

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی

# مدل سازی عددی هوا گرم کن خورشیدی با کلکتور لوله خلاء

نگارنده: مهیار علی پور

استاد راهنما:

دکتر علی سررشته‌داری

استاد مشاور:

دکتر محمد ضامن

بهمن ۱۴۰۰

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تأیید کند.

# تقدیم بہ پدر و مادر عزیز و فداکارم

## تقدیر و تشکر

خداوند را شاکرم که در طول مسیر زندگی، همواره بزرگ‌ترین پشتیبان و هدایت‌کننده بوده است.

از اساتید ارجمند جناب دکتر علی سررشته‌داری و دکتر محمد ضامن که در تمام مراحل بارانمایی و

کجک‌های بی‌دریغشان زحمات فراوان کشیده‌اند کمال قدردانی و سپاس را دارم.

# تعمدنامه

اینجانب **مهیار علی پور** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مکانیک - گرایش تبدیل انرژی** دانشکده مکانیک و مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "مدلسازی عددی هوا گرم کن خورشیدی با کلکتور لوله خلا" تحت راهنمایی **دکتر علی سررشته داری** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آن ها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، 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 می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

به‌طور کلی کلکتورهای حرارتی خورشیدی به دو دسته کلی کلکتورهای **هوا گرم‌کن** و آب گرم‌کن خورشیدی تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به کمبود منابع انرژی و همچنین رویکردهای زیست محیطی، این دستگاه‌ها نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای مهندسی از جمله گرمایش ساختمان، خشک‌کن‌های خورشیدی، تهویه مطبوع و غیره یافته‌اند. به‌علاوه؛ ساختار ساده، هزینه پایین ساخت و نگهداری از جمله دیگر مزایای این گونه دستگاه‌های خورشیدی می‌باشد. در این پایان‌نامه با استفاده از روش جدیدی توسط **کلکتور لوله خلاء**، از حرارت جذب‌شده توسط تابش خورشیدی به‌طور مستقیم، جهت تولید **هوای گرم** بهره گرفتیم. ما با استفاده از روش **حل عددی** به بررسی مدل‌سازی عددی انتقال حرارت در هوا گرم‌کن خورشیدی با **کلکتور لوله خلاء** توسط نرم‌افزار انسیس **فلوئنت** پرداختیم. مدل موردنظر را در حالت‌های مورد بررسی قرار دادیم. با اضافه کردن یک فن در قسمتی از کلکتور که به‌عنوان خشک‌کن در نظر گرفته شده است؛ جریان انتقال حرارت را از حالت طبیعی به حالت اجباری تغییر دادیم. مقادیر تغییرات دما و شار تابش خورشیدی و بازدهی حرارتی کلکتور را به دست آوردیم تا عملکرد حرارتی هوا گرم‌کن را در شرایط گوناگون مورد ارزیابی قرار دهیم. مشاهده کردیم تغییرات میزان دمای میانگین **کلکتور** با تغییر شار تابش خورشیدی در طول روز، در حالت ناپایا نوسان کمی نسبت به حالت پایا دارد. همچنین بازدهی عملکرد حرارتی کلکتور در شرایط ناپایا برای طول زمان مورد مطالعه تغییرات بسیار کمی نسبت به حالت پایا نشان داد. با بررسی بازده حرارتی **کلکتور** از نتایج دریافتیم که میانگین بازدهی عملکرد حرارتی سیستم در طول روز برای حالت ناپایا ۵۳/۲۷٪ است. بنابراین به دلیل نوسانات دمایی کم در طول ساعات روز، به‌کارگیری **هوای گرم** تولیدی برای مصارف خشک‌کن در این شرایط کاری مناسب است. واژگان کلیدی: هوا گرم‌کن، هوا گرم‌کن خورشیدی، کلکتور، کلکتور لوله خلاء

# فهرست مطالب

|    |                                                                   |
|----|-------------------------------------------------------------------|
| ی  | فهرست جداول                                                       |
| ک  | فهرست اشکال                                                       |
| م  | فهرست علائم اختصاری                                               |
| ۱  | فصل ۱: کلیات تحقیق                                                |
| ۲  | ۱-۱ مقدمه .....                                                   |
| ۴  | ۲-۱ مروری بر تحقیقات پیشین در کلکتورهای خورشیدی .....             |
| ۴  | ۱-۲-۱ مطالعات انجام شده در زمینه کلکتورهای لوله خلأ خورشیدی ..... |
| ۵  | ۲-۲-۱ بررسی و تحلیل عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایش خورشیدی .....  |
| ۱۰ | ۳-۲-۱ بهینه‌سازی سیستم‌های هوا گرم‌کن خورشیدی .....               |
| ۱۹ | ۴-۲-۱ شبیه‌سازی سیستم‌های هوا گرم‌کن خورشیدی .....                |
| ۲۱ | ۳-۱ بیان مسئله .....                                              |
| ۲۴ | ۴-۱ اهمیت و ضرورت تحقیق .....                                     |
| ۲۶ | ۵-۱ روش تحقیق .....                                               |
| ۲۶ | ۶-۱ نتیجه‌گیری .....                                              |
| ۲۹ | فصل ۲: آشنایی با کلکتورهای خورشیدی                                |
| ۳۰ | ۱-۲ مقدمه .....                                                   |
| ۳۲ | ۲-۲ هوا گرم‌کن خورشیدی .....                                      |
| ۳۳ | ۳-۲ کلکتور خورشیدی .....                                          |
| ۳۵ | ۴-۲ انواع کلکتورهای خورشیدی .....                                 |
| ۳۶ | ۱-۴-۲ کلکتورهای صفحه تخت .....                                    |
| ۳۸ | ۲-۴-۲ کلکتورهای لوله خلأ .....                                    |
| ۴۲ | ۳-۴-۲ کلکتورهای متمرکز کننده خورشیدی .....                        |
| ۴۳ | ۵-۲ سیستم‌های گرمایش خورشیدی .....                                |
| ۴۳ | ۱-۵-۲ سیستم‌های فعال و غیرفعال .....                              |
| ۴۶ | ۶-۲ مدل فیزیکی و شرح عملکرد هوا گرم‌کن .....                      |
| ۴۹ | ۷-۲ معرفی پژوهش و نوآوری .....                                    |
| ۵۱ | فصل ۳: روش مدل‌سازی کلکتور خورشیدی و شبیه‌سازی عددی               |
| ۵۲ | ۱-۳ مقدمه .....                                                   |

|     |                                                                            |
|-----|----------------------------------------------------------------------------|
| ۵۲  | ۲-۳ روش تحلیل مسائل مهندسی                                                 |
| ۵۳  | ۳-۳ معرفی و انتخاب نرم افزار                                               |
| ۵۵  | ۴-۳ معادلات حاکم                                                           |
| ۵۶  | ۵-۳ جریان در جابجایی طبیعی                                                 |
| ۵۹  | ۳-۶ مدل آشفستگی                                                            |
| ۶۱  | ۳-۶-۱ مدل آشفستگی $k - \omega$                                             |
| ۶۱  | ۲-۶-۳ مدل آشفستگی $k - \epsilon$                                           |
| ۶۵  | ۷-۳ روش حل عددی حجم محدود                                                  |
| ۶۸  | ۸-۳ تولید شبکه                                                             |
| ۷۲  | ۹-۳ انتقال حرارت تشعشی                                                     |
| ۷۲  | ۱۰-۳ مفاهیم تابشی                                                          |
| ۸۰  | ۱۱-۳ مدل سازی تابش                                                         |
| ۸۳  | ۳-۱۱-۱ تئوری مدل تابش سطح به سطح (S2S)                                     |
| ۸۵  | ۳-۱۱-۲ مدل بار خورشیدی                                                     |
| ۸۷  | ۳-۱۱-۳ تئوری محاسبه بار خورشیدی                                            |
| ۹۰  | ۱۲-۳ محاسبه تابش خورشید روی سطح شیب دار                                    |
| ۹۱  | ۱۳-۳ آنالیز عملکرد حرارتی کلکتور                                           |
| ۹۵  | <b>فصل ۴: شبیه سازی عددی و نتایج</b>                                       |
| ۹۶  | ۱-۴ مقدمه                                                                  |
| ۹۶  | ۲-۴ هندسه مورد مطالعه                                                      |
| ۱۰۰ | ۳-۴ شبکه بندی روی مدل                                                      |
| ۱۰۲ | ۴-۴ نتایج مربوط به آزمایش تجربی دستگاه در حالت هوا گرم کن با سیکل بسته هوا |
| ۱۰۳ | ۵-۴ مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی                                |
| ۱۰۴ | ۶-۴ اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی                     |
| ۱۰۷ | ۷-۴ تنظیمات مدل حل مسئله                                                   |
| ۱۰۹ | ۴-۷-۱ مدل حل تشعشع                                                         |
| ۱۱۰ | ۴-۷-۲ شرایط مرزی                                                           |
| ۱۱۲ | ۴-۸ حل مسئله                                                               |
| ۱۱۲ | ۴-۹ تحلیل نتایج                                                            |
| ۱۱۲ | ۴-۹-۱ نتایج شبیه سازی عددی برای حالت بدون فن                               |
| ۱۱۷ | ۴-۹-۲ نتایج شبیه سازی عددی برای حالت با فن                                 |
| ۱۲۱ | ۴-۹-۳ شار تابشی خورشید برای حالت های مورد بررسی                            |

