-۲ هیدرات نمک.....	۴۴
۲-۲-۷-۲ فلزات.....	۴۵
۳-۷-۲ یوتکتیک‌ها.....	۴۶
۸-۲ نتیجه‌گیری.....	۴۶
فصل ۳ مدل‌سازی سیستم ذخیره‌سازی و خشک‌کن خورشیدی.....	۴۹
۱-۳ مقدمه.....	۵۰
۲-۳ مدل‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی.....	۵۲
۱-۲-۳ معادلات حاکم بر سیستم ذخیره‌سازی حرارتی.....	۵۲
۲-۲-۳ هندسه حل.....	۵۴
۳-۲-۳ شبکه‌بندی هندسه و تست استقلال حل از شبکه.....	۵۵
۴-۲-۳ خواص مواد بکار رفته.....	۵۹
۵-۲-۳ معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی.....	۶۰
۶-۲-۳ گسسته‌سازی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی.....	۶۲
۷-۲-۳ شرایط حاکم بر شبیه‌سازی عددی.....	۶۴
۸-۲-۳ اعتبارسنجی.....	۶۶
۹-۲-۳ نتایج شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی.....	۶۸
۳-۳ مدل‌سازی خشک‌کن خورشیدی.....	۷۳

۷۴.....	۳-۳-۱ معادلات حاکم بر خشک کن خورشیدی
۷۵.....	۳-۳-۲ هندسه حل
۷۵.....	۳-۳-۳ شبکه بندی هندسه و تست استقلال حل از شبکه
۷۸.....	۳-۳-۴ خواص مواد بکار رفته
۷۸.....	۳-۳-۵ معادلات حاکم بر شبیه سازی عددی
۷۹.....	۳-۳-۶ گسسته سازی معادلات حاکم بر شبیه سازی عددی
۸۰.....	۳-۳-۷ شرایط حاکم بر شبیه سازی عددی
۸۲.....	۳-۳-۸ اعتبارسنجی
۸۵.....	۳-۳-۹ نتایج شبیه سازی خشک کن خورشیدی
۸۸.....	۳-۴ خلاصه و نتیجه گیری
۹۱.....	فصل ۴ جایگزینی توابع ریاضی
۹۲.....	۴-۱ مقدمه
۹۳.....	۴-۲ شبیه سازی خشک کن با جایگزینی توابع ریاضی
۹۵.....	۴-۳ اعتبارسنجی شبیه سازی خشک کن با توابع ریاضی
۹۹.....	۴-۴ شبیه سازی خشک کن خورشیدی با تغییر خواص پارافین
۱۰۳.....	۴-۵ خلاصه و نتیجه گیری
۱۰۵.....	فصل ۵ جمع بندی و پیشنهادات
۱۰۶.....	۵-۱ جمع بندی و نتایج
۱۰۹.....	۵-۲ پیشنهادات
۱۱۰.....	مراجع

فهرست جداول

صفحه	عناوین
جدول (۱-۳)..... ۵۷	نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای سیستم ذخیره‌سازی حرارتی.....
جدول (۲-۳)..... ۵۹	خواص ترمو-فیزیکی پارافین.....
جدول (۳-۳)..... ۶۰	خواص ترمو-فیزیکی مواد بکار رفته در سیستم ذخیره‌سازی حرارتی.....
جدول (۴-۳)..... ۶۷	نتایج شبیه‌سازی عددی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی.....
جدول (۵-۳)..... ۷۷	نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای خشک‌کن خورشیدی.....
جدول (۶-۳)..... ۷۸	خواص ترمو-فیزیکی هوا.....
جدول (۷-۳)..... ۷۸	خواص ترمو-فیزیکی مواد بکار رفته شده در خشک‌کن خورشیدی.....
جدول (۸-۳)..... ۸۴	نتایج شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی.....
جدول (۱-۴)..... ۹۴	توابع ریاضی ورودی به خشک‌کن خورشیدی تحت اثر پارافین A.....
جدول (۲-۴)..... ۹۵	نتایج آنالیز استقلال حل از گام زمانی برای خشک‌کن خورشیدی تحت اثر پارافین A.....
جدول (۳-۴)..... ۹۶	نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی خشک‌کن با داده‌های ورودی و توابع ورودی تحت اثر پارافین A.....
جدول (۴-۴)..... ۱۰۰	توابع ریاضی ورودی به خشک‌کن خورشیدی تحت اثر پارافین B.....

فهرست اشکال

صفحه	عناوین
۲.....	شکل (۱-۱). مصرف انرژی جهانی از سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰.....
۸.....	شکل (۲-۱). خشک کن خورشیدی مستقیم.....
۹.....	شکل (۳-۱). خشک کن خورشیدی مستقیم.....
۱۱.....	شکل (۴-۱). خشک کن خورشیدی مستقیم با سوخت زیست توده.....
۱۲.....	شکل (۵-۱). خشک کن خورشیدی مستقیم جابجایی اجباری با سیال هوا.....
۱۳.....	شکل (۶-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم.....
۱۴.....	شکل (۷-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با کلکتور صفحه تخت.....
۱۵.....	شکل (۸-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با فین های مستطیلی.....
۱۵.....	شکل (۹-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با مدل ریاضی.....
۱۶.....	شکل (۱۰-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با مکانیزم متحرک.....
۱۶.....	شکل (۱۱-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم.....
۱۷.....	شکل (۱۲-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با سیستم جذب.....
۱۷.....	شکل (۱۳-۱). خشک کن خورشیدی جابجایی اجباری با کلکتور حاوی لوله های تخلیه.....
۱۸.....	شکل (۱۴-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم و کلکتور با شیار V شکل.....
۱۹.....	شکل (۱۵-۱). خشک کن خورشیدی هیبریدی.....
۲۰.....	شکل (۱۶-۱). خشک کن خورشیدی هیبریدی جابجایی طبیعی.....
۲۰.....	شکل (۱۷-۱). خشک کن خورشیدی هیبریدی جابجایی اجباری.....
۲۷.....	شکل (۱-۲). انواع مختلف ذخیره سازی حرارتی انرژی خورشیدی.....
۲۸.....	شکل (۲-۲). تغییرات دما و گرما در طی تغییر فاز ماده.....

- شکل (۲-۳). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری با مواد ذخیره سازی گرمای محسوس..... ۳۰
- شکل (۲-۴). نمای شماتیک تأسیسات آزمایشگاهی به همراه اتاق خشک کردن..... ۳۲
- شکل (۲-۵). خشک کن با چند سینی، همراه با هیتر خورشیدی چند مسیره مورب، با ذخیره سازی حرارتی..... ۳۳
- شکل (۲-۶). نمای کلی سیستم خشک کن خورشیدی..... ۳۴
- شکل (۲-۷). شماتیک خشک کن خورشیدی جابجایی طبیعی با ذخیره گرمایی، همراه با جاذب برگشت پذیر..... ۳۵
- شکل (۲-۸). طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده..... ۴۱
- شکل (۳-۱). بخش های مختلف سیستم خشک کردن خورشیدی..... ۵۱
- شکل (۳-۲). هندسه و شبکه بندی کویل مارپیچ و مخزن برای آنالیز استقلال حل از شبکه..... ۵۶
- شکل (۳-۳). نمودار آنالیز استقلال حل از شبکه برای سیستم ذخیره سازی حرارتی..... ۵۷
- شکل (۳-۴). هندسه اصلی کویل مارپیچ و مخزن استوانه ای سیستم ذخیره سازی همراه با شبکه بندی..... ۵۸
- شکل (۳-۵). دمای محیط شهر کرمان در فصل تابستان..... ۶۵
- شکل (۳-۶). نمودار نتایج اعتبارسنجی شبیه سازی سیستم ذخیره سازی حرارتی..... ۶۸
- شکل (۳-۷). پروفیل دمایی نمای برشی از سیستم ذخیره سازی حرارتی در ساعت محلی ۱۴ عصر..... ۶۹
- شکل (۳-۸). پروفیل دمایی در مرزهای مخزن ذخیره سازی حرارتی در ساعت محلی ۱۴ عصر..... ۷۰
- شکل (۳-۹). پروفیل دمایی در مرزهای اطراف ماده تغییر فاز دهنده در ساعت محلی ۱۴ عصر..... ۷۰
- شکل (۳-۱۰). پروفیل سرعت در مخزن ذخیره سازی حرارتی..... ۷۱
- شکل (۳-۱۱). نمودار تغییر فاز پارافین در کویل مارپیچ، نسبت به ساعات محلی مختلف..... ۷۲
- شکل (۳-۱۲). مقایسه دماهای ورودی و خروجی از مبدل حرارتی با فرض وجود پارافین و بدون آن..... ۷۳
- شکل (۳-۱۳). هندسه و شبکه بندی اتاق خشک کن خورشیدی و سینی ها..... ۷۶
- شکل (۳-۱۴). نمودار نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای خشک کن خورشیدی..... ۷۷
- شکل (۳-۱۵). دماهای ورودی به خشک کن خورشیدی در ساعات محلی مختلف..... ۸۲
- شکل (۳-۱۶). نمودار نتایج اعتبارسنجی شبیه سازی خشک کن خورشیدی..... ۸۵

- شکل (۳-۱۷). پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن خورشیدی در ساعت محلی ۱۴ عصر..... ۸۶
- شکل (۳-۱۸). پروفیل دمایی در مقطع برشی از اتاق خشک‌کن خورشیدی در ساعت محلی ۱۴ عصر..... ۸۶
- شکل (۳-۱۹). پروفیل سرعت از مقطع طولی اتاق خشک‌کن خورشیدی..... ۸۷
- شکل (۳-۲۰). پروفیل سرعت از مقطع عرضی اتاق خشک‌کن خورشیدی..... ۸۷
- شکل (۳-۲۱). پروفیل خط جریان در اتاق خشک‌کن خورشیدی در ساعت محلی ۱۴ عصر..... ۸۸
- شکل (۴-۱). نمودار نتایج شبیه‌سازی خشک‌کن با داده‌ها و توابع ورودی تحت اثر پارافین A، بر حسب ساعات محلی..... ۹۷
- شکل (۴-۲). پروفیل دمایی دیواره‌های خشک‌کن در شبیه‌سازی با توابع ورودی تحت اثر پارافین A، در ساعت ۱۴..... ۹۸
- شکل (۴-۳). پروفیل دمایی مقطع برشی خشک‌کن در شبیه‌سازی با توابع ورودی تحت اثر پارافین A، در ساعت ۱۴..... ۹۸
- شکل (۴-۴). نتایج شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی با توابع ریاضی، تحت اثر پارافین A و B..... ۱۰۱
- شکل (۴-۵). پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن با توابع ورودی، تحت اثر پارافین B..... ۱۰۲
- شکل (۴-۶). پروفیل دمایی در مقطع برشی اتاق خشک‌کن با توابع ورودی، تحت اثر پارافین B..... ۱۰۲

علائم و اصطلاحات

Symbols

علائم اختصاری

A_c	External Surface Area	مساحت سطح خارجی (مترمربع)
A_{mush}	Mushy Zone Constant	ثابت ناحیه نرم
c_l	Specific Heat Capacity of PCM at The Liquid Mode	ظرفیت گرمای ویژه ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع (ژول/کیلوگرم-کلوین)
c_p	Specific Heat Capacity	ظرفیت گرمای ویژه (ژول/کیلوگرم-کلوین)
c_s	Specific Heat Capacity of PCM at The Solid Mode	ظرفیت گرمای ویژه ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد (ژول/کیلوگرم-کلوین)
E_{mec}	Mechanical Energy Consumed by Fan and Water Pump	انرژی مکانیکی مصرف شده توسط فن و پمپ آب (ژول)
E_{st}	Stored Energy in The Storage Tank	انرژی ذخیره شده در مخزن ذخیره سازی (ژول)
G_b	Generation of Turbulence Kinetic Energy Due to Buoyancy	انرژی جنبشی آشفته تولید شده به علت بویانسی (ژول)
G_k	Generation of Turbulence Kinetic Energy Due to The Mean Velocity Gradients	انرژی جنبشی آشفته تولید شده به علت گرادیان سرعت متوسط (ژول)
$\vec{g}$	Acceleration of Gravity	شتاب گرانشی (متر/مجدور ثانیه)
H	Enthalpy	آنتالپی (کیلوژول/کیلوگرم)
h	Sensible Enthalpy	آنتالپی محسوس (کیلوژول/کیلوگرم)
h_c	Convective Heat Transfer Coefficient	ضریب انتقال حرارت جابجایی (وات/مترمربع-کلوین)
h_{ref}	Reference Enthalpy	آنتالپی مرجع (کیلوژول/کیلوگرم)
k_w	Thermal Conductivity of Wall	هدایت حرارتی دیواره (وات/متر-کلوین)
L	Coil Length	طول کوئل
$\dot{m}$	Mass Flow Rate	دبی جرمی (کیلوگرم/ثانیه)
m_{pcm}	Mass of PCM	جرم ماده تغییر فاز دهنده (کیلوگرم)
n	Number of Turns	تعداد چرخه ها
P	Pressure	فشار (پاسکال)
p	Pitch of Helix	گام مارپیچ

Q_{cond}	Conduction Heat Transfer	انتقال حرارت هدایتی (ژول/ثانیه)
Q_{conv}	Convection Heat Transfer	انتقال حرارت جابجایی (ژول/ثانیه)
Q_f	Energy Flux of Fluid	شار انرژی سیال (ژول/ثانیه)
$Q_{in,dryer}$	Thermal Energy Input to The Dryer	انرژی گرمایی ورودی به خشک کن (ژول)
$Q_{out,dryer}$	Energy Output from The Dryer Chamber	انرژی خروجی از اتاق خشک کن (ژول)
Q_{pcm}	Total Energy Absorbed by PCM	انرژی کلی جذب شده توسط ماده تغییر فاز دهنده (ژول)
R	Turn Radius	شعاع چرخه
r	Coil Radius	شعاع کویل
$\vec{S}$	Momentum Source Term	ترم منبع مومنتوم (نیوتن/متر)
S_k	Additional Source Terms k	ترم‌های منبع افزوده شده به k
S_ε	Additional source terms ε	ترم‌های منبع افزوده شده به ε
T	Temperature	دما (کلوین)
$T_{f,in}$	Inlet Fluid Temperature	دمای سیال ورودی (کلوین)
$T_{f,m}$	Mean Fluid Temperature	دمای میانگین سیال (کلوین)
$T_{f,out}$	Outlet Fluid Temperature	دمای سیال خروجی (کلوین)
$T_{in,coll}$	Inlet Temperature to The Collector	دمای ورودی به کلکتور (کلوین)
$T_{in,s}$	Inlet Temperature to The Storage Tank	دمای ورودی به مخزن ذخیره‌سازی (کلوین)
T_l	Liquidud Temperature	دمای فاز مایع (کلوین)
T_{melt}	Melting Temperature	دمای ذوب (کلوین)
$T_{out,coll}$	Outlet Temperature from The Collector	دمای خروجی از کلکتور (کلوین)
$T_{out,s}$	Outlet Temperature from The Storage Tank	دمای خروجی از مخزن ذخیره‌سازی (کلوین)
T_{pcm}	Temperature of PCM	دمای ماده تغییر فاز دهنده (کلوین)
T_{ref}	Reference Temperature	دمای مرجع (کلوین)
T_s	Solidus Temperature	دمای فاز جامد (کلوین)
$T_{w,m}$	Mean Tube Wall Temperature	دمای میانگین دیواره لوله (کلوین)
t	Time	زمان (ثانیه)
t_w	Wall Thickness	ضخامت دیواره (متر)

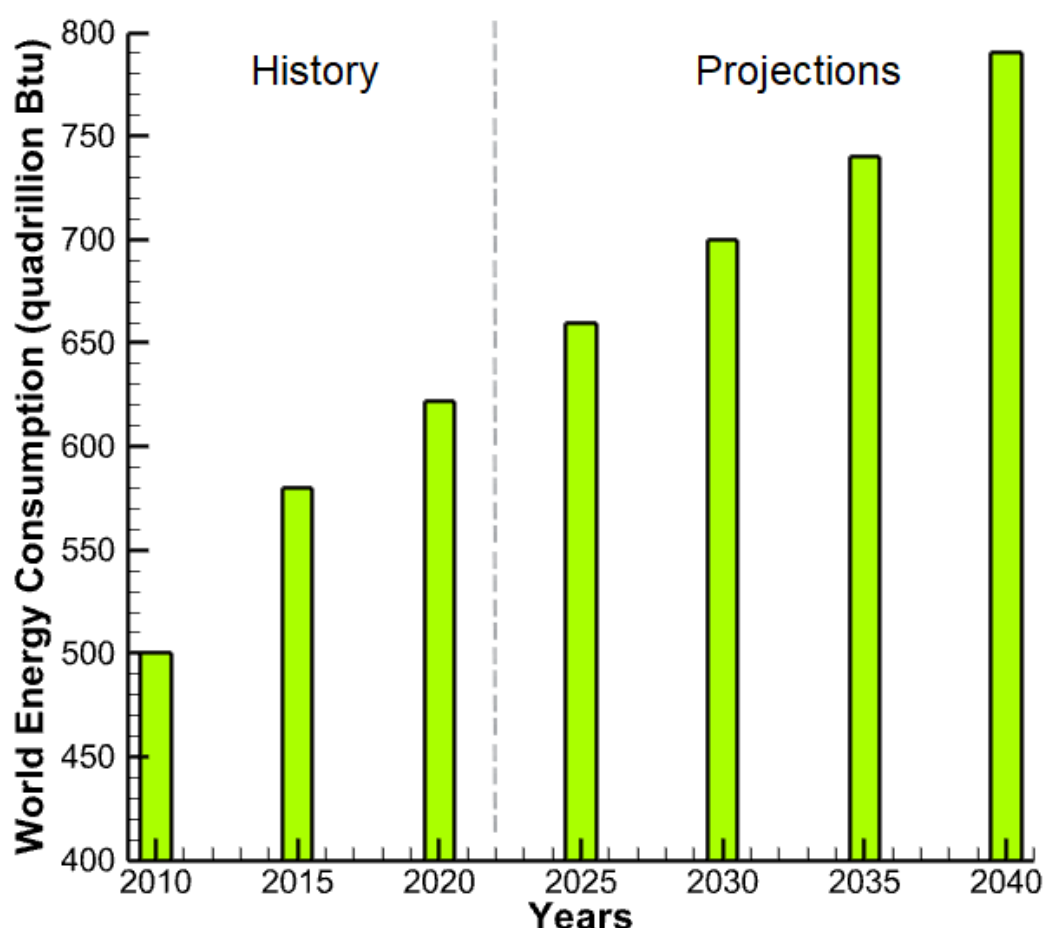
u_i	Time Averaged Velocity Vector	بردار سرعت متوسط بر حسب زمان (متر/ثانیه)
$\vec{V}$	Velocity Vector	بردار سرعت (متر/ثانیه)
Y_m	Contribution of The Fluctuating Dilatation	ضریب انبساط نوسانی
η_{dryer}	Drying Efficiency	بازده خشک کردن
μ	Dynamic Viscosity	ویسکوزیته دینامیکی (پاسکال-ثانیه)
ρ	Density	چگالی (کیلوگرم/مترمکعب)
β	Volumetric Expansion Coefficient	ضریب پخش حجمی (یک/کلوین)
ξ	Liquid Fraction	کسر مایع
σ_k	Turbulent Prandtl Numbers for k	اعداد پرانتل آشفته برای k
σ_ε	Turbulent Prandtl Numbers for ε	عدد پرانتل آشفته برای ε

فصل ۱

خشک کن های خورشیدی

۱-۱ مقدمه

طبق مطالعات و تحقیقات محققین، مصرف انرژی در جهان، هر ۲۰ سال دو برابر می‌شود [۱]. بر اساس گزارش و پیش‌بینی بین‌المللی، مصرف انرژی جهانی در سال ۲۰۱۰، از ۵۰۰ quadrillion Btu به ۶۲۲ quadrillion Btu در سال ۲۰۲۰ رسیده است. همچنین، پیش‌بینی می‌شود که این مقدار، در سال ۲۰۴۰ به ۷۹۰ quadrillion Btu برسد. در شکل (۱-۱)، مصرف انرژی جهانی، از سال ۲۰۱۰ و پیش‌بینی آن تا سال ۲۰۴۰، نشان داده شده است [۲].



شکل (۱-۱). مصرف انرژی جهانی از سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۴۰ [۲]

از طرفی، هزینه بالای سوخت‌های فسیلی، مانند: نفت، گاز، زغال‌سنگ و... به عنوان منابع انرژی،

کاهش تدریجی ذخیره آن‌ها و تأثیرات مخرب زیست‌محیطی در استفاده از آن‌ها، محدودیت‌های شدیدی در مصرف آن‌ها ایجاد کرده است. این امر، موجب شده است که بشر، به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند: انرژی خورشیدی، انرژی باد، انرژی زمین گرمایی و... برود.

از مهم‌ترین کاربردهای انرژی تجدیدپذیر، می‌توان به استفاده آن در توربین‌های بادی، در سلول‌های خورشیدی جهت تامین برق، در بخش‌های مختلف کشاورزی، مانند: خشک کردن محصولات کشاورزی با استفاده از انرژی خورشیدی و... اشاره نمود. همچنین، امروزه انرژی در بخش کشاورزی، به اندازه‌ای اهمیت دارد که هرگونه اختلال در تأمین انرژی مورد نیاز آن، به شکل قابل توجهی بر سطح تولید محصولات اثر می‌گذارد. این مورد، نشان دهنده اهمیت استفاده از انرژی تجدیدپذیر، در بخش کشاورزی می‌باشد [۳].

۲-۱ کاربرد انرژی تجدیدپذیر در بخش کشاورزی

بخش کشاورزی، جهت پاسخگویی به تولید بیشتر غذا برای جمعیت در حال افزایش، به شدت به انرژی وابسته است. مقدار قابل توجهی از انرژی جهانی، در بخش کشاورزی هزینه می‌شود. حدود ۳/۶۲٪ از انرژی جهانی، برای خشک کردن محصولات کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بجای سوخت‌های فسیلی، در بخش کشاورزی، از اهمیت بالایی برخوردار است.

از جمله مهم‌ترین کاربردهای انرژی تجدیدپذیر در بخش کشاورزی، می‌توان به استفاده از انرژی خورشیدی در پمپ‌های آبی، جهت: پمپاژ آب آبیاری، خشک کردن محصولات، گرمایش و تهویه سازه‌های موجود در مزارع، گرم کردن آب برای شست‌وشوی تجهیزات گاوداری‌ها و خنک کردن محصولات لبنی، استفاده از انرژی باد جهت تولید برق و پمپاژ آب برای مصارف شرب و کشاورزی، توربین‌های بادی کوچک برای تولید کردن برق، استفاده از انرژی زمین گرمایی، استرلیزه و خشک کردن مواد غذایی، گرم کردن و تهویه گلخانه‌ها، خشک کردن چوب جهت تهیه کاغذ، خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن میوه‌ها، اشاره نمود [۳].

یکی از روش‌های مناسب برای نگهداری و حفظ محصولات کشاورزی، این است که آن‌ها را بوسیله خشک‌کن‌ها با مصرف انرژی، خشک می‌کنند. بدون فرآیند خشک کردن، آب آزاد باعث فساد در مواد غذایی می‌شود. خشک کردن کنترل شده محصولات، بیشتر در فرآیندهای خشک کردن صنعتی انجام می‌شود. هوای گرم برای خشک کردن صنعتی محصولات، معمولاً با سوزاندن سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شود و مقادیر زیادی از سوخت‌ها در سراسر دنیا، برای این منظور استفاده می‌شوند. اما، به علت مشکلات استفاده از سوخت‌های فسیلی، که در بخش گذشته به آن پرداخته شد؛ خشک‌کن‌های خورشیدی برای خشک کردن محصولات کشاورزی، جایگزین مناسبی برای خشک‌کن با سوخت‌های فسیلی می‌باشند [۴].

۳-۱ کاربرد انرژی خورشیدی در خشک کردن محصولات کشاورزی

یکی از منحصر به فردترین منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی می‌باشد. این انرژی می‌تواند به صورت مستقیم و غیرمستقیم، به شکل‌های مختلف دیگر انرژی تبدیل گردد. انرژی خورشیدی، رایگان و از نظر محیطی پاک است. بنابراین، به عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌های منابع جایگزین انرژی‌های فسیلی، شناخته می‌شود [۵].

با بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برای خشک کردن، پتانسیل قابل‌توجهی برای خشک کردن محصولات کشاورزی، مانند: دانه‌های غذایی، میوه‌ها، سبزیجات و گیاهان دارویی فراهم می‌شود [۶]. محصولات غذایی، به ویژه میوه‌ها و سبزیجات، به هوای گرم در محدوده دمایی بین ۴۵ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد، برای خشک کردن ایمن نیاز دارند. خشک کردن با کمک انرژی خورشیدی، به محصولات کشاورزی کمک می‌کند؛ تا به شکل منطقی، سریعاً به یک مقدار رطوبت ایمن رسیده، خشک شوند و همچنین، کیفیت محصول حفظ شود [۷].

انتخاب سیستم مناسب، در فرآیند خشک کردن خورشیدی محصولات کشاورزی، مهم است. همچنین، باید مراقبت ویژه در انتخاب سیستم خشک کردن، صورت گیرد. یکی از ابتدایی‌ترین روش‌های

خشک کردن به کمک انرژی خورشیدی، خشک کردن محصولات در زیر نور مستقیم خورشید می باشد که در ادامه، به آن خواهیم پرداخت.

۱-۳-۱ خشک کردن محصولات در زیر نور مستقیم خورشید

در بسیاری از کشورها، خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، روشی عمومی است که برای خشک کردن و حفظ محصولات کشاورزی و... مورد استفاده قرار می گیرد. این روش، در کشورهای گرمسیری و نیمه گرمسیری، شامل: پخش محصول به صورت لایه های نازک روی سینی ها و قرار دادن محصول در معرض باد و آفتاب است [۸].

خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، به شرایط محیطی مانند: تابش خورشید، باد و سایر شرایط محیطی بستگی دارد. همچنین، پارامترهای خارجی خشک کردن را، نمی توان در این روش کنترل کرد. در نتیجه، منجر به یک دوره خشک کردن طولانی مدت و یا نرخ خشک شدگی نامطلوب، می شود. پارامترهایی که در خشک کردن موثرند؛ عبارتند از: حرارت ورودی، ظرفیت رطوبت، دمای خشک کردن، نرخ جریان هوا و... [۹]. این روش، باعث خراب شدن بسیاری از محصولات، به دلیل: اثر باد، ضایعات، بارندگی و... می شود. از آنجا که روند خشک شدن در این روش نسبتاً کند است؛ باعث تلفات قابل توجهی، از جمله: عفونت حشرات، واکنش های آنزیمی، رشد میکروارگانیسم ها می شود که باعث کاهش قابل توجه کیفیت محصول می شود. همچنین، خشک کردن غیریکنواخت، منجر به تخریب محصولات کشاورزی در هنگام ذخیره سازی می شود. مشکلات جدی خشک شدن، در مناطق گرمسیر مرطوب و مناطق نیمه گرمسیری ایجاد می شود. زیرا، در آنجا محصولات کشاورزی، باید در فصل باران خشک شوند. معایب زیادی که در خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید وجود دارد؛ باعث شده است که خشک کن های خورشیدی، جایگزین این روش شوند. بنابراین، استفاده از خشک کن های خورشیدی، برای کاهش این مشکلات، از اهمیت بالایی برخوردار می باشد [۱۰].

۱-۴ خشک‌کن‌های خورشیدی و انواع آن

در کشورهای در حال توسعه، خشک کردن خورشیدی، توانایی برآورده ساختن نیازهای زیاد به غذاهای سالم و کم‌هزینه را دارد. خشک‌کن‌های خورشیدی، نه تنها برای خشک کردن محصولات کشاورزی به کار می‌روند؛ بلکه انرژی را ذخیره می‌کنند؛ زمان زیادی را صرفه‌جویی می‌کنند؛ مساحت کمتری را اشغال می‌کنند و کیفیت محصول را بهبود می‌بخشند.

اولین ایده برای خشک‌کن خورشیدی، توسط اوریت و استنلی [۱۱] در سال ۱۹۷۶ ارائه شد. این خشک‌کن، به شکل یک جعبه بود که یک پوشش شفاف داشت. هدف اصلی این اختراع، فراهم کردن روشی جدید و بهبود یافته بود که بر کاستی‌های موجود در خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، غلبه می‌کرد.

استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی، در شرایط کنترل شده دما و حذف رطوبت، باعث خشک شدن کامل و باکیفیت محصول می‌شود. درصد رطوبت، در محصولات مختلف متفاوت است. سیستم‌های خشک‌کننده، برای خشک کردن محصولات با رطوبت مختلف، معمولاً به دو دسته: دما پایین و دما بالا، طبقه‌بندی می‌شوند. در سیستم خشک‌کننده با دمای پایین، با استفاده از تهویه مناسب، رطوبت محصول با هوای موجود برای خشک کردن، وارد حالت تعادل می‌شود. سیستم‌های خشک‌کننده با دمای بالا نیز، زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرند که نرخ سریع خشک کردن، برای محصولات حاوی رطوبت بالا مورد نیاز باشد [۱۲].

به طور کلی، خشک‌کن‌های خورشیدی، بر اساس حالت حرکت هوا، عملکرد انرژی خورشیدی، نوع محصول مورد نظر برای خشک شدن و عایق‌بندی، مونتاژ و...، طبقه‌بندی می‌شوند. خشک‌کن‌های خورشیدی، از لحاظ حالت حرکت هوا، به دو دسته کلی: خشک‌کن‌های جابجایی اجباری و جابجایی طبیعی، تقسیم می‌شوند [۱۳].

در خشک‌کن‌های خورشیدی جابجایی طبیعی (یا خشک‌کن‌های خورشیدی پسیو)^۱، جریان هوای مورد نیاز برای خشک کردن محصول، به شکل طبیعی یا به وسیله نیروی شناوری انجام می‌شود [۱۴]. خشک‌کن خورشیدی جابجایی طبیعی، به حداقل هزینه برای کنترل دمای خشک کردن، نیاز دارد. این نوع خشک‌کن‌های خورشیدی، به دلیل نگهداری و کارکرد ساده‌اش، محبوبیت زیادی دارند. خشک‌کن‌های خورشیدی جابجایی طبیعی، یکی از قدیمی‌ترین انواع خشک‌کن‌های موجود است. این خشک‌کن خورشیدی، شامل: یک کلکتور، یک ورق شفاف و یک بخش برای خشک کردن است. این قسمت‌ها، به صورت سری متصل می‌شوند و شامل سیستم‌هایی هستند که می‌توانند، بازده خشک کردن رضایت‌بخشی را، ارائه کنند [۱۵].

سیستم خشک‌کن‌های خورشیدی جابجایی طبیعی، ظرفیت محدودی دارند. همچنین، میزان خشک شدن در این خشک‌کن‌ها، با تأخیر می‌باشد و به شدت وابسته به شرایط جوی است. زیرا، نیروی شناوری برای انتقال جریان هوا در خشک‌کن، کوچک می‌باشد و در نتیجه، کیفیت محصولات خشک‌کن، به ویژه در شرایط نامساعد جوی، کاهش می‌یابد [۱۶].

در خشک‌کن‌های خورشیدی جابجایی اجباری (یا خشک‌کن‌های خورشیدی اکتیو)^۲، با استفاده از فن یا دمنده، هوای مورد نیاز برای خشک شدن محصول، از طریق کلکتور خورشیدی به اتاق خشک‌کن منتقل می‌شود [۱۷]. خشک‌کن خورشیدی جابجایی اجباری، برای راه اندازی به برق نیاز دارد. در حالی که بسیاری از مناطق روستایی، یا برق ندارند و یا برای تولید برق مورد نیاز، باید هزینه‌های بالایی را بپردازند. بنابراین، این نوع خشک‌کن‌ها، در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، کاربرد چندانی ندارند [۱۸]. از مزایای خشک‌کن خورشیدی جابجایی اجباری، می‌توان به ظرفیت خشک شدن بهتر، به حداقل رساندن تلفات جرم و کیفیت مناسب محصولات خشک شده، اشاره کرد [۱۹-۲۰].

هر کدام از خشک‌کن‌های اکتیو و پسیو، از لحاظ ساخت و ساز و کار، به سه مدل تقسیم می‌شوند که

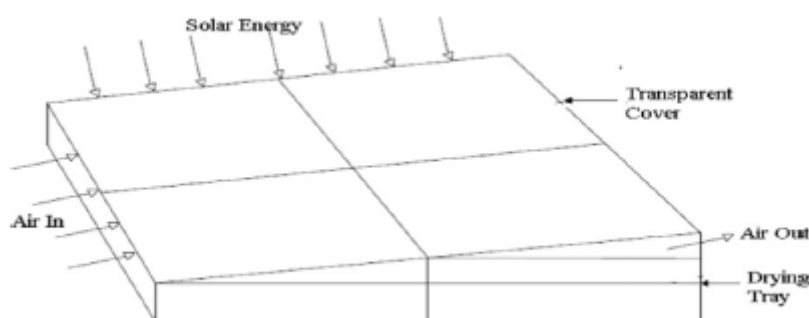
^۱Passive

^۲Active

عبارتند از: خشک‌کن خورشیدی مستقیم، غیرمستقیم و هیبریدی. در ادامه، به جزئیات این سه مدل و بررسی‌های محققین در هر مدل، خواهیم پرداخت.

۱-۴-۱ خشک‌کن خورشیدی مستقیم

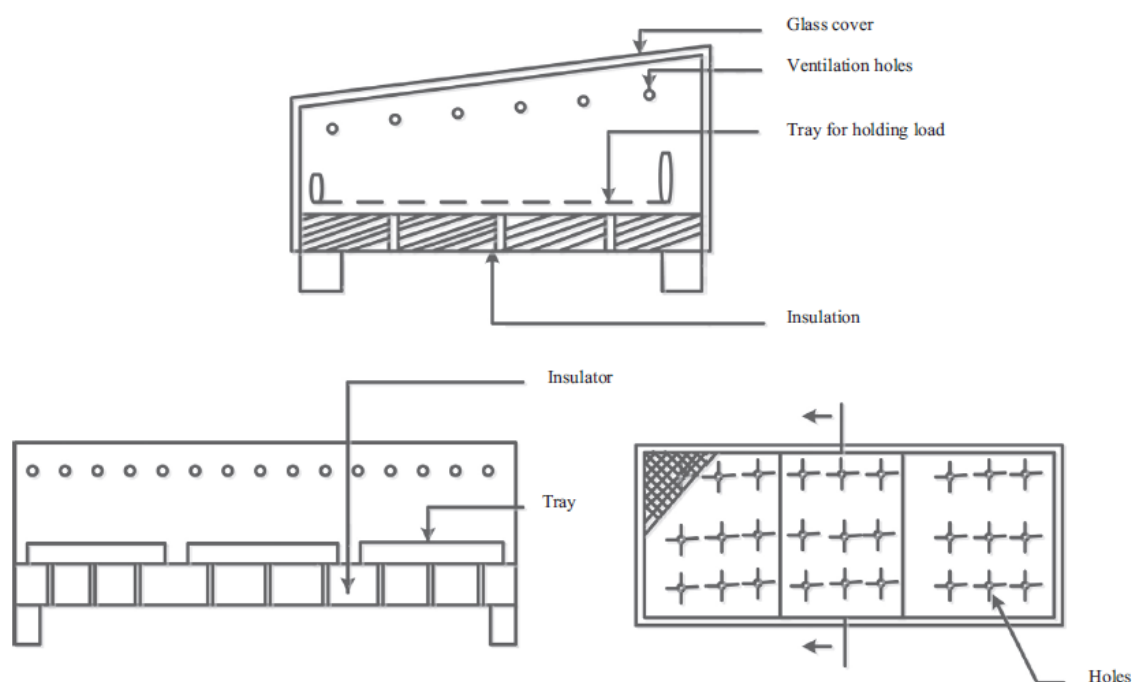
خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم، رایج‌ترین وسیله برای خشک کردن محصولات کشاورزی و مواد غذایی هستند. در یک خشک‌کن خورشیدی مستقیم، رطوبت محصولی که باید خشک شود؛ با اثر مستقیم تابش خورشید بر روی محصول، با گردش طبیعی هوا یا بدون آن، از بین می‌رود [۲۱]. یک نمونه از خشک‌کن خورشیدی مستقیم، در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱). خشک‌کن خورشیدی مستقیم [۲۲]

خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم، دارای محفظه خشک کردن هستند که یک جعبه عایق می‌باشد و با یک پوشش شفاف، از جنس شیشه یا پلاستیک ساخته شده است و دارای سوراخ‌هایی، برای ورود و خروج هوا از محفظه است [۲۳]. هنگامی که تابش خورشید، بر روی پوشش شیشه‌ای می‌تابد؛ دمای هوا بالا می‌رود و هوا، بطور طبیعی یا با فشار باد، به وسیله منبع خارجی (به عنوان مثال: فن، دمنده، و...) یا ترکیبی از هر دو، جریان می‌یابد. بخشی از تابش خورشیدی ضعیف، به جو منعکس خواهد شد. این مقدار در قسمت دیگر، به داخل کابینت خشک‌کن منتقل می‌شود. این مقدار منتقل شده، مجدد از سطح محصول منعکس می‌شود و رطوبت باقی‌مانده محصول را جذب می‌کند. در این صورت، دمای محصول افزایش و رطوبت آن به شکل تبخیر، کاهش می‌یابد [۲۴].

خشک کن خورشیدی مستقیم، معمولاً در مناطقی استفاده می شود که در طول روز، تابش مستقیم نور خورشید وجود دارد. شکل (۳-۱)، یک نمونه از این نوع خشک کن ها می باشد. اتاق خشک کن، از چوب فشرده به ضخامت ۱ سانتی متر، ساخته شده و کاملاً توسط پشم شیشه، در قسمت های داخلی، پشتی و پایینی عایق بندی شده است. دیواره جلویی، شیب دار می باشد و با یک صفحه شیشه ای ضخیم، پوشانده شده است؛ تا نور خورشید از آن عبور کند. این دیواره شفاف، برای حالت غیرمستقیم ممکن است؛ با یک ورق عایق و کدر، پوشانده شود. قسمت پشتی خشک کن، دارای سوراخ های خروجی است که از طریق آن، هوای مرطوب توسط فن بیرون می رود. پایین ترین قسمت دیواره جلویی، به گونه ای ساخته شده است که می تواند، با استفاده از دمنده گریز از مرکز، هوای گرم را از کلکتور خورشیدی به داخل محفظه، هدایت کند [۲۵].



شکل (۳-۱). خشک کن خورشیدی مستقیم [۲۵]

خشک کن خورشیدی مستقیم، دارای ساختاری ساده و ارزان است. بازده متوسط خشک کن های خورشیدی مستقیم، به نوع محصول، سرعت جریان هوا و محل خشک شدن، بستگی دارد. این نوع خشک کن ها، از محصول در برابر: گرد و غبار، باران، آوار، شبنم و...، محافظت می کنند. همچنین، این

خشک‌کن‌ها، دارای اشکالاتی در عملکرد خود هستند؛ مانند: گرمای بیش از حد به محصول، کیفیت نامطلوب محصول و ظرفیت خشک کردن محدود. محصول در این خشک‌کن‌ها، به علت قرار گرفتن مستقیم در برابر تابش خورشید، ممکن است تغییر رنگ بدهد. فشردگی محصول در داخل پوشش شیشه‌ای، موجب کاهش مقاومت‌پذیری آن می‌شود. کیفیت محصول خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم را، می‌توان با استفاده از انواع خاصی از فرآیندهای شیمیایی بهبود داد [۲۶].

خشک‌کن خورشیدی مستقیم جابجایی طبیعی، با استفاده از چوب، تیغه شیشه و فلزات در دسترس، طراحی می‌شود. بازده این خشک‌کن‌ها، به برخی پارامترها از قبیل: دمای محیط، دبی جرمی هوا سیستم خشک کردن و شار حرارتی فرایند، بستگی دارد [۲۷].

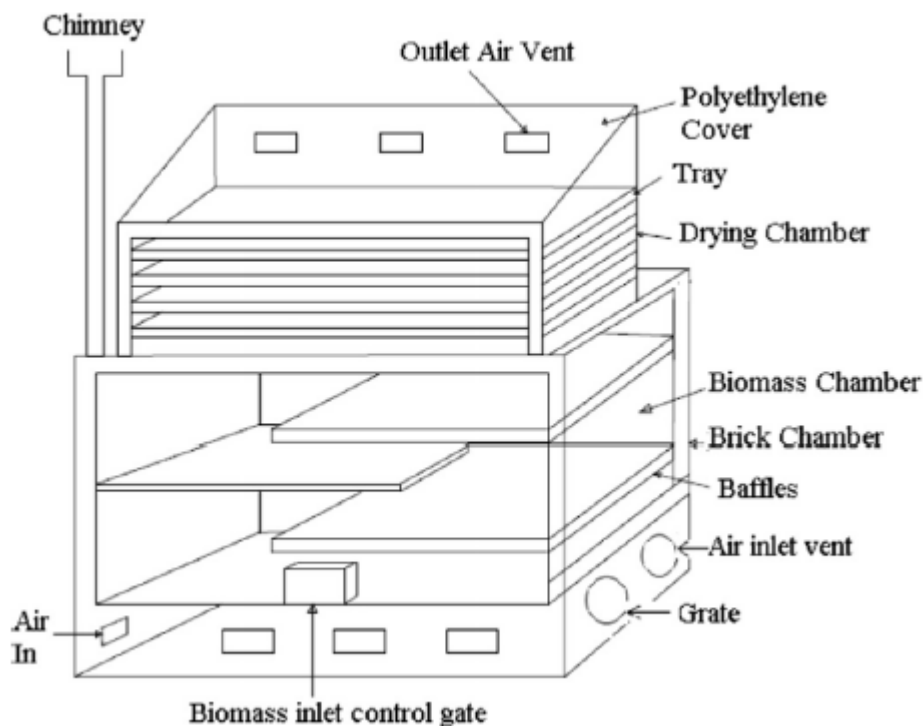
شریکومار و همکاران [۲۸]، یک خشک‌کن خورشیدی مستقیم را برای خشک کردن کدو، بهبود دادند. طبق نتایج، ظرفیت رطوبت از ۹۵ تا ۵٪ در مدت ۶ ساعت، کاهش داده شد. در حالی که با استفاده از خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، همین مقدار رطوبت در مدت زمان ۱۱ ساعت، کاهش پیدا کرده بود. طول عمر خشک‌کن، به مدت ۲۰ سال، با دوره بازگشت سرمایه در ۳/۲۶ سال فرض شد.