۴-۹-۴ عدد ناسلت برای دو حالت کلکتور..... ۱۲۲

۴-۹-۵ عملکرد حرارتی کلکتور..... ۱۲۳

فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۲۷

۵-۱ مقدمه..... ۱۲۸

۵-۲ نتیجه‌گیری..... ۱۲۸

۵-۳ پیشنهادها..... ۱۲۹

مراجع ۱۳۱

# فهرست جداول

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۱-۲ انواع کلکتورهای حرارتی خورشیدی و محدوده دمای کاری آن‌ها [۸۲]..... | ۳۵  |
| جدول ۱-۴ مشخصات هندسی و متغیرهای مسئله.....                                | ۹۷  |
| جدول ۲-۴ آزمایش اندازه‌گیری دمای مخزن (بدون محصول) - ۱۵/۲/۹۹ [۹۸].....     | ۱۰۲ |
| جدول ۳-۴ آزمایش اندازه‌گیری دمای مخزن (بدون محصول) - ۱۷/۲/۹۹ [۹۸].....     | ۱۰۲ |
| جدول ۴-۴ مقادیر ضرایب تابشی برای لوله داخلی و خارجی کلکتور [۹۶].....       | ۱۱۰ |

# فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ تغییرات دما برای هوای ورودی و خروجی به کلکتور نسبت به زمان [۴۳] ..... ۷
- شکل ۲-۱ استفاده از مبدل حرارتی در ارتفاع مختلف برای گرمایش هوا [۱۱] ..... ۱۱
- شکل ۳-۱ تغییرات دما در زمان با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در سرعت جریان ۰,۰۱۸ کیلوگرم بر ثانیه [۱۳] ..... ۱۲
- شکل ۴-۱ دمای ورودی و خروجی آب گرم کلکتور؛ قبل و بعد از استفاده از سیستم بازیافت حرارت [۱۹] ..... ۱۴
- شکل ۵-۱ مدل سه بعدی لوله‌های حرارتی هم‌محور داخل لوله‌های شیشه‌ای خلأ توسط کابیل و همکاران [۲۱] ..... ۱۶
- شکل ۶-۱ شماتیک شبکه بندی مدل مورد مطالعه، توسط وحید و همکاران [۱۶] ..... ۲۰
- شکل ۷-۱ انواع کلکتورهای لوله خلأ [۹۰] ..... ۲۲
- شکل ۱-۲ شاخص تقاضای جهانی انرژی بر اساس سوخت بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی [۶۰] ..... ۳۰
- شکل ۲-۲ آینده جهانی مصرف انرژی [۶۱] ..... ۳۱
- شکل ۳-۲ نمایی از ساختار کلکتور خورشیدی مورد مطالعه در آزمایشگاه ..... ۳۳
- شکل ۴-۲ نمای عرضی از جزئیات ساختار کلکتور صفحه تخت [۹۱] ..... ۳۸
- شکل ۵-۲ لوله‌های خلأ شده ..... ۳۹
- شکل ۶-۲ شماتیک برش عرضی از لوله خلأ از نوع ساده [۹۲] ..... ۴۰
- شکل ۷-۲ شماتیک کلکتور لوله خلأ از نوع لوله حرارتی [۹۱] ..... ۴۱
- شکل ۸-۲ نمایی شماتیک از کلکتور لوله خلأ نوع U-شکل [۹۰] ..... ۴۲
- شکل ۹-۲ شماتیک کلکتور سهموی خطی [۹۱] ..... ۴۳
- شکل ۱۰-۲ نمایی شماتیک از کلکتور لوله خلأ ترموسیفون بر پایه آب [۹۲] ..... ۴۴
- شکل ۱۱-۲ شماتیکی از سیستم فعال بر پایه هوا گرم‌کن [۹۱] ..... ۴۶
- شکل ۱۲-۲ نمایی از کلکتور خورشیدی لوله خلأ مورد مطالعه ..... ۴۷
- شکل ۱۳-۲ نمای شماتیک از سیرکولاسیون جریان هوا در کلکتور لوله خلأ [۹۳] ..... ۴۹
- شکل ۱-۳ حجم کنترل استفاده شده برای گسسته سازی معادله بقاء ..... ۶۶
- شکل ۲-۳ روش ایجاد شبکه ..... ۶۹
- شکل ۳-۳ شماتیک خواص تابشی مواد شفاف در کلکتور لوله خلأ [۹۴] ..... ۷۶
- شکل ۴-۳ رفتار پرتوی خورشیدی در هنگام بازتابش از سطوح [۸۹] ..... ۷۸
- شکل ۵-۳ فرآیند انتقال حرارت تابشی در محیط فعال [۸۴] ..... ۸۲

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| شکل ۳-۶ مؤلفه‌های تابشی مستقیم، پراکنده و بازتاب شده از سطح زمین برای یک سطح شیب‌دار [۸۹]                     | ۸۸  |
| شکل ۳-۷ تابش مستقیم روی سطح افقی و شیب‌دار [۸۹]                                                               | ۹۱  |
| شکل ۴-۱ مدل هندسی ایجادشده در محیط دیزاین مدلر                                                                | ۹۷  |
| شکل ۴-۲ مجموعه‌ی کلکتور لوله خلاً خورشیدی [۹۵]                                                                | ۹۹  |
| شکل ۴-۳ هندسه مورد استفاده برای حل عددی                                                                       | ۹۹  |
| شکل ۴-۴ نمای کلی از شبکه‌بندی هگزا هدرال روی هندسه مدل                                                        | ۱۰۰ |
| شکل ۴-۵ جزئیات مش مورد استفاده                                                                                | ۱۰۱ |
| شکل ۴-۶ استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی                                                                      | ۱۰۴ |
| شکل ۴-۷ مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه در آزمایش تجربی                                                            | ۱۰۵ |
| شکل ۴-۸ مقایسه تغییرات دمای کلکتور در طول روز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و حل عددی برای حالت بدون فن (ایستا) | ۱۰۶ |
| شکل ۴-۹ مقایسه تغییرات دمای کلکتور در طول روز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و حل عددی برای حالت با فن           | ۱۰۷ |
| شکل ۴-۱۰ کانتور تغییرات دما در کلکتور برای ساعت ۱۰:۰۰ صبح الی ۱۹:۰۰ عصر                                       | ۱۱۵ |
| شکل ۴-۱۱ کانتور تغییرات سرعت در ساعت ۱۰                                                                       | ۱۱۷ |
| شکل ۴-۱۲ کانتور تغییرات دما در کلکتور در ساعت ۱۰:۰۰ صبح الی ۱۹:۰۰ عصر                                         | ۱۲۰ |
| شکل ۴-۱۳ شار خورشیدی در کلکتور برای دو روز مورد بررسی در حالات جریان آزاد و اجباری                            | ۱۲۱ |
| شکل ۴-۱۴ عدد ناسلت برای کلکتور در حالت ایستا و غیر ایستا                                                      | ۱۲۲ |
| شکل ۴-۱۵ درصد بازدهی عملکرد حرارتی کلکتور بر اساس زمان در حالت‌های مختلف                                      | ۱۲۴ |

# فهرست علائم اختصاری

|                      |                  |
|----------------------|------------------|
| شاخص ناهمسانگردی     | $A_i$            |
| ضریب دید             | $F_{ij}$         |
| نیروی بویانسی        | $f_B$            |
| شتاب گرانش زمین      | $g$              |
| تابش مستقیم          | $G_b$            |
| تابش پراکنده         | $G_d$            |
| تابش روی سطح شیب‌دار | $G_T$            |
| عدد گراشف            | $Gr$             |
| شدت تابش             | $I$              |
| رادیوسیتی            | $J$              |
| انرژی جنبشی          | $k$              |
| فشار                 | $p$              |
| عدد پرانتل           | $Pr$             |
| شار حرارتی           | $q$              |
| عدد رایلی            | $Ra$             |
| عدد رینولدز          | $Re$             |
| دما                  | $T$              |
| دمای سیال ورودی      | $T_i$            |
| دمای سیال خروجی      | $T_o$            |
| زمان                 | $t$              |
| سرعت سیال            | $v$              |
| ضریب تلفات حرارتی    | $U$              |
| نمادهای یونانی       |                  |
| ضریب پخش حرارتی      | $\alpha$         |
| قابلیت جذب           | $\alpha_\lambda$ |
| ضریب انبساط حجمی     | $\beta$          |
| ظرفیت حرارتی ویژه    | $C_p$            |

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| $\varepsilon$         | تلفات انرژی         |
| $\varepsilon_\lambda$ | ضریب جذب            |
| $\eta$                | راندمان کلکتور      |
| $\rho$                | جرم حجمی            |
| $\rho_g$              | ضریب بازتابش زمین   |
| $\rho_\lambda$        | قابلیت بازتابندگی   |
| $\sigma$              | ثابت استفان بولتزمن |
| $\sigma_s$            | ضریب پخش            |
| $\tau_\lambda$        | قابلیت عبور         |
| $\emptyset$           | خاصیت کلی           |
| $\mu$                 | ویسکوزیته دینامیکی  |
| $\nu$                 | لزجت سینماتیکی      |
| $\lambda$             | طول موج             |

# فصل ۱: کلیات تحقیق

## ۱-۱ مقدمه

با توجه به افزایش جمعیت در کره زمین و کم شدن ذخایر سوخت‌های فسیلی در عصر حاضر همواره پژوهشگران و محققان در تلاش هستند تا از منابع جایگزین جهت تأمین نیاز به انرژی استفاده کنند. انرژی‌های نو و تجدید پذیر با توجه به مزایای بسیاری که دارند همواره مورد توجه بشر قرار گرفته است. منابع انرژی‌های تجدید پذیر نه تنها نامحدود است بلکه اغلب اثرات جبران‌ناپذیر زیست‌محیطی نیز ایجاد نمی‌کند. بنا بر دلایل توجیه‌پذیر امروزه اکثر کشورها در جهان، علی‌الخصوص کشورهایی که از منابع انرژی فسیلی بی‌بهره هستند و برای تأمین نیاز آن را از کشورهای دیگر خریداری می‌کنند، به دنبال کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و جایگزین کردن آن با انرژی‌های تجدید پذیر می‌باشند و برای محقق کردن این امر سرمایه‌گذاری‌های زیادی در این زمینه انجام می‌دهند. در ایران به دلیل اینکه قیمت حامل‌های انرژی پایین می‌باشد؛ سبب شده، توجه زیادی به بهره‌برداری از انرژی‌های تجدید پذیر و توسعه برای استفاده از این منابع نشود؛ اما در سال‌های اخیر با توجه به اینکه بهای حامل‌های انرژی و سوخت‌های فسیلی افزایش پیدا کرده و همچنین مشکلات زیست‌محیطی متأثر از مصرف بی‌رویه‌ی سوخت، استفاده گسترده‌تر از انرژی‌های تجدید پذیر مورد توجه در برنامه‌های توسعه‌ای قرار گرفته است. در مجموع بیش از ۸۰ درصد مصرف انرژی در ساختمان‌ها، جهت گرمایش محیط و آب استفاده می‌شود و به‌طور کلی بیش از ۳۰ درصد از کل انرژی مصرفی در جهان برای گرمایش استفاده می‌شود. در این بین انرژی مورد نیاز برای گرمایش آب به‌طور متوسط بین ۲۰ تا ۳۰ درصد از کل انرژی مورد نیاز ساختمان را شامل می‌شود. در نتیجه می‌توان در طول سال تا ۷۰ درصد انرژی مورد نیاز برای گرمایش را با استفاده از سامانه‌های تجدید پذیر، نظیر کلکتورهای حرارتی خورشیدی تأمین کرد [۱].

با توجه به دلایل ذکر شده، در سال‌های اخیر می‌بینیم انواع پروژه‌هایی که با سامانه‌های حرارتی خورشیدی مورد بهره‌برداری قرار گرفته به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا کرده است. مطابق آنچه از آمارها

می‌توان مشاهده کرد در حال حاضر، حدوداً ۸۸,۸۴۵ گیگاوات ساعت (GWh) انرژی حرارتی حاصل از تابش خورشید در واحدهای حرارتی بدست می‌آید [۲]. اگر می‌خواستیم این مقدار انرژی حرارتی را با سوزاندن سوخت‌های فسیلی استحصال کنیم در نتیجه بایستی ۳۹,۳ میلیون تن گاز کربن دی‌اکسید (CO<sub>2</sub>) به جو زمین منتشر می‌کردیم. می‌توان انتظار داشت که در سال‌های آتی میزان بهره‌برداری از انرژی خورشیدی در تمام سطح کره زمین به ۱۹۵,۸ گیگاوات انرژی حرارتی خواهد رسید که برای بدست آوردن این مقدار انرژی حرارتی باید ۲۷۹,۷ میلیون مترمربع کلکتور خورشیدی مورد بهره‌برداری قرار گیرد [۳]. همچنین می‌توان انتظار داشت که این روند در سال‌های پیش‌رو نیز پایدار باشد و به‌طور تقریبی در هر سال ۲۵ درصد به این مقدار انرژی حرارتی دریافت شده، حاصل از تابش خورشید با استفاده از کلکتورهای خورشیدی اضافه شود. ۸۸ درصد از این تعداد کلکتورهای خورشیدی که تا اکنون استفاده شده است شامل کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت و کلکتورهای لوله خلأ می‌باشند [۲]. از بین انواع کلکتورها، دو نوع کلکتور خورشیدی صفحه تخت و لوله خلأ به این دلیل که عملکرد حرارتی آن‌ها بالا می‌باشد بسیار مورد توجه پژوهشگران و محققان جهت کارهای تحقیقاتی قرار گرفته‌اند. علاوه بر این، کشورهای نظیر چین، آمریکای شمالی و کشورهای اروپایی حدوداً ۸۶,۶ درصد از کل کلکتورهایی که تاکنون در سراسر کره زمین نصب شده را به خود اختصاص داده‌اند و از جمله کشورهای مطرح در بهره‌گیری از انرژی خورشیدی به حساب می‌آیند [۴]. تمامی آمار و ارقام نشان می‌دهد که استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر علی‌الخصوص انرژی خورشیدی در چند سال اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته و کشورهای اروپایی و چین در این زمینه برنامه‌ریزی بلندمدتی را انجام داده‌اند، بنابراین این تحقیق بر آن است تا به مدل‌سازی عددی هوا گرم‌کن خورشیدی با کلکتور لوله خلأ بپردازد. این کلکتور از نظر ساختاری مشابه آب گرم‌کن‌های لوله خلأ می‌باشد، با این تفاوت که از هوا به‌عنوان سیال کاری بهره می‌گیرد.

## ۱-۲ مروری بر تحقیقات پیشین در کلکتورهای خورشیدی

تفاوت‌های زیادی در مورد نوع سیستم گرمایش، کلکتور خورشیدی و کاربردهای آن وجود دارد. طراحی یک سیستم مجهز به کلکتور خورشیدی، می‌تواند عملکرد حرارتی متفاوتی را در مناطق مختلف آب و هوایی، از خود نشان دهد. به همین دلیل ارزیابی انرژی در سیستم‌های گرمایش خورشیدی و کلکتورهای خورشیدی تحت شرایط آب و هوایی مختلف بسیار مهم است. طراحی کاربردی سیستم‌های گرمایش خورشیدی مزیت‌های فراوانی را برای کاربران آن‌ها به همراه دارد. کلکتور لوله خلاء یکی از انواع کلکتورهای خورشیدی است که برای کاربردهای گوناگون، از جمله گرمایش هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. با شبیه‌سازی سیستم گرمایش هوای خورشیدی می‌توانیم، مناسب‌ترین پارامترها برای طراحی را مورد تحلیل قرار دهیم.

در گذشته تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه صورت پذیرفته و موضوعات مختلفی، مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین، انواع پژوهش‌های آزمایشگاهی و عددی که برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی؛ نظیر گرمایش هوا، استفاده از مواد ذخیره کننده انرژی و سایر مواردی که برای کاربردهای گوناگون انجام شده است را تشریح خواهیم کرد.

## ۱-۲-۱ مطالعات انجام شده در زمینه کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی

صبیحه و همکاران<sup>۱</sup> [۵] یک بررسی جامع در مورد پیشرفت و توسعه‌های اخیر کلکتور خورشیدی لوله خلاء انجام دادند و اینکه چرا لوله‌های خلاء بیشتر ترجیح داده می‌شوند. همچنین انواع کلکتورهای لوله خلاء، ساختار، کاربردها و چالش‌های استفاده از آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که این کلکتورها با توجه به کاربرد در دمای بالا، دارای پتانسیل مطلوبی در بخش‌های صنعتی، مسکونی و کشاورزی هستند.

---

<sup>1</sup> Sabiha et al

انکوئتا و همکاران<sup>۱</sup> [۶] نشان دادند که خلأ بین لوله‌ها نقش مهمی در عملکرد حرارتی لوله‌های خلأ شده ایفا می‌کند، به‌طوری‌که اتلاف همرفت را حذف کرده و خاصیت عایق حرارتی را بهبود می‌بخشد. لوله داخلی با مواد پوشش‌دهنده مناسب پوشش داده می‌شود، که جذب بالا و قابلیت انتشار پایین دارد. لوله داخلی تابش خورشیدی را جذب کرده و انرژی گرمایی را به محیط داخل لوله داخلی منتقل می‌کند.

## ۱-۲-۲ بررسی و تحلیل عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایش خورشیدی

ما و همکاران<sup>۲</sup> [۱۵] تأثیر لایه هوا و شدت تابش خورشیدی را در عملکرد حرارتی کلکتور لوله خلأ خورشیدی با لوله حرارتی از نوع U-شکل<sup>۳</sup> را مورد مطالعه قرار دادند و مشخص شد که فاصله فضای بین لوله خلأ می‌تواند به شدت بر نرخ انتقال گرما و کارایی کلکتور تأثیر بگذارد. راندمان کلکتور با افزایش شدت تابش خورشیدی افزایش می‌یابد، اما به تدریج به یک ثبات می‌رسد.

کورتباس و دورماس<sup>۴</sup> [۳۷] پنج نوع مختلف هوا گرم‌کن، با انواع آرایش جریان روی صفحه جاذب را از نظر بازدهی باهم مقایسه کردند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با زیاد شدن زبری سطح، انتقال حرارت و افت فشار افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که تلفات اگزرژی سیستم با افزایش بازده کلکتور کاهش می‌یابد و یک رابطه معکوس بین تلفات اگزرژی و انتقال حرارت در هنگامی که فشار کاهش پیدا می‌کند، وجود دارد.

ساکسنا و همکاران<sup>۵</sup> [۳۰] با ارزیابی هوا گرم‌کن خورشیدی از نوع سیستم جریان اجباری، عملکرد حرارتی هوا گرم‌کن را مورد تحلیل قرار دادند. در این تحقیق با استفاده از لامپ‌های حرارتی استفاده شد و دمای داخلی محفظه هوا گرم‌کن را افزایش دادند تا عملکرد حرارتی بالاتری را ایجاد کنند. نتایج

---

<sup>1</sup> Nkwetta et al

<sup>2</sup> Ma et al

<sup>3</sup> U-type

<sup>4</sup> Kurtbas and Durmus

<sup>5</sup> Saxena et al

به دست آمده توانست افزایش عملکرد بین ۱۸/۰۴ درصد تا ۲۰/۷۸ درصد نسبت به جریان جابجایی آزاد و بین ۵۲/۲۱ درصد تا ۸۰/۰۵ درصد نسبت به جریان جابجایی اجباری را نشان دهد.

کارسلی<sup>۱</sup> [۳۹] چهار نوع هوا گرم کن با زوایای جهت گیری مختلف و با صفحات جاذب مختلف را به صورت تجربی بررسی کرد. او بازده قانون اول و دوم را برای چهار نوع هوا گرم کن تحلیل کرد. بیشترین بازده را هوا گرم کن با صفحه جاذب پره دار و با زاویه استقرار ۷۵ درجه داشت. اسن<sup>۲</sup> [۴۰] به صورت تجربی عملکرد یک نوع کلکتور خورشیدی دومیسیره با چهار نوع صفحه جاذب متفاوت را مقایسه نمود. همچنین او روابط اگزرژی مربوط به این چهار نوع کلکتور را نیز بررسی کرد. نتایج کار او نشان داد که بیشترین برگشت ناپذیری در کلکتور با صفحه جاذب تخت و بدون مانع رخ می دهد، در حالی که این نوع هوا گرم کن کمترین بازدهی را دارد.