تفرا و همکاران [۲۹]، عملکرد خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم چوبی و هرمی را، برای خشک کردن سیب‌زمینی ارزیابی کردند. مشاهده شد که زمان کلی خشک شدن در این خشک‌کن‌ها، نسبت به روش خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، ۲ تا ۳ ساعت کاهش یافت. همچنین، برای ایجاد یک محیط خشک کردن بهتر، خشک‌کن هرمی از نظر اقتصادی به صرفه‌تر می‌باشد.

ایک و آرینز [۳۰]، یک نوع نمونه اولیه از خشک‌کن مستقیم جابجایی طبیعی، برای خشک کردن ذرت طراحی کردند. طبق نتایج، ظرفیت رطوبت، از ۲۹ به ۱۲٪ بر رطوبت پایه، کاهش یافت. همچنین، زمان خشک کردن در این طراحی، نسبت به روش خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، ۵۵٪ صرفه‌جویی شد. بازده خشک‌کن و روش خشک کردن در زیر نور مستقیم خورشید، به ترتیب ۴۵٪ و ۲۲٪ محاسبه شد.

بنا و فولر [۳۱] طبق شکل (۱-۴)، یک خشک‌کن خورشیدی جابجایی طبیعی مستقیم، با یک سوخت

زیست‌توده را برای خشک کردن میوه‌ها و سبزیجات، در مکان غیرالکتریکی ترکیب کردند. طبق نتایج، بازده کلی خشک کردن، برای ۲۰ تا ۲۲ کیلوگرم آناناس، با برش‌هایی به اندازه ۰/۰۱ متر، ۹٪ بدست آمد.



شکل (۴-۱). خشک‌کن خورشیدی مستقیم با سوخت زیست‌توده [۳۱]

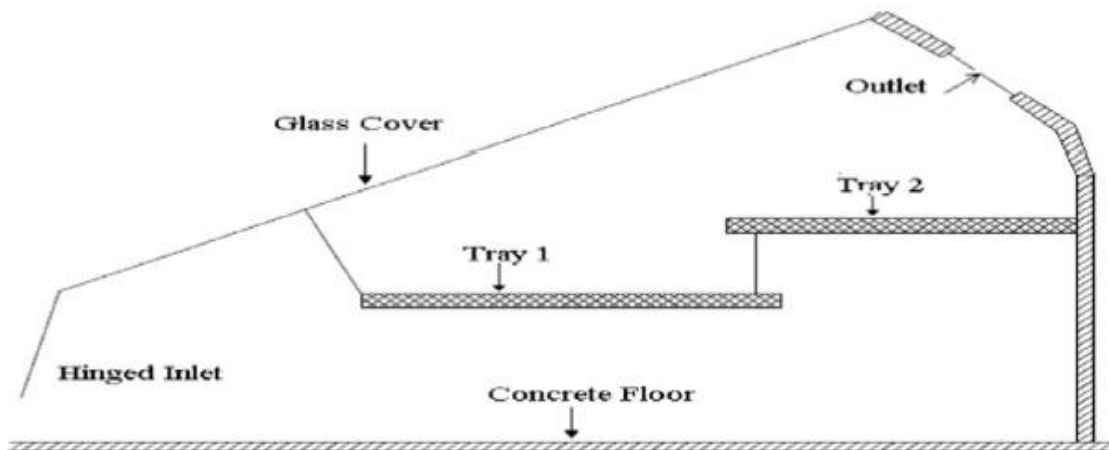
کامل و همکاران [۳۲]، عملکرد خشک کردن شکلات را، با استفاده از یک خشک‌کن خورشیدی قابل حمل، با هزینه پایین، تحت جابجایی طبیعی بررسی کردند. طبق نتایج، زمان خشک کردن، در مقایسه با روش‌های دیگر خشک کردن، حدود ۶۲٪ کاهش یافت. همچنین، مشاهده شد که ظرفیت رطوبت، از ۳۶/۳۳ تا ۸/۳۳٪ بر رطوبت پایه، کاهش یافت.

اوقرونا و یوسف [۳۳]، یک خشک‌کن خورشیدی مستقیم جابجایی طبیعی را، برای خشک کردن تاپیوکا^۱ طراحی کردند. دمای محیط در این طراحی، ۳۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی محیط، ۷۴٪ بود. مشاهده شد که ظرفیت رطوبت، از ۷۹ به ۱۰٪ کاهش یافت.

^۱Tapioca

^۲ تاپیوکا، نوعی نشاسته می‌باشد؛ که در برزیل تولید و در برخی از کشورهای آمریکای جنوبی، مصرف می‌شود [۳۳]

غضنفری و همکاران [۳۴]، یک خشک کن خورشیدی مستقیم جابجایی اجباری را، برای خشک کردن لایه نازک پسته، طراحی کردند. ثابت خشک شدن پسته، با استفاده از نوعی مدل خاص توانی و نمایی تعیین شد. در نهایت مشاهده شد که مقدار رطوبت پسته، از ۲۱ به ۶٪ کاهش یافت. نمای کلی این خشک کن خورشیدی، در شکل (۵-۱) نشان داده شده است.



شکل (۵-۱). خشک کن خورشیدی مستقیم جابجایی اجباری با سیال هوا [۳۴]

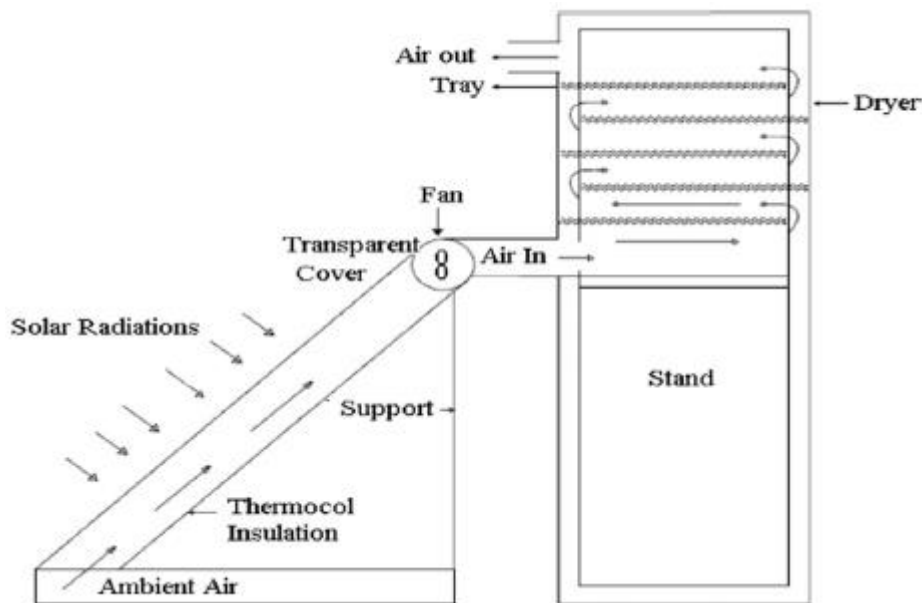
۲-۴-۱ خشک کن خورشیدی غیرمستقیم

خشک کن های خورشیدی غیرمستقیم، دارای یک کلکتور خورشیدی جداگانه و یک بخش خشک کردن هستند. این نوع خشک کن ها، معمولاً از چهار مؤلفه تشکیل شده اند. به عنوان مثال: کلکتور خورشیدی، بخش خشک کردن، فن^۱ و مجاری برای گردش هوا. در یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم، ابتدا گرمای خورشید، توسط کلکتور خورشیدی جمع می شود و سپس، به اتاق خشک کن منتقل می شود و عمل خشک شدن، در آنجا رخ می دهد [۳۵].

کلکتور خورشیدی، در رسیدن به درجه حرارت بالاتر با دبی جریان هوای کنترل شده، کمک می کند. همچنین، مشاهده می شود که در شرایط عملکردی دما بالا، بازده کلکتور خورشیدی کاهش می یابد [۳۶]. با طراحی مناسب یک کلکتور خورشیدی، می توان مقدار دمای مطلوب و دبی جرمی مناسب، برای

^۱Fan

جریان هوا بدست آورد و محصول را به شکل بهتری خشک کرد. بطور کلی، بیشتر کلکتورهای خورشیدی، از چوب یا فلزهایی ساخته شده‌اند که دارای پوشش مناسبی از مواد جذب‌کننده هستند. مانند: پلی‌اتیلن سیاه، که برای جذب بهتر حرارت مورد نیاز برای خشک کردن محصول، مناسب است [۳۷]. یک نمونه از خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، در شکل (۶-۱) نشان داده شده‌است.



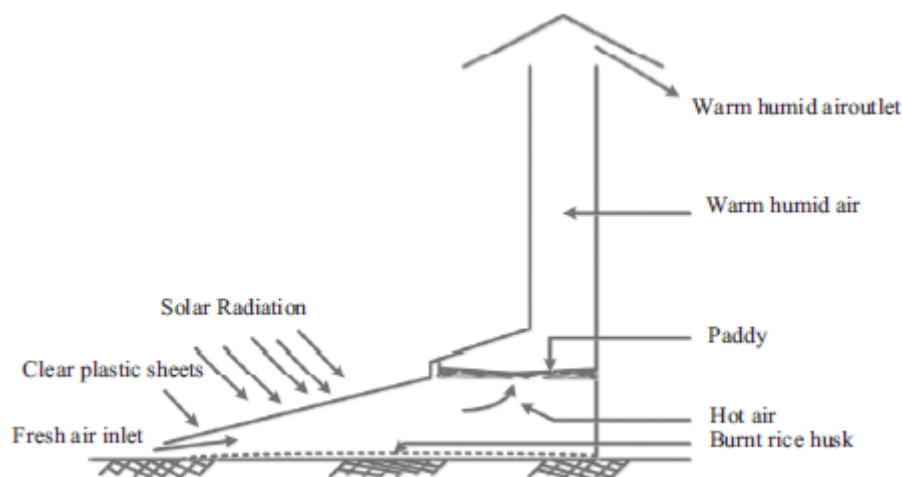
شکل (۶-۱). خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم [۲۶]

از گرمای گردش هوای خشک کردن، برای بهبود بازده فرآیند استفاده می‌شود. در غیر این صورت، این گرما در اتمسفر، به طور ایده‌آل هدر می‌رود [۳۸]. بازده خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، به دبی جریان هوا در کلکتور خورشیدی، بستگی دارد که می‌توان آن را، با استفاده از فن یا دمنده، کنترل کرد. هدف اصلی استفاده از فن، حفظ دبی جریان هوا در بخش خشک کردن می‌باشد که منجر به تبخیر یکنواخت رطوبت از محصول می‌شود [۳۹].

خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، در شرایط آب و هوایی نامطلوب، قادر به خشک کردن مطلوب محصول می‌باشد و کیفیت محصولات خروجی از آن، در شرایط نامساعد جوی، مطلوب می‌باشد. همچنین، این خشک‌کن برای مزارع کوچک، به دلیل کم‌هزینه بودن، ایده‌آل می‌باشد [۴۰].

گواهین و تیواری [۴۱]، یک خشک‌کن غیرمستقیم با کلکتور صفحه تخت طراحی کردند که در

شکل (۷-۱)، نشان داده شده است. هوای خورشیدی وارد شده به محفظه، گرم می‌شود. سپس، از میان محصولات مرطوب عبور می‌کند. هیترهای هوا وصل هستند. مفهوم اصلی کلکتور صفحه تخت در این طراحی، برای خشک کردن محصولات غذایی می‌باشد که در خشک‌کن خورشیدی کابینتی، خشک می‌شود. همچنین، از هیتر خورشیدی، برای گرم کردن هوای ورودی به محفظه، استفاده می‌شود. هوای گرم شده، سپس به هوای مرطوب و گرم تبدیل می‌شود و از خروجی عبور می‌کند. این نوع خشک‌کن‌ها، از لحاظ حل معادلات مختلف که بر اساس تعادل انرژی است؛ بهتر از سایر خشک‌کن‌ها می‌باشند. همچنین، نسبت به سایر خشک‌کن‌های کابینتی معمولی، عملکرد بهتری دارند.

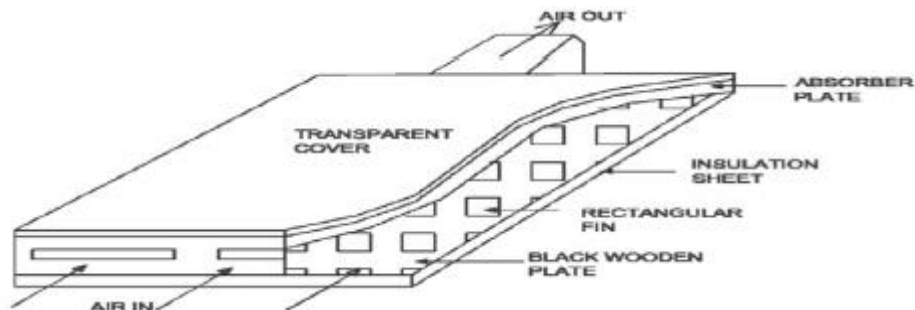


شکل (۷-۱). خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم با کلکتور صفحه تخت [۴۱]

یالدز و ایرتیکن [۴۲]، به طور آزمایشگاهی رفتار سبزیجات مختلف را، با دبی‌های مختلف هوا و با توجه به زمان خشک شدن آن‌ها، در یک خشک‌کن خورشیدی غیر مستقیم بررسی کردند. مشاهده شد که با افزایش سرعت هوا، زمان خشک شدن، بین ۱۴ تا ۳۷٪ نسبت به خشک شدن طبیعی خورشیدی، کاهش پیدا می‌کند.

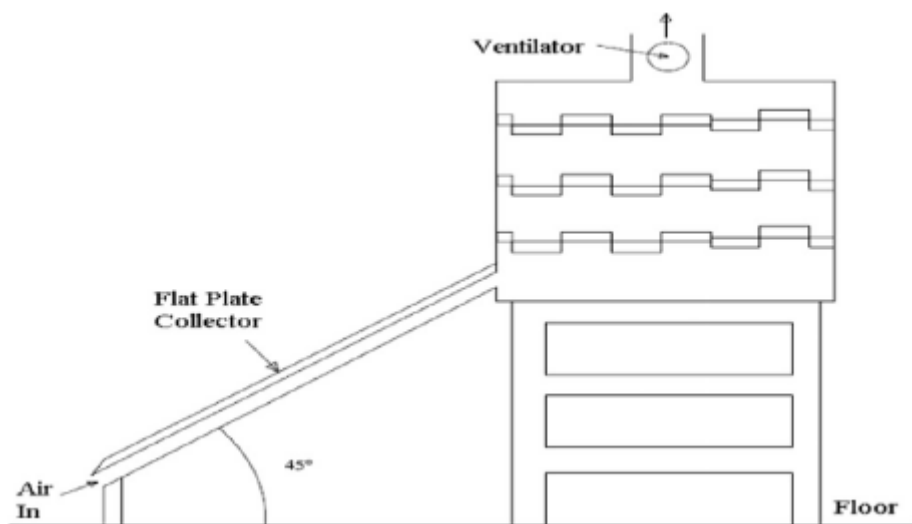
مومی و همکاران [۴۳]، عملکرد حرارتی خشک‌کن خورشیدی غیر مستقیم را با ایجاد جریان هوای آشفته در کلکتور، با استفاده از فین‌های مستطیلی، ارزیابی کردند. طبق نتایج، بازده کلکتور با استفاده از صفحات جاذب فین، ۸۰٪ و بدون در نظر گرفتن آن‌ها ۷۷٪، گزارش شد. نمونه‌ای از خشک‌کن

خورشیدی غیرمستقیم با فین‌های مستطیلی، برای جریان آشفته هوا، در شکل (۸-۱) نشان داده شده- است.



شکل (۸-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با فین‌های مستطیلی [۴۳]

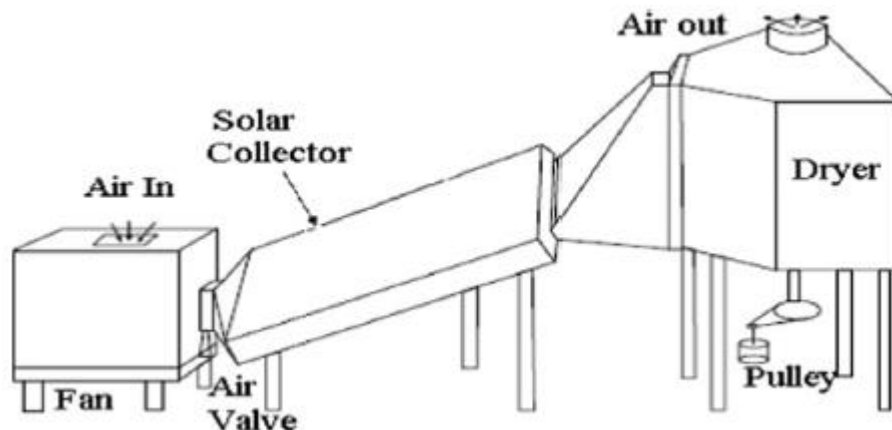
علی و دزمون [۴۴]، یک خشک کن خورشیدی غیرمستقیم را با دو مدل ریاضی، برای خشک کردن سیب زمینی شبیه سازی کردند. یکی از این مدل ها، عملکرد حرارتی کلکتور خورشیدی، با فین مستطیلی را نشان می داد و دیگری، نمایانگر سینتیک خشک کردن هوا، در خروجی کلکتور بود که خسارات کالری، از طریق دیواره های خشک کن را، بررسی می کرد. نمونه ای از این خشک کن خورشیدی، در شکل (۹-۱) نشان داده شده است.



شکل (۹-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با مدل ریاضی [۴۴]

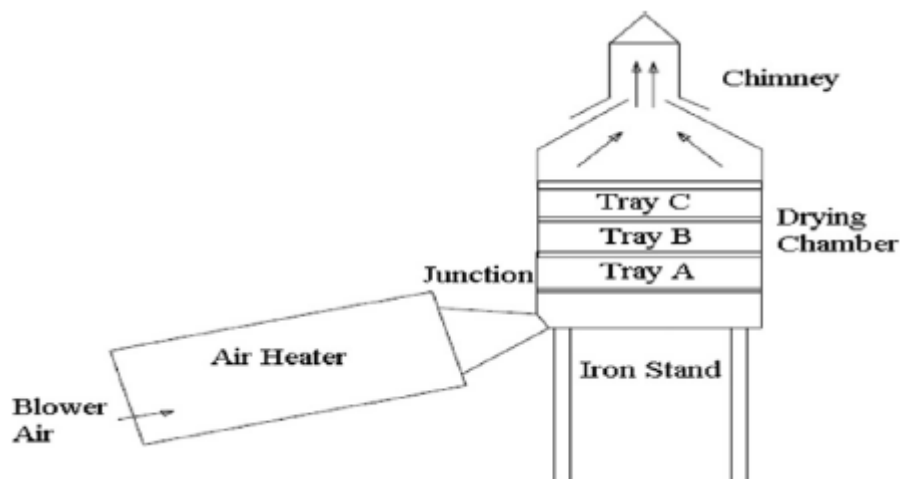
اکپینار و همکاران [۴۵]، یک مدل ریاضی برای خشک کردن زردآلو، در یک خشک کن دوار خورشیدی، ارائه کردند. در این طراحی، دمای هوای خشک کردن از $47/3$ تا $61/74$ درجه سانتی گراد، سرعت هوا از $0/707$ تا $2/3$ متر بر ثانیه و سرعت چرخشی از 0 تا $2/25$ دور در دقیقه بود. یک نمونه

از خشک کن خورشیدی دوار با مکانیسم متحرک، در شکل (۱۰-۱) نشان داده شده است.



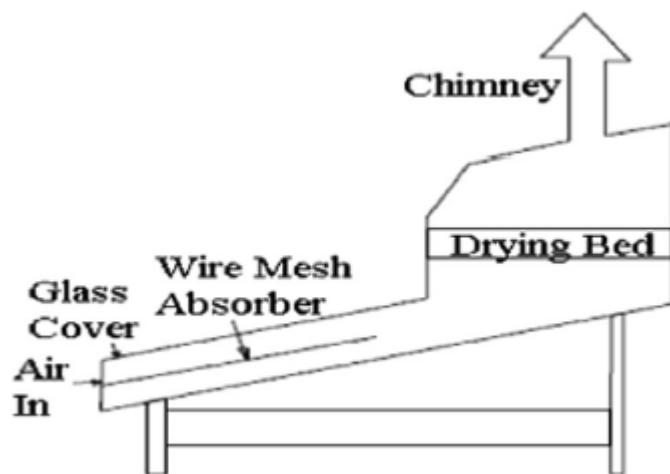
شکل (۱۰-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با مکانیزم متحرک [۴۵]

آیسا و همکاران [۴۶]، عملکرد خشک کردن پنبه را، با استفاده از خشک کن خورشیدی غیرمستقیم، برای دماهای مختلف و سرعت جریان هوا مشخص، بررسی کردند. مشاهده شد که بازده کلی، برای میانگین دمای $53/68$ درجه سانتی گراد، از $1/85$ تا $1/18/6$ متغیر است. خشک کن خورشیدی غیرمستقیم استفاده شده در این طراحی، در شکل (۱۱-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۱-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم [۴۶]

مادلوپا و همکاران [۴۷]، یک هیتر خورشیدی همراه با دو سیستم جذب خورشیدی، به شکل جابجایی طبیعی، برای تبخیر آب انبه طراحی کردند. مشاهده شد که ظرفیت رطوبت، از ۸۵ به ۱۳٪ کاهش می یابد. خشک کن خورشیدی غیر مستقیم با سیستم جذب، در شکل (۱۲-۱) نشان داده شده است.

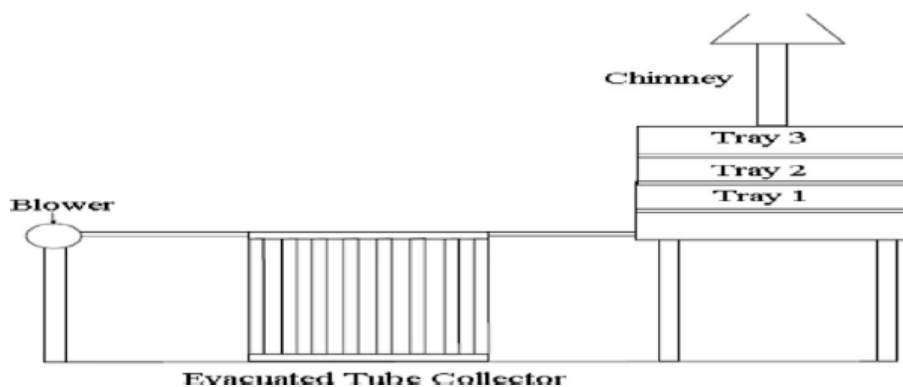


شکل (۱-۱۲). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم با سیستم جذب [۴۷].

تاشتوش و همکاران [۴۸]، یک مدل ریاضی برای خشک کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی طبیعی، که قادر به خشک کردن فرآورده‌های لبنی بود را، طراحی کردند. طبق نتایج، بازده متوسط کلکتور ۳۷٪ و حداکثر دمای هوا نیز ۴۱ درجه سانتی‌گراد بدست آمد.

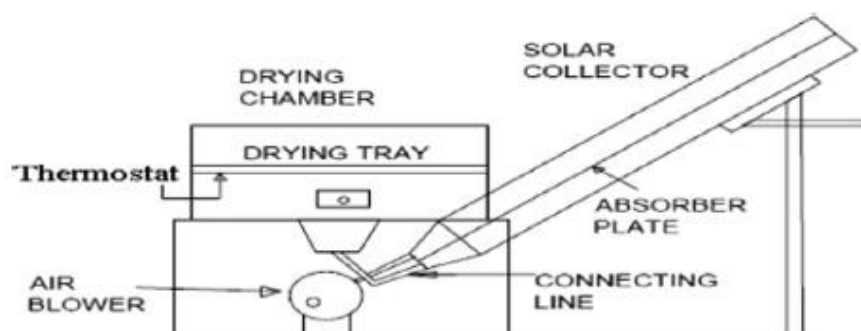
کادمن و ساموئل [۴۹]، یک کلکتور خورشیدی صفحه مسطح با جابجایی اجباری را، برای خشک کردن گل کلم، طراحی کردند. هدف از انجام آن، توزیع بهتر هوای گرم از طریق سینی‌ها، در یک فرآیند تابشی بود. طبق نتایج، بازده حرارتی متوسط در نیمه روز، ۶۱/۵٪ گزارش شد.

سوننداری و همکاران [۵۰]، یک خشک کن خورشیدی جابجایی اجباری را، با داشتن یک کلکتور حاوی لوله‌های تخلیه، برای خشک کردن کدو طراحی کردند. رطوبت کدو، در مقایسه با خشک شدن به شکل طبیعی، از ۹۱ به ۶/۲۵٪ در مدت ۶ ساعت کاهش یافت. این خشک کن خورشیدی، در شکل (۱-۱۳) نشان داده شده‌است.



شکل (۱-۱۳). خشک کن خورشیدی جابجایی اجباری با کلکتور حاوی لوله‌های تخلیه [۵۰]

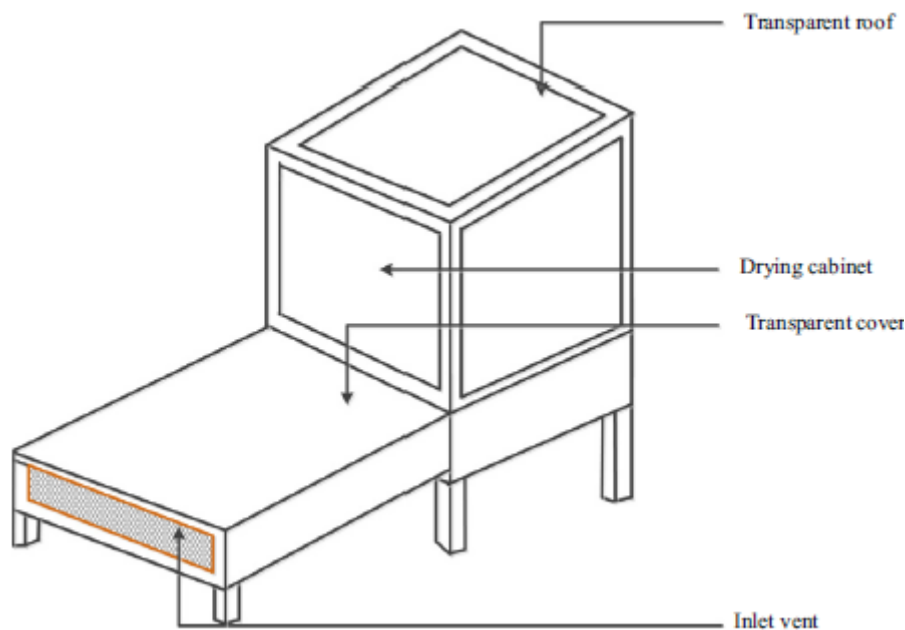
گاته آ [۵۱]، خشک کن خورشیدی غیرمستقیم، شامل: کلکتور با شیار V شکل را، برای خشک کردن ذرت طراحی کرد. مساحت کلکتور، ۲/۰۴ متر مربع و زاویه های شیب آن، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه بودند. عملکرد سیستم خشک کن خورشیدی به: تابش خورشیدی، زاویه شیب کلکتور و دمای محیط، وابسته است. خشک کن خورشیدی غیرمستقیم بکارگرفته شده در این طراحی، در شکل (۱۴-۱) نشان داده شده است.



شکل (۱۴-۱). خشک کن خورشیدی غیرمستقیم و کلکتور با شیار V شکل [۵۱]

۳-۴-۱ خشک کن خورشیدی هیبریدی

در خشک کن خورشیدی هیبریدی، عمل گرمایش مستقیم به وسیله تابش خورشید و پیش گرم کردن هوا به وسیله کلکتور خورشیدی، به شکل ترکیبی و همزمان انجام می شود. انرژی خشک کن خورشیدی هیبریدی، از پرتوهای خورشیدی که از طریق کلکتور وارد می شوند؛ بدست می آید. سطح داخلی کلکتور، به رنگ سیاه است و پرتوهای خورشیدی، با به دام انداختن گرمای هوایی که در داخل محفظه جمع می شود؛ مهار می شوند. همچنین، این خشک کن ها، توانایی لازم برای خشک کردن بهتر محصولات و رساندن آن ها به سطح رطوبت مطلوب را، دارا می باشند. نمونه ای از یک خشک کن خورشیدی هیبریدی، در شکل (۱۵-۱) نشان داده شده است [۵۲].

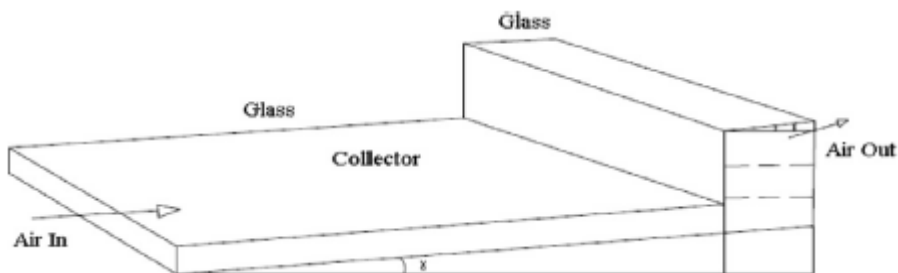


شکل (۱-۱۵). خشک کن خورشیدی هیبریدی [۵۲]

متوسط بازده کلکتور، در خشک کن های خورشیدی هیبریدی ۶۲/۵٪ است. بازده خشک کن خورشیدی هیبریدی، از ۱۷ تا ۲۹٪ متغیر است که می توان، با استفاده از تکنیک های خاصی، مانند: صفحه رفلکتور، اثرات لعاب، چرخش هوای در حال خشک شدن و...، آن را افزایش داد [۵۲].

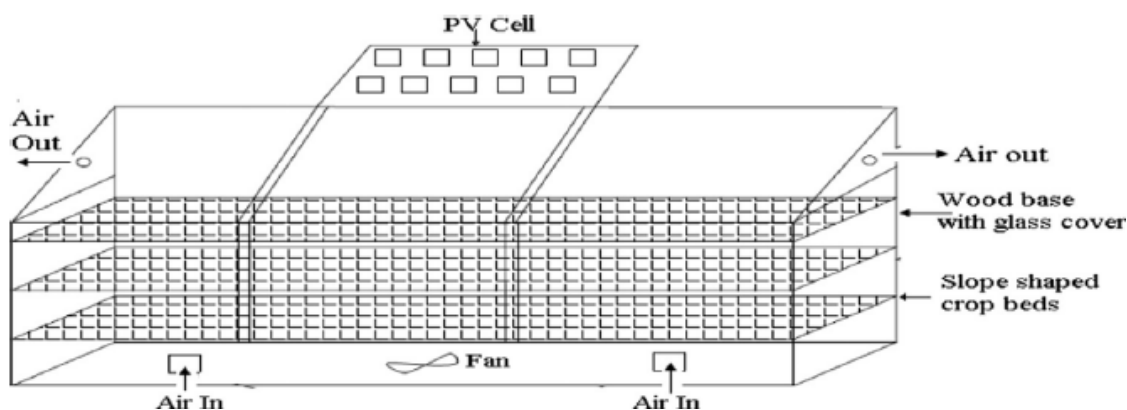
بلاچی و اولالوسی [۵۳]، عملکرد خشک کن خورشیدی هیبریدی را، برای خشک کردن چیبس بررسی کردند. طبق نتایج، دبی خشک کردن، بازده کلکتور و درصد رطوبت حذف شده (بر رطوبت پایه) به ترتیب، ۰/۶۲ کیلوگرم بر ثانیه، ۵۷/۵٪ و ۸۵/۴٪ بود.

سیمیت و همکاران [۵۴]، یک پژوهش آزمایشگاهی در مورد خشک کردن جابجایی طبیعی ذرت، با خشک کن های هیبریدی و غیرمستقیم انجام دادند. طول کلکتور برای خشک کن هیبریدی، به علت: خشک شدن اضافی از طریق تابش مستقیم در ظرفیت یکسان، کوتاه تر از کلکتور خشک کن غیرمستقیم بود. همچنین، هزینه کلی خشک کردن برای خشک کن هیبریدی، بیشتر از خشک کن غیرمستقیم گزارش شد. نمونه ای از خشک کن هیبریدی جابجایی طبیعی، در شکل (۱-۱۶) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۶). خشک کن خورشیدی هیبریدی جابجایی طبیعی [۵۴]

ژورایف و آخاتوف [۵۵]، یک خشک کن خورشیدی هیبریدی جابجایی اجباری را طراحی کردند. از این خشک کن، می توان به عنوان گلخانه در فصل زمستان و به عنوان یک خشک کن خورشیدی، در طول بقیه سال استفاده کرد. هزینه کلی خشک کن، به دلیل استفاده از پنل خورشیدی و فن برای جابجایی اجباری، به طور قابل توجهی بالا می باشد. نمونه ای از خشک کن خورشیدی هیبریدی جابجایی اجباری، در شکل (۱-۱۷) نشان داده شده است.



شکل (۱-۱۷). خشک کن خورشیدی هیبریدی جابجایی اجباری [۵۵]

۵-۱ مقایسه انواع خشک کن های خورشیدی با یکدیگر

تجزیه و تحلیل فنی و اقتصادی خشک کن خورشیدی، یک اصل مهم برای امکان سنجی کلی طراحی یک سیستم می باشد. این تجزیه و تحلیل، به فاکتورهای زیادی از جمله: خصوصیات فیزیکی محصول، شرایط آب و هوایی خشک شدن، کارایی طراحی، بازده سیستم، هزینه عملیاتی و نگهداری، بستگی دارد. بنابراین، مقایسه خشک کن های خورشیدی با یکدیگر و انتخاب مناسب آن ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این بخش، به مقایسه انواع خشک کن های خورشیدی و بررسی هایی که محققین، به

شکل مقایسه‌ای انجام دادند؛ خواهیم پرداخت.

خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم، با کنترل بهتر پارامترهای خشک کردن، نسبت به خشک‌کن‌های مستقیم موثرتر هستند. بازده کلکتور در خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم، بین ۱۸ تا ۴۰٪ بسته به دماهای مختلف هوا برای خشک کردن، متغیر می‌باشد. بازده متوسط خشک‌کن‌های خورشیدی غیرمستقیم، بین ۱۳ تا ۲۵٪ متغیر است که نسبت به خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم، کمتر است. اما، کیفیت محصول خشک شده در خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، بهتر از خشک‌کن خورشیدی مستقیم است [۵۶].

سانوسی و همکاران [۵۷]، عملکرد خشک‌کن‌های خورشیدی مستقیم و غیرمستقیم را، برای خشک کردن گوجه‌فرنگی بررسی و با یکدیگر مقایسه کردند. طبق نتایج، خشک‌کن خورشیدی مستقیم، بیشترین کاهش رطوبت را داشت و همچنین، بیشترین تغییر دمایی را نسبت به خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، داشت.

راجاگوپال و همکاران [۵۸]، عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری را با حالت جابجایی طبیعی، برای خشک کردن نارگیل، با یکدیگر مقایسه کردند. مشاهده شد که زمان خشک شدن در حالت جابجایی اجباری، کمتر از حالت جابجایی طبیعی بود.

ناهار و همکاران [۵۹]، عملکرد خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم را با خشک‌کن مستقیم، جهت خشک کردن سبزیجات، با یکدیگر مقایسه و بررسی کردند. طبق نتایج، زمان خشک شدن در خشک‌کن مستقیم، ۲۰٪ بیشتر نسبت به خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم بود. اما، کیفیت محصولات، در خشک‌کن غیرمستقیم بهتر از خشک‌کن مستقیم بود.

آزاد و همکاران [۶۰]، عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی هیبریدی را با خشک‌کن غیرمستقیم، برای خشک کردن انگور، با یکدیگر مقایسه و بررسی کردند. پس از پنج روز، ظرفیت رطوبت در خشک‌کن هیبریدی از ۸۱/۷ به ۳۶/۷٪ کاهش یافت. همچنین، کیفیت محصول خشک شده، در حالت هیبریدی نسبت به حالت غیرمستقیم، بهتر بود.

۱-۶ نتیجه گیری

با توجه به اینکه، رطوبت موجود در مواد غذایی، با گذر زمان، باعث ایجاد فساد در مواد غذایی می شود و همچنین، محدود بودن منابع انرژی تجدیدناپذیر، خشک کردن محصولات کشاورزی با کمک انرژی خورشیدی، به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، دارای اهمیت می باشد. طبق شواهد، از گذشته تا کنون، روش خشک کردن زیر نور مستقیم خورشید، بسیار ارزان بوده و هیچ هزینه ای ندارد. اما، کیفیت محصول، در چنین سیستم هایی بسیار ضعیف است و از این رو، قادر به رقابت با استانداردهای بازار نیست. از طرف دیگر، خشک کن های خورشیدی، یک دستگاه خشک کننده مؤثر، با کارایی ساده و قادر به خشک کردن محصولات، با کیفیت مطلوب است. همچنین، هزینه سرمایه گذاری آن ها، مطلوب می باشد.

خشک کن های خورشیدی به لحاظ حرکت هوا، به دو دسته جابجایی طبیعی و جابجایی اجباری تقسیم می شوند و هر کدام از آن ها به لحاظ ساز و کار به سه دسته خشک کن خورشیدی مستقیم، غیرمستقیم و هیبریدی طبقه بندی می شوند.

با توجه به نتایج تحقیقات گذشته، خشک کن های جابجایی طبیعی، به حداقل هزینه، برای کنترل دمای خشک کردن نسبت به حالت جابجایی اجباری، نیاز دارند. همچنین، خشک کن های جابجایی طبیعی، به شدت به شرایط جوی وابسته هستند و نیروی شناوری، برای انتقال جریان هوا کم می باشد و باعث کاهش کیفیت محصول، در این خشک کن ها می شود. اما، در خشک کن های خورشیدی جابجایی اجباری، بازده خشک شدن و کیفیت محصولات، نسبت به جابجایی طبیعی مطلوب تر می باشد.

خشک کن خورشیدی هیبریدی، در دنیای تکنولوژی امروزی، بهترین وسیله برای خشک کردن سریع محصولات کشاورزی، با کیفیت بالا و بازده مطلوب است. اما، خشک کن هیبریدی، دارای هزینه بالایی نسبت به سایر خشک کن ها است. خشک کن خورشیدی مستقیم نیز، معمولاً در مناطقی که تابش مستقیم خورشید وجود دارد؛ استفاده می شود و از محصل، در برابر آوار، باران و... محافظت می کند. اما،

گرمای بیش از حد به محصول در این خشک‌کن‌ها، باعث کاهش کیفیت محصول می‌شود. در خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم نیز، به علت جمع شدن گرمای خورشید در کلکتور، محصولات با کیفیت مطلوبی خشک می‌شوند. بازده این خشک‌کن‌ها، نسبت به بازده خشک‌کن‌های مستقیم، کم می‌باشد ولی، کیفیت محصولات خروجی، بهتر می‌باشد. ایجاد مسیرهای دابل، گردش هوای داغ، صفحه V شکل در کلکتورهای خورشیدی غیرمستقیم، موجب بهبود عملکرد سیستم می‌شود. بطور کلی، این نوع خشک‌کن‌ها، برای محصولاتی که در آن نیاز به زمان کمی برای خشک کردن می‌باشد؛ مناسب هستند.

خشک‌کن‌های خورشیدی، علاوه بر مزیت ارزان بودن که نسبت به خشک‌کن‌ها با سوخت فسیلی دارند؛ عیب‌ها و نقص‌هایی نیز دارند. ماهیت متناوب خورشید به عنوان منبع اصلی، یکی از مهم‌ترین مشکلات خشک‌کن‌های خورشیدی می‌باشد. این مورد، باعث کاهش بازده خشک‌کن خورشیدی، در ساعاتی که خورشید در دسترس نمی‌باشد؛ می‌شود. محققین و متخصصین، از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، برای حل این مشکل استفاده می‌کنند. آن‌ها برای این کار، از ماسه، شن و همچنین مواد تغییر فاز دهنده^۱، استفاده می‌کنند. در فصل آینده، به انواع روش‌های ذخیره‌سازی انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی، در ساعات در دسترس بودن خورشید و بکارگیری آن، در ساعات در دسترس نبودن خورشید، می‌پردازیم. همچنین، توضیحاتی راجب ویژگی‌ها و خصوصیات مواد تغییر فاز دهنده، به عنوان یکی از ابزارهای ذخیره‌سازی انرژی، به شکل مفصل شرح می‌دهیم.