اوزتوپ و همکاران<sup>۳</sup> [۴۱] در یک مطالعه مروری جنبه های انرژی و اگزرژی سیستم های هوا گرم کن خورشیدی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که بر روی روش های آنالیز انرژی، مطالعات زیادی توسط محققان انجام شده در حالی که بر روی روش های تحلیل اگزرژی، مطالعات کمتری انجام شده است. الیم و همکاران<sup>۴</sup> [۴۲] تولید آنتروپی و افت فشار در یک هوا گرم کن خورشیدی را که در آن از نانو سیال استفاده شده بود، تحلیل کردند. آن ها تولید آنتروپی، افت فشار و ظرفیت افزایش انتقال حرارت به وجود آمده در اثر نانو سیال ها را درون یک هوا گرم کن صفحه تخت بررسی کردند. نتیجه به دست آمده از کار آن ها نشان داد که نانو سیال اکسید مس، تولید آنتروپی را کاهش داده و ضریب انتقال حرارت را در مقایسه با آب (به عنوان سیال جاذب) افزایش می دهد.

کریم و همکاران<sup>۵</sup> [۴۳] یک هوا گرم کن دومیسیره دندانه دار را به صورت تئوری با یک نمونه تجربی مقایسه نمودند. یک مدل ریاضی برای این نوع کلکتور ایجاد کردند و شبیه سازی با استفاده از برنامه متلب

---

<sup>1</sup> Karsli

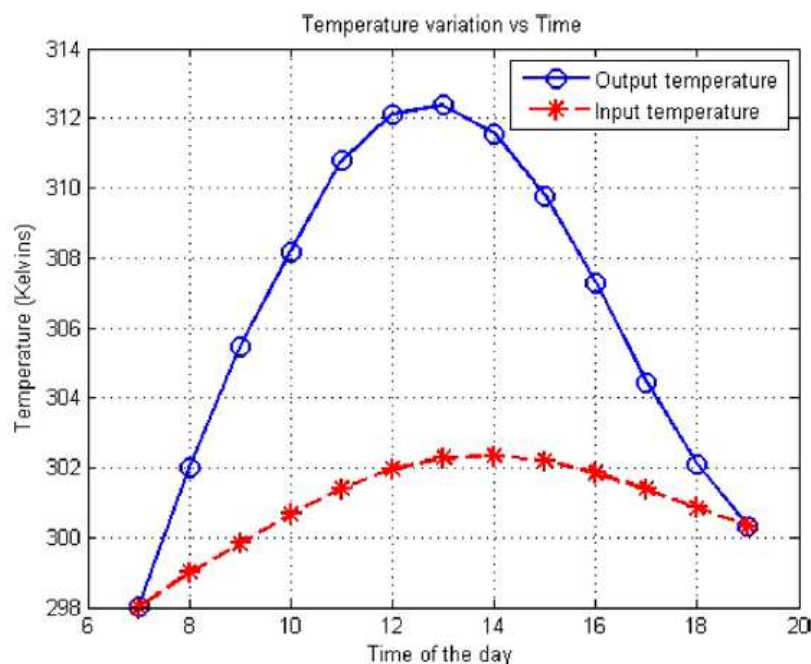
<sup>2</sup> Esen

<sup>3</sup> Oztop et al

<sup>4</sup> Alim et al

<sup>5</sup> Kaeim et al

انجام شد. نتایج شبیه‌سازی با سه نتیجه تحقیقاتی متمایز اعتبار سنجی شد و مشخص شد که شبیه‌سازی توانایی پیش‌بینی دقیق، عملکرد کلکتور گرم‌کن هوا را در مقایسه با داده‌های تجربی دارد. آن‌ها پارامترهایی نظیر شدت تابش خورشید، دمای هوای ورودی، نرخ جریان و طول کلکتور را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند؛ به‌غیر از شدت تابش، سایر پارامترها اثر قابل‌توجه کمتری روی دمای خروجی و بازده هوا گرم‌کن ندارند. مقادیر تغییرات دما برای هوای ورودی و خروجی به کلکتور نسبت به زمان از ساعت ۷ صبح الی ۱۹ بعدازظهر در شبیه‌سازی به دست آمد، که در شکل ۱-۱ می‌بینیم. تفاوت بین نتایج پیش‌بینی‌شده و تجربی، حداکثر، حدود ۰.۷٪ بود که با در نظر گرفتن برخی عدم قطعیت‌ها در مقادیر پارامتر ورودی، قابل‌قبول برای مقایسه می‌باشد.



شکل ۱-۱ تغییرات دما برای هوای ورودی و خروجی به کلکتور نسبت به زمان [۴۳]

بهره‌مند و همکاران<sup>۱</sup> [۴۴] به شبیه‌سازی رفتار حرارتی دو هوا گرم‌کن تک جداره و دوجداره با جریان جابجایی اجباری پرداختند. آن‌ها دریافتند که در اعداد رینولدز بسیار بالا ( $Re > 22000$ )، مقدار بازده انرژی برای هوا گرم‌کن با شیشه دوجداره منفی است. او همچنین نشان داد، از نظر عملکرد انرژی و

<sup>1</sup> Bahrehmand et al

اگرژی، نتایج به دست آمده برای انتخاب کارآمدترین سیستم و تعیین پارامترهای طراحی مانند عدد رینولدز، عمق کانال و طول کلکتور مفید خواهد بود.

ابوشکا و سویک<sup>۱</sup> [۴۵] در یک مطالعه تجربی به تحلیل اگرژی، انرژی و اقتصادی هوا گرم کن خورشیدی با صفحه تخت و با صفحه جاذب دنداندار پرداختند. آن‌ها از دو فلز مختلف مس و آلومینیوم به عنوان جاذب استفاده کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که هوا گرم کن با صفحه جاذب دنداندار و از جنس فلز مس بهترین عملکرد را دارد. میانگین بازگشت سرمایه برای این کلکتور بین ۴,۳ تا ۴,۶ سال است. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تولید انرژی با و بدون کلکتورهای شیاردار، بسته به مقدار انرژی خورشیدی که به آن می‌رسد، در شرایط اکولوژیکی استان مانیسا امکان‌پذیر است.

ردی و همکاران<sup>۲</sup> [۴۹] تحلیل انرژی و اگرژی یک هوا گرم کن خورشیدی با صفحه جاذب موجدار که مجهز به سیستم ترکیبی ویژه‌ای است، را مطالعه کردند. در کار آن‌ها، دقت پیش‌بینی سیستم پیشنهادی ۹۸,۱ درصد است و با نتایج تجربی این کلکتور قابل مقایسه است. بیشترین بازده حرارتی و بازده قانون دوم در کار تحقیقاتی آن‌ها به ترتیب ۳۷/۲۲ و ۱۱/۵۸ درصد بوده است. فادهولی و سوپیان<sup>۳</sup> [50] در مقاله مروری نکاتی را در مورد هوا گرم کن‌های خورشیدی صفحه تخت ارائه کرده‌اند. آن‌ها مطالبی را در مورد عملکرد هوا گرم کن‌ها به خصوص در مورد ارزیابی عملکرد انرژی و اگرژی آن‌ها گزارش کردند. طبق بررسی‌های آن‌ها محدوده بازده حرارتی کلکتورها در آزمایش‌های داخلی بین ۳۰ تا ۷۹ درصد و محدوده بازده اگرژی بین ۸ تا ۶۱ درصد بوده است. حاتمی و همکاران<sup>۴</sup> [52] نیز تحلیل انرژی و اگرژی یک خشک کن خورشیدی بر پایه یک مدل دینامیکی را انجام دادند. آن‌ها در مدل دینامیکی خود اثر پارامترهای مختلف از جمله تشعشع دریافتی توسط سطح کلکتور، تغییرات دما در طول کلکتور و سایر موارد را در نظر گرفتند، مدل آن‌ها با نتایج تجربی در سه حالت نرخ جریان جرمی هوا با دقت بالا

---

<sup>1</sup> Abuşka and Şevik

<sup>2</sup> Reddy

<sup>3</sup> Fudholi and Sopian

<sup>4</sup> Hatami

مطابقت خوبی داشت. اثر طول کلکتور و سرعت به عنوان پارامترهای مؤثر بر دمای خروجی به ترتیب رابطه خطی و نمایی را نشان داد. حداکثر راندمان انرژی برای این سیستم ۲۲ درصد بود.

لی و همکاران<sup>۱</sup> [۸] در چین، مدل انتقال حرارت در کلکتور لوله خلأ خورشیدی در سیستم آب گرم کن را بررسی کردند. در این مدل، انتقال حرارت در کلکتور ترکیبی از همرفت طبیعی در لوله شیشه‌ای کلکتور و جریان اجباری در بخش خروجی جریان سیال می‌باشد. معادله جریان نیز با تجزیه و تحلیل پارامترهای اصطکاک و شناوری در لوله ایجاد شده است. از طریق حل این معادلات رابطه بین دمای میانگین کلکتور، دمای خروجی و دبی همرفت طبیعی به دست آورده شد. با بررسی عملکرد دمایی کلکتور نتایج نشان داد، مدل ایجاد شده در شب نیز قابل استفاده است. هنگام استخراج رابطه بین دمای متوسط و دمای خروجی کلکتور، اتلاف حرارت به محیط نادیده گرفته شد. در نتایج اثبات شد که ضریب تلفات حرارتی نسبت به مقادیر محاسبه شده کمتر است. به این دلیل که ضریب تلفات حرارتی کلکتور لوله خلأ پایین است. بنابراین انحراف بین پیش بینی‌ها و اندازه‌گیری‌ها کمتر از ۵٪ بوده است، که این تقریب در کاربردهای مهندسی معقول می‌باشد.