^۱Phase Change Material (PCM)

فصل ۲

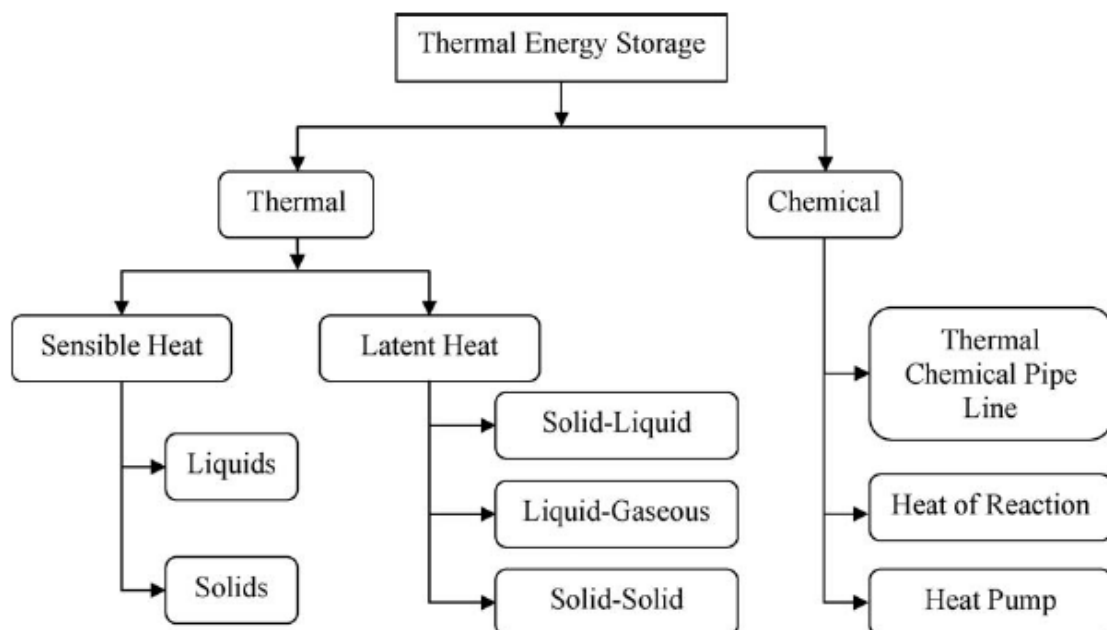
ذخیره‌سازی انرژی در خشک‌کن‌های خورشیدی

۱-۲ مقدمه

در مباحث فصل گذشته، به اهمیت انرژی خورشیدی، در خشک کردن محصولات کشاورزی و جایگزینی آن به جای منابع سوخت‌های فسیلی، به دلیل ارزان بودن انرژی‌های تجدیدپذیر، پرداخته شد. همچنین، کاربرد انرژی خورشیدی در خشک‌کن‌ها، جهت خشک کردن محصولات کشاورزی شرح داده شد. اما، این خشک‌کن‌ها، به علت: ماهیت متناوب خورشید در ساعات شبانه‌روز، باعث کاهش بازده خشک کردن، کیفیت نامطلوب محصول و عدم ثابت ماندن دما در حین خشک کردن، در ساعاتی که خورشید در دسترس نمی‌باشد؛ می‌شوند. استفاده از خشک‌کن‌های خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، برای خشک کردن در دمای ثابت، یک راهکار برای حل این مشکل می‌باشد. ذخیره‌سازی انرژی، زمان بین تامین انرژی و تقاضای انرژی را کاهش می‌دهد. مواد غذایی، در اواخر غروب، با کمک سیستم ذخیره‌سازی خشک می‌شوند. در حالی که خشک کردن در اواخر شب، با خشک‌کن معمولی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

۲-۲ ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی

ذخیره‌سازی انرژی، مساله‌ای کلیدی است که برای منابع انرژی متناوب، مانند: انرژی خورشیدی، باید بین عرضه انرژی و تقاضای انرژی، مطابقت داده شود. فناوری‌های متعددی برای ذخیره‌سازی انرژی در اشکال مختلف، از جمله: انرژی مکانیکی، الکتریکی و حرارتی وجود دارد. انرژی گرمایی را می‌توان بطور کلی، در مایعات یا جامدات عایق شده، به شکل: گرمای محسوس و گرمای نهان ذخیره کرد. بخش‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، در شکل (۱-۲) نشان داده شده است [۶۱].



شکل (۱-۲). انواع مختلف ذخیره‌سازی حرارتی انرژی خورشیدی [۶۱]

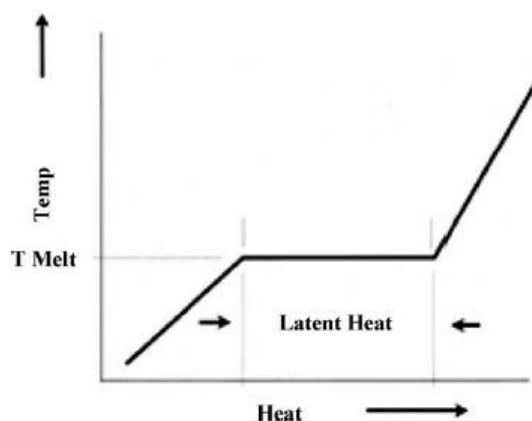
انرژی حرارتی در ذخیره‌سازی گرمای محسوس (SHS^1)، با بالا رفتن دمای یک ماده جامد یا مایع و با استفاده از ظرفیت حرارتی ماده، ذخیره می‌شود. مقدار گرمای ذخیره شده، به: ظرفیت حرارت ویژه، تغییر دما و میزان مواد ذخیره‌سازی، بستگی دارد.

مواد ذخیره‌سازی حرارتی، مانند: ماسه، سنگ‌ریزه، سنگ آهک، بتن، آجر و...، عموماً برای ذخیره‌سازی گرمای محسوس بکار می‌روند. آب، یکی از بهترین مواد ذخیره‌کننده گرمای محسوس می‌باشد. زیرا، ارزان بوده و دارای گرمای ویژه مطلوبی است. همچنین، نمک‌های مذاب، روغن‌ها، فلزات مایع و...، از دیگر مواد ذخیره‌کننده گرمای محسوس می‌باشند که در دمای بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، استفاده می‌شوند [۶۲].

ذخیره گرمای نهان (LHS^2)، عبارت است از: جذب گرما یا آزاد شدن آن، هنگامی که یک ماده ذخیره‌سازی دچار تغییر فاز از جامد به مایع، یا مایع به گاز، یا برعکس، در دمای کم و بیش ثابت شود که نمودار دما، بر حسب حرارت داده شده به آن، در شکل (۲-۲) نشان شده است [۶۳].

¹Sensible Heat Storage

²Latent Heat Storage



شکل (۲-۲). تغییرات دما و گرما در طی تغییر فاز ماده [۶۳]

سیستم‌های حرارتی-شیمیایی، در یک واکنش شیمیایی کاملاً برگشت‌پذیر، به انرژی جذب شده یا آزاد شده، در شکستن و اصلاح پیوندهای مولکولی، وابسته هستند. در این حالت، گرمای ذخیره شده، به: میزان مواد ذخیره‌سازی، گرمای واکنش گرمازا و میزان تبدیل آن، بستگی دارد [۶۴].

از طرفی، خشک کردن، یک فرآیند ضروری در حفظ محصولات کشاورزی است. خشک کردن، تحت شرایط کنترل شده دما و رطوبت، به بهبود کیفیت محصولات غذایی کمک می‌کند. خشک کردن بسیاری از محصولات، مانند: غلات، در دمای ثابت، متوسط و به طور مداوم چند روز انجام می‌شود. در چنین حالتی، ذخیره‌سازی حرارتی، برای خشک شدن مداوم محصولات در خشک‌کن خورشیدی، مورد نیاز است. به طوری که امکان خشک شدن محصولات، در ساعاتی که نور خورشید در دسترس نمی‌باشد نیز، وجود داشته باشد [۶۵].

سیستم ذخیره‌سازی، در خشک‌کن‌های خورشیدی به گونه‌ای است که در ساعات تابش نور خورشید، حرارت ناشی از هوای گرم تابش خورشید را، جذب می‌کند (فرایند شارژ^۱) و در ساعاتی که تابش خورشید کم یا موجود نمی‌باشد؛ با آزاد کردن حرارت، باعث حفظ دمای متعادل محفظه خشک کردن می‌شود (فرایند تخلیه^۲) [۶۶].

^۱Charging Process

^۲Discharging Process

۲-۳ کاربرد ذخیره‌سازی حرارتی در خشک‌کن خورشیدی

توسعه خشک‌کن خورشیدی با سیستم ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، برای خشک کردن محصولات کشاورزی، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. همچنین، در ساعاتی که خورشید در دسترس نمی‌باشد؛ باعث جبران افت بازده خشک‌کن می‌شود. اخیراً، استفاده از سیستم ذخیره‌سازی گرما در خشک‌کن‌های خورشیدی، مورد توجه محققین قرار گرفته‌است. در طول زمان، تعداد زیادی از مواد تغییر فاز دهنده جامد-مایع، برای کاربردهای گرمایش و سرمایش، توسط محققین بررسی شده‌اند. در این بخش، به تحقیقات صورت گرفته، در حوزه سیستم ذخیره‌سازی حرارتی با استفاده از مواد ذخیره‌کننده گرمای محسوس و همچنین، با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، به عنوان ذخیره‌کننده گرمای نهان در خشک‌کن خورشیدی، جهت خشک کردن محصولات کشاورزی می‌پردازیم.

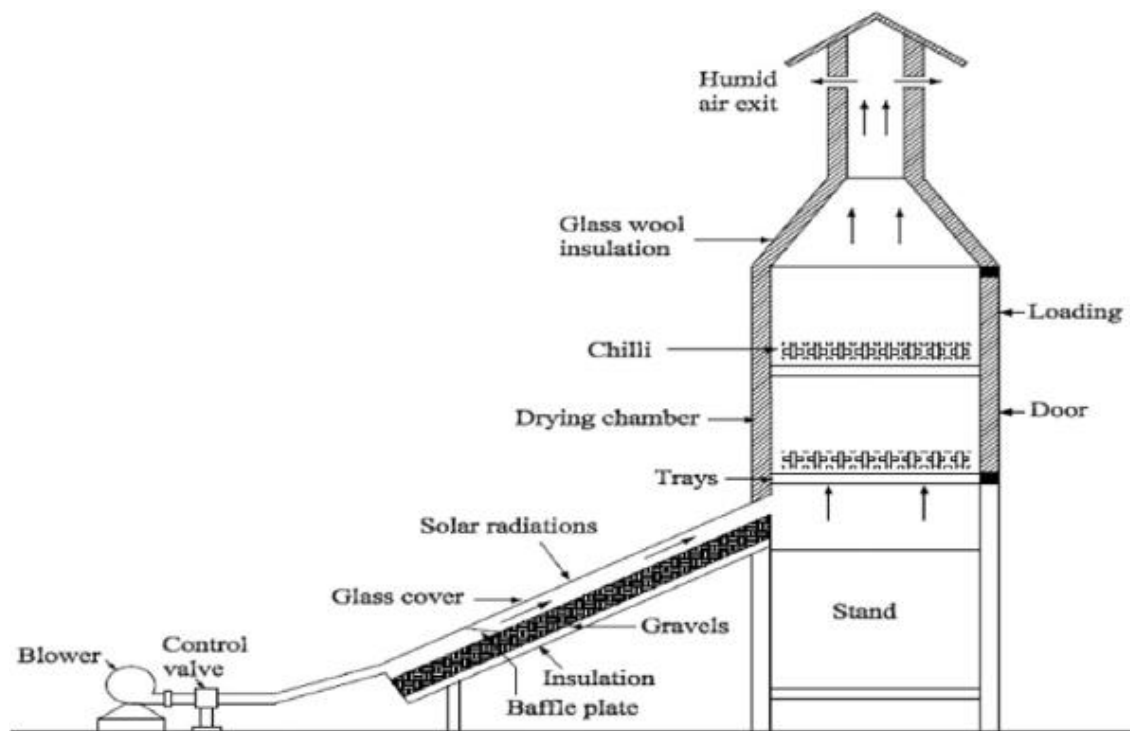
باتلر و تروئگر [۶۷]، به طور تجربی یک کلکتور خورشیدی را به همراه تخت سنگی، به عنوان ذخیره‌کننده حرارتی برای خشک کردن بادمزمینی، بررسی کردند. زمان خشک کردن، از ۲۲ تا ۲۵ ساعت طول کشید؛ تا میزان رطوبت را از ۲۰٪، به سطح رطوبت ایمن با دبی حجمی هوا ۴/۹ متر مکعب بر ثانیه، کاهش دهد.

السبایی و همکارانشان [۶۸]، تاثیر استفاده از ماسه، سنگ آهک و براده‌های آهن را به عنوان وسیله‌ای برای ذخیره‌سازی گرمای محسوس، بر عملکرد حرارتی یک هیتر هوای خورشیدی دو مسیره، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها، به این نتیجه رسیدند که بازده ترمو-هیدرولیکی هیتر با ماسه، حدود ۲۲-۲۷٪ بیشتر از حالت بدون ذخیره‌سازی است.

همچنین، السبایی و همکارانشان [۶۸]، یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم، با جابجایی طبیعی همراه با ماسه را به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند. تحقیق مذکور، به این نتیجه رسید که همراه با ماده ذخیره‌کننده گرمای محسوس، پس از ۶۰ ساعت به رطوبت نهایی محصول، و بدون آن، پس از ۷۲ ساعت به این مقدار می‌رسیم.

آیپان و مایلسامی [۶۹]، یک خشک‌کن خورشیدی جابجایی طبیعی را با مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس، برای خشک کردن نارگیل طراحی کردند. هنگامی که از سیستم ذخیره‌سازی استفاده شد؛ مقدار رطوبت، از ۵۲ به ۷/۲٪ بر رطوبت پایه، به مدت ۵۲ ساعت کاهش یافت. در حالی که این مقدار کاهش، هنگامی که از سیستم ذخیره‌سازی استفاده نشد؛ به مدت ۷۸ ساعت انجام شد. بازده خشک شدن در هر دو حالت، به طور متوسط ۱۸٪ گزارش شد.

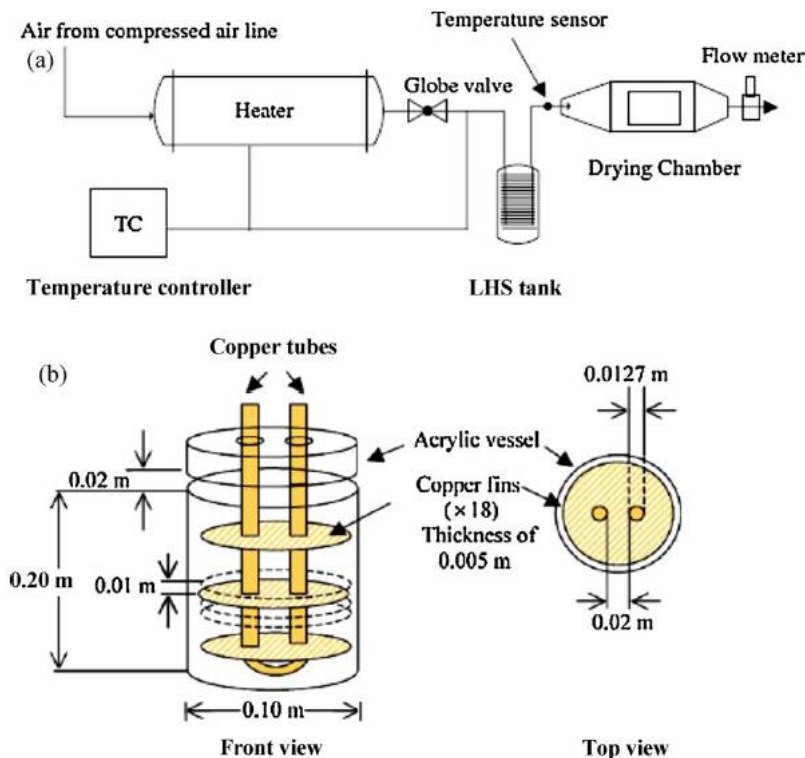
مهرانج و چاندراسکار [۷۰]، یک خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری را با مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس، برای خشک کردن فلفل طراحی کردند. مشاهده شد که هوا با دبی جرمی ۰/۲۵ کیلوگرم بر ثانیه، در ۲۴ ساعت رطوبت فلفل را به ۹/۱٪ وزنی کاهش داد. بازده متوسط خشک کردن، ۲۱٪ بدست آمد. خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری استفاده شده در این پژوهش، در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل (۳-۲). خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری با مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس [۷۰]

دواهستین و پیکوسوریکات [۷۱]، امکان استفاده از سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان با واکس پارافین را، در خشک‌کن‌های خورشیدی که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است؛ بررسی کردند. مخزن استفاده

شده در تحقیق مذکور، یک مخزن استوانه‌ای، به قطر ۰/۱۰ متر و ارتفاع ۰/۲۰ متر بود. هوای گرم شده توسط هیتر خورشیدی، از طریق مخزن ذخیره‌کننده گرمای نهان، در یک لوله مسی به قطر ۰/۱۲۷ متر که متصل به ۱۸ فین به قطر ۰/۰۸ متر، ضخامت ۰/۰۵ متر و فاصله بین دو فین مجاور ۰/۰۱ متر بود؛ جریان داشت. طبق نتایج آن‌ها، واکس پارافین به عنوان یک ماده تغییر فاز دهنده، برای حفظ انرژی خورشیدی اضافی در طول خشک کردن و انتشار آن، زمانی که انرژی خورشیدی ناکافی بوده یا موجود نبوده؛ مناسب می‌باشد. همچنین، بر سینتیک خشک کردن یک محصول غذایی (سیب‌زمینی شیرین)، تاثیر مطلوبی دارد. مشخصه‌های انتقال حرارت، پروفیل دما و نیز اثرات دما و سرعت هوای ورودی، در طول شارژ و تخلیه مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهده شد که ذوب شدن، توسط هدایت حرارتی و به دنبال آن، جابجایی آزاد صورت گرفت. ذوب شدن، از مرکز سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان به نقطه‌ای بسیار دور، در جهت شعاعی رخ داد و از بالا، به نقاط انتهایی در جهت محوری انجام شد. در حالی که تنها هدایت حرارتی، در فرآیند انجماد صورت گرفت. ماده تغییر فاز دهنده، از قسمت خارجی به قسمت داخلی مخزن ذخیره‌کننده گرمای نهان، به دلیل از دست دادن گرما به اطراف، منجمد شد. با افزایش دمای هوای ورودی و سرعت هوا، زمان شارژ کاهش یافت. همچنین، مقدار انرژی قابل استخراج، برای هر واحد دبی جرمی هوای ورودی از محیط، هنگامی که سرعت هوای ورودی ۱ متر بر ثانیه بود؛ ۱۹۲۰ کیلوژول دقیقه بر کیلوگرم و هنگامی که سرعت ۲ متر بر ثانیه بود؛ این مقدار، ۱۳۸۶ کیلوژول دقیقه بر کیلوگرم، گزارش شد. این سیستم ذخیره‌سازی گرمای نهان، توانست انرژی گرمایی را برای خشک کردن سیب‌زمینی، هنگامی که سرعت ورودی هوا ۱ متر بر ثانیه بود؛ حدود ۴۰٪ و برای سرعت ۲ متر بر ثانیه، حدود ۳۴٪ ذخیره کند.



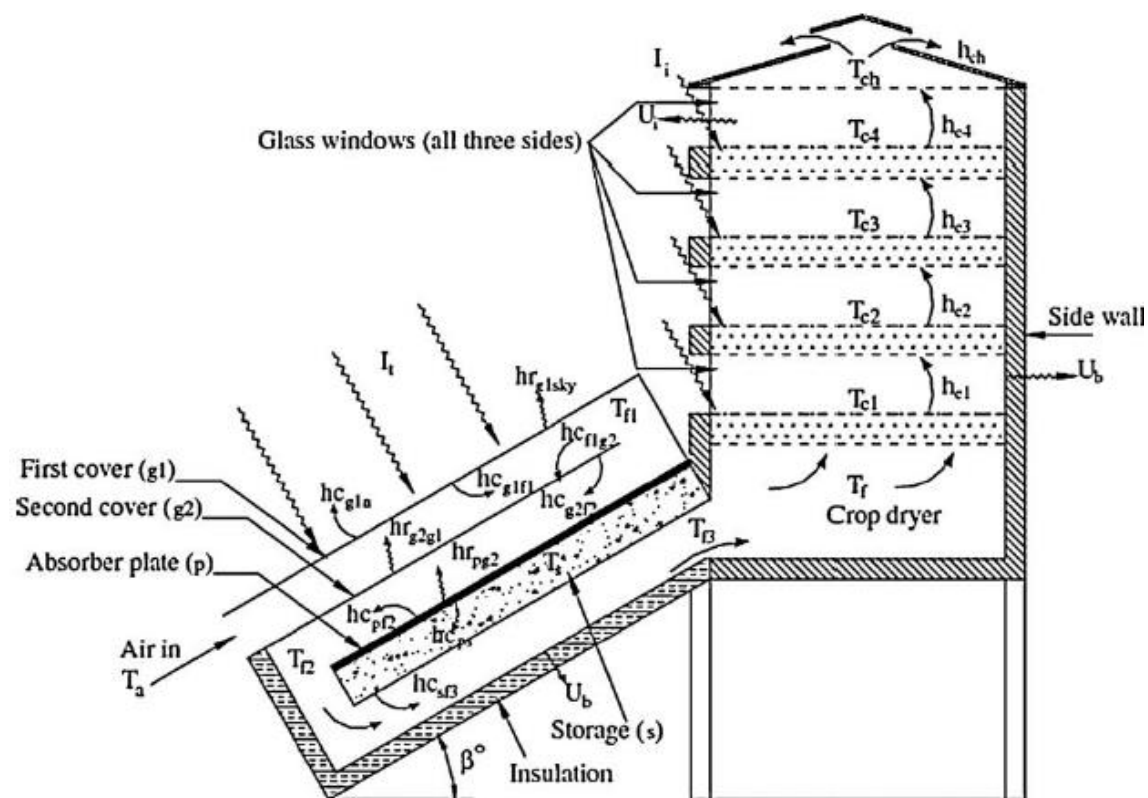
شکل (۲-۴). (a) نمای شماتیک تاسیسات آزمایشگاهی به همراه اتاق خشک کردن. (b) جزئیات طرح مخزن

ذخیره‌سازی گرمای نهان [۷۱]

بال و همکاران [۷۲]، یک خشک‌کن خورشیدی طراحی کردند که از واکس پارافین، به عنوان ماده تغییر فاز دهنده برای ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی در طول روز، استفاده می‌کند. در این تحقیق، از یک هوای داغ، در دمای نزدیک به خروجی کلکتور استفاده شد که در ساعاتی که انرژی خورشیدی در دسترس نیست؛ آزاد شود. تحقیق مذکور، به این نتیجه رسید که امکان خشک کردن محصولات غذایی، در دمای متوسط ۴۵-۷۰ درجه سانتی‌گراد وجود دارد.

ایساکیموتو و همکاران [۷۳]، خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیمی را، با مواد تغییر فاز دهنده بررسی کردند. در این تحقیق، از کلکتور خورشیدی مسیر دوگانه چین‌دار V شکل که از سه پنل ساخته شده بود؛ استفاده شد. کف و دو طرف کلکتور و مخزن ذخیره‌سازی، عایق‌بندی شدند و مواد تغییر فاز دهنده، در کپسول‌های کروی پر شدند و در داخل مخزن ذخیره‌سازی قرار گرفتند. طبق نتایج، بازده کلکتور با افزایش دبی، زیاد می‌شود که این زیاد شدن، به علت: کاهش اتلافات حرارتی، همراه با کاهش میانگین دمای کلکتور است.

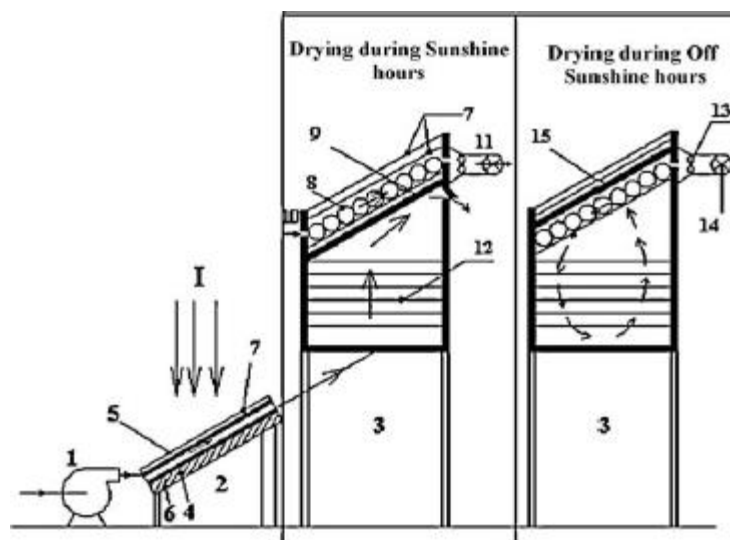
جین [۷۴]، یک تحلیل دوره‌ای راجع به خشک کردن محصولات، با چند سینی که به یک هیتر هوای خورشیدی چند مسیره مورب، با ذخیره‌سازی حرارتی گرمای نهان، متصل بود؛ جهت خشک کردن برنج، انجام داد. دمای محصول، با افزایش معقول طول کلکتور، عرض و زاویه انحراف، افزایش می‌یابد. مشاهده شد که مقدار رطوبت محصول، با زمان خشک کردن در روز کاهش یافت. به دلیل تغییر دمای محصول در سینی‌های مختلف خشک‌کن، نرخ خشک شدن متفاوتی مشاهده شد. همچنین، بازده حرارتی خشک کردن، با افزایش جرم محصول بیشتر شد. خشک‌کن با چند سینی، همراه با هیتر خورشیدی چند مسیره مورب با ذخیره‌سازی حرارتی، در شکل (۲-۵) نشان داده شده‌است.



شکل (۲-۵). خشک‌کن با چند سینی، همراه با هیتر خورشیدی چند مسیره مورب، با ذخیره‌سازی حرارتی [۷۴]

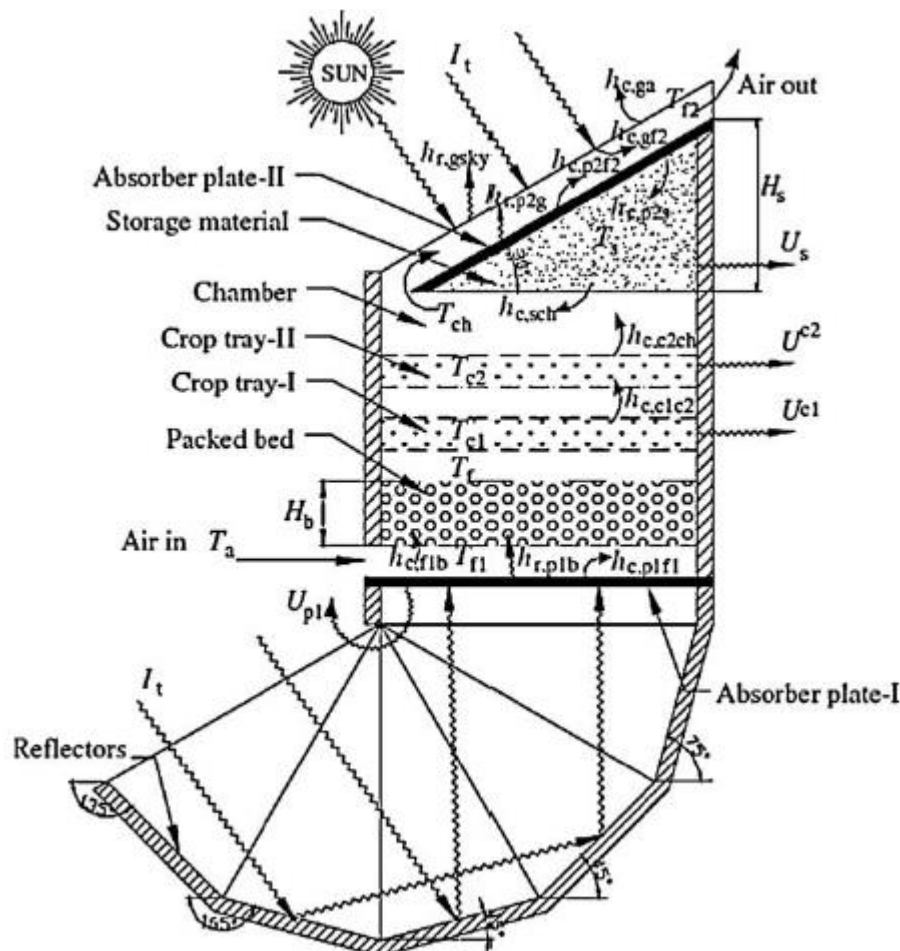
الکیلانی و همکاران [۷۵]، دمای خروجی هوا را در یک هیتر خورشیدی با مواد تغییر فاز دهنده، در فرایند تخلیه، برای هشت دبی بررسی کردند. در این تحقیق، از کامپوزیت‌های واکس پارافین، به عنوان مواد تغییر فاز دهنده و از پودر آلومینیوم، برای افزایش انتقال حرارت استفاده شد. مشاهده شد که برای دبی ۰/۰۵ کیلوگرم بر ثانیه، مدت زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده، حدود ۸ ساعت می‌باشد. نتیجه

گرفته شد که دبی جرمی جریان، بطور معکوس با زمان انجماد مواد تغییر فاز دهنده، متناسب است. شانموگام و ناتاراجان [۷۶]، عملکرد خشک کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری را، برای خشک کردن برش‌های آناناس و نخود سبز، با آینه منعکس کننده و بدون آن را بررسی کردند. این سیستم، در دو حالت یعنی: ساعاتی که خورشید در دسترس بود و ساعاتی که خورشید خارج از دسترس بود؛ کار می‌کرد. در ساعات در دسترس بودن خورشید، هوای گرم از کلکتور صفحه تخت، به محفظه خشک کردن جهت خشک کردن محصول به شکل اجباری، فرستاده شد و همزمان بستر خشک کن، تابش خورشیدی را مستقیم و از طریق آینه منعکس کننده، دریافت کرد. در ساعاتی که خورشید خارج از دسترس بود؛ خشک کن، با گردش هوا در داخل محفظه خشک کردن، توسط یک فن برگشت پذیر در بستر خشک کن، مانع از ایجاد دمای نامطلوب شد. قرار دادن آینه منعکس کننده روی بستر خشک کن، پتانسیل خشک شدن را ۲۰٪ افزایش داد. افزایش دما مفید با آینه، در حدود ۱۰ درجه سانتی گراد انجام شد که زمان خشک شدن را برای نخود سبز و آناناس، به ترتیب ۲ و ۴ ساعت کاهش داد. همچنین، بازده بازیافت، نرخ خشک شدن و بازده حرارتی به طور متوسط، نسبتاً بیشتر شد. در شکل (۲-۶)، اجزای این خشک کن و آینه منعکس کننده نشان داده شده است.



شکل (۲-۶). نمای کلی سیستم خشک کن خورشیدی، شامل: ۱-دمنده، ۲-کلکتور خورشیدی صفحه تخت، ۳-اتاق خشک کردن، ۴-عایق کاری، ۵-صفحه جاذب، ۶-صفحه پایینی، ۷-پوشش شفاف، ۸-بستر، ۹-تخته سه لا، ۱۰-ورودی هوا، ۱۱-مجرا برای خروجی هوا، ۱۲-سینی‌های خشک کردن، ۱۳-فن برگشت پذیر، ۱۴-شیر، ۱۵-تخته سه لا [۷۶]

جین [۷۷]، یک مدل تحلیلی گذرا را ارائه داد تا عملکرد یک خشک‌کن خورشیدی را، با داشتن یک صفحه کلکتور جاذب معکوس و ذخیره حرارتی با جریان طبیعی هوا را، بررسی کند. عملکرد این خشک‌کن با بستر پر شده، برای خشک کردن پیاز که روی سینی قرار گرفته بود؛ بررسی شد. دمای محصول، به عرض کانال جریان هوا و ارتفاع بستر پر شده، بستگی داشت. ذخیره‌سازی انرژی گرمایی، بر خشک شدن در طول ساعاتی که خورشید نبود؛ تاثیرگذار بود و در کاهش نوسانات دما برای خشک کردن، بسیار مناسب بود. مدل ریاضی پیشنهاد شده در این تحقیق، برای ارزیابی عملکرد کلکتور، با صفحه جاذب معکوس و ذخیره حرارتی، با خشک‌کن خورشیدی جابجایی طبیعی، مفید بود. همچنین، این مدل ریاضی، برای پیش‌بینی دمای محصول، میزان رطوبت و میزان خشک شدن محصول، مناسب بود. شکل (۷-۲)، خشک‌کن و مدل ارائه شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۲). شماتیک خشک‌کن خورشیدی جابجایی طبیعی با ذخیره گرمایی، همراه با جاذب برگشت‌پذیر [۷۷]

با توجه به بررسی‌های محققین، در مورد کاربرد ذخیره‌سازی حرارتی در خشک‌کن‌های خورشیدی که در این بخش، به آن پرداخته شد؛ ذخیره‌سازی گرمای نهان، از اهمیت بیشتری نسبت به ذخیره‌سازی گرمای محسوس، برخوردار است. این مورد، نشان دهنده مزیت و برتری ذخیره‌سازی گرمای نهان، نسبت به گرمای محسوس می‌باشد که در بخش بعدی، به آن خواهیم پرداخت.

۴-۲ مزایای ذخیره‌سازی گرمای نهان به ذخیره‌سازی گرمای محسوس

در میان تکنیک‌های ذخیره‌سازی حرارتی، ذخیره‌سازی انرژی گرمای نهان، به دلیل توانایی آن برای ذخیره‌سازی چگالی بالای انرژی در جرم واحد یا حجم واحد، در یک فرآیند ایزوترمال، از اهمیت بالایی برخوردار است. در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان، دمای متوسط از زمانی که وارد یک تغییر فاز می‌شود؛ کم و بیش ثابت باقی می‌ماند. در سیستم‌های ذخیره‌سازی کوچک، ذخیره‌سازی تغییر فاز با چگالی بالای انرژی، اهمیت زیادی دارند. مزیت اصلی استفاده از ذخیره‌سازی گرمای محسوس، هزینه کم آن در مقایسه با ذخیره گرمای نهان است. گرمای محسوس ذخیره شده را، نمی‌توان در دمای ثابت تحویل داد. زیرا، موجب کاهش بازده سیستم ذخیره‌سازی می‌شود که این مورد، جز معایب اصلی ذخیره‌سازی گرمای محسوس می‌باشد [۷۸].

با توجه به مزیت ذخیره‌سازی گرمای نهان به گرمای محسوس و اهمیت مواد تغییر فاز دهنده، به عنوان مواد ذخیره‌کننده گرمای نهان، در بخش بعدی به بررسی خواص و طبقه‌بندی این مواد می‌پردازیم.

۵-۲ مواد تغییر فاز دهنده (PCM)

مواد تغییر فاز دهنده، موادی با ترکیبات آلی یا معدنی هستند که قابلیت جذب و ذخیره پنهان مقادیر زیادی از انرژی گرمایی را، درون خود دارند. مواد تغییر فاز دهنده در دمای ثابت، گرما را جذب یا ساطع

^۱Phase Change Material

می‌کنند. آن‌ها ۵ تا ۱۴ برابر، گرمای بیشتری را نسبت به مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس، مانند: آب، سنگ و ماسه، ذخیره می‌کنند. ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی آن‌ها، در جرم واحد یا حجم واحد با اختلاف دمای کم، زیاد می‌باشد. همچنین، گرادیان دمای آن‌ها در طول فرایند شارژ و تخلیه، کوچک می‌باشد [۷۹].

تغییر فاز، به شکل جامد-جامد، جامد-مایع، جامد-گاز، مایع-گاز و بالعکس می‌باشد. در انتقال جامد-جامد، ماده از یک کریستال، به یک کریستال دیگر تبدیل می‌شود و گرما را ذخیره می‌کند. این انتقال‌ها به طور کلی، گرمای نهان اندک و تغییرات حجم کوچک، نسبت به انتقال جامد-مایع دارند. مواد تغییر فاز دهنده جامد-جامد، ظرفیت مورد نیاز در طراحی را، با دقت کمتر و انعطاف‌پذیری بیشتری ارائه می‌کنند [۸۰].

انتقال گاز-جامد و گاز-مایع، انتقال فاز بهتری بوسیله گرمای نهان، نسبت به انتقال جامد-جامد دارند. اما، تغییرات حجم آن‌ها زیاد بوده و در حین انتقال فاز، مشکلاتی مانند: مهار آن‌ها وجود دارد. تغییرات بزرگ در حجم، باعث ایجاد سیستم پیچیده و غیرعملی می‌شود [۸۱].

تغییرات جامد-مایع نسبت به مایع-گاز، گرمای نهان کمتری دارند. این تحولات، تنها شامل یک تغییر کوچک (۱۰٪ یا کمتر) در حجم است. ثابت شده است که انتقال جامد-مایع، برای استفاده در سیستم‌های ذخیره انرژی گرمایی، از نظر اقتصادی به صرفه است.

مواد تغییر فاز دهنده را نمی‌توان به عنوان واسطه انتقال حرارت، مورد استفاده قرار داد. یک محیط انتقال حرارت جداگانه با مبدل حرارتی، بین انتقال انرژی از منبع به مواد تغییر فاز دهنده و از مواد تغییر فاز دهنده به محصول، باید در نظر گرفته شود. به دلیل ضریب نفوذ حرارتی پایین در مواد تغییر فاز دهنده، مبدل حرارتی باید به شکل مخصوصی طراحی شود. به دلیل تغییر حجم مواد تغییر فاز دهنده در ذوب، نیاز به بررسی حجم مخصوص محفظه، نسبت به کل ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد. همچنین، این طراحی، باید قادر به پذیرش این تغییرات حجم باشد و با ماده تغییر فاز دهنده بکار رفته، سازگار باشد. نقطه ذوب ماده تغییر فاز دهنده بکار رفته شده در طراحی، باید در محدوده دمایی متناسب

با طراحی باشد. همچنین، سطح مبدل حرارتی، باید مطلوب باشد و سطح محفظه، باید با ماده تغییر فاز دهنده سازگار باشد [۸۲].

۲-۵-۱ ذخیره‌سازی گرمای نهان در مواد تغییر فاز دهنده

در توسعه سیستم ذخیره‌سازی حرارتی گرمای نهان، سه مورد اساسی وجود دارد که عبارتند از: مواد تغییر فاز دهنده، جنس محفظه‌ها و مبدل‌های حرارتی. مواد تغییر فاز دهنده، مواد ذخیره‌سازی گرمای نهان هستند. آن‌ها برای ذخیره و رها کردن گرما، از پیوندهای شیمیایی استفاده می‌کنند. انتقال انرژی حرارتی، هنگامی اتفاق می‌افتد که پیوندهای شیمیایی، با مواد متلاشی می‌شوند. زیرا، مواد تغییر فاز دهنده، از یک جامد به یک مایع یا از یک مایع به یک جامد، تغییر می‌کند. این تغییر حالت را، فاز می‌گویند. در ابتدا، مواد تغییر فاز دهنده مایع-جامد، مانند مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس عمل می‌کنند. دمای آن‌ها، هنگامی که گرما را جذب می‌کنند؛ افزایش می‌یابد. برخلاف مواد ذخیره‌سازی گرمای محسوس، هنگامی که مواد تغییر فاز دهنده به درجه حرارت تغییر فاز می‌رسند (نقطه ذوب شدن آن‌ها)؛ مقدار زیادی گرما را بدون اینکه داغ‌تر شوند؛ جذب می‌کنند. گرمای ذخیره شده در طی فرآیند تغییر فاز ماده، گرمای نهان نام دارد. از آنجا که تغییر فاز در دمای ثابت، کمی زمان می‌برد؛ می‌توان تغییرات دما را یکسان در نظر گرفت. وقتی دمای محیط اطراف ماده تغییر فاز دهنده افت می‌کند؛ ماده تغییر فاز دهنده، سفت می‌شود و گرمای نهان ذخیره‌شده را آزاد می‌کند [۸۳].

مواد تغییر فاز دهنده، از گرمای نهان استفاده می‌کنند که می‌توانند، گرما را ذخیره کنند یا در محدوده دمایی کوچک، آن را آزاد کنند. مواد تغییر فاز دهنده، دارای توانایی تغییر حالت خود، با محدوده دمایی مشخص است. این مواد، در طی فرآیند گرمایش، به علت: رخ دادن تغییر فاز، انرژی را جذب می‌کنند و در طول فرآیند خنک‌سازی، انرژی را در دامنه تغییر فاز، به شکل معکوس به محیط می‌دهند [۸۴].

ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، در تغییر فاز جامد به مایع با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده، به دلیل مزایایی که دارند؛ مورد توجه بسیاری از سیستم‌های خورشیدی قرار گرفته است. این مزایا، عبارتند از:

تغییر فاز، شامل مواد تغییر فاز دهنده‌ای است که ظرفیت ذخیره‌سازی حرارتی بالایی دارند. مواد تغییر فاز دهنده، در دمای تقریباً ثابت، ذوب و منجمد می‌شوند. همچنین، حجم کمی برای یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی نهان، مورد نیاز است که منجر می‌شود؛ تلفات حرارتی سیستم، در یک سطح منطقی، در طول فرایند شارژ و تخلیه گرما، حفظ شود [۸۵]. در بخش‌های بعدی، برای انتخاب ماده تغییر فاز دهنده مناسب، به بررسی خواص مطلوب برای این مواد، می‌پردازیم. در نهایت، دسته‌بندی‌های مختلف این مواد، شرح داده می‌شود.

۲-۶ خواص مواد تغییر فاز دهنده

تعداد زیادی از مواد تغییر فاز دهنده، با حرارت در هر محدوده دمایی مورد نیاز، ذوب می‌شوند. با این حال، این مواد، برای بکارگیری به عنوان مواد ذخیره‌سازی گرمای نهان، باید: خواص شیمیایی، سینتیک و فیزیکی مطلوبی داشته باشند. علاوه بر این، ملاحظات اقتصادی این مواد، در مقیاس بزرگ نیز بسیار مهم است. در ادامه، به شرح خواص مواد تغییر فاز دهنده‌ای که در طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی، مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ می‌پردازیم.

از لحاظ خواص حرارتی، مواد تغییر فاز دهنده باید در محدوده دمایی عملیاتی، دمای مناسبی برای انتقال فاز (دمای ذوب) داشته باشد. برای به حداقل رساندن اندازه فیزیکی مخزن ذخیره‌سازی، این مواد باید دارای ظرفیت بالای گرمای محسوس و نهان ناشی از ذوب باشند. جهت ایجاد ذخیره‌سازی گرمای محسوس، گرمای ویژه بالا مورد نیاز است. رسانایی حرارتی بالا در هر دو فاز جامد و مایع، به شارژ و تخلیه بهتر انرژی کمک می‌کند [۸۶].

چگالی به عنوان خواص فیزیکی مواد تغییر فاز دهنده، باید بالا باشد؛ بطوری که مخزن، حجم کمتری از آن را در خود جای دهد. همچنین، تغییرات حجم آن باید در حین تغییر فاز، کم باشد. جهت کاهش مشکلات کنترل، از مواد با فشار بخار کم در دمای کار استفاده شود. برای ظرفیت ذخیره‌سازی ثابت، در هر چرخه انجماد و ذوب، نیاز به مواد تغییر فاز دهنده با فاز پایدار می‌باشد [۸۶-۸۷].

از دید خواص سینتیکی، برای جلوگیری از ایجاد حالت سرمای بیش از حد (سوپر کولینگ^۱) فاز مایع، نیاز به مواد با نرخ هسته‌ای بالا می‌باشد. همچنین، برای پاسخگویی نیازهای بازیابی حرارت از سیستم ذخیره‌سازی، نرخ رشد ساختار کریستالی مواد تغییر فاز دهنده، باید بالا باشد [۸۶-۸۷].

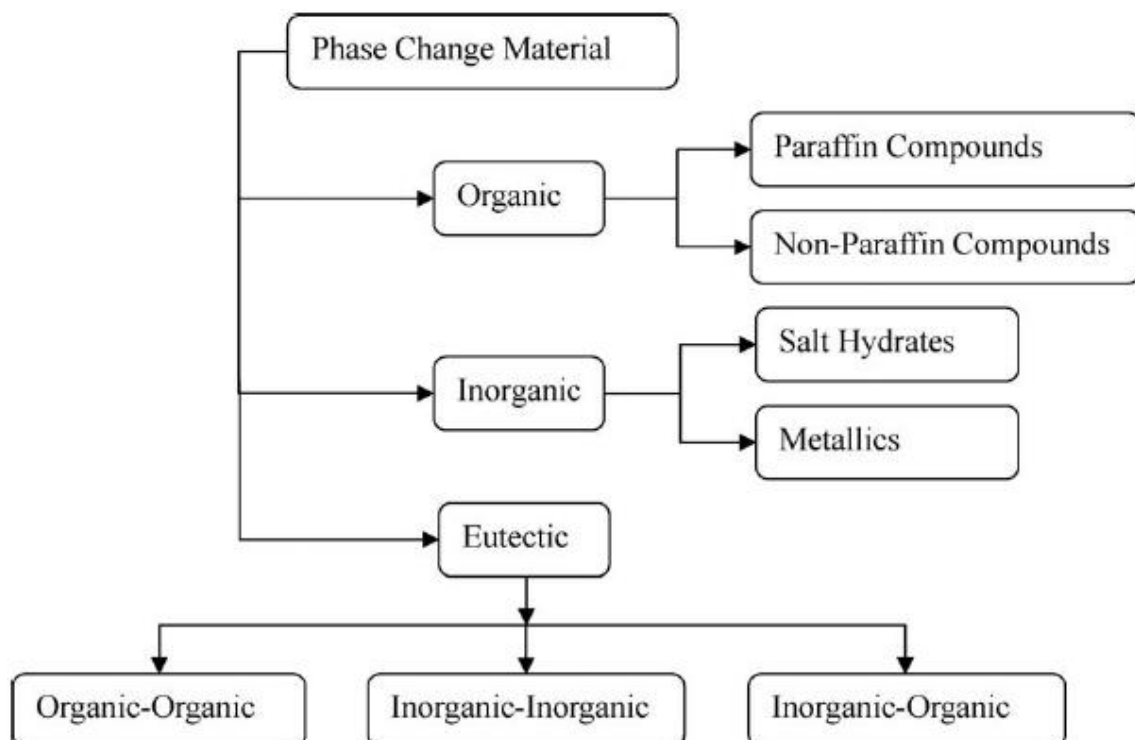
مواد تغییر فاز دهنده، باید پایداری شیمیایی طولانی مدت داشته باشد. چرخه ذوب و انجماد آن، کامل و برگشت‌پذیر باشد. همچنین، بعد از گذراندن تعداد زیادی چرخه، تجزیه نشود. با مواد بکار رفته شده برای نگهداری آن، سازگار (غیرخورنده) باشد. این مواد، جهت برقراری ایمنی لازم، باید غیرسمی، غیراشتعال و غیر قابل انفجار باشد [۸۷].

از لحاظ اقتصادی، بکارگیری ماده تغییر فاز دهنده باید مقرون به صرفه باشد. همچنین این مواد، باید در مقیاس بزرگ، کاملاً در دسترس باشند [۸۷].

۷-۲ طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده

تعداد زیادی از مواد تغییر فاز دهنده (آلی، معدنی و یوتکتیک)، در محدوده دمایی ۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، در دسترس هستند که برای کاربردهای خورشیدی، مناسب می‌باشند. طبقه بندی مواد تغییر فاز دهنده، در شکل (۲-۸) نشان داده شده‌است.

^۱Super Cooling



شکل (۲-۸). طبقه‌بندی مواد تغییر فاز دهنده [۸۶]

مواد شیمیایی آلی و معدنی زیادی وجود دارند که می‌توان، از نقطه ذوب و گرمای نهان، آن‌ها را به عنوان ماده تغییر فاز دهنده تشخیص داد. به جز نقطه ذوب در محدوده دمای کاری، اکثر مواد تغییر فاز دهنده، معیارهایی که برای یک ماده ذخیره‌سازی مورد نیاز است را، دارا نمی‌باشند. از آنجا که هیچ ماده‌ای نمی‌تواند تمام خصوصیات مورد نیاز، برای ذخیره‌سازی حرارتی مناسب را داشته باشد؛ باید از دیگر مواد موجود استفاده کرد و با طراحی یک سیستم مناسب، خواص فیزیکی ضعیف را جبران کرد. برای مثال: فین‌های فلزی، می‌توانند برای افزایش رسانایی حرارتی مواد تغییر فاز دهنده، مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، می‌توان سرمای بیش از حد (حالت سوپر کولینگ) که ممکن است به وسیله یک عامل هسته‌ای، در مواد ذخیره‌سازی ایجاد و باعث ذوب نامناسب شود را، با استفاده از ضخامت مناسب، مهار کرد [۸۶].

به طور کلی، ظرفیت ذخیره‌سازی گرمای نهان حجمی ترکیبات معدنی (۲۵۰-۴۰۰ کیلوگرم بر دسی متر مکعب)، تقریباً دو برابر ترکیبات آلی (۱۲۸-۲۰۰ کیلوگرم در دسی متر مکعب) می‌باشد. در ادامه، با توجه به رفتار شیمیایی و حرارتی بسیار متفاوت آن‌ها، خواص هر زیر گروه که به عنوان مواد تغییر

فاز دهنده، برای طراحی سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان استفاده می‌شوند؛ مورد بررسی قرار می‌گیرد [۸۷].

۲-۷-۱ مواد تغییر فاز دهنده آلی

مواد آلی، به دو دسته‌ی پارافین و غیر پارافین، طبقه‌بندی می‌شوند. مواد آلی، شامل ذوب متجانس هستند. این مواد، باید کاملاً ذوب شوند؛ تا فازهای مایع و جامد از نظر ترکیب، یکسان باشند. در غیر این صورت، اختلاف چگالی اجزا جامد و مایع باعث جداسازی می‌شوند و نهایتاً، منجر به تغییر ترکیب شیمیایی مواد می‌شود. به عبارتی دیگر، باعث ذوب شدن و منجمد شدن مکرر، بدون تفکیک فاز و در نتیجه، از بین رفتن گرمای نهان آن‌ها می‌شود [۸۸].

۲-۷-۱-۱ پارافین‌ها

پارافین‌ها، ترکیبی از آلکان‌های زنجیره‌ای می‌باشند که عمدتاً به شکل مستقیم $CH_3 - (CH_2) - CH_3$ تشکیل شده‌اند. ساختار زنجیره‌ای (CH_2) ، مقدار زیادی گرمای نهان آزاد می‌کند. نقطه ذوب و گرمای نهان هر دو، با زیاد شدن طول زنجیره، افزایش می‌یابند. پارافین، به دلیل در دسترس بودن در یک محدوده دمایی زیاد، برای ذخیره‌سازی گرمای نهان، واجد شرایط می‌باشد. اما، با توجه به در نظر گرفتن هزینه، تنها برخی از پارافین‌ها می‌توانند به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، در سیستم‌های ذخیره‌سازی گرمای نهان، مورد استفاده قرار گیرند. پارافین، بی‌خطر، قابل اعتماد، قابل پیش‌بینی، ارزان و بدون خوردگی است. از نظر شیمیایی، بی‌اثر و پایدار می‌باشد و در دماهای زیر ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، تغییرات کمی در میزان ذوب نشان می‌دهد و فشار بخار کمی، در فرم مذاب دارد. با توجه به خصوصیات پارافین‌ها، پارافین‌هایی که در سیستم ذخیره‌سازی استفاده می‌شوند؛ معمولاً چرخه ذوب-انجماد بسیار طولانی دارند.

برخی از پارافین‌ها، بر اساس تعداد اتم کربن، طبقه‌بندی می‌شوند. با افزایش تعداد اتم‌های کربن،

نقطه ذوب آلکان افزایش می‌یابد. علاوه بر ویژگی مطلوب پارافین‌ها، مانند: ذوب سازگار و خاصیت هسته‌ای خوب، آن‌ها برخی از خواص نامطلوب را نیز دارا می‌باشند که عبارتند از: (۱) هدایت حرارتی پایین، (۲) عدم سازگاری با ظروف پلاستیکی و (۳) اشتعال‌پذیری متوسط. همه این اثرات نامطلوب را می‌توان، با کمی تغییر واکس و راه‌های اصلاح بخش ذخیره‌سازی، تا حدودی از بین برد [۸۹].

۲-۷-۲ غیرپارافین‌ها

مواد آلی غیرپارافین، بی‌شمارترین مواد تغییر فاز دهنده، با خواص بسیار متنوع می‌باشند. هر یک از این مواد، برخلاف پارافین‌ها که دارای خواص بسیار مشابهی هستند؛ خواص خاص خود را دارند. آبهت، بودی و ساوهنی [۹۰]، یک بررسی گسترده در مورد مواد آلی انجام دادند و تعدادی از استرها، اسیدهای چرب، الکل و گلیکول را برای ذخیره انرژی شناسایی کردند. این مواد آلی، زیر گروه اسیدهای چرب و سایر مواد آلی، به غیر از پارافین می‌باشند. این مواد، قابل اشتعال هستند و نباید در معرض دمای بیش از حد بالا، شعله‌های آتش یا مواد اکسیدکننده، قرار بگیرند. برخی از ویژگی‌های این مواد آلی، عبارتند از: گرمای زیاد همجوشی، قابلیت اشتعال‌پذیری، هدایت حرارتی کم، میزان متفاوت سمی بودن و ناپایداری در دماهای بالا.

اسیدهای چرب، از مقادیر همجوشی بسیار بالایی برخوردارند که قابل مقایسه با پارافین‌ها می‌باشند. همچنین اسیدهای چرب، عملکرد ذوب و انجماد قابل تکراری دارند و از رسیدن به حالت سوپرکولینگ، جلوگیری می‌کنند. فرمول کلی تمام اسیدهای چرب، به شکل $CH_3(CH_2)_nCOOH$ می‌باشد و به همین خاطر، به عنوان مواد تغییر فاز دهنده خوب، شناخته می‌شوند. اما، اشکال عمده آن‌ها، هزینه بالا می‌باشد که ۲ تا ۲/۵ برابر، بیشتر از پارافین‌ها است. همچنین، آن‌ها خورنده خفیفی دارند [۹۱].

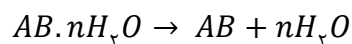
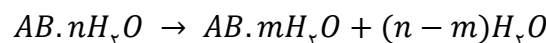
۲-۷-۲ مواد تغییر فاز دهنده معدنی

مواد معدنی، بطور کلی به دو دسته‌ی نمک هیدرات و فلز، طبقه‌بندی می‌شوند. این مواد تغییر فاز

دهنده، به طور قابل توجهی به حالت سوپرکولینگ نمی‌رسند و گرمای همجوشی آن‌ها، با انجام فرایندهای چرخه‌ای ذوب و انجماد، کاهش پیدا نمی‌کند [۸۶-۸۷].

۲-۷-۱-۲ هیدرات نمک

هیدرات‌های نمکی، به عنوان آلیاژهای نمک‌های معدنی و آب، در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها، معمولاً به شکل یک جامد کریستالی معمولی، با فرمول عمومی $AB \cdot nH_2O$ تشکیل می‌شوند. تبدیل جامد-مایع نمک هیدرات، باعث کاهش هیدروژن آلیاژ می‌شود. این فرآیند، شبیه به ذوب یا انجماد ترمودینامیکی می‌باشد. هیدرات‌های نمک، ذوب می‌شوند و به هیدرات نمک با مول‌های کمتری از آب، تبدیل می‌شوند.



هیدرات‌های نمکی، مهم‌ترین گروه مواد تغییر فاز دهنده هستند که در سیستم‌های ذخیره انرژی گرمای نهان، مورد استفاده گسترده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین خواص هیدرات‌های نمکی، عبارتند از: ظرفیت گرمای نهان بالا در هر واحد حجم، هدایت حرارتی نسبتاً بالا (تقریباً دو برابر پارافین‌ها) و تغییرات حجم کم، در حین ذوب شدن. همچنین، آن‌ها بسیار خورنده نیستند؛ با پلاستیک سازگار هستند و فقط کمی سمی هستند. بسیاری از هیدرات‌های نمکی، برای استفاده در ذخیره‌سازی، ارزان هستند [۹۲].

کریستال‌های هیدرات در نقطه ذوب، به نمک بدون آب و آب یا به یک هیدرات و آب با مول کمتری، تجزیه می‌شوند. یکی از مشکلات اکثر هیدرات‌های نمکی، مشکل ذوب نامناسب ناشی از این واقعیت است که آب آزاد شده در این تبلور، ظرفیت کافی برای حل کردن تمامی فاز جامد را ندارد. به دلیل اختلاف چگالی، نمک با هیدرات پایین (یا نمک بدون آب)، در انتهای ظرف مستقر می‌شود. این امر، منجر به ذوب-انجماد برگشت‌ناپذیر هیدرات نمک، در هر چرخه شارژ-تخلیه می‌شود. این مشکل را

می‌توان با روش‌های مختلفی حل کرد که عبارتند از: با همزن مکانیکی [۹۳]، با کپسوله کردن ماده تغییر فاز دهنده، جهت کاهش جداسازی [۹۴]، با افزودن عوامل ضخامت دهنده که مانع از تشکیل نمک‌های جامد، به وسیله نگه داشتن آن در حالت معلق می‌شود [۹۵]. با استفاده از آب اضافی، به طوری که کریستال‌های ذوب شده، باعث ایجاد محلول اشباع شده نشوند [۹۶]. با اصلاح ترکیب شیمیایی سیستم و تبدیل مواد نامناسب به مواد مناسب [۹۷].

بیشتر هیدرات‌های نمکی، دارای خواص هسته‌ای ضعیفی هستند که منجر به سوپرکولینگ شدن مایع، قبل از شروع تبلور می‌شود. دانشمندان شرکت جنرال الکتریک نیویورک [۹۸]، برای غلبه بر مشکل جداسازی نمک و سوپرکولینگ شدن هیدرات نمک، یک سیستم ذخیره‌سازی حرارتی غلتک استوانه‌ای را پیشنهاد کردند. این سیستم، از یک مخزن استوانه‌ای تشکیل شده‌است که به صورت افقی، با دو مجموعه غلتک نصب شده‌است. مزایای استفاده از روش غلتک استوانه‌ای، عبارتند از: تغییر فاز کامل، گرمای نهان آزاد شده در محدوده ۹۰-۱۰۰٪ از گرمای نهان تئوری، عملکرد قابل تکرار با بیش از ۲۰۰ چرخه، نرخ انتقال حرارت داخلی بالا، قابلیت انجماد بطور یکنواخت [۹۹].

از دیگر مشکلات، می‌توان به تعداد کم مول‌های آب موجود در هیدرات نمکی، در طول فرآیند تخلیه اشاره کرد. افزودن مواد شیمیایی، می‌تواند از تشکیل هیدرات نمکی با تعداد مول کم جلوگیری کند. این کار، باعث افزایش قابلیت حل هیدرات نمک با تعداد مول‌های آبی کم، نسبت به هیدرات نمک با تعداد مول‌های آبی بیشتر می‌شود [۱۰۰].

۲-۲-۷-۲ فلزات

فلزات این بخش، شامل: فلزات با ذوب پایین و فلزات یوتکتیک^۱ می‌باشند. این فلزات، به دلیل جرم سنگین، هنوز به شکل جدی برای فناوری سیستم مواد تغییر فاز دهنده، در نظر گرفته نشده‌اند. با این حال، هنگامی که حجم مورد توجه است؛ آن‌ها به دلیل گرمای زیاد همجوشی در هر واحد حجم، به

^۱Eutectics

عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده می‌شوند. همچنین، آن‌ها رسانایی حرارتی بالایی دارند. استفاده از فلزات، تعدادی از مشکلات مهندسی غیرمعمول را به وجود می‌آورد. تفاوت عمده بین فلزات و سایر مواد تغییر فاز دهنده، در هدایت حرارتی بالای آن‌ها می‌باشد. فلزاتی برای استفاده در سیستم ذخیره‌سازی، مناسب می‌باشند که دارای خواص: گرمای کم همجوشی در هر واحد وزن، گرمای زیاد همجوشی در هر واحد حجم، رسانایی حرارتی بالا، گرمای ویژه کم، فشار بخار نسبتاً کم، باشند [۱۰۱].

۲-۷-۳ یوتکتیک‌ها

یوتکتیک، ترکیبی با حداقل ذوب دو یا چند جزء است که هر یک از آن‌ها، ذوب شده و منجمد می‌شوند و به طور همزمان، ترکیبی از کریستال‌های اجزا را، در طی تبلور تشکیل می‌دهد [۱۰۲]. یوتکتیک‌ها، تقریباً همیشه ذوب و منجمد می‌شوند. از آنجایی که آن‌ها منجمد می‌شوند و به ترکیبی از کریستال‌ها تبدیل می‌شوند؛ زمان برای جدا کردن اجزای آن‌ها، کم می‌باشد. همچنین، با ذوب شدن مولفه‌ها بطور همزمان، امکان جدایش مجدد آن‌ها بعید می‌باشد. بنابراین، به ندرت برای ذخیره‌سازی حرارتی بکار می‌روند [۱۰۳].

۲-۸ نتیجه‌گیری

با توجه به مطالبی که در بخش‌های گذشته ارائه شد و همچنین، با مطالعه مقالات محققین، می‌توان نتیجه گرفت؛ به علت ماهیت متناوب انرژی خورشیدی، از مواد ذخیره‌سازی می‌توان برای ذخیره انرژی، در ساعات اوج تابش خورشیدی استفاده کرد؛ تا در ساعات غیردسترس بودن خورشید یا انرژی، از آن استفاده شود. انرژی گرمایی را می‌توان به صورت گرمای محسوس، گرمای نهان و انرژی شیمیایی ذخیره کرد.

مواد ذخیره‌سازی حرارتی، شامل: ماسه، سنگ ریزه، سنگ آهک، بتن و آجر می‌باشد که عموماً، برای ذخیره‌سازی گرمای محسوس بکار می‌روند. مزیت اصلی استفاده از ذخیره گرمای محسوس، هزینه کم

آن در مقایسه با ذخیره گرمای نهان است. گرمای ذخیره شده را، نمی‌توان در دمای ثابت تحویل داد که این موجب کاهش بازده سیستم ذخیره‌سازی می‌شود.

مواد تغییر فاز دهنده، برای ذخیره‌سازی گرمای نهان استفاده می‌شوند. این مواد به سه دسته: آلی، معدنی و یوتکتیک تقسیم می‌شوند. دسته آلی، شامل: پارافین‌ها و غیرپارافین‌ها می‌باشد و دسته معدنی، شامل: هیدرات نمک و فلزات می‌باشند. مزیت‌ها و مشکلات هر یک از این دسته‌ها شرح داده‌شد.

مواد تغییر فاز دهنده، دمای ثابت و متوسطی که برای خشک کردن بیشتر محصولات کشاورزی لازم است را، فراهم می‌کنند. خشک‌کن خورشیدی با ماده تغییر فاز دهنده، باعث کاهش اتلاف گرمایی و افزایش بازده سیستم می‌شود. ویژگی‌های اساسی که در استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، باید شناسایی شوند؛ عبارتند از: گرمای ویژه بالا، چگالی و هدایت حرارتی بالا، ترکیب پایدار، خنثی بودن از نظر شیمیایی و غیرسمی بودن. همچنین، هدایت حرارتی پایین، یکی از مشکلات رایج در مواد تغییر فاز دهنده می‌باشد.

برای عملکرد حرارتی بهتر خشک‌کن خورشیدی، ماده تغییر فاز دهنده با خواص مطلوب، برای انتقال گرما مورد نیاز است. برای بهبود طراحی سیستم‌های خشک کردن، با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و تحلیل حرارتی آن، استفاده از نرم‌افزارهای تجاری مانند: انسیس فلوئنت^۱، جهت مدل‌سازی و پیش‌بینی عملکرد حرارتی خشک‌کن خورشیدی به همراه ذخیره‌سازی حرارتی، پیشنهاد می‌شود.

فصل ۳

مدل سازی سیستم ذخیره سازی و خشک کن

خورشیدی

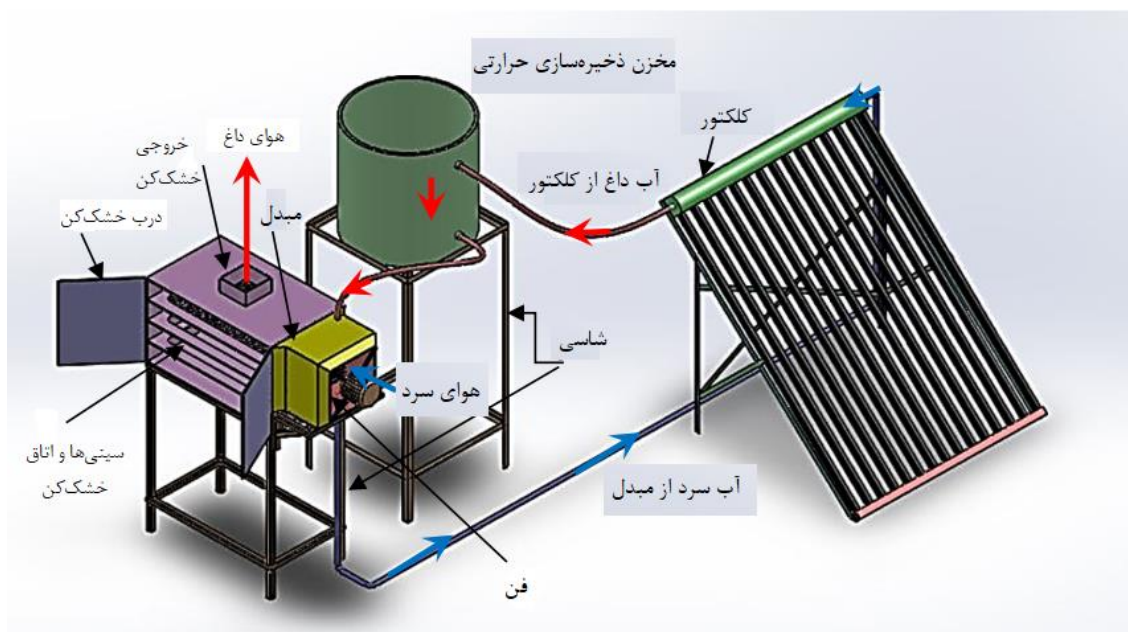
۳-۱ مقدمه

با توجه به مطالبی که در مورد خشک‌کن‌های خورشیدی و ذخیره‌سازی حرارتی، در فصل‌های اول و دوم شرح داده شد؛ سیستمی مناسب، برای خشک کردن خورشیدی در نظر گرفته شد. همچنین، به علت مزیت ذخیره‌سازی گرمای نهان به گرمای محسوس، از مواد تغییر فاز دهنده در این سیستم خورشیدی، استفاده شد.

مطابق شکل (۳-۱)، سیستم خشک کردن خورشیدی در این پژوهش، از بخش‌های مختلفی تشکیل شده است. این بخش‌ها عبارتند از: لوله‌های تخلیه‌کننده حرارت به کلکتور خورشیدی^۱، سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، مبدل حرارتی و خشک‌کن خورشیدی. بر اثر تابش خورشید، دمای آب در لوله‌های حرارتی کلکتور، افزایش می‌یابد. سپس، آب وارد مخزن ذخیره‌سازی حرارتی می‌شود و گرمای آب، توسط ماده تغییر فاز دهنده، طی فرایند شارژ جذب می‌شود. آب خروجی از مخزن ذخیره‌سازی، وارد مبدل حرارتی شده و پس از تبادل حرارت با هوای ورودی به مبدل، از آن خارج می‌شود. در نهایت، آب خروجی از مبدل، وارد کلکتور شده و چرخه کامل می‌شود. هوای خروجی از مبدل که دمای آن افزایش یافته، وارد خشک‌کن خورشیدی غیرمستقیم جابجایی اجباری شده و پس از کاهش رطوبت اتاق خشک کردن، از آن خارج می‌شود.

اهمیت سیستم بکار رفته شده در این پژوهش، عبارتند از: لوله‌های تخلیه‌کننده حرارت به کلکتور خورشیدی، حرارت ناشی از تابش خورشید را به شکل غیرمستقیم، به خشک‌کن منتقل می‌کنند که این امر، موجب حفظ کیفیت محصول می‌شود. همچنین، وجود سیستم ذخیره‌سازی همراه با ماده تغییر فاز دهنده، در ساعاتی که خورشید خارج از دسترس می‌باشد؛ باعث حفظ دمای مطلوب در خشک‌کن و عدم افت بازده خشک‌کن می‌شود. برای انجام این پژوهش، از بررسی‌های ایرانمنش و همکاران [۱۰۴]، به عنوان اطلاعات پایه استفاده شده است.

^۱ Evacuated Tube Solar Collector (ETSC)



شکل (۱-۳). بخش‌های مختلف سیستم خشک کردن خورشیدی [۱۰۴]

ایرانمنش و همکاران [۱۰۴]، عملکرد کلکتور و مبدل حرارتی را، بشکل آزمایشگاهی بررسی کردند. آن‌ها همچنین، به بررسی خشک کن خورشیدی به همراه سیستم ذخیره سازی گرمای نهان، به کمک شبیه سازی عددی و عملیات آزمایشگاهی، جهت مطالعه عملکرد حرارتی آن‌ها، پرداختند. این پژوهش، در شهر کرمان، با طول جغرافیایی $53/6^\circ$ شرقی و عرض جغرافیایی $32/4^\circ$ شمالی، در فصل تابستان انجام شد. تابش خورشیدی در استان کرمان، در تابستان و بهار، بین 6 تا $5/7$ کیلووات ساعت در روز و در زمستان و پاییز، بین $4/3$ تا $4/4$ کیلووات ساعت در روز است. همچنین، میزان تشعشعات خورشیدی روزانه در شهر کرمان، بطور متوسط بین $5/18$ تا $5/47$ کیلووات ساعت، تخمین زده می‌شود.

پژوهش فعلی، شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول شامل: مدل سازی سیستم ذخیره سازی حرارتی و بخش دوم شامل: مدل سازی محفظه خشک کن می‌باشد. این دو بخش، به شکل عددی شبیه سازی شدند. در این فصل، هندسه، شبکه بندی، مواد بکار گرفته شده، معادلات و شرایط حل بررسی می‌شود. سپس، به اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی در هر بخش، با نتایج پژوهش ایرانمنش و همکاران، خواهیم پرداخت. در نهایت، معایب حل عددی سیستم ذخیره سازی حرارتی و ارائه روشی جایگزین برای آن، شرح داده خواهد شد.

۲-۳ مدل سازی سیستم ذخیره سازی حرارتی

آب گرم شده توسط تابش خورشید، پس از خروج از کلکتور، وارد سیستم ذخیره سازی حرارتی می شود. برای طراحی سیستم ذخیره سازی حرارتی، از مخزن استوانه ای شکل استفاده شد. در داخل مخزن، کویل مارپیچی که حاوی ماده تغییر فاز دهنده می باشد؛ قرار داده شد. از پارافین، به عنوان ذخیره کننده گرمای نهان استفاده شد. زیرا، طبق مطالبی که در فصل دوم بیان شد؛ پارافین، به دلیل فشار بخار کم و همچنین، دمای ذوب تقریباً کم که نزدیک به دمای کارکرد سیستم های حرارتی خورشیدی است و در دسترس بودن آن، می تواند بهترین انتخاب برای استفاده در سیستم ذخیره سازی حرارتی باشد. همچنین، پارافین به لحاظ شیمیایی پایدار است؛ در دوره استفاده طولانی مدت، غیرخورنده است؛ با طول عمر بلند مدت و عملکرد خوب و غیرقابل تغییر، در هنگام استفاده از چرخه تغییر فاز می باشد. گرمای اعمال شده به پارافین توسط آب، باعث افزایش دمای داخلی پارافین می شود و در نقطه ذوب، این انرژی برای تغییر فاز پارافین به کار می رود. پس از تبادل حرارتی، آب از مخزن خارج شده و به مبدل حرارتی می رود. در ادامه، به شرح معادلات حاکم بر بخش ذخیره کننده گرما می پردازیم. سپس، به روند مدل سازی آن به کمک شبیه سازی عددی، پرداخته می شود.

۱-۲-۳ معادلات حاکم بر سیستم ذخیره سازی حرارتی

همانطور که قبلاً ذکر شد؛ سیستم ذخیره حرارتی، متشکل از: یک مخزن استوانه ای و یک کویل مارپیچ، حاوی ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) می باشد. در هر چرخه، در طی فرایند شارژ (ساعات تشعشع خورشیدی بالاتر)، ماده تغییر فاز دهنده، با جذب گرما از آب گرم داخل مخزن، ذوب می شود و در ساعات تابش خورشید پایین (وقتی دمای کلکتور از مخزن ذخیره سازی کمتر است)، فاز تغییر می کند و برعکس، پارافین انرژی حرارتی خود را، در طی فرایند تخلیه از دست می دهد و این انرژی را، به آب (سیال داخل مخزن) می دهد.

شار انرژی برای سیال داخل مخزن ذخیره‌سازی، به شرح زیر است:

$$Q_f = \dot{m}c_p(T_{f,in} - T_{f,out}) \quad (۱-۳)$$

$T_{f,in}$ و $T_{f,out}$ به ترتیب، دمای ورودی و خروجی سیال داخل مخزن ذخیره‌سازی (K)، c_p ظرفیت گرمای ویژه ($J/kg.K$) و $\dot{m}$ دبی جرمی (kg/s) است.

گرما به شکل جابجایی توسط سیال و سپس، به شکل هدایتی توسط دیواره کویل مارپیچ، به ماده تغییر فاز دهنده منتقل می‌شود. گرمای منتقل شده به ماده تغییر فاز دهنده، باعث افزایش دمای داخلی آن می‌شود و در نقطه ذوب، این انرژی برای تغییر فاز پارافین استفاده می‌شود. انتقال حرارت جابجایی، از سیال گرم شده به دیواره کویل حاوی ماده تغییر فاز دهنده (Q_{conv})، بوسیله معادله (۲-۳) بدست می‌آید:

$$Q_{conv} = h_c A_c (T_{f,m} - T_{w,m}) \quad (۲-۳)$$

h_c ، ضریب انتقال حرارت جابجایی ($W/m^2.K$) می‌باشد که با توجه به اعداد ناسلت، رینولدز و پرانتل قابل محاسبه می‌باشد. $T_{f,m}$ و $T_{w,m}$ ، به ترتیب میانگین دمای سیال و میانگین دمای دیواره بیرونی کویل (K) و A_c مساحت دیواره خارجی کویل (m^2) هستند. مقدار A_c ، توسط معادله (۳-۳) قابل محاسبه می‌باشد:

$$A_c = 2\pi rL + 2\pi r^2 \quad (۳-۳)$$

r ، شعاع کویل مارپیچ (m) و L ، طول کویل مارپیچ (m) می‌باشد. برای محاسبه طول کویل مارپیچ، از معادله (۴-۳) استفاده می‌شود:

$$L = n\sqrt{c^2 + p^2}, \quad c = 2\pi R \quad (۴-۳)$$

n تعداد چرخه، p گام حلقه (m) و R شعاع هر حلقه (m) می‌باشد.

گرمای هدایت داده شده به ماده تغییر فاز دهنده (درون دیواره کویل مارپیچی مسی)، توسط معادله (۵-۳) بیان می‌شود:

$$Q_{cond} = k_w A_c \frac{(T_{w,m} - T_{pcm})}{t_w} \quad (5-3)$$

T_{pcm} ، میانگین دمای ماده تغییر فاز دهنده (K)، k_w ضریب هدایت حرارتی مس (W/mK) و t_w ضخامت دیواره کوئل (m) می باشد.

انرژی کلی جذب شده بوسیله ماده تغییر فاز دهنده، در طول فرایند شارژ و تخلیه را، می توان توسط معادلات زیر بدست آورد:

$$Q_{pcm} = m_{pcm} c_l (T_{pcm} - T_{melt}) \quad T_{pcm} > T_{melt} \quad (\text{فرایند شارژ}) \quad (6-3)$$

$$Q_{pcm} = m_{pcm} c_s (T_{pcm} - T_{melt}) \quad T_{pcm} < T_{melt} \quad (\text{فرایند تخلیه}) \quad (7-3)$$

c_s ، ظرفیت گرمای ویژه ماده تغییر فاز دهنده در حالت جامد ($J/kg.K$)، c_l ، ظرفیت گرمای ویژه ماده تغییر فاز دهنده در حالت مایع ($J/kg.K$)، m_{pcm} جرم ماده تغییر فاز دهنده (kg) و T_{melt} دمای ذوب (K) می باشد.

انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن، شامل: سیال و ماده تغییر فاز دهنده، با استفاده از معادله (3-3) محاسبه می شود [104]:

$$E_{st} = Q_f + Q_{pcm} \quad (8-3)$$

۲-۲-۳ هندسه حل

برای طراحی هندسه مخزن ذخیره سازی حرارتی و کوئل مارپیچ، از نرم افزار کتیا^۱ استفاده شد. مخزن ذخیره سازی، شامل: استوانه ای به قطر ۰/۵ متر، ارتفاع ۰/۶ متر و به ضخامت ۲ میلی متر، از جنس فولاد می باشد. ورودی و خروجی استوانه، از یک مجرا دایره ای به قطر ۱۰ میلی متر تشکیل شده است. فاصله بین مجرا ورودی و خروجی مخزن استوانه ای، ۵۷ سانتی متر می باشد.

برای طراحی محل قرارگیری پارافین، از کوئلی به قطر ۳۰ میلی متر و ضخامت ۱ میلی متر، به شکل

مارپیچ استفاده شد. جنس این کوئل، از مس بوده و شامل: ۶ چرخه، با گام ۶ سانتی متر می باشد. همچنین، شعاع هر حلقه، ۱۵/۹ سانتی متر طراحی شد.

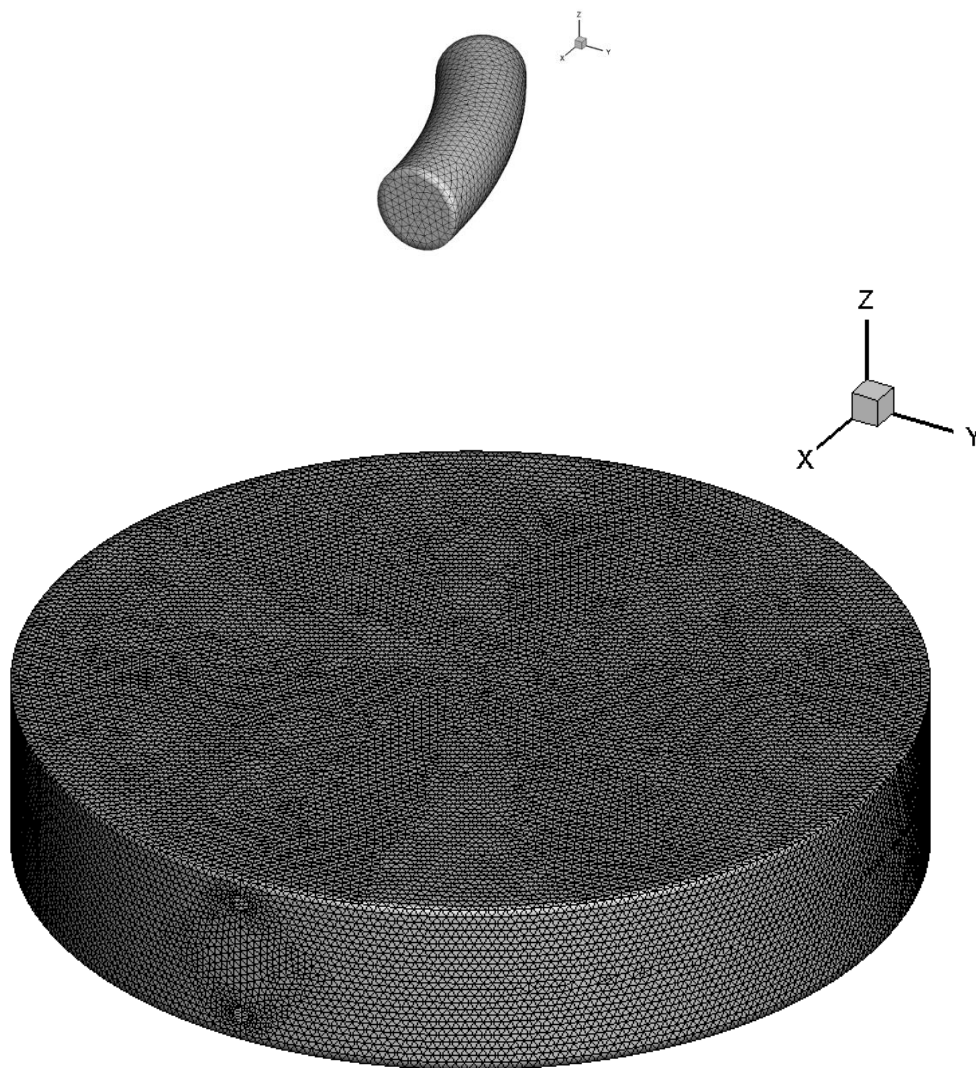
۳-۲-۳ شبکه بندی هندسه و تست استقلال حل از شبکه

پس از ایجاد هندسه، برای حل عددی، محدوده حل شبکه بندی شد. برای شبکه بندی هندسه و همچنین ارزیابی شبکه ایجاد شده، از نرم افزار گمبیت^۱ استفاده شد. با توجه به اینکه کیفیت شبکه، بر کیفیت حل اثر می گذارد و به منظور مستقل شدن نتایج از شبکه، آنالیز استقلال از شبکه ایجاد شد. برای آنالیز استقلال از شبکه، از پنج سری شبکه، با هندسه ای کوچکتر نسبت به هندسه اصلی استفاده شد. در این آنالیز، از مخزن استوانه ای به قطر ۰/۵ متر و به ارتفاع ۰/۱ متر استفاده شد (نسبت به هندسه اصلی استوانه، ۶ برابر کوچکتر شد). از یک کوئل مارپیچ، به قطر ۳۰ میلی متر استفاده شد که شامل ۳۰ درجه از یک حلقه کامل بود (نسبت به هندسه اصلی کوئل مارپیچ، ۷۲ برابر کوچکتر شد). پس از ایجاد هندسه، کلیه محدوده حل شبکه بندی شد. از پنج سری شبکه به تعداد ۱۳۷۰۰۰، ۲۰۲۰۰۰، ۲۷۴۰۰۰، ۴۰۰۰۰۰ و ۵۴۸۰۰۰ استفاده شد. نوع شبکه بکار گرفته شده در این هندسه، شبکه هیبریدی بود.

پس از ایجاد شبکه، به بررسی شبکه به کمک معیار اسکیونس^۲ پرداخته شد. به طور کلی، بهترین شبکه، مربوط به آن هایی بود که دارای اسکیونس ۰ بودند و بدترین، مربوط به شبکه با اسکیونس ۱ بود. گزارش های ارزیابی فرآیند شبکه بندی، نشان داد که اسکیونس هر پنج سری شبکه، برای انجام شبیه سازی عددی، مناسب می باشد. شکل (۳-۲)، هندسه و شبکه ایجاد شده، برای آنالیز استقلال حل از شبکه را نشان می دهد که شامل ۲۷۴۰۰۰ عدد شبکه می باشد.

^۱Gambit

^۲Skewness



شکل (۲-۳). هندسه و شبکه‌بندی کوئل مارپیچ و مخزن برای آنالیز استقلال حل از شبکه (با تعداد مش ۲۷۴۰۰۰)

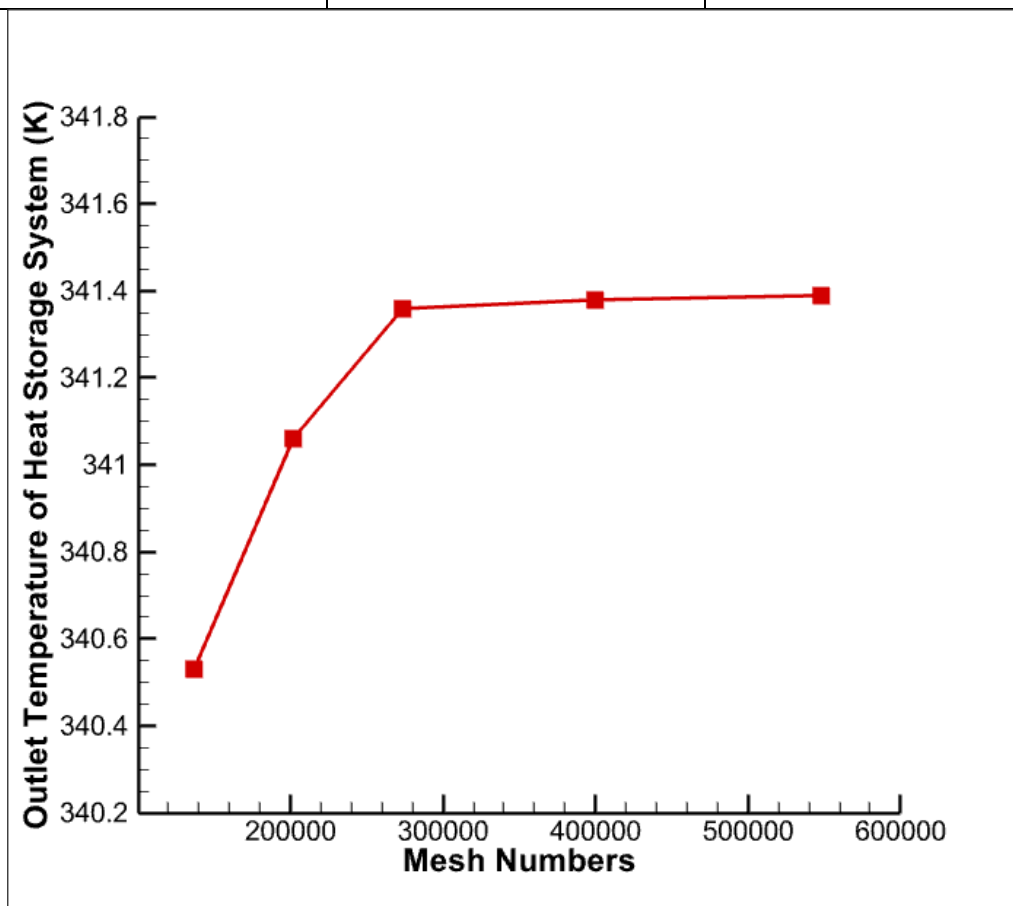
شرایط حل شبیه‌سازی عددی برای آنالیز استقلال حل از شبکه، نسبت به شرایط اصلی، دارای کمی اصلاحات بود. تمامی شرایط گسسته‌سازی، شرایط مرزی، معادلات حل عددی و جنس مواد بکار رفته شده، مطابق با حل اصلی بود که در قسمت‌های بعد، به شرح آن خواهیم پرداخت. در شبیه‌سازی آنالیز استقلال از شبکه، آب با دمای ۳۶۵ کلوین و با دبی ۰/۰۴۳ لیتر بر دقیقه، وارد استوانه شد. دمای اولیه برای کل دامنه محاسباتی، ۳۲۵ کلوین (دمای ذوب پارافین) انتخاب شد. با انجام این کار، فقط گرمای نهان جذب شده توسط پارافین، محاسبه شد و مقدار گرمای محسوس پارافین، صفر شد. پارافین در ابتدای حل، به طور کامل در فاز جامد قرار داشت.