براکامونته و همکاران<sup>۲</sup> [۹] بررسی عددی و تجربی اثر زاویه شیب بر لایه بندی حرارتی و بازدهی حرارتی بر روی دو سیستم آب گرم کن خورشیدی لوله خلأ را انجام دادند. آن‌ها با تجزیه و تحلیل تأثیر شیب بر رفتار حرارتی دستگاه در زوایای شیب کم، که برای مناطق نیمه گرمسیری مورد توجه است، به بررسی این موضوع پرداختند. آزمایش‌ها در طول چهار هفته با تغییر زاویه شیب کلکتور انجام شد. مشخص شد که زاویه شیب تأثیر قابل توجهی بر افزایش انرژی روزانه خورشیدی، الگوهای جریان در داخل مخزن ذخیره و لایه بندی حرارتی دارد. همچنین مشاهده شد به دلیل مقدار کم تلفات حرارتی در لوله‌های خلأ، تأثیر کمی بر راندمان حرارتی داشت.

---

<sup>1</sup> Li et al

<sup>2</sup> Bracamonte et al

کوچر و همکاران<sup>۱</sup> [۱۰] کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت و لوله خلأ را با روش نمودار-F<sup>۲</sup> مقایسه کردند. نمودار-F روشی است که یک راه آسان برای تخمین عملکرد حرارتی سیستم‌های گرمایش خورشیدی و آب گرم ارائه می‌دهد. در این مطالعه، سیستم‌های خورشیدی با استفاده از نمودار-F مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند تا نیازهای آب گرم هتل‌ها را برآورده کنند. آن‌ها نشان دادند در تمام دماهایی که آب گرم مورد نیاز است، کلکتورهای لوله خلأ، نیاز بسیار بیشتری را نسبت به کلکتورهای صفحه تخت تحت پوشش قرار می‌دهند. بنابراین بازدهی آب گرم‌کن لوله خلأ، بیشتر از آب گرم‌کن صفحه تخت بوده است و به تعداد کمتری کلکتور لوله خلأ در مقایسه با صفحه تخت نیاز است.

## ۱-۲-۳ بهینه‌سازی سیستم‌های هوا گرم‌کن خورشیدی

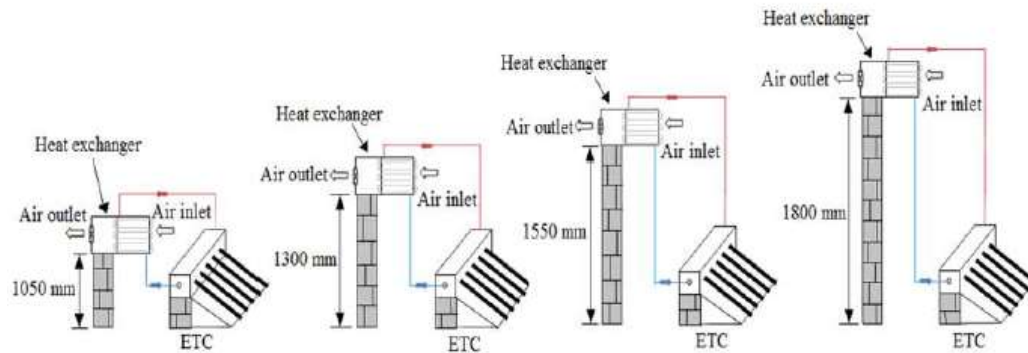
کومار و یاداو<sup>۳</sup> [۱۱] به‌طور تجربی عملکرد حرارتی سیستم گرمایش هوا با استفاده از انواع مختلف مبدل‌های حرارتی که با یک کلکتور خورشیدی لوله خلأ ترکیب شده است را بررسی کردند. در این سیستم یک آب گرم‌کن خورشیدی لوله خلأ با لوله‌های اتصال به مبدل حرارتی متصل می‌شود. از لوله‌های خلأ برای تولید آب گرم استفاده می‌شود. در این سیستم جریان آب گرم به دلیل پدیده ترموسیفون اتفاق می‌افتد. هوای گرم با عبور هوای محیط از مبدل حرارتی تولید می‌شود. این ساختار آزمایشی در کوراکشرتا، هند در موقعیت جغرافیایی؛ ۲۹,۵۸° (عرض جغرافیایی) و ۵۳.۷۶° (طول جغرافیایی) نصب شده است. همان‌طور که در شکل ۱-۲ می‌بینیم؛ آن‌ها تأثیر تغییرات ارتفاع بر سرعت جریان گردش طبیعی آب گرم را برای انواع مختلفی از مبدل‌های حرارتی ارزیابی کردند. حداکثر اختلاف دمای اندازه‌گیری شده بین هوای گرم و هوای محیط به‌دست‌آمده ۱۰,۷۸ درجه سانتی‌گراد بود. هدف از این کار تجربی، بهینه‌سازی ارتفاع مبدل حرارتی از سطح زمین و یافتن مناسب‌ترین مبدل حرارتی بین

<sup>1</sup> Kocer et al

<sup>2</sup> F-Chatr

<sup>3</sup> Kumar and Yadav

سه نوع مختلف مبدل‌های حرارتی است. این مقاله همچنین تأثیر تغییرات ارتفاع در نرخ جریان طبیعی جریان آب گرم را نشان می‌دهد.



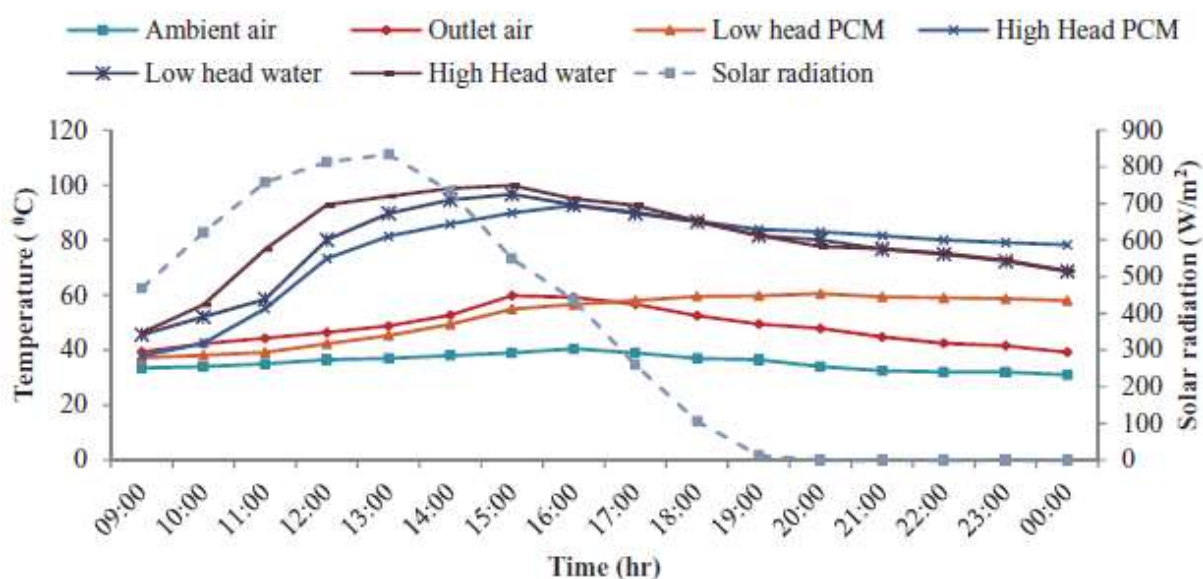
شکل ۱-۲ استفاده از مبدل حرارتی در ارتفاع مختلف برای گرمایش هوا [۱۱]

یاداو و باجپایی<sup>۱</sup> [۱۲] یک سیستم گرمایش هوای خورشیدی را بر پایه آب گرم‌کن خورشیدی لوله خلأ ساختند. این سیستم برای نرخ‌های مختلف جریان هوا، همراه یا بدون استفاده از رفلکتور و همچنین همراه یا بدون استفاده از سیم‌پیچ مسی بررسی شد. گزارش شد که اختلاف دمای بالاتر در نرخ پایین جریان هوا و کارایی بالاتر در نرخ‌های بالاتر جریان به دست آمد. بهره‌وری این سیستم با استفاده از یک رفلکتور و یک سیم‌پیچ مسی افزایش یافت.

مهلا و یاداو<sup>۲</sup> [۱۳] به‌طور تجربی یک سیستم گرمایش هوای خورشیدی مبتنی بر آب گرم‌کن لوله خلأ ساده با مواد تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار دادند. این سیستم برای نرخ‌های جریان هوای مختلف با و بدون استفاده از انواع مختلف فین و سیم‌پیچ مسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. گزارش شده است که این سیستم قادر به تولید هوای گرم در زمان تابش نور خورشید و بدون تابش نور خورشید با اختلاف دمای بالاتر است (مطابق شکل ۱-۳ برای حالت بدون فین).

<sup>1</sup> Yadav and Bajpai

<sup>2</sup> Mehla and Yadav



شکل ۱-۳ تغییرات دما در زمان با استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در سرعت جریان ۰,۰۱۸ کیلوگرم بر ثانیه [۱۳]

آرکار و همکاران<sup>۱</sup> [۱۴] در این مقاله، طراحی و پژوهش عملکرد سیستم گرمایش هوای خورشیدی، که متشکل از لوله خلأ هوا و ذخیره حرارتی گرمای نهان (LHTES)<sup>۲</sup> با لوله هم‌مرکز است، ارائه شده است. مدل بازده کلکتور و مدل پاسخ حرارتی، ذخیره حرارتی گرمای نهان و نیز اعتبار سنجی تجربی این مدل‌ها ارائه شده است. این مقاله روشی برای ارزیابی تأثیر سیستم گرمایش هوای خورشیدی با ذخیره حرارتی گرمای نهان ارائه می‌دهد. گرمای تولیدشده توسط سیستم گرمایش هوای خورشیدی در روز را می‌توان در طول شب برای گرمایش ساختمان تحویل داد. بنابراین، عملکرد سیستم از نظر تأمین گرمایش در طول دوره شبانه بهینه‌سازی شده است. چنین طراحی سیستمی و تحلیل عملکرد سیستم را نمی‌توان در پژوهش‌های انجام‌شده یافت.