پس از ذوب کامل پارافین، مقدار دمای آب خروجی از مخزن، برای هر کدام از شبکه‌ها محاسبه شد

که در جدول (۱-۳)، گزارش و نمودار آن، در شکل (۳-۳) آورده شده است. مطابق این جدول و نمودار، مقدار دمای آب خروجی، از تعداد شبکه ۲۷۴۰۰۰ به بالا، با خطای ناچیزی تغییر می کند. بنابراین، مقدار دمای آب خروجی از مخزن، از تعداد شبکه ۲۷۴۰۰۰ به بالا، مستقل از کیفیت و تعداد شبکه هندسه می باشد.

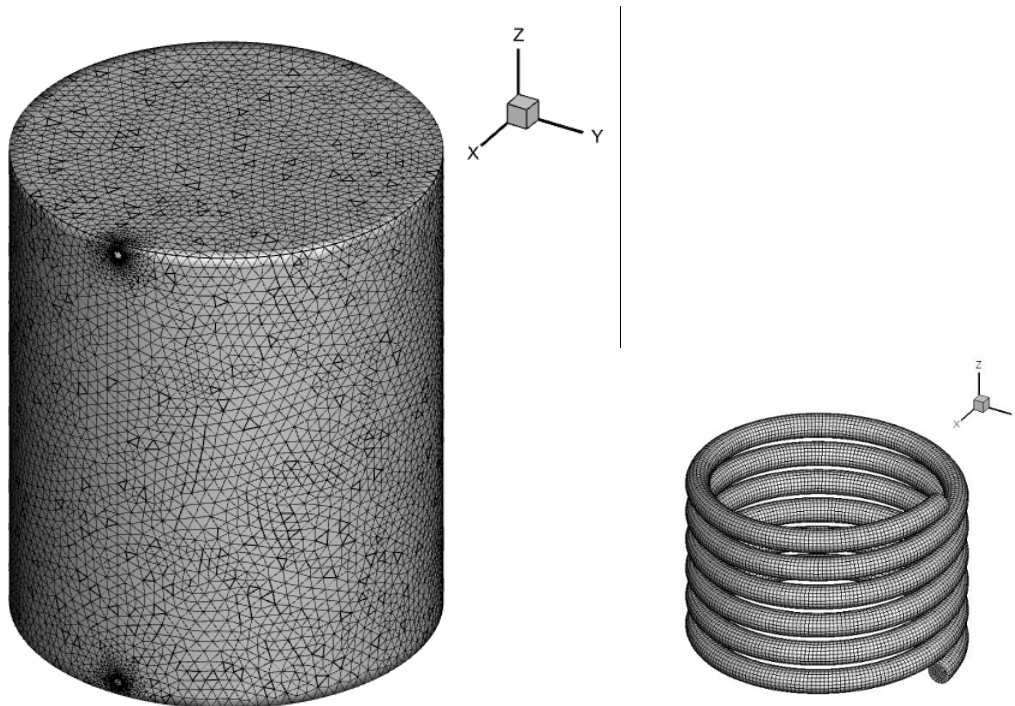
جدول (۱-۳). نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای سیستم ذخیره سازی حرارتی

تعداد شبکه ها	دمای آب خروجی (K)	درصد تغییرات
۱۳۷۰۰۰	۳۴۰/۵۳	---
۲۰۲۰۰۰	۳۴۱/۰۶	۰/۱۵۵
۲۷۴۰۰۰	۳۴۱/۳۶	۰/۰۸۷
۴۰۰۰۰۰	۳۴۱/۳۸	۰/۰۰۵
۵۴۸۰۰۰	۳۴۱/۳۹	۰/۰۰۲



شکل (۳-۳). نمودار آنالیز استقلال حل از شبکه برای سیستم ذخیره سازی حرارتی

پس از آنالیز استقلال حل از شبکه، هندسه اصلی سیستم ذخیره‌سازی، شبکه‌بندی شد. با توجه به آنالیز استقلال از شبکه و مقیاسی که برای استوانه و کوئل مارپیچ در نظر گرفته شد؛ حدود ۲۱۰۰۰۰۰ عدد شبکه ایجاد شد که از این تعداد، ۱۶۰۰۰۰۰ عدد شبکه، برای بخش سیال بود و ۵۰۰۰۰۰ شبکه نیز، سهم بخش ماده تغییر فاز دهنده بود. پس از آن، شبکه‌های ایجاد شده، به کمک معیار اسکیونس بررسی شدند. گزارش‌های ارزیابی فرآیند شبکه‌بندی، نشان داد که اسکیونس برای مخزن ذخیره‌سازی، حدود ۰/۴۹ است. این عدد، برای هرگونه شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی^۱، مناسب است. همچنین این آمار، با بررسی‌های ایرانمنش و همکاران [۱۰۴] تطبیق خوبی داشت. هندسه اصلی استوانه و کوئل مارپیچ بکار گرفته شده همراه با شبکه آن‌ها، در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۴). هندسه اصلی کوئل مارپیچ و مخزن استوانه‌ای سیستم ذخیره‌سازی همراه با شبکه‌بندی

۴-۲-۳ خواص مواد بکار رفته

در شبیه‌سازی عددی، از نوعی پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد. در جدول (۲-۳)، خواص ترمو-فیزیکی این نوع پارافین نشان داده شده‌است. همچنین، ویسکوزیته دینامیکی پارافین، با افزایش دما، کاهش می‌یابد و به عنوان تابعی از دما است. این تابع را، می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$\mu = 0.182e^{-0.155 \times T_{pcm}} \quad 325 < T_{pcm} < 356 \quad (9-3)$$

جدول (۲-۳). خواص ترمو-فیزیکی پارافین

۷۸۳	چگالی $[kg/m^3]$
۱۶۶	گرمای نهان $[kJ/kg]$
۰/۰۰۰۵۶۱	ضریب پخش حجمی $[1/K]$
۰/۲	ضریب هدایت حرارتی $[W/m.K]$
۲/۱	گرمای ویژه حرارتی $[kJ/kg.K]$
۳۲۵	دمای فاز جامد $[K]$
۳۴۸	دمای فاز مایع $[K]$

همانطور که در بخش‌های گذشته مطرح شد؛ مخزن و کوئل مارپیچ، به ترتیب از جنس فولاد و مس می‌باشند. در جدول (۳-۳)، خواص ترمو-فیزیکی فولاد و مس استفاده شده در این شبیه‌سازی و همچنین مشخصات آب، به عنوان سیال مورد استفاده در مخزن ذخیره‌سازی، آورده شده‌است.

جدول (۳-۳). خواص ترمو-فیزیکی مواد بکار رفته در سیستم ذخیره‌سازی حرارتی

مواد [Materials]	ضریب هدایت حرارتی [W/m.K]	چگالی [kg/m ³]	گرمای ویژه حرارتی [J/kg.K]
آب	۰/۶	۹۹۸/۲	۴۱۸۲
فولاد	۱۶/۳۲	۷۹۹۵	۴۹۶/۲
مس	۳۵۷/۷	۸۹۷۸	۳۵۱/۸

۳-۲-۵ معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، در نرم‌افزار انسیس فلوئنت^۱ انجام شد. این شبیه‌سازی، بر اساس سه معادله: جرم، مومنتوم و انرژی انجام می‌شود که به حالت کوپل شده می‌باشند. این معادلات، به ترتیب نهایتاً به: معادلات پیوستگی، ناویر-استوکس و انرژی، منجر می‌شوند. این معادلات، برای آب در بخش مخزن استوانه‌ای و پارافین در بخش کوئل ماریپچی، به شرح زیر است.

الف) بخش مخزن استوانه‌ای:

معادله پیوستگی، برای آب با فرض جریان تراکم‌ناپذیر و ناپایا، عبارت است از:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (۳-۱۰)$$

معادله مومنتوم، برای آب در همه جهات، بوسیله معادله (۳-۱۱) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V}) \quad (۳-۱۱)$$

معادله انرژی حرارتی، برای آب در مخزن استوانه‌ای، عبارت است از:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h \right) \quad (۳-۱۲)$$

^۱ANSYS FLUENT

ب) بخش کوئل مارپیچی:

معادله پیوستگی، برای پارافین در کوئل مارپیچ، مشابه بخش گذشته، بوسیله معادله (۳-۱۰) بیان می‌شود. اما معادله مومنتوم، برای پارافین در همه جهات، با فرض چگالی مبتنی بر بوسینسک^۱، عبارت است از:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \beta \vec{g} (T - T_{ref})) + \vec{S} \quad (۳-۱۳)$$

در معادلات بالا، $\vec{V}$ بردار سرعت (m/s)، ρ چگالی (kg/m^3)، P فشار (N/m^2)، μ ویسکوزیته دینامیکی ($N \cdot s/m^2$)، $\vec{g}$ شتاب گرانشی (m/s^2)، T دما (K)، β ضریب پخش حجمی ($1/K$)، t زمان (s) و $\vec{S}$ ترم منبع مومنتوم (N/m) می‌باشد که به معادله (۳-۱۳) اضافه شده‌است تا اثر تغییر فاز را، بر جابجایی نشان دهد.

معادله انرژی حرارتی، برای پارافین در کوئل مارپیچ، با فرض اعمال گرمای نهان، عبارت است از:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{V}h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h \right) \quad (۳-۱۴)$$

در معادله بالا، k ضریب هدایت حرارتی سیال ($W/m \cdot K$)، H آنتالپی (J/kg) و h آنتالپی محسوس (J/kg) می‌باشد.

آنتالپی مواد، به صورت مجموع گرمای نهان (ΔH) و آنتالپی محسوس (h) محاسبه می‌شود که عبارت است از:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT, \quad H = h + \Delta H \quad (۳-۱۵)$$

h_{ref} آنتالپی مرجع، در دمای مرجع (T_{ref}) می‌باشد.

^۱ بطور کلی فرض بوسینسک (Boussinesq)، تقریبی است که در جریان‌های سیال، تحت تاثیر نیروی شناوری استفاده می‌شود. در این فرض، از تغییرات چگالی سیال، در ترم مومنتوم صرف نظر می‌شود و اثر تغییرات چگالی، فقط در ترم‌هایی از معادله حرکت سیال که شامل ضریب شتاب گرانشی می‌باشند؛ اعمال می‌شود [۸۶].

در کویل مارپیچ، ξ کسر مایع^۱ می‌باشد که ممکن است؛ بین صفر (فاز جامد) و یک (فاز مایع)، تغییر کند. کسر مایع (ξ) که هنگام تغییر فاز، بین حالت جامد و مایع اتفاق می‌افتد؛ عبارت است از:

$$\xi = \begin{cases} 0 & \text{if } T_{pcm} < T_s \\ 1 & \text{if } T_{pcm} > T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{if } T_l > T_{pcm} > T_s \end{cases} \quad (16-3)$$

با شناسایی کسر مایع، می‌توان ترم $\vec{S}$ را که به معادله مومنتوم اضافه می‌شود؛ محاسبه کرد:

$$\vec{S} = \frac{(1-\xi)^2}{\xi^3} A_{mush} \vec{V} \quad (17-3)$$

A_{mush} ، به شکل ناحیه نرم نشان داده می‌شود و منطقه‌ای است که در آن، کسر مایع بین ۰ تا ۱ قرار دارد. به طور کلی، این ناحیه نرم، به عنوان «محیط متخلخل» مدل‌سازی می‌شود که در آن، تخلخل از ۱ تا ۰، به عنوان ماده جامد کاهش می‌یابد. A_{mush} ، ثابت ناحیه نرم می‌باشد و فرایند سنیتیک را، در ناحیه نرم توصیف می‌کند [۱۰۴].

۳-۲-۶ گسسته‌سازی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی

برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی، از بین روش‌های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی، از الگوریتم SIMPLEC استفاده شد. علت این انتخاب، این بود که در روش SIMPLEC، بر خلاف روش SIMPLER، معادلات اضافی بیشتری حل نمی‌شود. اما، در بیشتر مسائل، از نرخ همگرایی ۲۰ تا ۳۰ درصد بالاتری، نسبت به روش SIMPLE برخوردار است و البته، از نسبت هزینه بر تکرار تقریباً برابری برخوردار است. همچنین، برای مسائل مربوط به ماده تغییر فاز دهنده، روش SIMPLEC همگرایی بهتری دارد. تفاوت این روش با SIMPLE، در ساده‌سازی رابطه تصحیح سرعت و فشار خلاصه می‌شود. در این الگوریتم، اثر تصحیحی سرعت المان‌های مجاور، حذف نمی‌گردد؛ بلکه مقادیر آن‌ها، در

^۱Liquid Fraction

تصحیح فشار المان‌ها به کار گرفته می‌شود. با این روش، نتایج دقیق‌تری، نسبت به روش SIMPLE حاصل می‌شود. همچنین، برای حل معادلات مومنتوم و انرژی، از طرح آپویند مرتبه دوم^۱ استفاده شد. در روش SIMPLEC برای حالت دو بعد، u^*, v^*, p^* به ترتیب مقادیر فشار و سرعت‌های حدس زده هستند. u', v', p' به ترتیب فشار و سرعت‌های تصحیح شده می‌باشند. u و v به ترتیب مقادیر واقعی فشار و سرعت، در جهات x و y می‌باشند. $\emptyset$ ، پارامتری است که همزمان با حل بدست می‌آید. d نیز بر اساس ضریب Under Relaxation تعیین می‌شود. مراحل حل این روش، به شرح زیر است:

۱- ابتدا، مقادیر اولیه حدس زده شده، بکار گرفته می‌شود.

۲- به کمک مقادیر اولیه، سرعت‌های کاذب به شکل زیر تعیین می‌شود:

$$\hat{u}_{i,j} = \frac{\sum a_{nb} u_{nb}^* + b_{i,j}}{a_{i,j}}, \quad \hat{v}_{i,j} = \frac{\sum a_{nb} v_{nb}^* + b_{i,j}}{a_{i,j}} \quad (18-3)$$

$$a_E = \rho_e d_e \Delta y, \quad a_W = \rho_w d_w \Delta y, \quad a_N = \rho_n d_n \Delta x, \quad a_S = \rho_s d_s \Delta x \quad (19-3)$$

$$d_e = \frac{\Delta y}{a_e - \sum_{nb} a_{nb}}, \quad d_n = \frac{\Delta x}{a_n - \sum_{nb} a_{nb}} \quad (20-3)$$

$$b = F_w^* - F_e^* + F_s^* - F_n^* \quad (21-3)$$

۳- حل معادله فشار و بدست آوردن p :

$$a_{i,j} P_{i,j} = a_{i-1,j} P_{i-1,j} + a_{i+1,j} P_{i+1,j} + a_{i,j-1} P_{i,j-1} + a_{i,j+1} P_{i,j+1} \quad (22-3)$$

۴- با استفاده از $p = p^*$ ، معادله مومنتوم گسسته شده حل می‌شود و مقادیر u^* و v^* بدست می‌آید:

$$a_{i,j} u_{i,j}^* = \sum a_{nb} u_{nb}^* + (P_{i-1,j}^* - P_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (23-3)$$

$$a_{i,j} v_{i,j}^* = \sum a_{nb} v_{nb}^* + (P_{i,j-1}^* - P_{i,j}^*) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (24-3)$$

۵- معادله تصحیح فشار، حل می‌شود:

$$a_{i,j} P'_{i,j} = a_{i-1,j} P'_{i-1,j} + a_{i+1,j} P'_{i+1,j} + a_{i,j-1} P'_{i,j-1} + a_{i,j+1} P'_{i,j+1} \quad (25-3)$$

^۱Second Order Upwind

۶- با کمک مقادیر تصحیح فشار، مقادیر تصحیح سرعت بدست می‌آید و u ، v ، P و ϕ^* بروزرسانی می‌شوند:

$$u_{i,j} = u^*_{i,j} + d_{i,j}(P'_{i-1,j} - P'_{i,j}) \quad , \quad v_{i,j} = v^*_{i,j} + d_{i,j}(P'_{i,j-1} - P'_{i,j}) \quad (26-3)$$

۷- تمام معادلات انتقال گسسته شده دیگر، حل می‌شوند:

$$a_{i,j}\phi_{i,j} = a_{i-1,j}\phi_{i-1,j} + a_{i+1,j}\phi_{i+1,j} + a_{i,j-1}\phi_{i,j-1} + a_{i,j+1}\phi_{i,j+1} + b^{\phi}_{i,j} \quad (27-3)$$

اگر ϕ همگرا شد؛ ادامه حل متوقف می‌شود. در غیر این صورت، $u^* = u$ ، $v^* = v$ ، $P^* = P$ و $\phi^* = \phi$ قرار داده شده و حل مجدد تکرار می‌شود [۱۰۴].

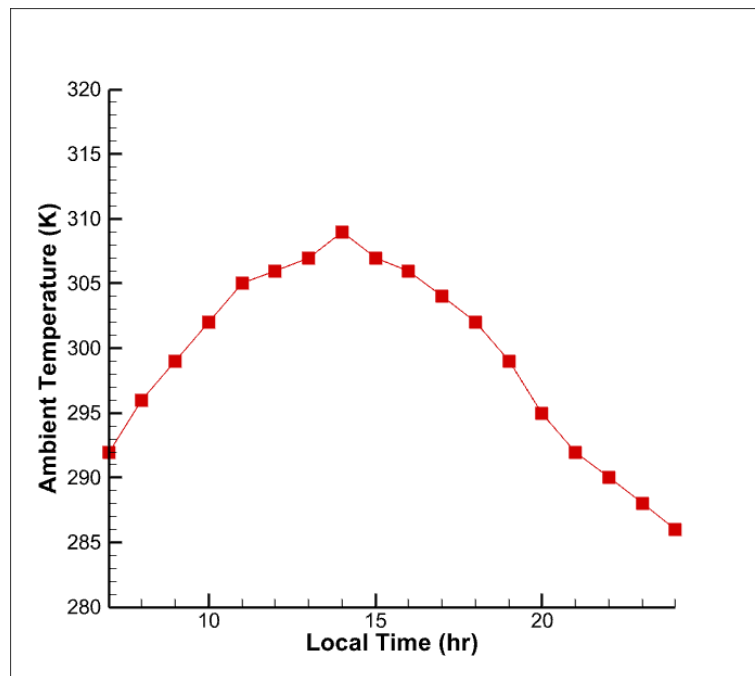
۷-۲-۳ شرایط حاکم بر شبیه‌سازی عددی

در این شبیه‌سازی، مساله سه بعدی در نظر گرفته شد. از قسمت بالایی استوانه، آب با دبی 0.43 لیتر بر دقیقه، از ورودی وارد می‌شود و پس از تبادل حرارت با پارافین موجود در کوئل مارپیچ، از قسمت پایین استوانه، خارج می‌شود.

از مدل مبتنی بر فشار استفاده شد. زیرا، گزارش شده‌است که برای مدل‌سازی مسائل ذوب و انجماد، مناسب است و همچنین، جریان آب، تراکم‌ناپذیر فرض شد. الگوی سیال، در طی فرآیند حرارتی بسیار مهم است. از آنجا که شرایط در کل فرایند خشک شدن، بسیار جزئی است؛ بنابراین، می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. مقدار عدد رینولدز در کل دامنه محاسباتی، کم‌تر از 2000 بود؛ بنابراین، جریان سیال در داخل سیستم ذخیره‌سازی، یک الگوی آرام دارد.

به منظور حل معادلات حاکم، شرایط مرزی مناسب و شرایط اولیه باید اعمال شوند. دامنه محاسباتی در دمای یکنواخت، ثابت در نظر گرفته شد. تمام سطوح هندسه در نظر گرفته شده، صاف و جریان سیال بر روی آن، بدون اصطکاک تعیین شد. دمای اولیه کل سیستم، بر اساس دمای محیط (7 صبح) که در شکل (۳-۵) نشان داده شده‌است؛ محاسبه شد. این نمودار، مربوط به دمای محیط، در فصل تابستان

شهر کرمان می‌باشد. همچنین، در ابتدای حل، پارافین موجود در کویل مارپیچ، بطور کامل در فاز جامد قرار داشت (مقدار کسر مایع در ابتدای حل، برابر صفر بود).



شکل (۳-۵). دمای محیط شهر کرمان در فصل تابستان [۱۰۴]

به عنوان شرایط مرزی، در سمت ورودی استوانه، دمای سیال و دبی سیال انتخاب شد. مقدار سرعت، به عنوان یک مقدار متوسط محاسبه شده، از دبی جرمی سیال تعیین شد. برای دمای ورودی سیال، از داده‌های آزمایشگاهی خارج شده از کلکتور خورشیدی، استفاده شد. دیواره مخزن، به شکل عایق و ثابت در نظر گرفته شد. در سمت خروجی استوانه، شرط فشار خروجی صفر تعیین شد. در مرزهای کویل مارپیچ، دیواره‌های کویل، به عنوان دیواره‌های ثابت انتخاب شدند. همچنین، برای این دیواره‌ها، شرط مرزی کوپله حرارتی^۱ تعیین شد.

این شبیه‌سازی، به شکل ناپایا، از ساعت محلی ۷ صبح تا ۱۹ عصر (فرایند شارژ) انجام شد. به عبارتی دیگر، این حل به شکل پیوسته، با بازه‌های زمانی ۳۶۰۰ ثانیه (۱ ساعت) و با گام زمانی ۰/۰۰۰۱ انجام

^۱ شرط مرزی کوپله حرارتی، زمانی استفاده می‌شود که دیوار دو طرفه باشد؛ طوری که یک مرز دیوار، بین دو ناحیه

پیوستگی قرار داشته باشد. در این شرط، انتقال حرارت دو طرف دیوار، تحت تاثیر یکدیگر می‌باشند [۱۰۴].

شد. معیارهای همگرایی باقی مانده، برای معادلات پیوستگی و مومنتوم، 0.0001 و برای معادله انرژی، 0.000001 تعیین شد. زیرا، بر اساس تجربه حل مسائل مشابه، این تنظیمات منجر به همگرایی بهتری می‌شوند. برای تمامی بازه‌های زمانی، تا قبل از اتمام بازه، حل همگرا شد. برای هر بازه زمانی، متوسط دمای خروجی مخزن و متوسط دمای ماده تغییر فاز دهنده، محاسبه شد و برای ادامه حل، دمای ورودی به مخزن، با توجه به ساعت محلی آن، به عنوان شرط مرزی استفاده شد.

۳-۲-۸ اعتبارسنجی

پس از اتمام بازه زمانی ۱۸ تا ۱۹ به وقت محلی، حل متوقف شد. دمای خروجی مخزن (T_{out}) و متوسط دمای ماده تغییر فاز دهنده (T_{pcm})، پس از اتمام هر بازه زمانی، محاسبه شد. دمای ورودی (T_{in}) نیز، همان دمای خروجی از کلکتور خورشیدی می‌باشد که به شکل آزمایشگاهی، از قبل محاسبه شد. مقدار شار انرژی برای سیال داخل مخزن ذخیره‌سازی، از معادله (۳-۱) بدست آمد. برای این معادله، مقدار $\dot{m}$ و c_p ، به ترتیب 0.000715 kg/s و 4182 J/kg.K در نظر گرفته شد.

برای محاسبه انرژی کلی جذب شده، بوسیله ماده تغییر فاز دهنده (پارافین) در طول فرایند شارژ، از معادله (۳-۶) استفاده شد. مقدار جرم پارافین (m_{pcm})، با توجه به حجم کوئل مارپیچ و چگالی پارافین، $4/1 \text{ kg}$ محاسبه شد. همچنین، مقدار گرمای ویژه پارافین در حالت مایع (c_l) و دمای ذوب پارافین (T_{melt})، به ترتیب 2100 J/kg.K و 325 K در نظر گرفته شد.

برای محاسبه انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن (E_{st})، از معادله (۳-۸) استفاده شد. از روش خطای نسبی، به عنوان شاخص معتبر، برای نشان دادن تفاوت بین داده‌های آزمایشی و داده‌های شبیه‌سازی شده، استفاده شد. این خطا، طبق معادله (۳-۲۸) محاسبه می‌شود. طبق این معادله، D_{pre} مربوط به داده‌های شبیه‌سازی و D_{exp} مربوط به داده‌های آزمایشگاهی می‌باشد.

$$Er (\%) = \frac{|D_{pre} - D_{exp}|}{D_{pre}} \times 100 \quad (28-3)$$

کلیه اطلاعات مربوط به دمای ورودی و خروجی مخزن ذخیره‌سازی (T_{in} و T_{out})، متوسط دمای

ماده تغییر فاز دهنده (T_{pcm}) و مقدار انرژی حرارتی ذخیره شده در مخزن (E_{st})، برای تمامی بازه‌های زمانی در جدول (۳-۴) آورده شده‌است. همچنین، مقادیر انرژی ذخیره شده در مخزن که توسط ایرانمنش و همکاران [۱۰۴]، برای هر بازه زمانی محاسبه شد ($E_{st,paper}$)؛ در این جدول شرح داده شده‌است. مقادیر خطای نسبی، برای هر بازه زمانی، مربوط به E_{st} و $E_{st,paper}$ می‌باشد.

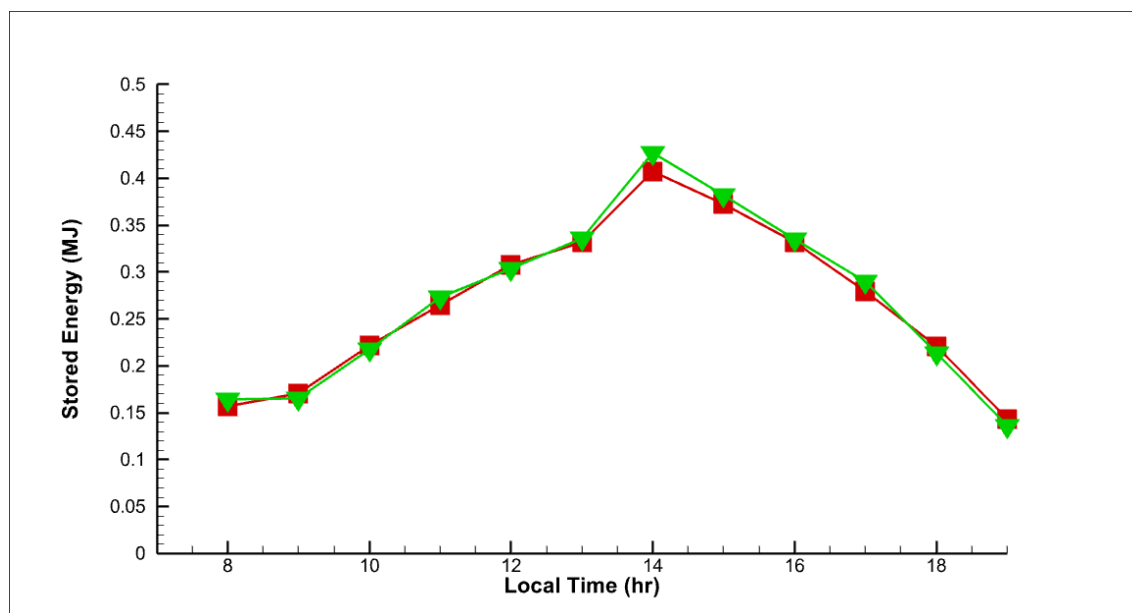
جدول (۳-۴). نتایج شبیه‌سازی عددی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی

ساعت محلی	T_{in} (K)	T_{out} (K)	T_{pcm} (K)	E_{st} (MJ)	$E_{st,paper}$ (MJ)	خطای نسبی (%)
۸	۳۳۰	۳۱۷/۱	۳۲۷/۱	۰/۱۵۶۹۴۲	۰/۱۶۴	۴/۰
۹	۳۳۶	۳۲۳/۴	۳۲۹	۰/۱۷۰۰۷۲	۰/۱۶۵	۳/۰
۱۰	۳۴۰/۵	۳۲۶/۵	۳۳۳/۳	۰/۲۲۲۱۶۵	۰/۲۱۸	۱/۹
۱۱	۳۴۵	۳۳۰	۳۳۷	۰/۲۶۴۷۸۷	۰/۲۷۳	۲/۹
۱۲	۳۴۸/۵	۳۳۳/۲	۳۴۱/۶	۰/۳۰۷۶۲۲	۰/۳۰۴	۱/۱
۱۳	۳۵۲	۳۳۶/۵	۳۴۴/۱	۰/۳۳۱۳۰۰	۰/۳۳۶	۱/۵
۱۴	۳۵۶	۳۳۹	۳۵۱	۰/۴۰۶۸۵۵	۰/۴۲۷	۴/۷
۱۵	۳۵۳	۳۳۷/۶	۳۴۹	۰/۳۷۲۴۱۲	۰/۳۸۲	۲/۴
۱۶	۳۴۹/۵	۳۳۵/۵	۳۴۶	۰/۳۳۱۵۱۲	۰/۳۳۵	۱/۰
۱۷	۳۴۶	۳۳۴	۳۴۲/۴	۰/۲۷۸۹۸۷	۰/۲۹۰	۴/۰
۱۸	۳۴۱	۳۳۰/۵	۳۳۷/۵	۰/۲۲۰۶۵۱	۰/۲۱۳	۳/۵
۱۹	۳۳۶	۳۲۷/۵	۳۳۱	۰/۱۴۳۱۵۷	۰/۱۳۶	۴/۹

در شکل (۳-۶)، تفاوت بین مقادیر ذخیره انرژی محاسبه شده در سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، توسط ایرانمنش [۱۰۴] و شبیه‌سازی فعلی، برای ساعات محلی مختلف نشان داده شده‌است. مطابق نمودار،

مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر محاسبه شده توسط ایرانمنش و همکاران، تطابق خوبی دارند. مقادیر خطای نسبی آن‌ها در هر بازه زمانی، ناچیز و قابل قبول می‌باشد. وجود این خطا، به علت: خطای ناشی از شبیه‌سازی عددی و همچنین، وجود اختلاف در برخی از پارامترهای هندسه، نسبت به هندسه بکار رفته توسط ایرانمنش و همکاران بود.

بطور کلی، ذخیره‌سازی انرژی در این سیستم، تا ساعت محلی ۱۴ عصر که میزان تابش خورشید، حداکثر می‌باشد؛ به شکل صعودی بود و از ساعت محلی ۱۴ تا ۱۹ عصر، با کم شدن میزان تابش خورشید، مقدار ذخیره‌سازی انرژی نیز کاهش یافت. مهم‌ترین پارامترهایی که در ذخیره‌سازی انرژی موثر هستند؛ عبارتند از: دبی جرمی و دمای ورودی آب، جرم پارافین، مساحت و جنس سطح کویل مارپیچ. همچنین این عوامل، تاثیر مستقیمی در مدت زمان ذوب پارافین و فرایند شارژ دارند. در صورت افزایش دمای ورودی و دبی جرمی آب، مقدار انرژی ذخیره‌سازی افزایش می‌یابد.

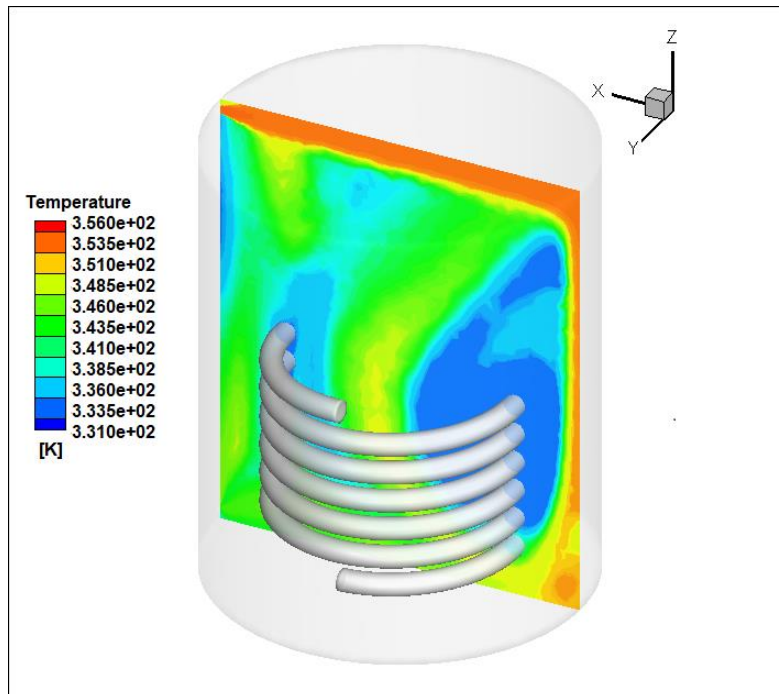


شکل (۳-۶). نمودار نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی

۳-۲-۹ نتایج شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی

شکل (۳-۷)، نمای برشی از پروفیل دمایی مخزن ذخیره‌سازی حرارتی را، نشان می‌دهد. این پروفیل دمایی، مربوط به ساعت محلی ۱۴ عصر و فرایند شارژ است که تابش خورشید در این ساعت، بالاترین

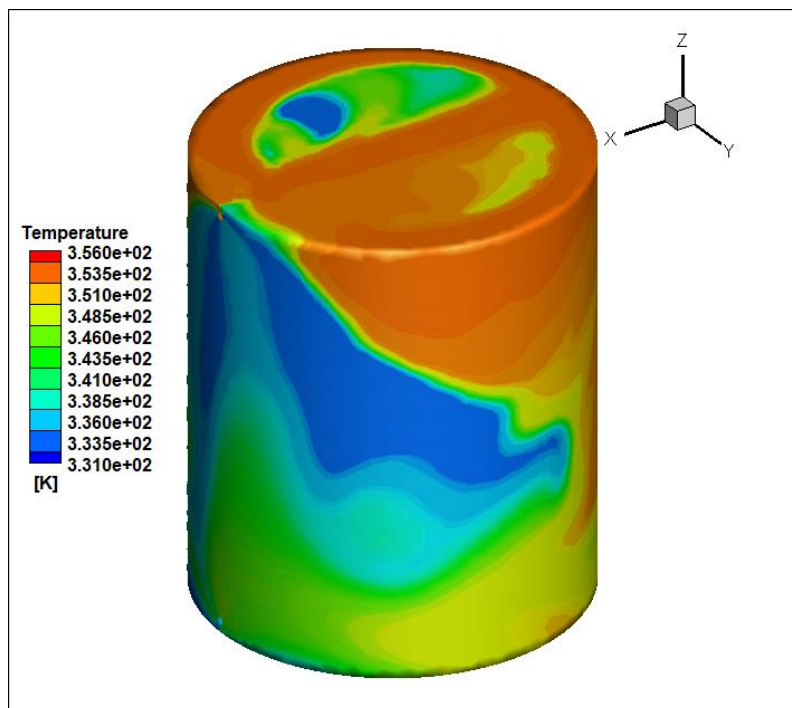
مقدار می‌باشد. طبق این پروفیل، آب با حداکثر دما، وارد مخزن شده‌است و گرمای خود را به پارافین، به عنوان ماده تغییر فاز دهنده داده‌است.



شکل (۷-۳). پروفیل دمایی نمای برشی از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی در ساعت محلی ۱۴ عصر

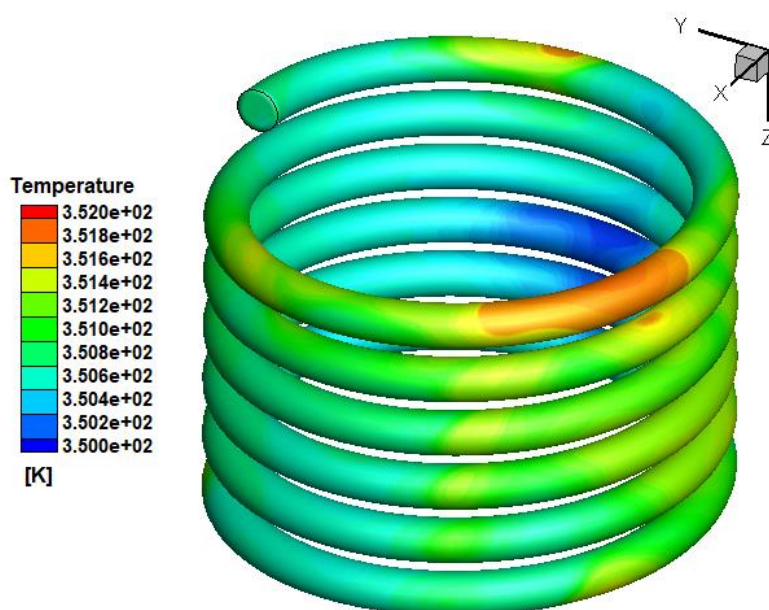
گرمای آب ورودی به مخزن ذخیره‌سازی، ابتدا به شکل جابجایی اجباری، به دیواره خارجی کویل مارپیچ منتقل و سپس، به شکل هدایتی، به دیواره داخلی کویل و پارافین منتقل شد. مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی (h_c) برای آب، برای تمامی ساعات محلی به طور متوسط، برابر ۱۴۸/۸ $W/m^2.K$ بود. ضریب انتقال حرارت جابجایی، برای جریان سیال حول کویل مارپیچ، از عدد ناسلت بدست می‌آید که این عدد، وابسته به اعداد رینولدز و پرانتل می‌باشد.

در شکل (۸-۳)، توزیع دما در مرزهای مخزن استوانه‌ای، در ساعت محلی ۱۴ عصر، نشان داده شده‌است. این پروفیل دمایی، نشان می‌دهد که اکثر اتلاف حرارتی، در مرزهای استوانه و حد فاصل بین ورودی و خروجی مخزن، رخ داده‌است.



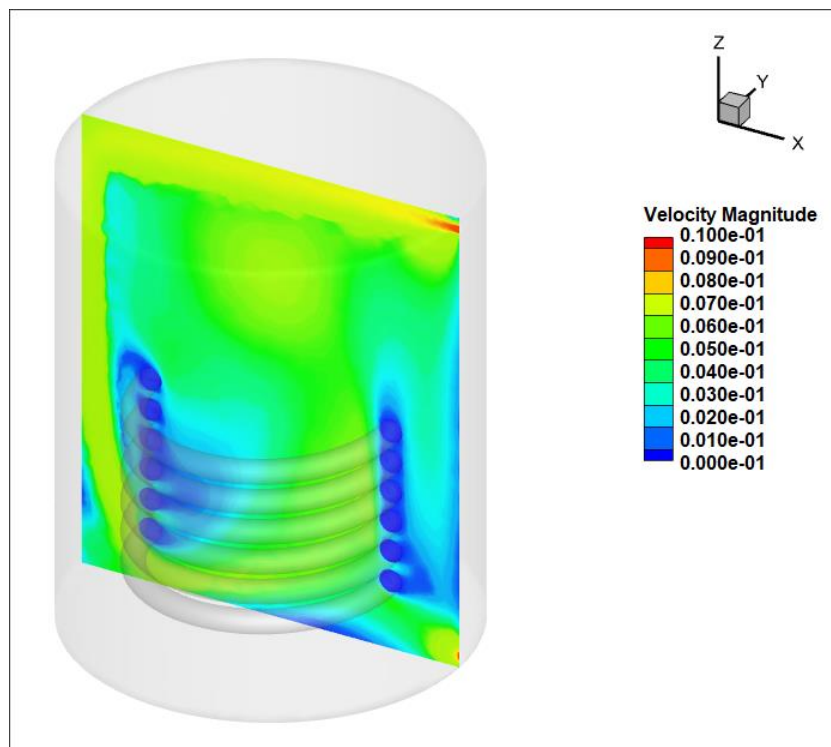
شکل (۳-۸). پروفیل دمایی در مرزهای مخزن ذخیره سازی حرارتی در ساعت محلی ۱۴ عصر

در شکل (۳-۹)، نحوه توزیع دما در مرزهای اطراف پارافین، در ساعت ۱۴ عصر، نشان داده شده است. با عبور جریان آب (سیال) حول کوئل مارپیچ، دمای پارافین افزایش می یابد. اختلاف دما، در بخش های بالایی و پایینی ماده تغییر فاز دهنده، تقریباً ۲ درجه می باشد. در حالی که این اختلاف، در شبیه سازی ایرانمنش و همکاران، حدود ۱/۷ درجه بود.



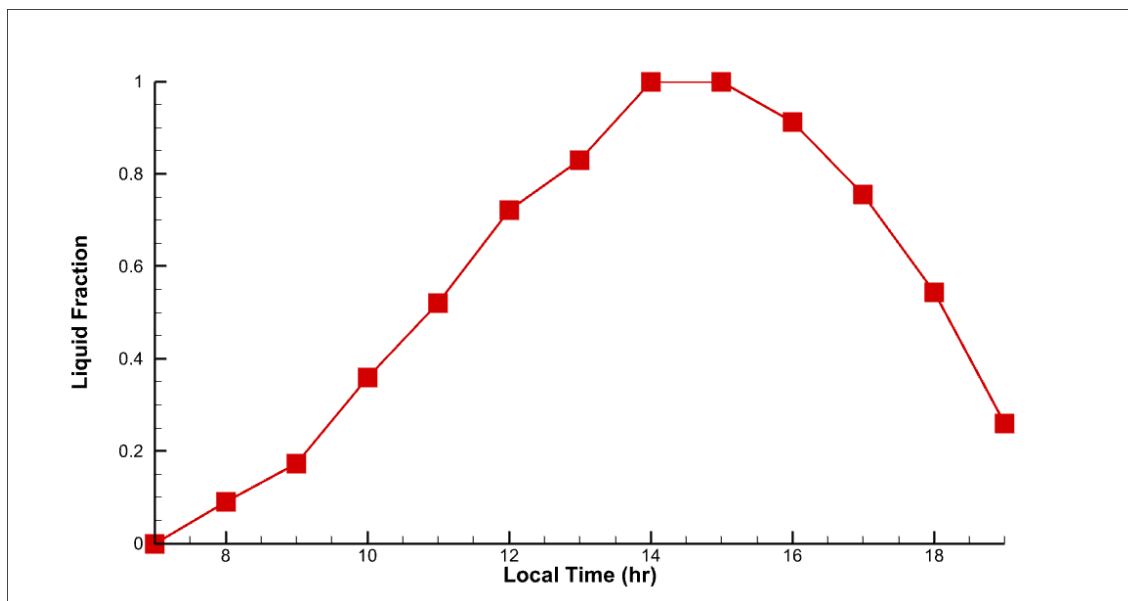
شکل (۳-۹). پروفیل دمایی در مرزهای اطراف ماده تغییر فاز دهنده در ساعت محلی ۱۴ عصر

در شکل (۳-۱۰)، پروفیل سرعت در مخزن ذخیره‌سازی حرارتی نشان داده شده‌است. آب با دبی ۰/۰۴۳ لیتر بر دقیقه، وارد مخزن می‌شود. به علت فشار ناشی از کوچک بودن قطر مقطع ورودی، آب به دیواره مخزن برخورد کرده و پس از تبادل حرارتی با کوئل مارپیچ حاوی پارافین، از مقطع موجود در نزدیک کف مخزن، خارج می‌شود.



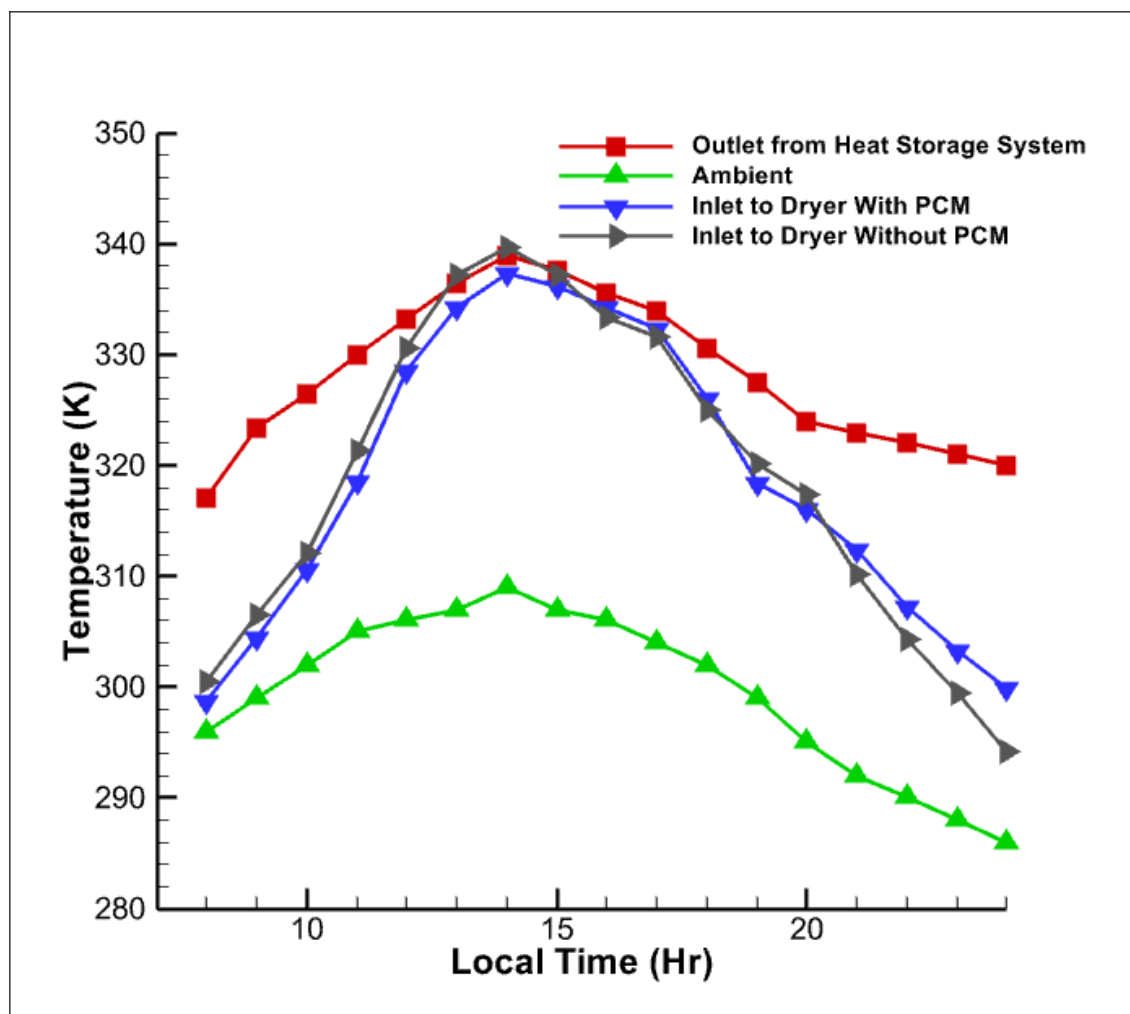
شکل (۳-۱۰). پروفیل سرعت در مخزن ذخیره‌سازی حرارتی

در شکل (۳-۱۱)، نمودار کسر مایع پارافین و تغییرات فاز آن در کوئل مارپیچ، برای ساعات محلی مختلف، نشان داده شده‌است. طبق این نمودار، پارافین در ساعت محلی ۷ صبح، در فاز جامد (کسر مایع صفر) قرار داشت. با رسیدن دمای پارافین به نقطه ذوب، فرایند شارژ آغاز می‌شود. افزایش دمای آب ورودی به مخزن، باعث بالا رفتن دمای پارافین و ذوب آن می‌شود و تا ساعت ۱۴ عصر، پارافین کاملاً در فاز مایع (کسر مایع یک) قرار می‌گیرد. فرایند ذوب، در جهت شعاعی از مرزهای پارافین شروع و به سمت مرکز کوئل ادامه می‌یابد. با کاهش دمای آب ورودی، دمای پارافین نیز کاهش می‌یابد و از ساعت محلی ۱۵، پارافین شروع به تغییر فاز مجدد و انجماد می‌کند.



شکل (۳-۱۱). نمودار تغییر فاز پارافین در کویل مارپیچ، نسبت به ساعات محلی مختلف

در شکل (۳-۱۲)، مقادیر ورودی به مبدل حرارتی (دمای محیط)، دمای ورودی به خشک‌کن خورشیدی در صورت وجود پارافین، بدون آن و دمای خروجی از سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، برای هر ساعت محلی با یکدیگر مقایسه شدند. مقادیر ورودی به خشک‌کن، همان مقادیر خروجی از مبدل حرارتی می‌باشند که به شکل آزمایشگاهی بررسی شدند [۱۰۴]. همچنین، مقادیر دمای خروجی از مخزن، از ساعت محلی ۲۰ به بعد، بر اساس بررسی‌های ایرانمنش و همکاران [۱۰۴] می‌باشد. این نمودارها، اثر وجود ماده ذخیره‌سازی حرارتی را، در سیستم خشک کردن نشان می‌دهد. مقدار دمای خروجی از مخزن ذخیره‌سازی، تا ساعت محلی ۱۴ که بیشترین تابش خورشید وجود دارد؛ صعودی می‌باشد. با کاهش حرارت خورشید، مقدار ذخیره‌سازی کاهش می‌یابد. از ساعت محلی ۲۰ به بعد، اثر فرایند تخلیه مشخص می‌باشد. در فرایند تخلیه، با آزاد شدن حرارت ماده تغییر فاز دهنده، دمای خروجی از مخزن، شیب ملایم و تقریباً ثابتی می‌گیرد و باعث حفظ دمای مطلوب، برای ورود به اتاق خشک‌کن می‌شود.



شکل (۳-۱۲). مقایسه دماهای ورودی و خروجی از مبدل حرارتی با فرض وجود پارافین و بدون آن [۱۰۴]

۳-۳ مدل سازی خشک کن خورشیدی

طبق مباحث بخش قبل، آب پس از خروج از سیستم ذخیره سازی حرارتی، وارد مبدل حرارتی می شود. از ورودی دیگر مبدل حرارتی، هوا با دبی مشخص به کمک فن^۱، از محیط وارد می شود و پس از تبادل حرارتی با آب، از مبدل خارج و وارد خشک کن خورشیدی می شود. بخش مبدل حرارتی، به شکل آزمایشگاهی توسط ایرانمنش و همکاران [۱۰۴]، بررسی شد.

برای مدل سازی خشک کن خورشیدی، از خشک کن غیرمستقیم استفاده شد. زیرا مطابق با مطالب فصل اول، این نوع خشک کن ها نسبت به نوع مستقیم، دارای مزیت بیشتری می باشند و کیفیت محصول

^۱Fan

در خشک‌کن غیرمستقیم، بالاتر می‌باشد. همچنین، به دلیل هزینه بالای اقتصادی خشک‌کن هیبریدی، خشک‌کن غیرمستقیم ترجیح داده‌شد. از همه مهم‌تر، با توجه به آب و هوای شهر کرمان، خشک‌کن غیرمستقیم مناسب می‌باشد.

هوا با دبی مشخص، وارد خشک‌کن خورشیدی می‌شود. سه سینی در خشک‌کن خورشیدی قرار داده‌شد. این سینی‌ها، دارای روزنه‌های عبور هوا و همچنین، محل قرارگیری محصول می‌باشند. برای تحلیل و بررسی نحوه توزیع حرارت در خشک‌کن خورشیدی، شبیه‌سازی عددی انجام شد. در ادامه، به شرح معادلات حاکم بر اتاق خشک‌کن خورشیدی می‌پردازیم. سپس، به روند مدل‌سازی آن به کمک شبیه‌سازی عددی، پرداخته می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از شبیه‌سازی، با داده‌های عددی بررسی شده، توسط ایرانمنش و همکاران [۱۰۴]، مقایسه خواهیم کرد.

۳-۳-۱ معادلات حاکم بر خشک‌کن خورشیدی

به طور معمول، برای توصیف تأثیر استفاده از تجهیزات دیگر، که با خشک‌کن‌ها ترکیب می‌شوند؛ باید بازده خشک شدن در نظر گرفته شود. بازده خشک کردن، نرخ انرژی مورد استفاده برای گرمایش و استخراج رطوبت از محصول، بر روی انرژی مصرف شده (مکانیکی و حرارتی) است. برای محاسبه بازده خشک کردن (خشک‌کن)، مقدار انرژی مورد استفاده برای گرم کردن و از بین بردن رطوبت (آب) از محصول و مقدار کل انرژی وارد شده به سیستم خشک‌کن، در طی فرآیند خشک کردن باید بدست آید که به شرح زیر می‌باشد:

$$\eta_{dryer} = \frac{Q_{out,dryer}}{Q_{in,dryer} + E_{mec}} \quad (29-3)$$

انرژی گرمایی ورودی به خشک‌کن (با در نظر گرفتن عایق بودن کانال‌های ارتباطی)، بوسیله معادله زیر بیان می‌شود:

$$Q_{in,dryer} = \left[\left(\int_0^t \dot{m}(t) * c_p (T_{in,coll} - T_{out,coll}) dt \right) - \int_0^t \dot{m}(t) * c_p (T_{in,s} - T_{out,s}) dt \right] \quad (30-3)$$

۲-۳-۳ هندسه حل

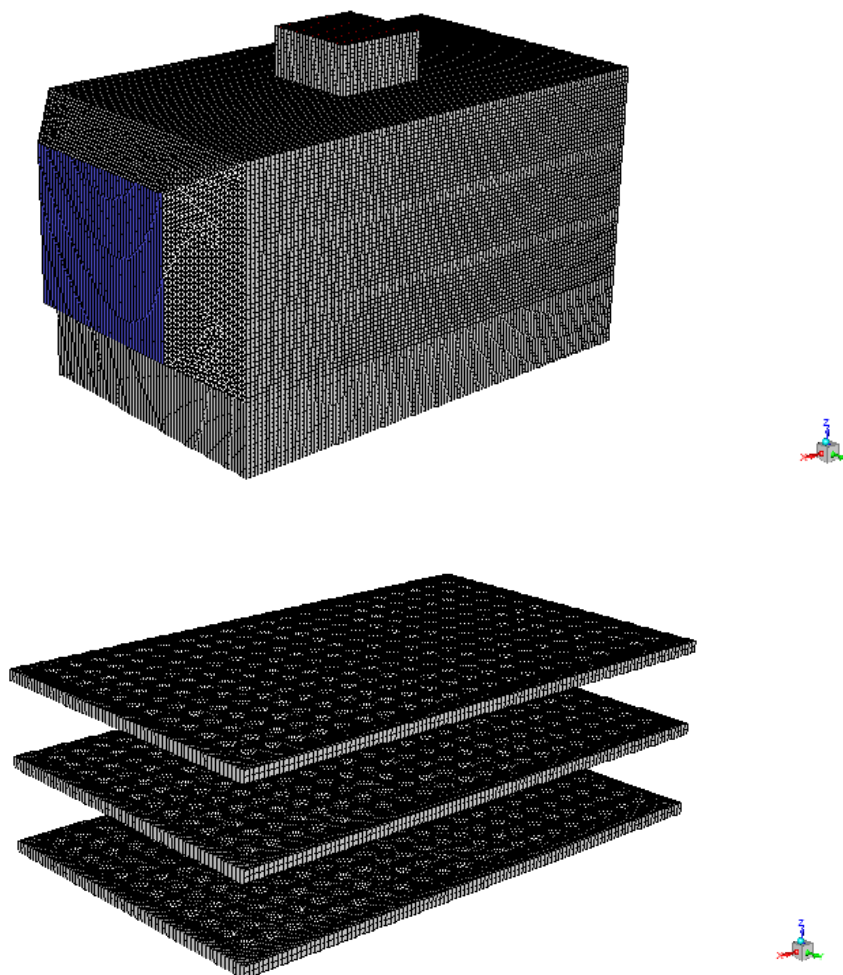
برای طراحی هندسه اتاق خشک کن خورشیدی و سینی‌ها، از نرم‌افزار کتیا استفاده شد. اتاق خشک-کن، شامل: مکعب مستطیلی به ابعاد $600 \times 600 \times 1000$ میلی‌متر، از جنس چوب MDF می‌باشد. مقطع ورودی به خشک‌کن، با فاصله ۱۰ سانتی‌متر از مکعب مستطیل، به فرم انبساطی می‌باشد. ابعاد ورودی به محفظه خشک‌کن، 320×383 میلی‌متر و ابعاد خروجی از محفظه، 200×200 میلی‌متر می‌باشد.

سه سینی به ابعاد 500×900 میلی‌متر، از جنس پلی‌اتیلن، به ضخامت ۲ سانتی‌متر طراحی شد که به فاصله ۱۵ سانتی‌متر از یکدیگر، در محفظه خشک‌کن قرار گرفتند. قطر سوراخی سینی‌ها، ۳۰ میلی‌متر و فاصله بین مرکز هر سوراخ، ۴۵ میلی‌متر می‌باشد.

۳-۳-۳ شبکه‌بندی هندسه و تست استقلال حل از شبکه

پس از ایجاد هندسه، برای حل عددی، محدوده حل شبکه‌بندی شد. برای شبکه‌بندی هندسه و همچنین، ارزیابی شبکه ایجاد شده، از نرم‌افزار گمبیت استفاده شد. با توجه به اینکه کیفیت شبکه، بر کیفیت حل اثر می‌گذارد و به منظور مستقل شدن نتایج از شبکه، آنالیز استقلال از شبکه ایجاد شد. برای آنالیز استقلال نتایج از شبکه، از پنج سری شبکه، بدون تغییر ابعاد هندسه اصلی استفاده شد. تعداد شبکه در این پنج سری، به ترتیب: ۱۵۰۰۰۰، ۲۲۰۰۰۰، ۳۰۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰۰ بود. نوع شبکه استفاده شده، شبکه هیبریدی بود. همچنین، برای هر کدام از شبکه‌ها، آنالیز اسکینوس انجام شد. نتایج آنالیز، برای هر کدام از شبکه‌ها جهت شبیه‌سازی عددی، مطلوب بود. تمامی شرایط گسسته‌سازی، شرایط مرزی، شرایط اولیه، معادلات و جنس مواد بکار رفته شده، برای آنالیز استقلال حل از شبکه، مشابه با شبیه‌سازی اصلی خشک‌کن خورشیدی بود. از شرایط ساعت محلی ۸ صبح که

در ادامه به آن خواهیم پرداخت؛ برای آنالیز استقلال حل از شبکه، استفاده شد. هندسه محفظه خشک-کن و سینی‌های طراحی شده همراه با شبکه آن‌ها، در شکل (۳-۱۳) نشان داده شده‌است. تعداد این شبکه‌ها، ۳۰۰۰۰۰ عدد می‌باشد.



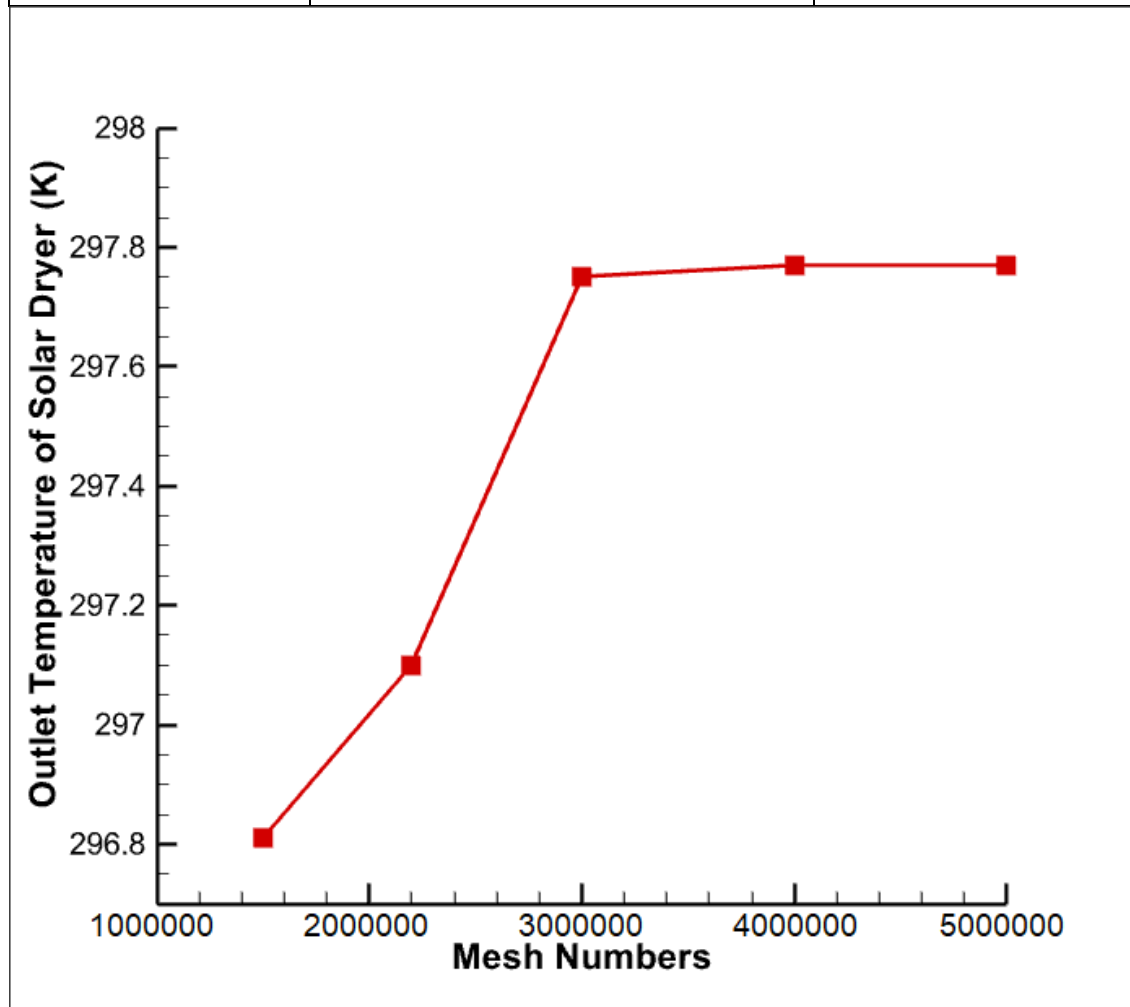
شکل (۳-۱۳). هندسه و شبکه‌بندی اتاق خشک‌کن خورشیدی و سینی‌ها با تعداد شبکه ۳۰۰۰۰۰

پس از اتمام همگرایی در ساعت ۸ صبح برای تمامی شبکه‌ها، دمای خروجی محفظه خشک‌کن (T_{out})، برای هر سری از شبکه‌ها محاسبه شد. در جدول (۳-۵) و شکل (۳-۱۴)، نتایج حاصل از آنالیز استقلال حل از شبکه، برای هندسه خشک‌کن نشان داده شده‌است. مطابق این جدول و نمودار، برای تعداد شبکه ۳۰۰۰۰۰ به بالا، نتایج حاصل از حل، با خطای بسیار ناچیزی تغییر کرد. بنابراین، نتایج حل در این بازه شبکه‌ای، مستقل از تعداد و کیفیت شبکه می‌باشند. همچنین، برای شبیه‌سازی سایر ساعات محلی، از تعداد شبکه ۳۰۰۰۰۰ استفاده شد. گزارش‌های ارزیابی این شبکه نشان داد که

اسکیونس، برای اتاق خشک کن، حدود ۰/۴۵ است و این عدد، برای هرگونه شبیه سازی دینامیک سیالات محاسباتی، مناسب است.

جدول (۳-۵). نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای خشک کن خورشیدی

تعداد شبکه ها	دمای خروجی از محفظه خشک کن (K)	درصد تغییرات
۱۵۰۰۰۰	۲۹۶/۸۱	---
۲۲۰۰۰۰	۲۹۷/۱۰	۰/۰۹۷
۳۰۰۰۰۰	۲۹۷/۷۵	۰/۲۱۸
۴۰۰۰۰۰	۲۹۷/۷۷	۰/۰۰۶
۵۰۰۰۰۰	۲۹۷/۷۷	۰/۰۰۰



شکل (۳-۱۴). نمودار نتایج آنالیز استقلال حل از شبکه برای خشک کن خورشیدی

۴-۳-۳ خواص مواد بکار رفته

در شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، از هوا به عنوان سیال استفاده شد. در جدول (۴-۳)، خواص ترمو-فیزیکی هوا آورده شده‌است:

جدول (۴-۳). خواص ترمو-فیزیکی هوا

۱/۲۲۵	چگالی $[kg/m^3]$
۱۰۰۶/۴۳	گرمای ویژه حرارتی $[J/kg.K]$
۰/۰۲۴۲	ضریب هدایت حرارتی $[W/m.K]$
$1/7894 \times 10^{-5}$	ویسکوزیته $[kg/m.s]$

همچنین، اتاق خشک‌کن و سینی‌ها، به ترتیب از جنس چوب و پلی‌اتیلن می‌باشند. خواص ترمو-فیزیکی پلی‌اتیلن و چوب استفاده شده در شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، در جدول (۷-۳) آورده شده‌است.

جدول (۷-۳). خواص ترمو-فیزیکی مواد بکار رفته شده در خشک‌کن خورشیدی

مواد [Materials]	ضریب هدایت حرارتی [W/m.K]	چگالی [kg/m ³]	گرمای ویژه حرارتی [J/kg.K]
پلی‌اتیلن	۰/۴۸۵	۹۵۰	۱۹۰۰
چوب	۰/۷۱۳	۷۰۰	۲۳۱۰

۵-۳-۳ معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی نیز، در نرم‌افزار فلوئنت انجام شد. در این شبیه‌سازی، با توجه به نبود ماده تغییر فاز دهنده و عملیات ذوب و انجماد، معادلات کمی ساده‌تر بودند. معادله پیوستگی برای هوا، به عنوان سیال مورد استفاده در خشک‌کن خورشیدی، به شکل تراکم‌ناپذیر فرض

شد. این معادله، مشابه با شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، به فرم معادله (۳-۱۰) بود.

معادله مومنتوم، برای هوا در خشک‌کن خورشیدی، با فرض جریان پایا و بدون در نظر گرفتن فرض چگالی مبتنی بر بوسینسک، عبارت است از:

$$\vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \frac{1}{\rho} (-\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V}) \quad (3-31)$$

معادله انرژی حرارتی، برای هوا در خشک‌کن خورشیدی، با فرض پایا بودن جریان، بوسیله معادله (۳-۳۲) بیان می‌شود:

$$\nabla \cdot (\vec{V}h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{\rho c_p} \nabla h \right) \quad (3-32)$$

۳-۳-۶ گسسته‌سازی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی

برای گسسته‌سازی معادلات حاکم بر شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی، از بین روش‌های مختلف دینامیک سیالات محاسباتی، از الگوریتم SIMPLE استفاده شد. زیرا، برای شبیه‌سازی‌های مشابه، پیشنهاد شده‌است. همچنین، برای حل معادلات مومنتوم و انرژی، طرح آپویند مرتبه دوم بکار گرفته‌شد. روش SIMPLE برای دو بعد، به شرح زیر است:

۱- ابتدا مقادیر اولیه u ، v و P حدس زده می‌شود.

۲- با کمک این مقادیر، معادلات گسسته شده مومنتوم حل می‌شود.

$$a_{i,j} u^*_{i,j} = \sum a_{nb} u^*_{nb} + (P^*_{i-1,j} - P^*_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3-33)$$

$$a_{i,j} v^*_{i,j} = \sum a_{nb} v^*_{nb} + (P^*_{i,j-1} - P^*_{i,j}) A_{i,j} + b_{i,j} \quad (3-34)$$

۳- معادله گسسته شده تصحیح فشار حل می‌شود.

$$a_{i,j} P'_{i,j} = a_{i-1,j} P'_{i-1,j} + a_{i+1,j} P'_{i+1,j} + a_{i,j-1} P'_{i,j-1} + a_{i,j+1} P'_{i,j+1} + b \quad (3-35)$$

$$b = F^*_w - F^*_e + F^*_s - F^*_n \quad (3-36)$$

۴- سرعت‌ها و فشارها تصحیح می‌شوند.

$$u_{i,j} = u^*_{i,j} + (P'_{I-1,j} - P'_{I,j})A_{i,j} \quad (37-3)$$

$$v_{I,j} = v^*_{I,j} + (P'_{I,j-1} - P'_{I,j})A_{I,j} \quad (38-3)$$

$$P_{I,j} = P^*_{I,j} + P'_{I,j} \quad (39-3)$$

۵- اگر مقادیر u ، v و P با مقادیر حدس زده شده همگرا شوند؛ حل متوقف می شود. در غیر این صورت، مراحل بالا، با مقادیر جدید تکرار می شوند.

۷-۳-۳ شرایط حاکم بر شبیه سازی عددی

شبیه سازی عددی خشک کن خورشیدی، به شکل سه بعدی و حالت پایا انجام شد. در این شبیه سازی، هوا با دبی جرمی 0.25 kg/s ، از مقطع ورودی خشک کن وارد و پس از گذر جریان در خشک کن و سوراخ های سینی ها، در نهایت از مقطع خروجی خشک کن، خارج شد. شبیه سازی عددی، به علت فرض تراکم ناپذیر بودن هوا، بر اساس مدل مبتنی بر فشار انجام شد.

یکی از اصلی ترین پارامترهایی که در شبیه سازی خشک کن تأثیر می گذارد؛ عدد رینولدز است. با توجه به مقدار بالای عدد رینولدز ($Re > 2000$) که از شرایط مختلف بدست آمد؛ مدل آشفته در شبیه سازی عددی، در نظر گرفته شد. اثر ویسکوزیته سیال، شناوری و آشفتگی نیز، باید برای فرآیند شبیه سازی در نظر گرفته شود؛ تا تصویر دقیق و همراه با جزئیات، از توزیع هوا و انتقال حرارت سیستم خشک شدن را نشان دهد. از بین مدل های آشفتگی، مدل $k - \varepsilon$ انتخاب شد. این مدل، دارای دو معادله انتقال است که پدیده آشفتگی را در شبیه سازی عددی توصیف می کند. مدل $k - \varepsilon$ ، به عنوان یک مدل موفق، به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد و با کاربردهایی در زمینه کشاورزی و صنعتی، اعتبارسنجی می شود. دو معادله آشفتگی $k - \varepsilon$ ، برای مدل سازی خشک کن خورشیدی، به صورت زیر نشان داده می شوند:

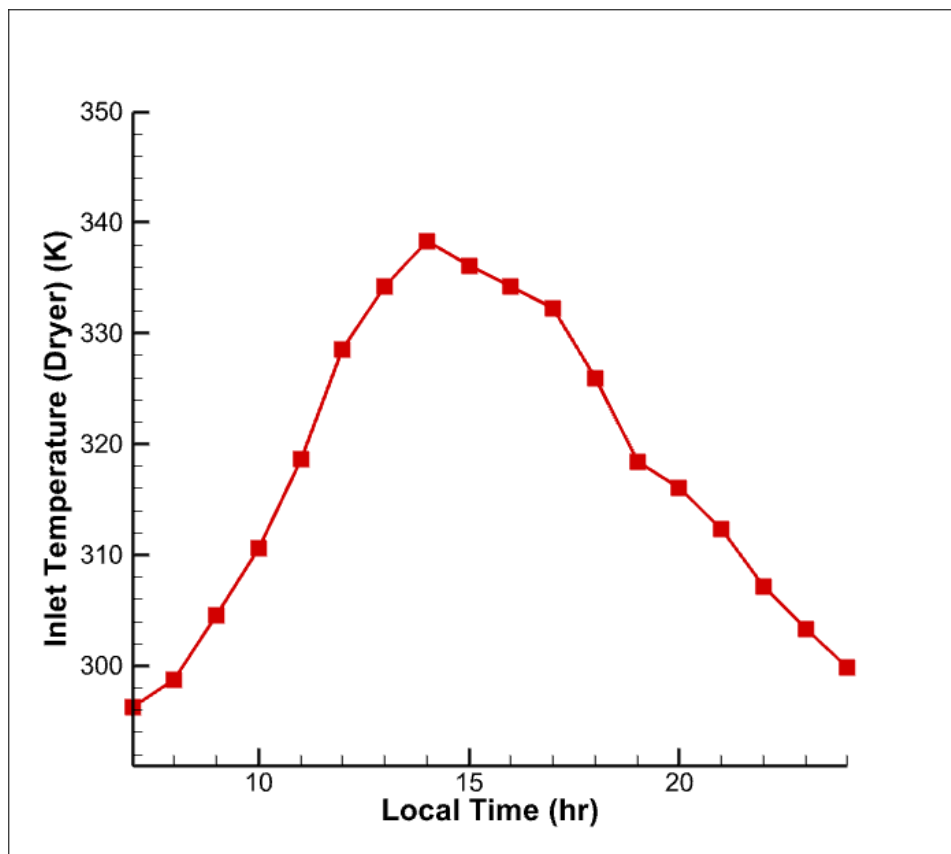
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m - S_k \quad (40-3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (41-3)$$

u_i بردار سرعت متوسط بر حسب زمان (m/s)، σ_k عدد پرانتل آشفته برای k ، G_k انرژی جنبشی آشفته تولید شده به علت گرادیان سرعت متوسط (J)، G_b انرژی جنبشی آشفته تولید شده به علت بویانسی (J)، Y_m ظرفیت انبساط نوسانی، S_k ترم‌های منبع افزوده شده به k ، σ_ε عدد پرانتل آشفته برای ε ، S_ε ترم‌های منبع افزوده شده به ε می‌باشد.

برای شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی، دامنه محاسباتی در دمای یکنواخت، ثابت در نظر گرفته‌شد. تمام سطوح هندسه در نظر گرفته‌شده، صاف و جریان سیال بر روی آن، بدون اصطکاک تعیین شد. برای تعیین دمای اولیه، از دمای محیط هر ساعت محلی، مطابق با شکل (3-5) استفاده شد. به عنوان شرایط مرزی، در سمت ورودی خشک‌کن، شرط دمای سیال و دبی سیال انتخاب شد. دبی سیال، 0.25 kg/s انتخاب شد. برای دمای ورودی سیال (هوا)، از دماهای خروجی از مبدل حرارتی که به شکل آزمایشگاهی توسط ایرانمنش و همکاران بررسی شد؛ برای هر ساعت محلی استفاده شد. دماهای ورودی به خشک‌کن خورشیدی برای هر ساعت محلی، در شکل (3-15) نشان داده شده‌است. دیواره‌های خشک‌کن، دارای شرط انتقال حرارت جابجایی با محیط اطراف می‌باشند. دیواره سینی‌ها، به عنوان دیواره‌های ثابت انتخاب شدند. همچنین برای دیواره سینی‌ها، شرط کوپله حرارتی، به عنوان شرط مرزی تعیین شد. در سمت خروجی خشک‌کن، شرط فشار خروجی صفر قرار داده‌شد.

شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی، به شکل ناپیوسته برای هر ساعت محلی، از ۷ تا ۲۴ انجام شد. معیارهای همگرایی باقی‌مانده، برای معادلات پیوستگی و مومنتوم، 0.0001 و برای معادله انرژی، 0.000001 تعیین شد. پس از اتمام همگرایی در هر ساعت محلی، دمای خروجی از خشک‌کن خورشیدی، محاسبه شد. برای ساعت محلی بعد، مجدداً دمای ورودی و دمای اولیه، مطابق با مطالب گفته شده، مقداردهی شد.



شکل (۳-۱۵). دماهای ورودی به خشک کن خورشیدی در ساعات محلی مختلف [۱۰۴]

۳-۳-۸ اعتبارسنجی

پس از اتمام همگرایی در تمامی ساعات محلی ۷ تا ۲۴، دمای خروجی محفظه خشک کن (T_{out})، برای تمامی ساعات محلی، محاسبه شد. با کمک معادله (۳-۳۰)، مقدار انرژی گرمایی ورودی به خشک کن برحسب MJ ، به فرم معادله (۳-۴۲) محاسبه شد. برای حل این معادله، مقدار دمای ورودی (T_{in}) برای تمامی ساعات محلی، از شکل (۳-۱۵) تعیین شد. مقدار دبی جرمی ($\dot{m}$) برای تمامی ساعات محلی، 0.025 kg/s در نظر گرفته شد. طبق جدول (۳-۶)، گرمای ویژه هوا (c_p)، $1006/43 \text{ J/kg.K}$ تعیین شد.

$$Q_{in} = 10^{-6} \times \dot{m} \times c_p \times (T_{in} - T_{out}) \times 3600 \quad (۳-۴۲)$$

جهت اعتبارسنجی شبیه سازی عددی خشک کن خورشیدی، مقدار انرژی گرمایی ورودی محاسبه شده برای هر ساعت محلی، با مقادیر محاسبه شده توسط ایرانمنش و همکاران [۱۰۴] ($Q_{in,paper}$)،

مقایسه شد. مشابه با شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، برای محاسبه خطای نسبی، بین مقادیر انرژی گرمایی ورودی بدست آمده از شبیه‌سازی عددی و مقادیر بدست آمده توسط ایرانمنش، از معادله (۳-۲۸) استفاده شد.

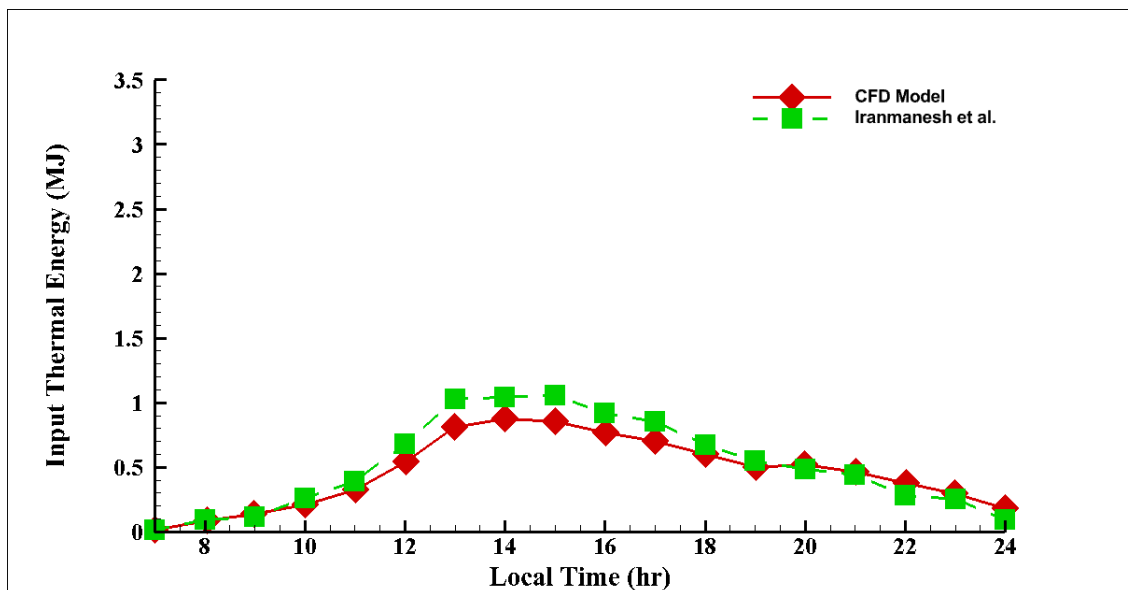
در جدول (۳-۸)، کلیه اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، شامل: دمای ورودی به خشک‌کن (T_{in})، دمای خروجی از خشک‌کن (T_{out})، انرژی گرمایی ورودی به خشک‌کن (Q_{in})، انرژی گرمایی ورودی محاسبه شده توسط ایرانمنش [۱۰۴] ($Q_{in,paper}$) و مقادیر خطای نسبی برای هر ساعت محلی، شرح داده شده‌است. همچنین، در شکل (۳-۱۶)، تفاوت بین مقادیر انرژی گرمایی ورودی محاسبه شده توسط ایرانمنش و مقادیر شبیه‌سازی، نشان داده شده‌است. مطابق نمودار، مقادیر شبیه‌سازی با مقادیر محاسبه شده توسط ایرانمنش و همکاران، تطابق خوبی دارند و مقادیر خطای نسبی آن‌ها، در هر بازه زمانی، تقریباً ناچیز می‌باشد. علت وجود خطای زیاد در بعضی ساعات محلی، تفاوت ابعاد ورودی و خروجی خشک‌کن، نسبت به هندسه ایرانمنش بود که با توجه به دبی جرمی یکسان، روی سرعت ورودی تاثیرگذار بود.

مقدار انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن خورشیدی، از ساعت محلی ۷ تا ۱۴، به علت افزایش تابش خورشید، به شکل صعودی بود. سپس، با کاهش تابش خورشید تا ساعت ۱۹، انرژی حرارتی ورودی نیز کاهش یافت. در نهایت، از ساعت ۱۹ به بعد و شروع فرایند تخلیه در مخزن ذخیره‌سازی، انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن، با شیب ملایمی کاهش یافت و موجب حفظ دمای مطلوب و عدم افت بازده خشک‌کن، در ساعات خارج از دسترس بودن خورشید، شد.

یکی از پارامترهای موثر، در مقدار انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن خورشیدی، دبی جرمی هوا می‌باشد که مطابق با معادله (۳-۲۹)، تاثیر مستقیمی بر بازده خشک‌کن می‌گذارد. افزایش دبی جرمی هوا، باعث افزایش انرژی حرارتی ورودی به اتاق خشک‌کن و کم شدن زمان خشک شدن، می‌شود. اما، افزایش بیش از حد دبی جرمی، منجر به کاهش بازده خشک کردن می‌شود.

جدول (۳-۸). نتایج شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی

خطا (%)	$Q_{in,pa} (MJ)$	$Q_{in} (MJ)$	$T_{out} (K)$	$T_{in} (K)$	ساعات محلی
۶/۴	۰/۰۱۱۰۷۵	۰/۰۱۰۳۶۵	۲۹۶/۲	۲۹۶/۳	۷
۶/۴	۰/۰۸۸۶۰۷	۰/۰۹۴۳۱۵	۲۹۷/۷	۲۹۸/۷	۸
۱۱/۳	۰/۱۳۲۹۱۱	۰/۱۱۷۸۷۹	۳۰۳/۲	۳۰۴/۵	۹
۲۴/۸	۰/۲۱۰۴۴۳	۰/۲۶۲۶۶۶	۳۰۷/۷	۳۱۰/۶	۱۰
۲۰/۵	۰/۳۲۱۲۰۲	۰/۳۸۷۳۲۵	۳۱۴/۴	۳۱۸/۶	۱۱
۲۵/۵	۰/۵۴۲۷۲۱	۰/۶۸۱۳۳۳	۳۲۱	۳۲۸/۵	۱۲
۲۷/۱	۰/۸۰۸۵۴۴	۱/۰۲۸۴۲۵	۳۲۲/۹	۳۳۴/۳	۱۳
۱۸/۷	۰/۸۷۵۰۰۰	۱/۰۳۹۱۸۸	۳۲۶/۸	۳۳۸/۳	۱۴
۲۴/۰	۰/۸۵۲۸۴۸	۱/۰۳۹۰۱۹	۳۲۴/۵	۳۳۶/۱	۱۵
۲۰/۲	۰/۷۶۴۲۴۰	۰/۹۱۸۸۵۲	۳۲۴/۱	۳۳۴/۲	۱۶
۲۲/۷	۰/۶۹۷۷۸۴	۰/۸۵۶۳۷۲	۳۲۲/۹	۳۳۲/۳	۱۷
۱۲/۱	۰/۵۹۸۱۰۱	۰/۶۷۰۷۰۸	۳۱۸/۶	۳۲۶	۱۸
۹/۵	۰/۴۹۸۴۱۷	۰/۵۴۶۱۹۶	۳۱۲/۴	۳۱۸/۸	۱۹
۷/۳	۰/۵۲۰۵۶۹	۰/۴۸۲۵۳۶	۳۱۰/۷	۳۱۶	۲۰
۴/۷	۰/۴۶۵۱۸۹	۰/۴۴۳۱۹۱	۳۰۷/۴	۳۱۲/۳	۲۱
۲۵/۴	۰/۳۷۶۵۸۲	۰/۲۸۰۶۶۳	۳۰۴/۱	۳۰۷/۲	۲۲
۱۴/۴	۰/۲۹۹۰۵۰	۰/۲۵۵۷۸۵	۳۰۰/۵	۳۰۳/۳	۲۳
۱۵/۸	۰/۱۷۷۲۱۵	۰/۰۹۵۹۹۲	۲۹۸/۸	۲۹۹/۹	۲۴

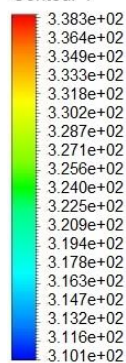


شکل (۳-۱۶). نمودار نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی

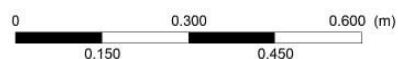
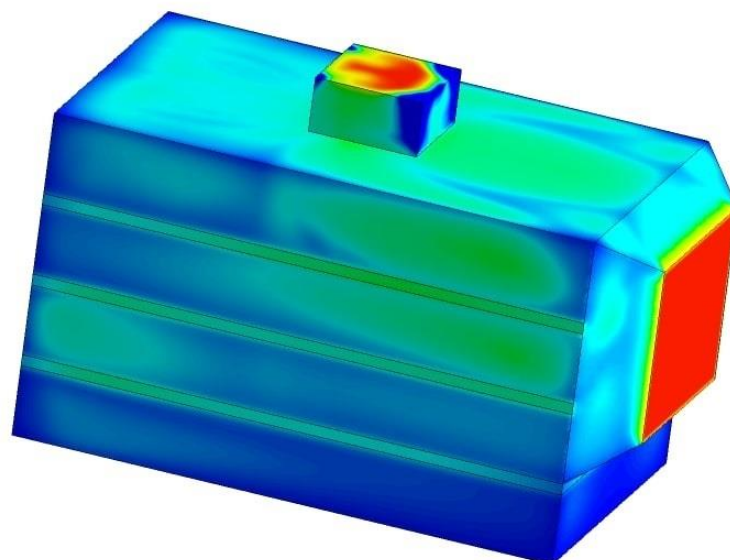
۹-۳-۳ نتایج شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی

شکل‌های (۳-۱۷) و (۳-۱۸) به ترتیب، پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن و پروفیل دمایی در مقطع برشی از وسط اتاق خشک‌کن را نشان می‌دهند. این پروفیل‌ها، مربوط به ساعت محلی ۱۴ عصر که تابش خورشیدی حداکثر است؛ می‌باشند. همچنین، همزمان با فرایند شارژ، در سیستم ذخیره-سازی حرارتی می‌باشند. با حرکت سیال (هوا) در داخل اتاق خشک‌کن، گرمای سیال توسط دیواره‌های اتاق و سینی‌ها جذب شد. بیشترین مقدار دما، ۳۳۸ کلوین بود. کمترین دما، مربوط به دیواره‌های اتاق بود که مقدار آن، ۳۱۰ کلوین بود.