کومار و همکاران<sup>۳</sup> [۷] به مدل‌سازی یک کلکتور لوله خلأ با لوله حرارتی باهدف افزایش حرارت تولیدی کلکتور پرداختند. آن‌ها گزارش دادند که عملکرد کلکتور به شدت به شرایط بیرونی مانند دما و

<sup>۱</sup> Arkar et al

<sup>۲</sup> latent heat thermal energy storage

<sup>۳</sup> Kumar et al

تابش خورشیدی حساس است. مسیر بخش اواپراتور تا کندانسور پارامتر بسیار مهمی برای طراحی لوله حرارتی است. اثر تعداد لوله‌های حرارتی بر عملکرد کلکتور خورشیدی نشان داد که، در ابتدا با افزایش تعداد لوله‌های حرارتی و ثانیاً کارکرد و طراحی مناسب چگالنده، کارایی کلکتور لوله حرارتی افزایش خواهد یافت.

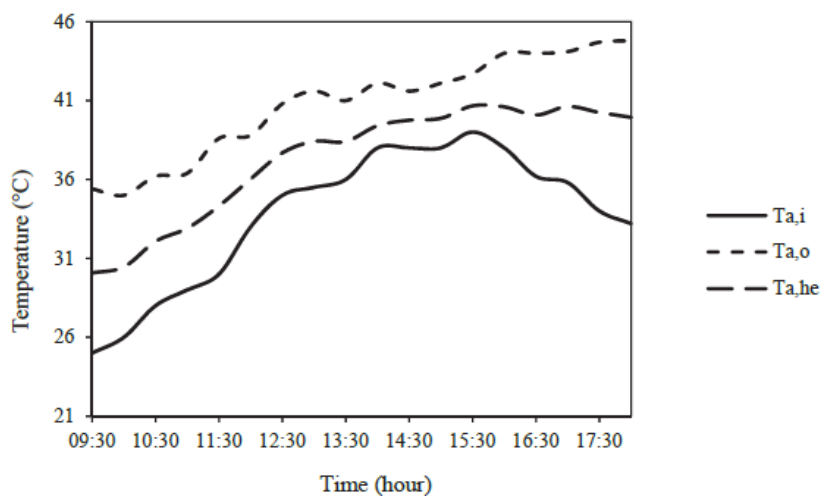
لیانگ و سایرین<sup>۱</sup> [۱۷] از لحاظ نظری و تجربی تأثیر پر کردن یک لوله خلأ همراه با لوله حرارتی - U شکل را با گرافیت فشرده مطالعه کردند و مشخص شد که کارایی لوله خلأ نوع پر شده از گرافیت با لوله U-شکل نسبت به لوله خلأ از نوع U-شکل با فین مسی دوازده درصد بیشتر است. اما مواد پرکننده، یعنی گرافیت فشرده شده، سنگین‌تر و گران‌تر از فین مسی یا آلومینیومی است که می‌تواند زمان و امکان استفاده از چنین موادی را برای بهبود نرخ انتقال گرما تحت تأثیر قرار دهد.

دقیق و شافعیان<sup>۲</sup> [۱۹] بر روی لوله حرارتی خشک‌کن با کلکتور خلأ به همراه سیستم بازیابی حرارت برای کاربردهای خشک‌کردن کار کردند. در آن از آب به عنوان سیال کاری و از هوا به عنوان سیال واسط در بخش مبدل حرارتی خشک‌کن استفاده شد. مطابق شکل ۱-۴ سیستم بازیابی حرارت برای افزایش راندمان کلی سیستم و حداکثر بهره‌وری از انرژی خورشیدی دریافتی، برای خشک‌کن استفاده شد. در پایان روز، بازده اگزرژتیک سیستم به حداکثر نرخ خود یعنی تقریباً ۱۱,۷ درصد می‌رسد.

---

<sup>1</sup> Liang

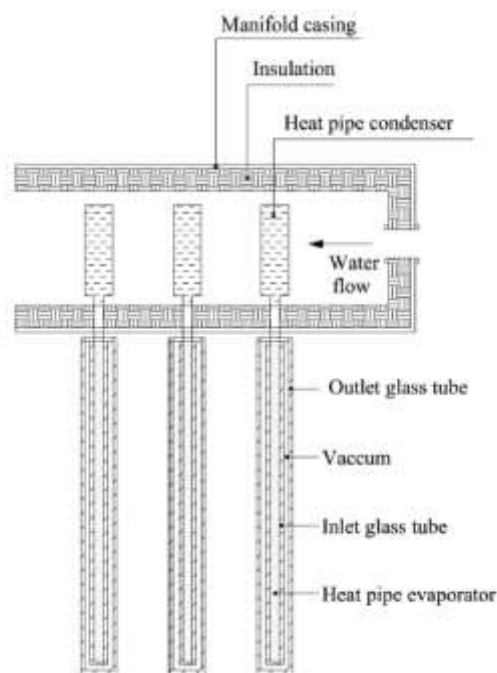
<sup>2</sup> Daghigh and Shafieian



شکل ۱-۴ دمای ورودی و خروجی آب گرم کلکتور؛ قبل و بعد از استفاده از سیستم بازیافت حرارت [۱۹]

در سال‌های اخیر، در فن‌آوری کلکتورهای لوله خلأ، اساساً دو پیشرفت رخ داده است که عملکرد سیستم را به شکلی عمیق افزایش داده است. یکی از آن‌ها استفاده از یک لوله گرمایی مبتنی بر لوله خلأ است و دیگری یک ماده تغییر فاز بر اساس مواد تغییر فاز دهنده برای کاربردهای بالقوه است. جعفر کاظمی و عبدی<sup>۱</sup> [۲۰] لوله حرارتی کلکتورهای لوله خلأ را به صورت تجربی و تئوری مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها راندمان کلکتور و بهره‌وری گرمای مفید بین روش‌های تئوری و تجربی را مقایسه کردند. تأثیر نرخ جریان سیال کاری و سطح کلکتور نیز مورد بررسی و بحث قرار گرفت. مقایسه نشان می‌دهد که مدل تئوری انطباق خوبی با نتایج تجربی دارد و می‌تواند بازده، گرمای مفید و دمای سیال کاری خروجی یک کلکتور لوله حرارتی لوله خلأ را با دقت خوبی پیش‌بینی کند.

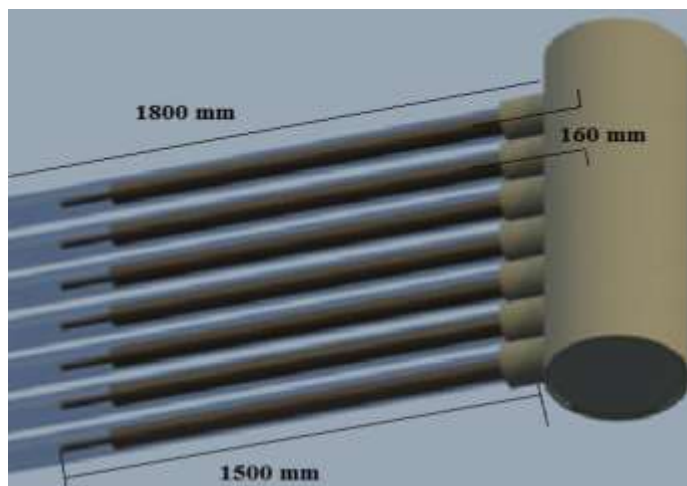
<sup>1</sup> Jafarkazemi and Abdi



شماتیکی از کلکتور لوله حرارتی خلأ مورد استفاده توسط جعفر کاظمی و عبدی [۲۰]

کابیل و همکاران<sup>۱</sup> [۲۱] یک مطالعه تجربی جدید در رابطه با استفاده از لوله حرارتی هم‌محور خلأ شده برای بهبود عملکرد حرارتی جهت کاربردهای گرمایش هوا انجام دادند. تأثیر زاویه شیب کلکتور بر عملکرد حرارتی سیستم، برای به دست آوردن زاویه شیب بهینه در طول دوره آزمایش را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد، که حداکثر افزایش راندمان حرارتی به ۶۷ درصد نسبت به حالت بدون وجود لوله‌های حرارتی در نرخ جریان جرمی ۰/۰۰۹ کیلوگرم بر ثانیه در زاویه شیب بهینه ۲۰ درجه در طول دوره آزمایش رسید.

<sup>1</sup> Kabeel et al



شکل ۵-۱ مدل سه بعدی لوله های حرارتی هم محور داخل لوله های شیشه ای خلأ توسط کابیل و همکاران [۲۱]

رودریگز - یوبیناس و همکاران<sup>۱</sup> [۲۲]، با استفاده از مواد تغییر فاز دهنده و روش ذخیره حرارتی گرمای نهان (LHTES) در تلاش برای بهبود عملکرد انرژی ساختمان ها هستند. از موارد ارائه شده، می توان تشخیص داد که در این ساختمان ها مواد تغییر فاز دهنده مختلفی برای گرمایش و سرمایش یک ساختمان مورد استفاده قرار گرفته اند. آن ها نشان دادند که علاوه بر سیستم های خشک کن و گرمایش فضا، کاربردهای زیادی برای گرم کردن ساختمان ها وجود دارد. آن ها همچنین دریافتند که تحقیقات و برنامه های کاربردی با LHTES در دوره اخیر شایع شده اند. سامان و همکاران<sup>۲</sup> [۲۳] عملکرد سیستم گرمایش ساختمان با کلکتورهای خورشیدی یکپارچه در پشت بام و سیستم ذخیره حرارتی گرمای نهان با صفحات تغییر فاز دهنده را ارائه و تحلیل کردند. آن ها مواد تغییر فاز دهنده را با نقطه ذوب ۲۸ درجه سانتی گراد آنالیز کردند. همچنین تأثیر دمای هوای ورودی ثابت و نرخ های جریان هوا در دمای هوای خروجی و زمان ذخیره بار در مخزن ذخیره ساز و دوره های تخلیه سیال سیستم را بررسی کردند.

چاروات و همکاران<sup>۳</sup> [۲۴] عملکرد روزانه سیستم ذخیره حرارتی گرمای نهان ساخته شده از صفحات پر شده توسط مواد تغییر فاز دهنده را مورد بررسی قرار دادند. در سیستم های حرارتی خورشیدی مبتنی بر

<sup>۱</sup>Rodriguez-Ubinas et al

<sup>۲</sup> Saman et al

<sup>۳</sup> Charvat et al

هوا، در اکثر مطالعات چرخه کامل تغییر فاز در ذخیره حرارتی گرمای نهان را در نظر می‌گیرند، همچنین در سیستم‌های خورشیدی که تأمین گرما به تابش خورشید روزانه بستگی دارد، متداول نیست. در نتیجه، آن‌ها همچنین تأکید کردند که معیارهای بهینه‌سازی مناسب برای ذخیره حرارتی گرمای نهان روزانه باید انتخاب شوند.

دی و همکاران<sup>۱</sup> [۲۵] یک مطالعه برای عملکرد حرارتی تهویه مطبوع دوجداره با مواد تغییر فاز دهنده در کانال هوایی ارائه دادند. ماده‌ی SP-22 به‌عنوان ماده تغییر فاز دهنده استفاده شد. مطالعات تطبیقی در طول زمستان، رفتار حرارتی بهبودیافته ساختمان را نشان داد و میزان مصرف انرژی را تا ۲۶٪ در طول روز کاهش داد. نویسندگان همچنین اظهار داشتند که در صورت اجرای عملیات به‌صورت کنترل‌شده، این سیستم صرفه‌جویی بیشتری خواهد داشت.

سانداری و همکاران<sup>۲</sup> [۲۶] ساخت یک خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله خلأ می‌تواند با و بدون مواد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی مانند سنگ‌ریزه باشد. عملکرد، کیفیت و سرعت بالای خشک‌کن نشان می‌دهد که خشک‌کن خورشیدی مجهز به کلکتور لوله خلأ با استفاده از مواد ذخیره‌ساز انرژی حرارتی نسبت به روش‌های دیگر خشک‌کردن برتری قابل‌ملاحظه‌ای دارد.

سینگ و همکاران<sup>۳</sup> [۳۱] تحقیقاتی را انجام دادند که متمرکز بر به دست آوردن حرارت در زمان‌های مختلف بوده است. مقادیر دما را از ساعت ۹ صبح الی ۶ بعدازظهر به دست آوردند و مطالعه بر روی هوا گرم‌کن خورشیدی با بستری از سنگ نیز صورت گرفت. در این تحقیقات نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که عملکرد این نوع هوا گرم‌کن با توجه به وجود بخش ذخیره حرارتی در آن بسیار بهبودیافته است و دمای بستر سنگی رابطه مستقیم با حرارت سیال خارج‌شده از سیستم خواهد داشت.

---

<sup>1</sup> De et al

<sup>2</sup> Sundari et al

<sup>3</sup> Singh

نافون<sup>۱</sup> [۳۸] اقداماتی را بر روی عملکرد و تولید آنتروپی یک هوا گرم‌کن خورشیدی دومسیره با پره‌های طولی به صورت عددی انجام داد. او یک مدل ریاضی ارائه داد که با استفاده از معادلات بقاء انرژی به دست آمده بود. او اثر شرایط ورودی سیال عامل و ابعاد هوا گرم‌کن بر روی انتقال حرارت، عملکرد و تولید آنتروپی را بررسی نمود. او نتیجه گرفت که بازده حرارتی با افزایش ارتفاع و تعداد پره‌ها افزایش می‌یابد.

انصاری و بازرگانه<sup>۲</sup> [۴۶] در یک مطالعه به بررسی افت فشار و بهینه‌سازی انتقال حرارت در هوا گرم‌کن خورشیدی دندانه‌دار پرداختند. از نظر آن‌ها وجود دندانه در سطوح هوا گرم‌کن انتقال حرارت را افزایش داده ولی سبب افت فشار نیز می‌شود. آن‌ها برای بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. ابوشکا<sup>۳</sup> [۴۷] در یک تحقیق تجربی عملکرد حرارتی یک صفحه جاذب با طراحی جدید و دارای دندانه‌هایی به شکل مخروط را بررسی نموده و آن را با کلکتور صفحه تخت در یک هوا گرم‌کن تک مسیره مقایسه کرد. طبق آزمایش‌های او بیشترین بازده حرارتی برای هوا گرم‌کن خورشیدی با صفحه جاذب دارای دندانه‌های مخروطی به دست آمد. یورال<sup>۴</sup> [۴۸] به طور تجربی ارزیابی انرژی و انرژی عملکرد یک هوا گرم‌کن صفحه تخت که در جاذب آن از پارچه استفاده شده بود را بررسی کرد. او هوا گرم‌کن فوق را با یک کلکتور صفحه تخت نیز مقایسه کرد. او نتیجه گرفت که استفاده از پارچه باعث بهبود عملکرد انرژی و انرژی در هوا گرم‌کن می‌شود. همچنین او دریافت که پارچه افت فشار در کلکتور را افزایش می‌دهد.

رام دیپ و اسریکومار<sup>۵</sup> [۵۱] در یک مطالعه تجربی، تحلیل انرژی و انرژی یک هوا گرم‌کن خورشیدی تک مسیره جریان موازی که در آن از پره‌های گرد در مسیر جریان هوا استفاده شده بود را بررسی کردند. آن‌ها از پره‌های گرد برای افزایش انتقال حرارت جابجایی درون هوا گرم‌کن استفاده نمودند. همچنین

---

<sup>1</sup> Naphon et al

<sup>2</sup> Ansari and Bazargan

<sup>3</sup> Abuska

<sup>4</sup> Ural et al

<sup>5</sup> Raam Dheep and Sreekumar

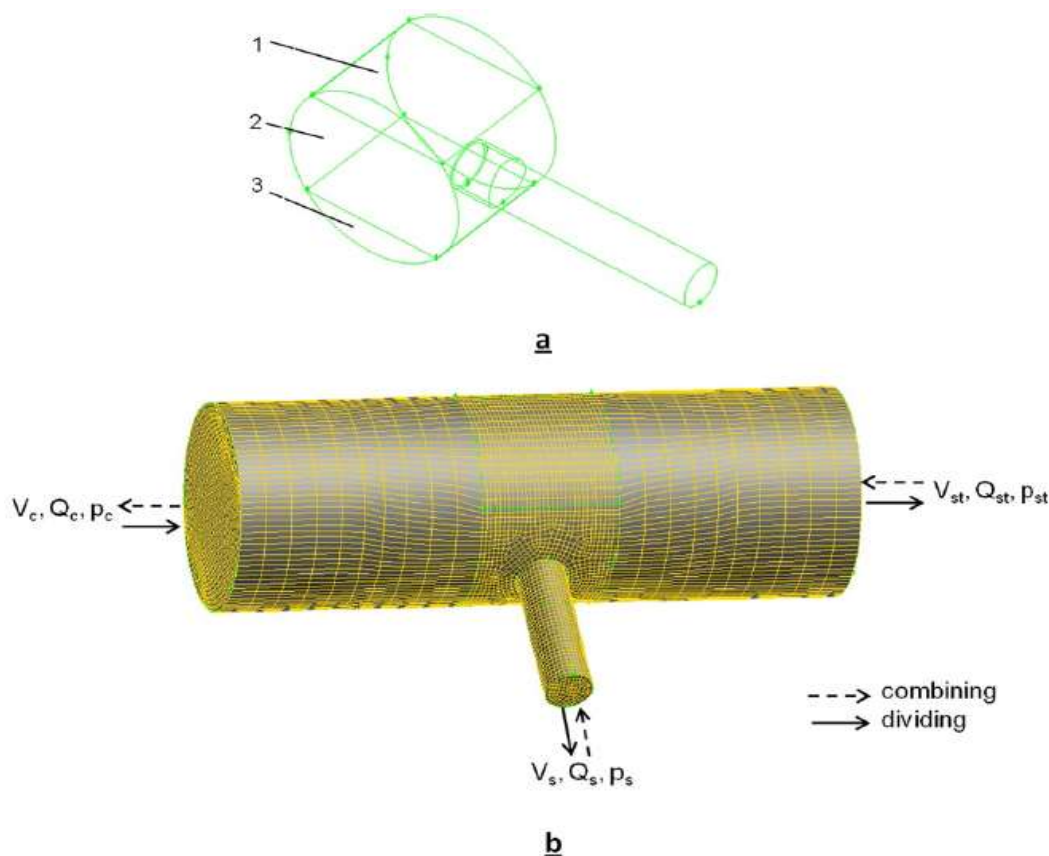
آن‌ها برای پنج مقدار دبی جرمی مختلف، آزمایش‌های خود را انجام دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که برای نرخ جریان کمتر، دمای هوای خروجی از هوا گرم‌کن بهینه‌تر خواهد بود.