Temperature
Contour 1



[K]

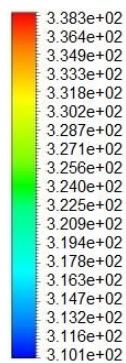


ANSYS
R19.1

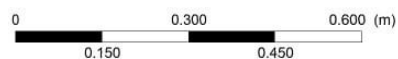
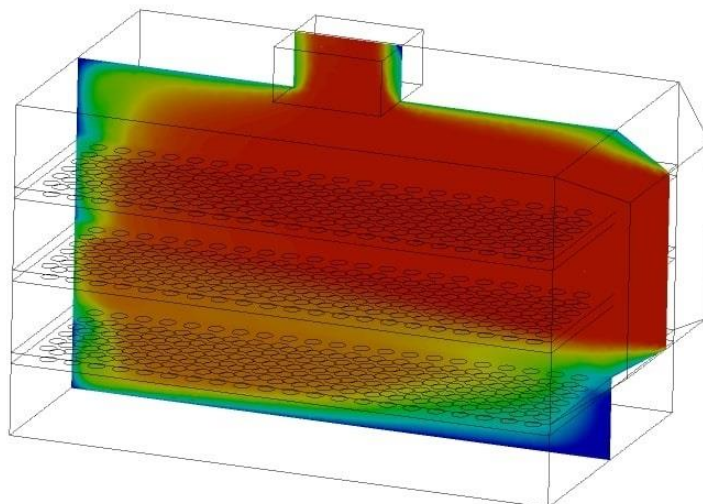


شکل (۳-۱۷). پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن خورشیدی در ساعت محلی ۱۴ عصر

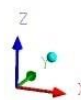
Temperature
Contour 2



[K]



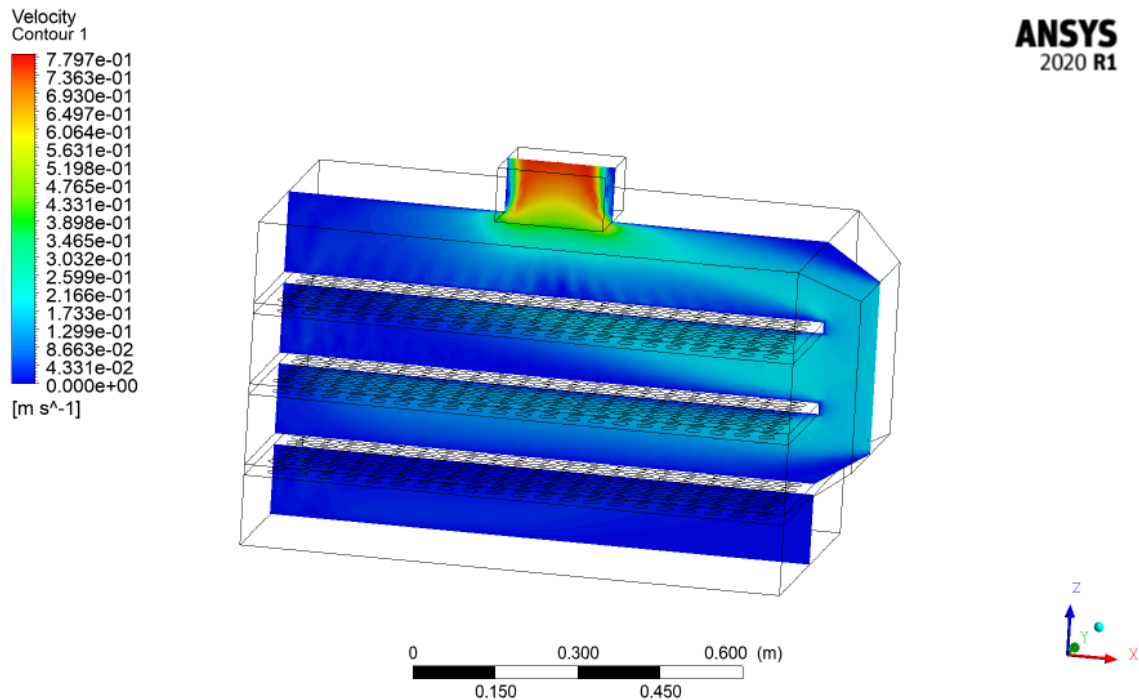
ANSYS
R19.1



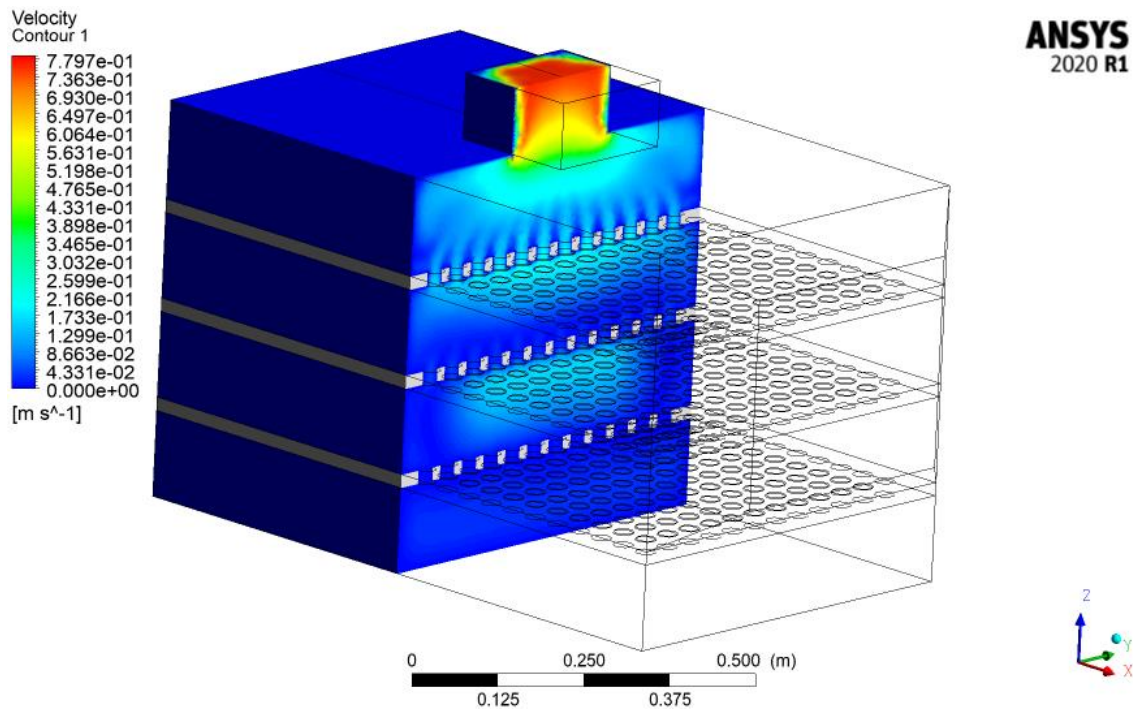
شکل (۳-۱۸). پروفیل دمایی در مقطع برشی از اتاق خشک‌کن خورشیدی در ساعت محلی ۱۴ عصر

شکل‌های (۳-۱۹) و (۳-۲۰)، پروفیل سرعت در مقاطع مختلف اتاق خشک‌کن را نشان می‌دهند.

طبق این پروفیل‌ها، هوا با دبی 0.25 kg/s ، وارد اتاق خشک‌کن می‌شود. پس از عبور از بین سینی‌ها و سوراخ‌های آن، از قسمت سقف اتاق خشک‌کن، خارج می‌شود.

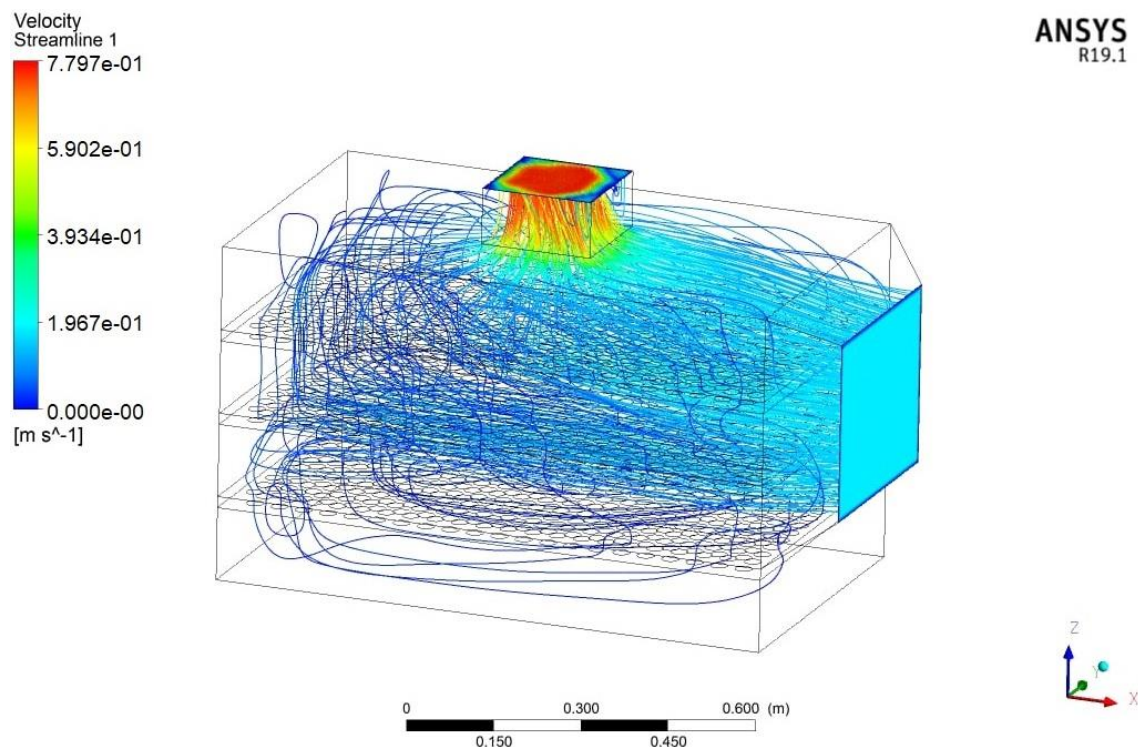


شکل (۳-۱۹). پروفیل سرعت از مقطع طولی اتاق خشک‌کن خورشیدی



شکل (۳-۲۰). پروفیل سرعت از مقطع عرضی اتاق خشک‌کن خورشیدی

شکل (۳-۲۱)، پروفیل خط جریان در اتاق خشک کن را، در ساعت محلی ۱۴ عصر نشان می دهد. در این پروفیل، اغتشاشات و جریان درهم در اتاق خشک کن، کاملاً واضح است. بخش عمده ای از این اغتشاشات، مربوط به قسمت های کف و پایینی اتاق می باشد.



شکل (۳-۲۱). پروفیل خط جریان در اتاق خشک کن خورشیدی در ساعت محلی ۱۴ عصر

۴-۳ خلاصه و نتیجه گیری

سیستم خشک کردن خورشیدی، از چهار بخش شامل: لوله های تخلیه کننده حرارت به کلکتور خورشیدی، مخزن ذخیره سازی حرارتی، مبدل حرارتی و خشک کن خورشیدی، تشکیل شده است. بخش های مخزن ذخیره سازی حرارتی و خشک کن خورشیدی، به ترتیب با هدف: محاسبه گرمای ذخیره شده، محاسبه انرژی گرمایی ورودی و همچنین، تحلیل توزیع حرارتی در هر دو بخش، به شکل شبیه سازی عددی، بررسی شد. برای این شبیه سازی، از اطلاعات آزمایشگاهی سایر بخش ها که توسط محققین انجام شده است؛ استفاده شد. تمامی معادلات مربوط به شبیه سازی عددی و گسسته سازی آن، شرایط حل مساله، خواص ترمو-فیزیکی سیال و مواد بکار رفته، هندسه و شبکه بندی آن و تست استقلال

حل از شبکه، برای هر دو بخش شرح داده شد.

برای شبیه‌سازی عددی سیستم ذخیره‌سازی، از مخزن استوانه‌ای از جنس فولاد استفاده شد. آب خروجی از کلکتور، وارد مخزن شد. سپس، با پارافین موجود در کویل مارپیچ مسی، تبادل حرارت انجام داد. پارافین، به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، در ساعات محلی مختلف، طبق فرایند شارژ و تخلیه، ذوب و منجمد شد. در نهایت، آب از مخزن خارج و وارد مبدل شد. برای تمامی ساعات محلی، شار انرژی آب، گرمای ذخیره شده توسط پارافین و مجموع انرژی ذخیره شده در سیستم ذخیره‌سازی، محاسبه شد. این مقادیر، به کمک مقادیر محاسبه شده توسط محققین، اعتبارسنجی شدند و با خطای قابل قبول برای هر ساعت محلی، تطابق خوبی با بررسی‌های محققین داشتند.

برای شبیه‌سازی عددی خشک‌کن خورشیدی، از مکعب مستطیلی از جنس چوب MDF استفاده شد که قسمت ورودی آن، به فرم انبساطی بود. سه سینی، از جنس پلی‌اتلین که دارای سوراخ‌های ریز بودند؛ در داخل خشک‌کن تعبیه شد. این سینی‌ها، در واقع محل قرارگیری محصول بودند. هوا با دبی جرمی ثابت، از مبدل حرارتی وارد خشک‌کن شد. در نهایت، پس از جریان در فضای اتاق خشک‌کن و سوراخ‌های سینی‌ها، از قسمت خروجی خشک‌کن خارج شد. قسمت خروجی خشک‌کن، به فرم مقطع مربعی، در سقف اتاق خشک‌کن تعبیه شد. شبیه‌سازی، برای تمامی ساعات محلی انجام شد. برای هر ساعت محلی، مقدار دمای خروجی و انرژی گرمایی ورودی به خشک‌کن، محاسبه شد. سپس، نتایج با مقادیر محاسبه شده توسط محققین، اعتبارسنجی شدند و با خطای قابل قبول برای هر ساعت محلی، تطابق خوبی با بررسی‌های محققین داشتند.

با توجه به شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی و اعتبارسنجی آن با نتایج محققین، زمان مدل-سازی، به علت حجم پیچیده محاسبات، باعث درگیری و فشار زیاد به CPU رایانه می‌شود. در واقع، با توجه به پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی و همچنین، صرف شدن زمان زیاد برای حل فرایند ذوب، برای شبیه‌سازی عددی این بخش، از رایانه پرسرعت همراه با هشت هسته استفاده شده است. بنابراین، اگر بتوان بجای حل فرایند ذوب در ماده تغییر فاز دهنده، اثرات ترکیبی آن با مبدل حرارتی را، به

صورت یک سری داده (تجربی یا عددی) استخراج کرد؛ می‌توان از آن‌ها به عنوان اطلاعات ورودی در مدل‌سازی خشک‌کن خورشیدی، استفاده کرد. در فصل آینده، بجای شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی به شکل کوپله، اثرات سیستم ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، به شکل توابع ریاضی در مدل‌سازی خشک‌کن خورشیدی، استفاده می‌شود.

فصل ۴

جایگزینی توابع ریاضی

۴-۱ مقدمه

در فصل گذشته، به شبیه‌سازی عددی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی و خشک‌کن خورشیدی، پرداخته شد. این شبیه‌سازی‌ها، با بررسی‌های محققین اعتبارسنجی شدند و تطابق قابل قبولی، در هر دو شبیه‌سازی وجود داشت. در شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، از اطلاعات تجربی و عددی که از بررسی‌های مخزن ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی صورت گرفته بود؛ به عنوان مقادیر ورودی به خشک‌کن استفاده شد. به عبارتی دیگر، ماده تغییر فاز دهنده در سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، از قبل ساخته و در شرایط محیطی مشخص، بررسی عددی شد. سپس، بعد از تبادل حرارتی در مبدل، به شکل داده‌هایی مشخص برای هر ساعت محلی، به عنوان مقادیر ورودی، در خشک‌کن خورشیدی استفاده شد. همانطور که قبلاً گفته شد؛ این کار باعث درگیری و فشار زیاد به CPU رایانه حلگر، به علت: حجم پیچیده محاسبات بخش ذخیره‌سازی می‌شود. استفاده از توابع ریاضی، به عنوان یک روش جایگزین، برای نشان دادن اثرات ماده تغییر فاز دهنده در ذخیره‌سازی و نشان دادن اثرات مبدل حرارتی، باعث می‌شود که سرعت محاسبات، به شدت بالا برود و از درگیری زیاد CPU، جلوگیری شود. در این فصل، توضیح داده می‌شود که با توجه به اطلاعات تجربی موجود، به چه شکلی توابع ریاضی استخراج و همچنین، به چه شکلی در مدل‌سازی خشک‌کن خورشیدی بکار برده شوند.

در ادامه، به بررسی عددی خشک‌کن خورشیدی که در فصل گذشته به آن پرداخته شد؛ به کمک جایگزینی توابع ریاضی، به جای داده‌های ورودی پرداخته می‌شود. به عبارتی دیگر، اثرات و خروجی‌های پارافین بکار رفته‌شده در سیستم ذخیره‌سازی (پارافین A) و مبدل حرارتی، به شکل توابع ریاضی برای بررسی عملکرد خشک‌کن خورشیدی، بکار برده می‌شود.

۲-۴ شبیه‌سازی خشک‌کن با جایگزینی توابع ریاضی

در این شبیه‌سازی، از هندسه و آنالیز استقلال حل از شبکه شبیه‌سازی گذشته استفاده شد. همچنین، شرایط حل، گسسته‌سازی، معادلات و جنس موارد بکار رفته شده، مطابق با شبیه‌سازی گذشته می‌باشد. شرایط مرزی و اولیه، مشابه با قبل بود؛ با این تفاوت که دماهای ورودی به اتاق خشک‌کن برای هر ساعت محلی، مطابق با توابع ریاضی تعریف می‌شود.

در جدول (۴-۱)، توابع ریاضی ورودی به خشک‌کن خورشیدی که جایگزین داده‌های ورودی می‌باشند؛ شرح داده شده‌است. این توابع ریاضی، وابسته به مبدل حرارتی و پارافینی می‌باشد که در فصل سوم، شبیه‌سازی شد (پارافین A). با توجه به وابستگی توابع ریاضی به زمان، حل به شکل ناپایا انجام شد. برای ایجاد توابع ریاضی، از بازه‌های زمانی ۳۶۰۰ ثانیه‌ای بین ساعات محلی ۷ تا ۲۴، استفاده شد. هر کدام از این توابع، به شکل کدهای دستوری UDF، در نرم‌افزار فلوئنت بکار گرفته‌شد. مطابق با جدول (۴-۱)، نوع توابع بکار رفته شده برای هر بازه زمانی، به فرم خطی مرتبه اول $T = At + B$ می‌باشد که به کمک دو نقطه که مربوط به اطلاعات ورودی بکار رفته در فصل سوم است؛ ایجاد می‌شود. مقادیر A برای هر بازه زمانی، برحسب شیب خط بین دو نقطه تعیین می‌شود. همچنین، مقادیر B برای هر بازه زمانی، نشان دهنده عرض از مبدا مربوط به آن دو نقطه می‌باشد. مقادیر A و B ، وابسته به خواص ماده تغییر فاز دهنده، هندسه سیستم ذخیره‌سازی و مبدل، شرایط حل و شرایط محیطی می‌باشد.

جدول (۴-۱). توابع ریاضی ورودی به خشک کن خورشیدی تحت اثر پارافین A

بازه ساعات محلی	بازه توابع ریاضی	تابع ریاضی دمای ورودی	بازه ساعات محلی	بازه توابع ریاضی	تابع ریاضی دمای ورودی
۸ تا ۷	$t \leq 3600$	$0.0007t + 269/3$	۹ تا ۸	$3600 < t \leq 7200$	$0.0016t + 292/9$
۱۰ تا ۹	$7200 < t \leq 10800$	$0.0017t + 292/3$	۱۱ تا ۱۰	$10800 < t \leq 14400$	$0.0022t + 286/6$
۱۲ تا ۱۱	$14400 < t \leq 18000$	$0.0028t + 279$	۱۳ تا ۱۲	$18000 < t \leq 21600$	$0.0016t + 299/5$
۱۴ تا ۱۳	$21600 < t \leq 25200$	$0.0011t + 310/3$	۱۵ تا ۱۴	$25200 < t \leq 28800$	$-0.0006t + 353/7$
۱۶ تا ۱۵	$28800 < t \leq 32400$	$-0.0005t + 351/3$	۱۷ تا ۱۶	$32400 < t \leq 36000$	$-0.0005t + 351/3$
۱۸ تا ۱۷	$36000 < t \leq 39600$	$-0.0018t + 395/3$	۱۹ تا ۱۸	$39600 < t \leq 43200$	$-0.0021t + 409/6$
۲۰ تا ۱۹	$43200 < t \leq 46800$	$-0.0007t + 347/2$	۲۱ تا ۲۰	$46800 < t \leq 50400$	$-0.001t + 364/1$
۲۲ تا ۲۱	$50400 < t \leq 54000$	$-0.0014t + 383/7$	۲۳ تا ۲۲	$54000 < t \leq 57600$	$-0.0011t + 365/7$
۲۴ تا ۲۳	$57600 < t \leq 61200$	$-0.0009t + 357/7$			

با توجه به ناپایا بودن حل و وابستگی آن به زمان، برای ایجاد گام زمانی مناسب، از آنالیز استقلال حل از گام زمانی استفاده شد. برای این کار، از چهار گام زمانی ۰/۱، ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ استفاده شد. هر کدام از حل‌ها، تا ۳۶۰۰ ثانیه انجام شد. برای تمامی بازه‌های زمانی، تا قبل از اتمام ۳۶۰۰ ثانیه، حل همگرا شد. بعد از اتمام بازه زمانی برای هر گام، متوسط دمای خروجی از اتاق خشک کن برای هر کدام از حل‌ها، با یکدیگر مقایسه شد. نتایج حاصل از این مقایسه، در جدول (۴-۲) آورده شده است. مطابق با این جدول، برای گام‌های زمانی ۰/۱ و کوچکتر از آن، دمای خروجی از اتاق خشک کن، با خطای ناچیز تغییر می‌کند که نشان دهنده مستقل بودن حل از گام زمانی، در این بازه می‌باشد. بنابراین، برای حل تمامی بازه‌های ساعات محلی، از گام زمانی ۰/۱ استفاده شد.

جدول (۲-۴). نتایج آنالیز استقلال حل از گام زمانی برای خشک کن خورشیدی تحت اثر پارافین A

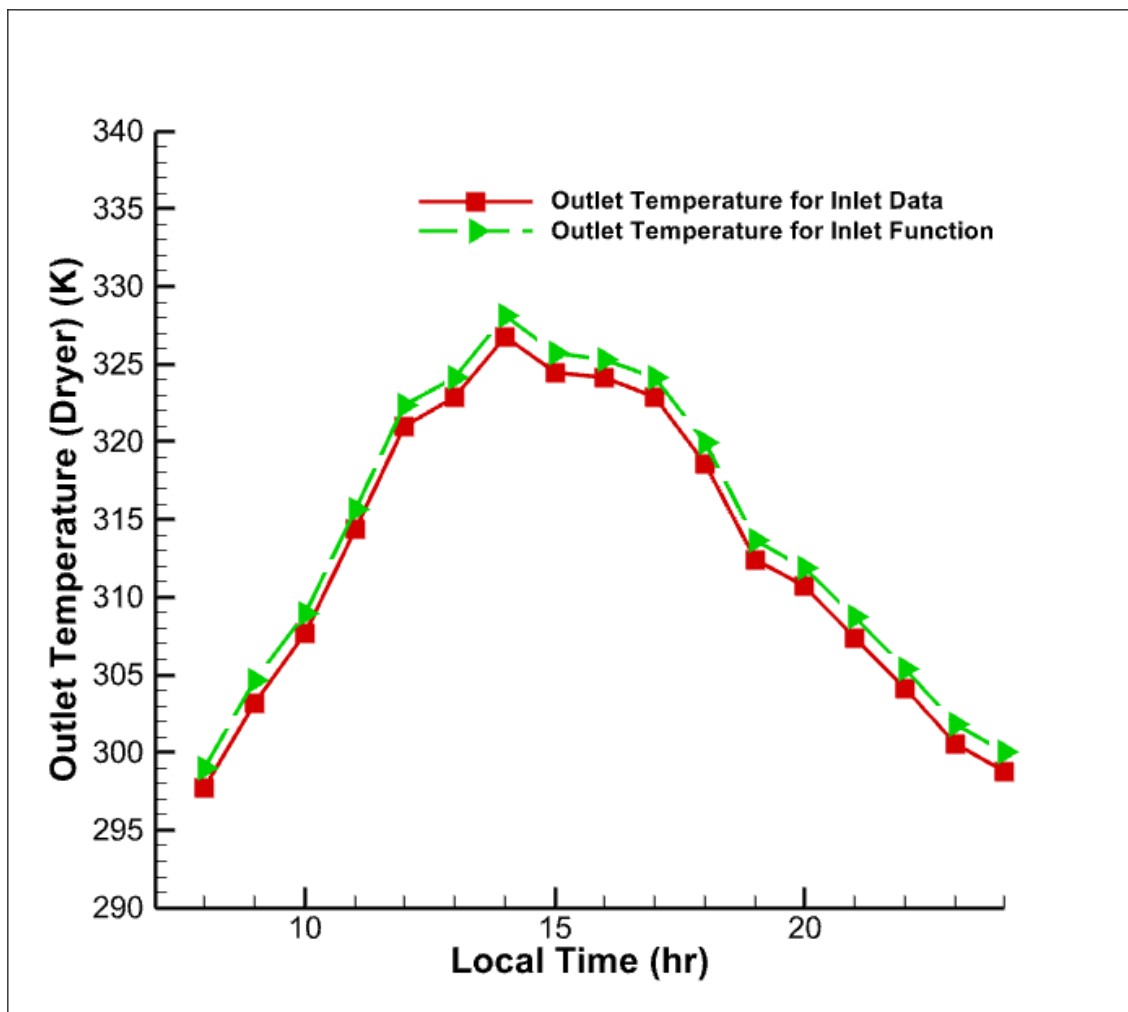
گام زمانی (s) (Time Step)	دمای خروجی (K) (Outlet Temperature)
۰/۰۱	۲۹۹/۱۹
۰/۱	۲۹۹/۱۳
۰/۲	۲۹۸/۵۳
۰/۵	۲۹۷/۶۴

۳-۴ اعتبارسنجی شبیه سازی خشک کن با توابع ریاضی

برای تمامی بازه های ساعات محلی ۷ تا ۲۴، تا قبل از اتمام بازه زمانی، حل همگرا شد. بعد از اتمام هر بازه ساعات محلی، متوسط دمای خروجی اتاق خشک کن محاسبه شد. این مقادیر، با مقادیر متوسط دمای خروجی از اتاق خشک کن در حل پایا که در فصل گذشته انجام شد؛ مقایسه و اعتبارسنجی شد. در جدول (۳-۴) و شکل (۴-۱)، نتایج کلی این اعتبارسنجی، برای تمامی بازه های ساعات محلی ۷ تا ۲۴، شرح داده شده است. طبق این جدول و نمودار، همانطور که قابل پیش بینی بود؛ برای هر بازه ساعت محلی، با خطای اندک، تطابق خوبی میان شبیه سازی پایا و شبیه سازی ناپایا وجود دارد. به عبارتی دیگر، توابع ورودی ناشی از پارافین A، جایگزین مناسبی برای داده های دمای ورودی می باشند. بنابراین، می توان به جای حل عددی و محاسبات پیچیده ماده تغییر فاز دهنده، از توابع ریاضی این ماده که وابسته به هندسه، شرایط حل و محیطی می باشد؛ بجای داده های ورودی، در مدل سازی خشک کن خورشیدی استفاده کرد. وجود خطا در مقایسه این دو شبیه سازی، به علت خطای حل عددی UDF و تفاوت بین فرض حالت پایا و ناپایا می باشد.

جدول (۳-۴). نتایج اعتبارسنجی شبیه‌سازی خشک‌کن با داده‌های ورودی و توابع ورودی تحت اثر پارافین A

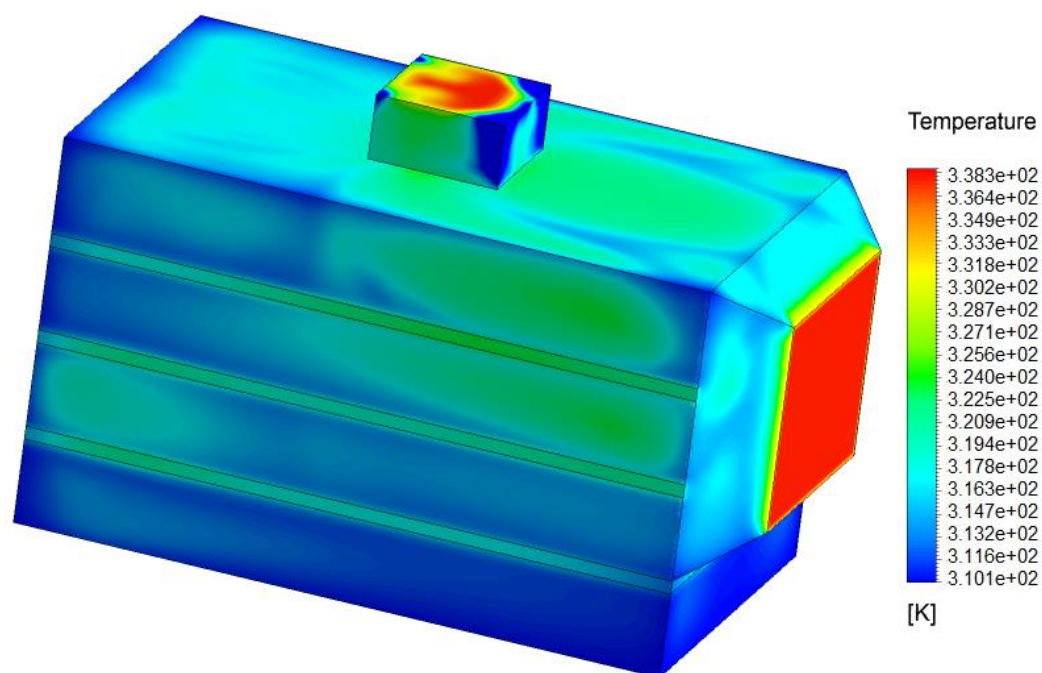
خطای نسبی	دمای خروجی خشک‌کن برای مدل‌سازی با توابع ورودی	دمای خروجی خشک‌کن برای مدل‌سازی با داده‌های ورودی	ساعات محلی
۰/۴۶	۲۹۹/۱	۲۹۷/۷	۸
۰/۴۵	۳۰۴/۶	۳۰۳/۲	۹
۰/۳۸	۳۰۸/۹	۳۰۷/۷	۱۰
۰/۳۸	۳۱۵/۶	۳۱۴/۴	۱۱
۰/۴۰	۳۲۲/۳	۳۲۱	۱۲
۰/۳۷	۳۲۴/۱	۳۲۲/۹	۱۳
۰/۳۹	۳۲۸/۱	۳۲۶/۸	۱۴
۰/۳۶	۳۲۵/۷	۳۲۴/۵	۱۵
۰/۳۶	۳۲۵/۳	۳۲۴/۱	۱۶
۰/۳۷	۳۲۴/۱	۳۲۲/۹	۱۷
۰/۴۰	۳۱۹/۹	۳۱۸/۶	۱۸
۰/۴۱	۳۱۳/۷	۳۱۲/۴	۱۹
۰/۳۸	۳۱۱/۹	۳۱۰/۷	۲۰
۰/۴۲	۳۰۸/۷	۳۰۷/۴	۲۱
۰/۴۲	۳۰۵/۴	۳۰۴/۱	۲۲
۰/۴۳	۳۰۱/۸	۳۰۰/۵	۲۳
۰/۴۰	۳۰۰	۲۹۸/۸	۲۴



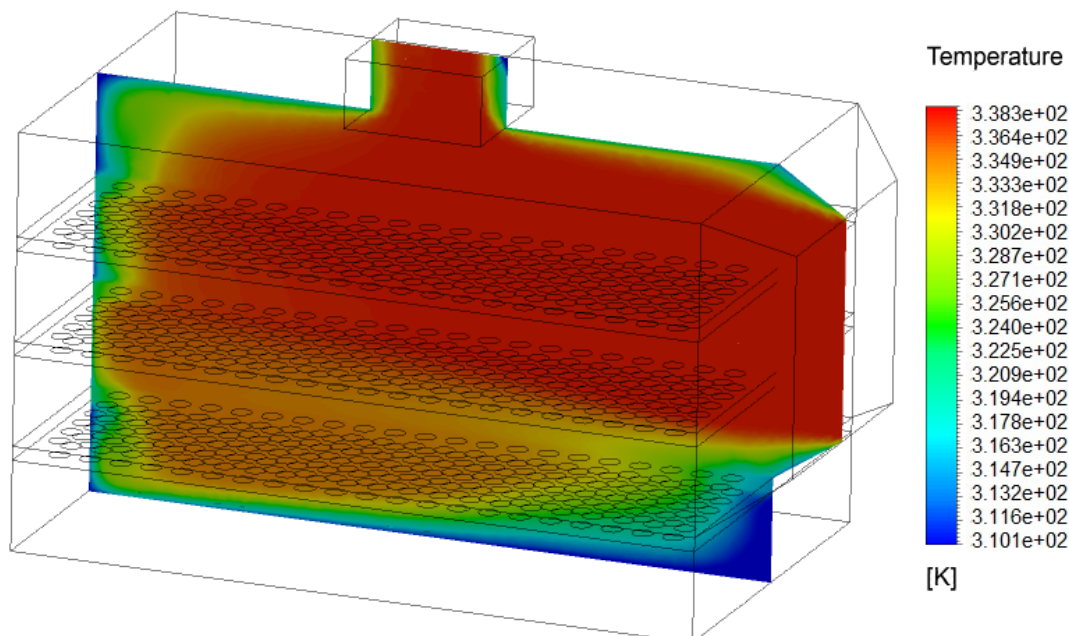
شکل (۱-۴). نمودار نتایج شبیه‌سازی خشک‌کن با داده‌ها و توابع ورودی تحت اثر پارافین A، بر حسب ساعات محلی

شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴) به ترتیب، پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن و مقطع برشی از اتاق خشک‌کن را، بر اساس شبیه‌سازی با توابع ریاضی ورودی، در ساعت محلی ۱۴ عصر نشان می‌دهد. این شکل‌ها، تطابق خوبی با شکل‌های (۱۷-۳) و (۱۸-۳) دارند. مشابه با شکل‌های (۱۷-۳) و (۱۸-۳)، در این پروفیل‌های دمایی نیز، با حرکت سیال (هوا) در داخل اتاق خشک‌کن، گرمای سیال توسط دیواره‌های اتاق و سینی‌ها جذب شد. سپس، هوا از طریق دریچه خروجی، از اتاق خارج شد. بیشترین دما، در هر دو حالت پایا و ناپایا، مربوط به مقطع ورودی بود که مقدار آن، ۳۳۸ کلوین بود و کمترین دما، مربوط به دیواره‌های اتاق بود که مقدار آن، ۳۱۰ کلوین محاسبه شد. با این تطابق، در پروفیل‌های دمایی در ساعت محلی ۱۴ و سایر ساعات، می‌توان گفت: توابع ریاضی ورودی به خشک‌کن که وابسته

به پارافین A، هندسه مخزن ذخیره‌سازی و مبدل می‌باشد؛ می‌تواند جایگزین مناسبی، برای داده‌های ورودی به خشک‌کن خورشیدی باشد.



شکل (۴-۲). پروفیل دمایی دیواره‌های خشک‌کن در شبیه‌سازی با توابع ورودی تحت اثر پارافین A، در ساعت ۱۴



شکل (۴-۳). پروفیل دمایی مقطع برشی خشک‌کن در شبیه‌سازی با توابع ورودی تحت اثر پارافین A، در ساعت ۱۴

پس از بررسی اعتبارسنجی شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی و اثبات اینکه توابع ریاضی ورودی به خشک‌کن که ناشی از خواص پارافین A می‌باشند؛ می‌توانند جایگزین مناسبی، برای داده‌های ورودی (آزمایشگاهی یا عددی) باشند. در بخش بعدی، به شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، با تغییر خواص پارافین و تغییرات ناشی از آن در توابع ورودی و عملکرد خشک‌کن خورشیدی، پرداخته خواهد شد.

۴-۴ شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی با تغییر خواص پارافین

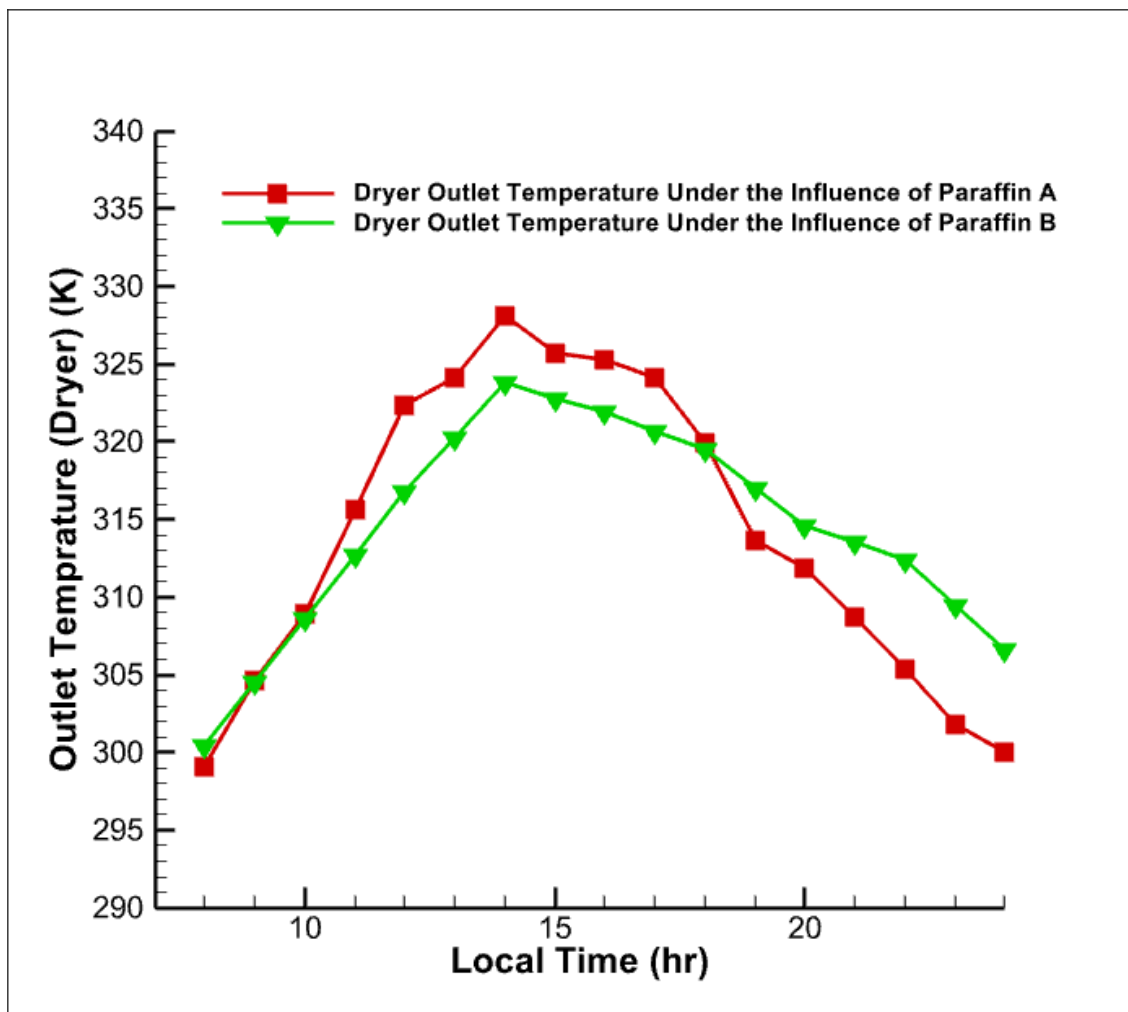
در شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، مشابه با شبیه‌سازی‌های گذشته، از همان هندسه و آنالیز استقلال حل از شبکه گذشته، برای خشک‌کن خورشیدی استفاده شد. همچنین، شرایط حل، گسسته-سازی، معادلات و جنس موارد بکار رفته شده، مطابق با شبیه‌سازی گذشته می‌باشد. شرایط مرزی و اولیه، مشابه با قبل می‌باشد. برای مقادیر ورودی به خشک‌کن خورشیدی، از توابع ریاضی استفاده شده‌است. این توابع، وابسته به پارافین با خواصی متفاوت از قبل (پارافین B) می‌باشد. این پارافین، توسط برهانی و همکاران [۱۰۵]، در هندسه‌ای متفاوت و در مخزن ذخیره‌سازی استوانه‌ای شکل، در شرایط آب و هوایی مشابه با شهر کرمان، بررسی شد.

در جدول (۴-۴)، توابع ریاضی بکار رفته شده در این شبیه‌سازی که وابسته به پارافین B و مبدل حرارتی می‌باشد؛ شرح داده شده‌است. این توابع ریاضی، برای هر بازه زمانی ۳۶۰۰ ثانیه‌ای، در ساعات محلی از ۷ تا ۲۴، متفاوت می‌باشد. توابع بکار رفته شده در این شبیه‌سازی نیز مشابه قبل، مطابق با فرم خطی مرتبه اول $T = At + B$ می‌باشد. با تغییر خواص پارافین، مقادیر A و B در این توابع، برای هر ساعت محلی، متفاوت با توابع گذشته می‌باشند. همچنین، وابستگی این توابع به زمان، باعث ایجاد حالت ناپایا در شبیه‌سازی شد. از تست استقلال حل از گام زمانی بخش گذشته، در این شبیه‌سازی استفاده شد. مقدار گام زمانی برای این شبیه‌سازی، ۰/۱ در نظر گرفته شد.

جدول (۴-۴). توابع ریاضی ورودی به خشک کن خورشیدی تحت اثر پارافین B

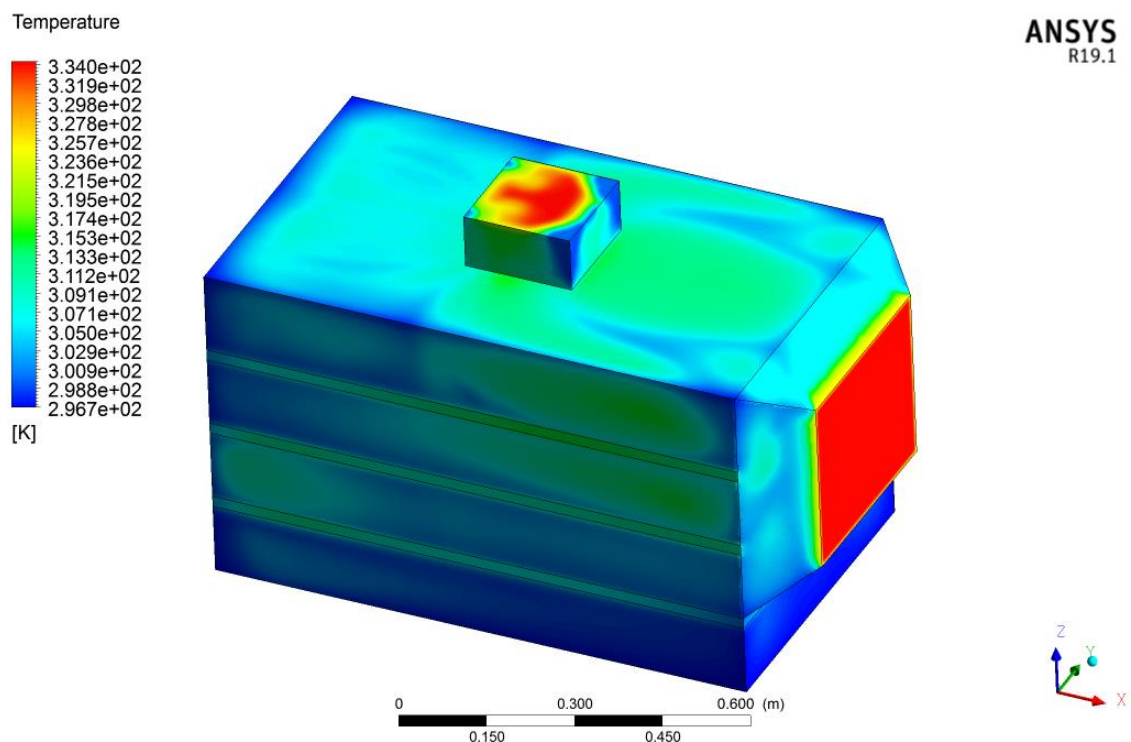
بازه ساعات محلی	بازه توابع ریاضی	تابع ریاضی دمای ورودی	بازه ساعات محلی	بازه توابع ریاضی	تابع ریاضی دمای ورودی
۷ تا ۸	$t \leq 3600$	$0.001t + 297/5$	۸ تا ۹	$3600 < t \leq 7200$	$0.0014t + 296/2$
۹ تا ۱۰	$7200 < t \leq 10800$	$0.0018t + 293$	۱۰ تا ۱۱	$10800 < t \leq 14400$	$0.0006t + 305/9$
۱۱ تا ۱۲	$14400 < t \leq 18000$	$0.0026t + 278/3$	۱۲ تا ۱۳	$18000 < t \leq 21600$	$0.0016t + 294/8$
۱۳ تا ۱۴	$21600 < t \leq 25200$	$0.0011t + 305/6$	۱۴ تا ۱۵	$25200 < t \leq 28800$	$-0.0006t + 349/7$
۱۵ تا ۱۶	$28800 < t \leq 32400$	$-0.0002t + 336/9$	۱۶ تا ۱۷	$32400 < t \leq 36000$	$-0.0004t + 343/2$
۱۷ تا ۱۸	$36000 < t \leq 39600$	$-0.0006t + 351/2$	۱۸ تا ۱۹	$39600 < t \leq 43200$	$-0.0008t + 357/8$
۱۹ تا ۲۰	$43200 < t \leq 46800$	$-0.0012t + 375/8$	۲۰ تا ۲۱	$46800 < t \leq 50400$	$-0.0006t + 349/8$
۲۱ تا ۲۲	$50400 < t \leq 54000$	$-0.0002t + 330/2$	۲۲ تا ۲۳	$54000 < t \leq 57600$	$-0.0009t + 366/2$
۲۳ تا ۲۴	$57600 < t \leq 61200$	$-0.0014t + 395$			

بعد از اتمام حل برای هر بازه زمانی ۳۶۰۰ ثانیه‌ای، متوسط دمای خروجی از خشک کن، برای هر بازه ساعات محلی از ۷ تا ۲۴، محاسبه شد. در شکل (۴-۴)، نتایج شبیه‌سازی عددی خشک کن خورشیدی با توابع ریاضی تحت اثر پارافین B، با نتایج ناشی از پارافین A مقایسه شده‌است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، می‌توان عملکرد خشک کن خورشیدی را، با تغییر خواص پارافین (از پارافین A به پارافین B) پیش‌بینی کرد. به عبارتی دیگر، اگر پارافین B را جایگزین پارافین A کنیم؛ دیگر نیازی به حل کامل و محاسبات پیچیده سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، تحت تاثیر پارافین B نمی‌باشد و می‌توان با کمک توابع ریاضی منحصر به این پارافین، عملکرد خشک کن خورشیدی را پیش‌بینی کرد.

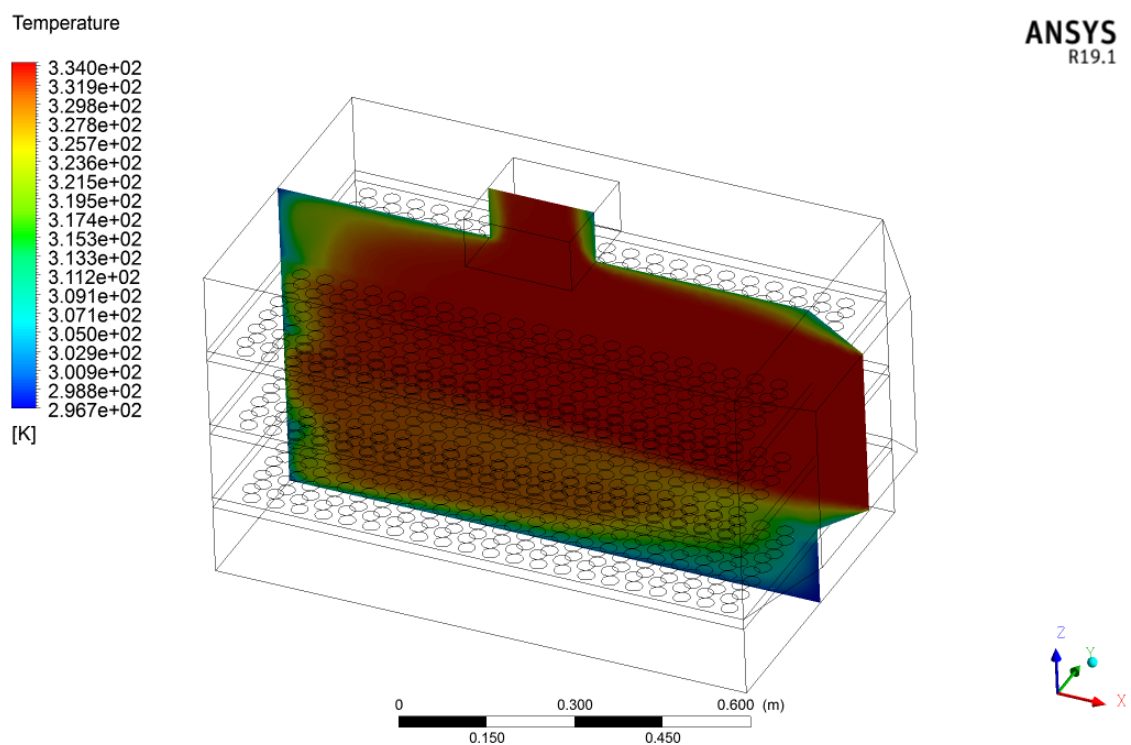


شکل (۴-۴). نتایج شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی با توابع ریاضی، تحت اثر پارافین A و B

شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) به ترتیب، پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن و مقطع برشی از اتاق خشک‌کن را، برای شبیه‌سازی با توابع ریاضی تحت اثر پارافین B، در ساعت محلی ۱۴ عصر نشان می‌دهند. طبق این شکل‌ها، در این ساعت محلی، هوا با دمای ۳۳۴ کلوین از مقطع ورودی، وارد اتاق خشک‌کن شده‌است. پس از جذب گرما توسط دیواره‌های اتاق و سینی‌ها، هوا از قسمت خروجی، با دمای میانگین ۳۲۴ کلوین خارج شد. بیشترین دما، مربوط به مقطع ورودی خشک‌کن و کمترین دما، مربوط به دیواره‌های اتاق بود که مقدار آن، ۲۹۶ کلوین محاسبه شد. با توجه به این شکل‌ها، با استخراج توابع ریاضی برای هر ماده تغییر فاز دهنده و اعمال آن بر روی خشک‌کن خورشیدی، می‌توان عملکرد و پروفیل دمایی مربوط به آن را، در خشک‌کن خورشیدی پیش‌بینی کرد.



شکل (۴-۵). پروفیل دمایی در دیواره‌های اتاق خشک‌کن با توابع ورودی، تحت اثر پارافین B



شکل (۴-۶). پروفیل دمایی در مقطع برشی اتاق خشک‌کن با توابع ورودی، تحت اثر پارافین B

۴-۵ خلاصه و نتیجه‌گیری

در این فصل، به شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، با جایگزینی توابع ریاضی ورودی به جای داده‌های ورودی (آزمایشگاهی یا عددی)، پرداخته شد. با توجه به اینکه شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، به علت: وجود ماده تغییر فاز دهنده و فرایند ذوب و انجماد آن، دارای حجم پیچیده‌ای از محاسبات است و برای انجام این محاسبات، به سیستم‌های رایانه‌ای با CPU قوی نیاز می‌باشد؛ استفاده از توابع ریاضی، به عنوان نشان‌دهنده اثرات ماده تغییر فاز دهنده در سیستم ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، مورد نیاز می‌باشد.

جهت اثبات عملکرد مشابه این توابع ریاضی، به جای داده‌های عددی یا آزمایشگاهی و نشان دادن کاهش حجم محاسبات سیستم ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، خشک‌کن خورشیدی با توجه به اطلاعات شرح داده شده در فصل سوم، مجدد شبیه‌سازی عددی شد. در این شبیه‌سازی، از توابع ریاضی که نشان دهنده اثرات پارافین استفاده شده در فصل سوم و مبدل حرارتی بود؛ به عنوان ورودی به خشک‌کن استفاده شد. این توابع، به فرم خطی مرتبه اول $T = At + B$ ، برای هر بازه ساعات محلی از ۷ تا ۲۴ بکار گرفته شد. نتایج و پروفیل‌های دمایی، نشان دادند که توابع ریاضی ورودی، می‌تواند جایگزین مناسبی برای داده‌های ورودی باشد.

در نهایت، به شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی با ورودی‌های جدید که ناشی از تغییر خواص پارافین بود؛ پرداخته شد. با تغییر خواص پارافین، مقادیر A و B که وابسته به خواص پارافین، هندسه مخزن ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، شرایط حل و محیطی می‌باشند؛ برای هر بازه ساعات محلی تغییر کرد. نتایج و پروفیل‌های دمایی حاصل از این شبیه‌سازی، نشان داد که با داشتن توابع ریاضی مخصوص به هر ماده تغییر فاز دهنده، می‌توان اثرات آن را بر روی عملکرد و توزیع حرارتی خشک‌کن خورشیدی پیش‌بینی کرد. این کار، به کاهش حجم محاسبات شبیه‌سازی ماده تغییر فاز دهنده در مخزن ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی کمک می‌کند. در فصل آینده، به مزیت‌های بیشتر این روش پرداخته خواهد شد.

فصل ۵

جمع‌بندی و پیشنهادات

۵-۱ جمع‌بندی و نتایج

سیستم خشک‌کن خورشیدی، از چهار بخش شامل: لوله‌های تخلیه‌کننده حرارت به کلکتور، سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، مبدل حرارتی و اتاق خشک‌کن خورشیدی، تشکیل شد. در این پژوهش، به شبیه‌سازی عددی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی و اتاق خشک‌کن خورشیدی، به کمک اطلاعات آزمایشگاهی سایر بخش‌ها که توسط محققین صورت گرفت؛ پرداخته شد. از اطلاعات محیطی شهر کرمان، در این پژوهش استفاده شد.

در شبیه‌سازی سیستم ذخیره‌سازی حرارتی، از مخزن استوانه‌ای، از جنس فولاد استفاده شد. در داخل استوانه، کوئل مارپیچ مسی، حاوی پارافین به عنوان ماده تغییر فاز دهنده، قرار داده شد. آبی که از کلکتور، به وسیله تابش خورشید گرم شد؛ وارد مخزن ذخیره‌سازی شد و پس از تبادل حرارت با پارافین، از مخزن خارج شد. در ابتدا، پارافین در حالت جامد بود. پارافین در ساعات تابش خورشید، حرارت آب را جذب کرد و با گذر زمان، تغییر فاز داد و به حالت مایع تبدیل شد. پارافین، در ساعات خارج از دسترسی به خورشید، گرمای ذخیره شده را آزاد کرد و با گذر زمان، به فاز جامد برگشت. شبیه‌سازی عددی، به فرم ناپایا از ساعت محلی ۷ تا ۱۹ انجام شد. برای هر ساعت محلی، متوسط دمای پارافین و دمای خروجی آب، محاسبه شد و به کمک آن‌ها، مقدار گرمای ذخیره شده در مخزن، برای هر ساعت محلی محاسبه شد. در نهایت، تطابق مقادیر محاسبه شده، با بررسی‌های محققین نشان داده شد. مقدار گرمای ذخیره شده در مخزن، با افزایش تابش خورشید و ذوب پارافین، افزایش یافت و در ساعت محلی ۱۴، به حداکثر مقدار که $0/406$ مگاژول بود؛ رسید. دمای آب ورودی به مخزن در این ساعت، 356 کلوین بود و متوسط دمای خروجی آب، 339 کلوین بود. همچنین، متوسط دمای پارافین، در ساعت محلی ۱۴، 351 کلوین بود. با کم شدن شدت تابش خورشید، مقدار انرژی ذخیره شده در مخزن نیز کاهش یافت و از ساعت محلی ۱۹، پارافین با آزادسازی حرارت، باعث حفظ دمای مطلوب، برای هوای ورودی به خشک‌کن و عدم افت بازده خشک کردن شد.

در شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی، از مکعب مستطیلی، از جنس MDF استفاده شد که مقطع ورودی آن، به فرم انبساطی بود. از سه سینی سوراخ‌دار، از جنس پلی‌اتیلن، در داخل اتاق خشک‌کن استفاده شد. هوای محیط، پس از ورود به مبدل و تبادل حرارتی با آب خروجی از مخزن ذخیره‌سازی، با دبی جرمی 0.025 kg/s ، وارد اتاق خشک‌کن شد. هوا، پس از تبادل حرارتی با سینی‌ها و دیواره‌های اتاق، از مجرای مربعی موجود در سقف اتاق، از خشک‌کن خورشیدی خارج شد. شبیه‌سازی عددی، به فرم پایا، از ساعت محلی ۷ تا ۲۴ انجام شد. برای هر ساعت محلی، متوسط دمای خروجی از اتاق خشک‌کن، محاسبه شد و به کمک آن، مقدار انرژی گرمایی ورودی به خشک‌کن، برای هر ساعت محلی محاسبه شد. در نهایت، تطابق مقادیر محاسبه شده، با بررسی‌های محققین نشان داده شد. مقدار انرژی گرمایی ورودی به خشک‌کن، با افزایش تابش خورشید تا ساعت ۱۴ به شکل افزایشی بود. مقدار گرمای ورودی به اتاق خشک‌کن، در ساعت ۱۴، $1/039$ مگاژول بود. همچنین، متوسط دمای ورودی و خروجی خشک‌کن، در این ساعت به ترتیب، $338/3$ و $326/8$ کلوین بود. انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن، با کاهش تابش خورشید، به شکل نزولی بود. همچنین، بعد از ساعت ۱۹ که خورشید در دسترس نبود؛ به علت: آزادسازی حرارت ذخیره شده در پارافین، انرژی حرارتی ورودی به خشک‌کن، با شیب ملایم‌تری کاهش یافت و موجب حفظ دمای مطلوب، در اتاق خشک‌کن خورشیدی شد.

به دلیل حجم پیچیده محاسبات مربوط به سیستم ذخیره‌سازی حرارتی و درگیری زیاد CPU رایانه حلگر، اثرات ماده تغییر فاز دهنده و مبدل حرارتی، به فرم توابع ریاضی مرتبه اول خطی $T = At + B$ ، برای هر ساعت محلی نوشته شد. مقادیر A و B ، وابسته به شرایط حل و محیطی، هندسه سیستم ذخیره‌سازی و مبدل و خواص پارافین می‌باشند. جهت اثبات عملکرد مشابه توابع ریاضی، به جای مقادیر ورودی به خشک‌کن و همچنین، کاهش حجم محاسبات بخش ذخیره‌سازی، مدل‌سازی خشک‌کن خورشیدی، به شکل ناپایا و از ساعت محلی ۷ تا ۲۴ انجام شد. مقدار میانگین خطای نسبی، برای هر ساعت محلی، حدود 0.41% بود. بنابراین، نتیجه گرفته شد که توابع ریاضی ورودی، جایگزین مناسبی برای داده‌های عددی و آزمایشگاهی می‌باشند. در نهایت، با تغییر توابع ورودی، با توجه به تغییر خواص

پارافین، شبیه‌سازی خشک‌کن خورشیدی انجام شد. نتایج، نشان داد که بدون انجام مدل‌سازی ماده تغییر فاز دهنده و کاهش چشم‌گیر محاسبات، می‌توان توابع ریاضی مشخصی برای هر ماده تغییر فاز دهنده و مبدل حرارتی در نظر گرفت و با کمک آن، عملکرد و توزیع حرارتی خشک‌کن خورشیدی را پیش‌بینی و بررسی کرد.

با توابع ریاضی، به جای ساختن یک ماده تغییر فاز دهنده و مشاهدات اثرات آن بر خشک‌کن خورشیدی، این امکان فراهم می‌شود که اثرات مواد تغییر فاز دهنده ساخته نشده را، بتوان قبل از ساخت، به کمک توابع ریاضی، بر روی خشک‌کن خورشیدی مدل‌سازی و اثرات آن، روی خشک‌کن خورشیدی را بررسی کرد. به عبارتی دیگر، با انجام این کار، می‌توان هر تابع ریاضی را بر اساس ماده تغییر فاز دهنده مشخص، با هندسه و شرایط مشخص، برای مخزن ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، به سیستم خشک‌کن خورشیدی، به عنوان ورودی داد و بلافاصله عملکرد خشک‌کن خورشیدی را بررسی کرد. مزیت اصلی این توابع ریاضی، عدم نیاز به بررسی عددی یا آزمایشگاهی ماده تغییر فاز دهنده، در مخزن ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی می‌باشد.

۵-۲ پیشنهادات

در مدل‌سازی ماده تغییر فاز دهنده در مخزن ذخیره‌سازی، پیچیدگی‌ها زیاد می‌باشد. حتی در شبیه‌سازی آن، ممکن است؛ مدل‌های ترمودینامیکی توسعه یافته، وجود داشته باشد که توابع ریاضی مربوط به آن‌ها، بسته به پیچیدگی موجود در سیستم ذخیره‌سازی و مبدل حرارتی، می‌تواند مرتبه دوم یا بیشتر، چند ضابطه‌ای و یا چند متغیره باشد. بنابراین، جهت کاهش حجم این محاسبات پیچیده، بجای استفاده از داده‌های ورودی به خشک‌کن، بهتر است؛ از توابع ریاضی مرتبط با آن شرایط، برای ورود به خشک‌کن خورشیدی استفاده شود. پیشنهاداتی که برای کارهای آینده، در این زمینه می‌توان ارائه داد؛ عبارت است از:

۱- اعمال خواص ترمودینامیکی، در مخزن ذخیره‌سازی که در طی آن، علاوه بر زمان، پارامترهای

دیگری نیز در تعیین توابع دمای ورودی به خشک‌کن، تاثیرگذار می‌باشند و موجب ایجاد توابع

مرتبه بالا، چند ضابطه‌ای و چند متغیره می‌شود.

۲- مطالعه ابعاد هندسی دیگر، برای کویل، مخزن و همچنین، بکارگیری هندسه‌های مختلف برای

آنها و ارائه الگوهای ریاضی قابل پیاده‌سازی مرتبط با آن.

۳- بررسی مواد تغییر فاز دهنده مختلف و اثرات نقاط ذوب و انجماد متفاوت آن، بر توابع ریاضی

ورودی به خشک‌کن خورشیدی، جهت تنظیم بازه‌های دمایی معین در خشک‌کن.

مراجع

- [١] M. Motahayyer, A. Arabhosseini, H. Samimi-Akhijahani, M. Khashechi, Application of computational fluid dynamics in optimization design of absorber plate of solar dryer. Iran, J. Biosyst. Eng. 49 (2) (2018) 285-294 (In Persian).
- [٢] History: Energy Information Administration (EIA), International Energy Outlook 2020 (October 2020), web site www.eia.doe.gov/outlook/ieo/. Projections: U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook; 2019.
- [٣] H. Ghasemkhani, A. Keyhani, M. Aghbashlo, S. Rafiee, A.S. Mujumdar, Improving exergetic performance parameters of a rotating-tray air dryer via a simple heat exchanger, Appl. Therm. Eng. 94 (2016) 13-23.
- [٤] G. Cakmak, C. Yildiz, The drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector, Food Bioprod. Process. 89 (2011) 103-108.
- [٥] Yadav YP, Tiwari GN. Transient and analytical solution of suspended flat plate solar air heater. Energy Convers Manage 1986;26:265-9.
- [٦] Whiller A. Performance of black painted solar air heaters of conventional designs. Solar Energy 1964;8(1):31-7.
- [٧] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G. Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. Department Enerzia, Divisione Ingegneria Sperimentale, Italy. Drying 1994;94:879-86.
- [٨] Mühlbauer W, Esper A. Present situation. In: CIGR handbook of agricultural engineering, 1999, p. 53.
- [٩] Panwar N, Kaushik S, Kothari S. State of the art of solar cooking: an overview. Renew Sustain Energy Rev 2012;16:3776-85.
- [١٠] Wittwer SH. Solar energy and agriculture. Cell Mol Life Sci 1982;38:10-3.
- [١١] Ekechukwu O, Norton B. Review of solar - energy drying Systems II: an overview solar drying technology. Energy Convers Manag 1999;40:615-55.
- [١٢] Hii C, Law C. Solar drying of major commodity products. 2012. p. 73-94.
- [١٣] Toshniwal U, Karale S. A review paper on solar dryer. Int J Eng Res Appl 2013;3(2):896-902.
- [١٤] Hii C, Law C. Solar drying of major commodity products. 2012. p. 73-94.
- [١٥] Oosthuizen P. The design of indirect solar rice dryers. J Eng Int Dev 1995;2:20-7.
- [١٦] Tiris C, Tiris M, Dincer I. Experiments on a new small-scale solar dryer. Appl Thermal Eng 1996;16:183-7.

- [17] Basunia M, Abe T. Thin layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. *J Food Eng* 2001;47:295–301.
- [18] Midilli A. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in a solar drying system. *Int J Energy Res* 2001;25:715–25.
- [19] Sodha M, Dang A, Bansal P, Sharman S. An analytical and experimental study of open sun drying and a cabinet tyre drier. *Energy Convers Manage* 1985;25: 263–71.
- [20] Loha C, Das R, Choudhury B, Chatterjee P. Evaluation of air drying characteristics of sliced ginger in a forced convective cabinet dryer and thermal conductivity measurement. *J Food Process Technol* 2012;3:6.
- [21] Ekechukwu O, Norton B. Review of solar - energy drying Systems II: an overview solar drying technology. *Energy Convers Manag* 1999;40:615–55.
- [22] Toshniwal U, Karale S. A review paper on solar dryer. *Int J Eng Res Appl* 2013;3(2):896–902.
- [23] Ghazanfari A, Tabil L, Sokhansanj S. Evaluating a solar dryer for shell drying of split pistachio nuts. *Dry Technol: Int J* 2003;21:1357–68.
- [24] Sharma A, Chen C, Lan N. Solar energy drying systems: a review. *Renew Energy Sustain Energy Rev* 2009;13:1185–210.
- [25] Janjai S, Bala B. Solar drying technology. *Food Eng Rev* 2012;4:16–54.
- [26] Hii C, Jangnam S, Ong S, Mujumdar A. *Sol Dry: Fundam Appl Innov* 2012:1–50.
- [27] Gbaha P, Yobouet Andoh H, Kouassi Saraka J, Kaménan Koua B, Toure S. Experimental investigation of a solar dryer with natural convective heat flow. *Renew Energy* 2007;32:1817–29.
- [28] Shreekumar A, Manikantan P, Vijaykumar K. Performance of indirect solar cabinet dryer. *Energy Convers Manage* 2008;49:1388–95.
- [29] Tefera A, Endalew W, Fikiru B. Evaluation and demonstration of direct solar potato dryer. *Livest Res Rural Dev* 2013:25.
- [30] Eke A, Arinze E. Natural convection mud type solar dryers for rural farmers. *Niger J Technol Dev* 2011.
- [31] Bena B, Fuller R. Natural convection solar dryer with biomass back up heater. *Sol Energy* 2002;72(1):75–83.
- [32] Kamble A, Kalbande S, Deshmukh M, Gadge S. Solar drying system for energy conservation. *Appl Sol Energy* 2011;47:124–33.
- [33] Ogheneruona D, Yusuf M. Design and fabrication of a direct natural convection solar dryer for Tapioca. *Leonardo Electron J Pract Technol* 2011;18:95–104.

- [۳۴] Ghazanfari A, Tabil L, Sokhansanj S. Evaluating a solar dryer for shell drying of split pistachio nuts. *Dry Technol: Int J* 2003;21:1357–68.
- [۳۵] Green M, Schwarz D. *Solar drying technology for food preservation*; 2001.
- [۳۶] Hossain M, Amer B, Gottschalk K. Hybrid solar dryer for quality dried tomato. *Int J Dry Energy* 2008;26(12):1561–601.
- [۳۷] Parikh D, Agrawal G. Solar drying in hot and dry climate of Jaipur, India. *Int J Renew Energy Res* 2011;1(4):224–31.
- [۳۸] Komilov O, Astanov S, Safarov O, Sharipov M, Faizullaev A, Tillaev L. Combined solar drying unit. *Appl Sol.Energy* 2009;45(4):71–5.
- [۳۹] Ghatrehsamani S, Zomorodian A. Impacts of drying air temperature, bed depth and air flow rate on walnut drying rate in an indirect solar dryer. *Int J Agric Sci* 2012;4(6):253–6.
- [۴۰] Sharma V, Colangelo A, Spagna G. Experimental performance of an indirect type solar fruit and vegetable dryer. *Energy Convers Manage* 1993;34: 293–308.
- [۴۱] Goyal R, Tiwari G. Parametric study of a reverse flat plate absorber cabinet dryer: a new concept. *Solar Energy* 1997;60:41–8.
- [۴۲] Yaldyz O, Ertekyn C. Thin layer solar drying of some vegetables. *Dry Technol* 2001;19(3–4):583–97.
- [۴۳] Moumami N, Ali S, Moumami A, Desmons J. Energy analysis of a solar air collector with rows of fins. *Renew Energy* 2004;29:2053–64.
- [۴۴] Ali S, Desmons J. Simulation of a new concept of an indirect solar dryer equipped with offset rectangular plate fin absorber plate. *Int J Energy Res* 2005;29:317–34.
- [۴۵] Akpınar E, Sarsilmaz C, Yildiz C. Mathematical modelling of a thin layer drying of apricots in a solar energized rotary dryer. *Int J Energy Res* 2004;28:739–52.
- [۴۶] Aissa W, El-sallak M, Elhakem A. Performance of solar dryer chamber used for convective drying of sponge cotton; 2012.
- [۴۷] Madhlopa A, Jones S, Saka J. A solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. *Renew Energy* 2002;27:27–37.
- [۴۸] Tashtosh G, Jaradat M, Zuraiakt S, Alijarah M. A mathematical model of indirect solar drying of dairy products (Jameed). *Energy Environ Eng* 2014;2(1):1–13.
- [۴۹] Kadam D, Samuel D. Convective flat-plate solar heat collector for cauliflowers drying. *Biosyst Eng* 2006;93(2):189–98.
- [۵۰] Sundari A, Neelamegam P, Subramanian C. An experimental study and analysis on solar drying of bitter ground using an evacuated tube air collection in Thanjavur, Tamil Nadu, India. *International Conference on Solar Energy Photovoltaic*; 2013.
- [۵۱] Gatea A. Design, construction and performance evaluation of solar maize dryer. *J Agric Biotechnol Sustain Dev* 2010;2(3):39–46.

- [٥٢] Bolaji BO, Olalusi AP. Performance evaluation of a mixed-mode solar dryer. *AUJ Technol* 2008;11:225–31.
- [٥٣] Bolaji B, Olalusi A. Performance evaluation of a mixed mode solar dryer. Technical Report, vol. 11; 2008. p. 225–31.
- [٥٤] Simate I. Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers. *Renew Energy* 2003;28:435–53.
- [٥٥] Juraev E, Akhatov J. Study of mixed-mode forced convection solar dryer. *Appl Sol Energy* 2009;45(1):61–4.
- [٥٦] Fudholi A, Sopian K, Ruslan M, Alghoul M, Sulaiman M. Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:1–30.
- [٥٧] Sanusi Y, Ajadi D, Adeyemo I. Comparative study of performance of open, direct and indirect solar dryer in drying tomatoes. *Int J Curr Eng Technol* 2013;3(2):637–45.
- [٥٨] Rajagopal T, Sivakumar S, Manivel R. Development of solar dryer incorporated with evacuated tube collector. *Int J Innov Res Sci Eng Technol* 2014;3:2655–8.
- [٥٩] Nahar N. Processing of vegetables in a solar dryer in arid areas. *International Solar Food Processing Conference*; 2009.
- [٦٠] Azad E. Design and experimental study of solar agricultural dryer for rural area. *Livest Res Rural Dev* 2008;20:9.
- [٦١] Khartchenko NV. Advanced energy systems. Berlin: Institute of Energy Engineering & Technology University; 1997.
- [٦٢] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(2):318–45.
- [٦٣] Lane GA. Solar heat storage—latent heat materials, vol. I. Boca Raton, FL: CRC Press, Inc; 1983.
- [٦٤] Nuckols ML. Analytical modeling of a diver dry suit enhanced with microencapsulated phase change materials. *Ocean Eng* 1999;26(6):547–64.
- [٦٥] Sharma VK, Colangelo A, Spagna G. Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying. Department Enerzia, Divisione Ingegneria Sperimentale, Italy. *Drying* 1994;94:879–86.
- [٦٦] Aboul-Enein S, El-Sebaii AA, Ramadan MRI, El-Gohary HG. Parametric study of a solar air heater with and without thermal storage for solar drying applications. *Renew Energy* 2000;21:505–22.
- [٦٧] Butler JL, Troeger JM. Drying peanuts using solar energy stored in a rockbed. *Agricultural energy vol. I, solar energy, selected papers and abstracts*. ASAE Publication, St Joseph, Michigan; 1980.
- [٦٨] El-Sebaii AA, Aboul-Enein S, Ramadan MRI, EL-Bialy E. Year round performance of double pass solar air heater with packed bed. *Energy Convers Manag* 2007;48:990–1003.

- [٦٩] Ayyappan S, Mayilsamy K. Solar tunnel drier with thermal storage for drying of copra. In: Proceedings of international conference on fluid mechanics and fluid power; 2010. p. 1–5.
- [٧٠] Mohanraj M, Chandrasekar P. Performance of a forced convection solar drier integrated with gravel as heat storage material for chilli drying. *J Eng Sci Technol* 2009;4(3):305–14.
- [٧١] Devahastin S, Pitaksuriyarat S. Use of latent heat storage to conserve energy during drying and its effect on drying kinetics of a food product. *Appl Therm Eng* 2006;26:1705–13.
- [٧٢] Bal LM, Sudhakar P, Satya S, Naik SN. Solar dryer with latent heat storage systems for drying agricultural food products. In: Proceedings of the international conference on food security and environmental sustainability; 2009.
- [٧٣] Esakkimuthu S, Hassabou A, Palaniappan C, Spinnler M, Blumenberg J, Velraj R. Experimental investigation no phase change material based thermal storage system for solar air heating applications. *Sol Energy* 2013;88:144–53.
- [٧٤] Jain D. Modeling the system performance of multi-tray crop drying using an inclined multi-pass solar air heater with in-built thermal storage. *J Food Eng* 2005;71:44–54.
- [٧٥] Alkilani MM, Sopian K, Mat S, Alghoul MA. Output air temperature prediction in a solar air heater integrated with phase change material. *Eur J Sci Res* 2009;27(3):334–434.
- [٧٦] Shanmugam V, Natarajan E. Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror. *Appl Therm Eng* 2007;27:1543–51.
- [٧٧] Jain D. Modeling the performance of the reversed absorber with packed bed thermal storage natural convection solar crop dryer. *J Food Eng* 2007;78: 637–47.
- [٧٨] Dutil Y, Rousse DR, Salah NB, Lassue SP, Zalewski L. A review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:112–30.
- [٧٩] Kaygusuz K, et al. Experimental and theoretical investigation of latent heat storage for water based solar heating systems. *Energy Convers Manage* 1995;36(5):315–23.
- [٨٠] Pillai KK, Brinkwarth BJ. The storage of low grade thermal energy using phase change materials. *Appl Energy* 1976;2:205–16.
- [٨١] Garg HP, Mullick SC, Bhargava AK. Solar thermal energy storage. D. Reidel Publishing Co; 1985.
- [٨٢] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage. In: Beghi C, editor. Thermal energy storage. Dordrecht, Holland: D. Reidel Publication Co; 1981.
- [٨٣] Hale DV, Hoover MJ, O'Neill MJ. Phase change materials hand book. Alabaa: Marshal Space Flight Center; 1971.

- [٨٤] Abhat A. Investigation of physical and chemical properties of phase change materials for space heating/cooling applications. In: Proc. of the International solar energy congress; 1978.
- [٨٥] Abhat A. Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials. *Solar Energy* 1981;30(4):313–32.
- [٨٦] Lalit M. Bal. Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review; 2010.
- [٨٧] Buddhi D, Sawhney RL. In: Proceedings on thermal energy storage and energy conversion; 1994.
- [٨٨] Kenisarin M, Mahkamov K. Solar energy storage using phase change materials. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11(9):1913–65.
- [٨٩] Hale DV, Hoover MJ, O'Neill MJ. Phase change materials hand book. Alabaa: Marshal Space Flight Center; 1971.
- [٩٠] Abhat A. Development of a modular heat exchanger with an integrated latent heat storage. Report no. BMFT FBT 81-050. Germany Ministry of Science and Technology Bonn; 1981.
- [٩١] Lane GA, Glew DN. Heat of fusion system for solar energy storage. In: Proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings. Virginia: Charlothensville; 1975. p. 43–55.
- [٩٢] Lane GA. Macro-encapsulation of PCM. Report no. ORO/5117-8. Midland, ichigan: Dow Chemical Company; 1978. p. 152.
- [٩٣] Lane GA. Macro-encapsulation of PCM. Report no. ORO/5117-8. Midland, Michigan: Dow Chemical Company; 1978. p. 152.
- [٩٤] Lane GA, Rossow HE. Encapsulation of heat of fusion storage materials. In: Proceedings of the second south eastern conference on application of solar energy; 1976. p. 442–55.
- [٩٥] Telkes M. Thermal storage for solar heating and cooling. In: Proceedings of the workshop on solar energy storage sub-systems for heating and cooling of buildings; 1975.
- [٩٦] Biswas R. Thermal storage using sodium sulfate decahydrate and water. *Solar Energy* 1977;99:99–100.
- [٩٧] Charlsson B, Stymme H, Wattermark G. An incongruent heat of fusion system $\text{CaCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ made congruent through modification of chemical composition of the system. *Solar Energy* 1979;23:333–50.
- [٩٨] Furbo S. Heat storage units using a salt hydrate as storage medium based on the extra water principle. Report no. 116. Technical University of Denmark; 1982.
- [٩٩] Herrick S. A rolling cylinder latent heat storage device for solar heating / cooling. *ASHRAE Tans* 1979;85:512–5.
- [١٠٠] Alexiades V, Solomon Alan D. Mathematical modeling of melting and freezing process. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation; 1992.

- [۱۰۱] Sharma A, Tyagi VV, Chen CR, Buddhi D. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13(2):318–45.
- [۱۰۲] George A. Hand book of thermal design. In: Guyer C, editor. Phase change thermal storage materials. McGraw Hill Book Co; 1989.
- [۱۰۳] Bo H, Gustafsson M, Setterwall F. Paraffin waxes and their binary mixture as phase change materials (PCMs) for cool storage in district cooling system. IEA Annex 10, phase change materials and chemical reactions for thermal energy storage first workshop, 16-17 April, 1998, Adana, Turkey; p 45-56.
- [۱۰۴] M. Iranmanesh, H. Samimi, M. Barghi. CFD modeling and evaluation the performance of a solar cabinet dryer equipped with evacuated tube solar collector and thermal storage system. *Solar Energy*; 2020.
- [۱۰۵] S.M. Borhani , M.J. Hosseini , A.A. Ranjbar , R. Bahrampoury. Investigation of Phase Change in a Spiral-Fin Heat Exchanger. 2018.

Abstract

Due to the increase in global energy consumption in various sectors, especially in dryers to dry agricultural products, as well as the limited resources of non-renewable energy, the use of solar energy is important because it is cheap. However, the intermittent nature of the sun during the day and its absence at night, causes the dryer to remain unstable and reduce the temperature, and as a result, reduce the quality of the product. Thermal storage of latent heat by Phase Change Material (PCM) during the day, and heat release during hours when the sun is not available; It stabilizes the dryer temperature at night and maintains the quality of the products.

In this research, numerical simulation of solar dryer using thermal storage system, for: calculation of energy stored in the storage section, investigation of thermal distribution and energy input to solar dryer, with the help of Fluent software. Examining the previous research, the equations related to both parts were extracted. To simulate the storage system, a cylindrical tank with a spiral coil containing paraffin was used. Water with temperature dependent on laboratory data, from the solar collector, for every local hour from 7 am to 7 pm, entered the tank and after heat exchange with paraffin as a phase change material, left the tank. The maximum stored heat was related to 14:00, which was 0.406 MJ. The average temperature of paraffin at this time was 351 K. The water leaving the tank enters the heat exchanger and after exchanging with the air that enters from the environment; Returns to the collector. The heat exchanger was tested in a laboratory by researchers. To simulate the solar dryer, a cubic chamber with an expansion inlet with three perforated rectangular trays was used. The exhaust air from the heat exchanger enters the solar dryer for every local hour from 7 am to 24 pm and leaves the drying room after exchanging heat with the walls and trays. The maximum heat energy input to the dryer occurred at 14:00 with the highest amount of sunlight, the amount of which was 1.039 MJ. The amount of energy stored in the tank and the amount of heat energy input to dryer for each local hour were validated by previous research.

Simulation of the storage section, due to: the use of melting and freezing models and complex computational volume, consumes a lot of time; And to do that, you need powerful computers. Using the temperature effects of the storage section and the heat exchanger in the form of mathematical functions for each hour is a good alternative to simulate these sections. The mean relative error between the dryer simulation using input mathematical

functions and the simulation using input data was 0.41%. By providing unique mathematical functions for each phase change material, according to the conditions and geometry of the tank and heat exchanger, as well as its application in solar dryers, the dryer performance can be investigated by spending a short time and reducing the volume of calculations. And predicted for each phase change material.

Keywords: Solar dryer, Spiral coil, Paraffin, Cylindrical storage tank, Alternative mathematical functions.



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering

**Modeling The Performance of A Solar dryer Chamber Using Phase
Change Materials**

Nima Haghbayan

Supervisor:

Dr. Ali Sarreshtedari

September 2021