## ۱-۲-۴ شبیه‌سازی سیستم‌های هوا گرم‌کن خورشیدی

وحید و همکاران<sup>۱</sup> [۱۶] به تجزیه و تحلیل مبتنی بر حل عددی توزیع جریان در یک کلکتور خورشیدی لوله خلاً هم‌محور با شرایط جریان آرام پرداختند. آن‌ها از تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی برای یافتن کاهش فشار ناشی از تقسیم و ترکیب جریان سیال از طریق یک اتصال سه‌راهی یک منیفولد کلکتور خورشیدی کمک گرفتند. شبیه‌سازی‌ها در فلوئنت برای محدوده‌ای از نسبت‌های جریان و اعداد رینولدز انجام شدند و معادلات برای ضرایب کاهش فشار در اتصالات ایجاد شدند. سپس یک مدل تئوری بر اساس تقریب‌های متوالی برای تخمین توزیع جریان هم‌دمای و غیر هم‌دمای در محدوده آرام از طریق کلکتوری متشکل از لوله‌های خلاً که به‌طور موازی در آرایش جریان معکوس (پیکربندی-U) و موازی (پیکربندی-Z) متصل هستند، بکار گرفته می‌شود. نتایج به‌دست‌آمده با نتایج تجربی موجود برای پیکربندی U مطابقت معقولی داشته است. ضرایب تلفات اتصال حاصل وابستگی شدیدی به سرعت جریان در اعداد رینولدز پایین نشان داده‌اند. جریان موازی (پیکربندی-Z) منجر به جریان بیشتر اما نه کاملاً یکنواخت نسبت به جریان معکوس (پیکربندی-U) شد. همچنین گفتند، استراتژی پیشنهادی مبتنی بر دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند به‌عنوان جایگزینی برای راه‌اندازی و انجام آزمایش‌های پرهزینه برای تخمین تلفات اتصال استفاده شود.

---

<sup>1</sup> Abdul Waheed Badar et al



شکل ۱-۶ شماتیک شبکه بندی مدل مورد مطالعه، توسط وحید و همکاران [۱۶]

ما و همکاران<sup>۱</sup> [۵۳] در یک کار تحقیقاتی با شبیه‌سازی، تحلیل انرژی و آگرژی یک سیستم خشک‌کن را بررسی کردند. در آن سیستم واحد ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بر پایه هوا ترکیب‌شده و از مواد دارای قابلیت تغییر فاز و یک هوا گرم‌کن خورشیدی فتوولتائیک در ساختار آن‌ها استفاده‌شده بود. آن‌ها عملکرد این سیستم را با استفاده از نرم‌افزار ترنسیس<sup>۲</sup> تخمین زدند. همچنین اثر چندین پارامتر مختلف مانند نحوه توزیع حرارت و آگرژی را بررسی نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند که در بخش هوا گرم‌کن خورشیدی فتوولتائیک، سیستم تلفات آگرژی بیشتری دارد.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده توسط پژوهشگران مشاهده می‌شود که؛ در ارزیابی کلکتورهای لوله خلأ خورشیدی، با تمرکز بر بهبود عملکرد حرارتی سیستم می‌توان راندمان کلکتور را افزایش داد. لذا باید

<sup>۱</sup> Ma et al

<sup>۲</sup> TRNSYS

تأثیر پارامترهای حرارتی در هنگام کارکرد سیستم تحلیل شود و مقدار مناسب این پارامترها جهت عملکرد مطلوب انتخاب گردد.

## ۱-۳ بیان مسئله

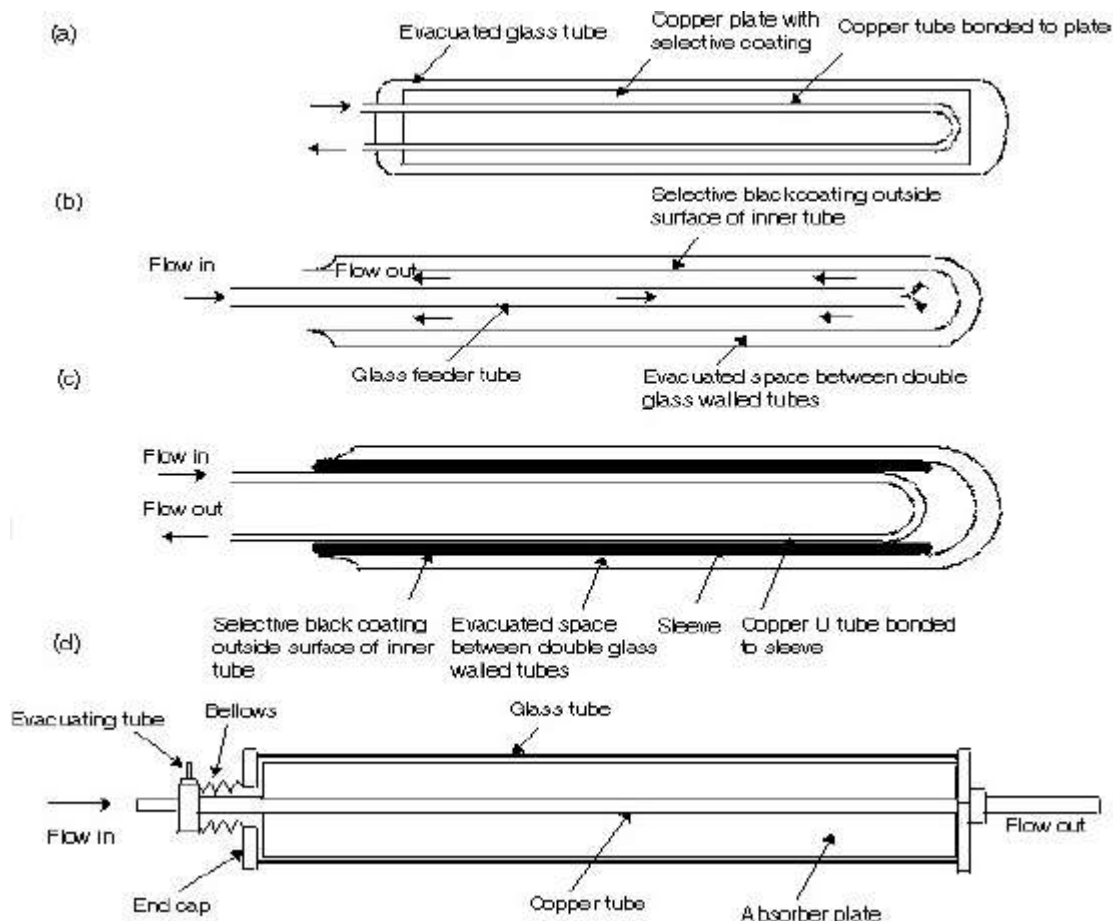
انرژی خورشیدی به عنوان یک منبع انرژی گرمایی در سیستم‌های خورشیدی استفاده می‌شود چراکه این انرژی پاک، ارزان، در دسترس، فراوان و تجدید پذیر است. با بحران انرژی جهانی، سیستم‌های خورشیدی به شکل گسترده برای کاربردهای گوناگون مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرند.

انرژی حرارتی خورشیدی قابلیت تأمین انرژی برای مصارف خانگی و صنعتی نظیر آب داغ، گرمایش هوا، سرمایش خورشیدی، خشک کردن خورشیدی و سایر کاربردها را شامل می‌شود. در میان کاربردهای متعدد؛ انرژی خورشیدی جهت گرمایش آب، گرمایش فضا و سرمایش بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مصرف انرژی برای تولید آب داغ، سهم بزرگی از کل مصرف انرژی ساختمان را شامل می‌شود. امروزه استفاده از هوای گرم حاصل از کلکتورهای خورشیدی برای خشک کردن مواد غذایی به دلیل کاهش سریع منابع انرژی، هزینه‌ها و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت فسیلی در حال افزایش است و در خشک‌کن‌های خورشیدی ترکیبی از سیستم‌های گرمایش کمکی نیز برای کمک به فرآیند رطوبت‌زدایی استفاده می‌شود. کلکتور خورشیدی برای جذب تابش خورشید طراحی شده است و آن را به حرارت تبدیل می‌کند. این کلکتورها عمدتاً به سه دسته مختلف شامل کلکتور صفحه تخت، کلکتور با لوله خلاء و کلکتورهای متمرکز کننده تقسیم‌بندی می‌شوند. در میان تمام کلکتورها حرارتی به‌طور خاص برای کاربردهای دمای پایین یا متوسط، کلکتور لوله خلاء بالاترین راندمان حرارتی را دارد و ویژگی‌هایی نظیر عایق حرارتی خوب و عدم حساسیت نسبت به جهت تابش نور خورشید را دارد. به‌طور کلی، سه نوع رایج از کلکتورهای لوله خلاء خورشیدی شامل موارد زیر هستند:

(۱) کلکتور خورشیدی لوله خلأ با جریان آب در لوله<sup>۱</sup> (نوع ساده)

(۲) کلکتور خورشیدی لوله خلأ با لوله‌ای از نوع U-شکل<sup>۲</sup>

(۳) کلکتور لوله خلأ از نوع لوله حرارتی<sup>۳</sup>



شکل ۱-۷ انواع کلکتورهای لوله خلأ [۹۰]

کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ<sup>۴</sup> (ETCs) شامل چندین لوله خلأ شده هستند که به صورت موازی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. لوله خلأ شامل دو لوله هم‌مرکز، یعنی لوله داخلی و لوله خارجی است؛ داخل هر لوله شرایط خلأ بین دو سطح لوله‌های شیشه‌ای شفاف ایجاد می‌شود و سپس لوله‌ها در انتهای

<sup>۱</sup> Water-in glass

<sup>۲</sup> U-Type Pipe

<sup>۳</sup> Evacuated heat pipe tubs (EHPT)

<sup>۴</sup> Evacuated Tube Collectors

یکدیگر باهم آب‌بندی می‌شوند. پوشش جذب‌کننده روی سطح بیرونی لوله حرارتی داخلی اعمال شده است و لوله‌های حرارتی برای انتقال گرما از فرآیند تغییر فاز سیال درون لوله استفاده می‌کنند. کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ در مقایسه با کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت، اتلاف انرژی پایینی دارند زیرا اعمال شرایط خلأ بهترین روش برای ایجاد عایق حرارتی است و به دلیل خلأ در سیستم گرمایش هوای خورشیدی، حرارت با دمای عملیاتی بالا تولید می‌شود در نتیجه عملکرد بهتری نسبت به کلکتورهای صفحه تخت دارند. برای کلکتورهای که خلأ شده است، توسعه سیستم رسانش گرمایی بین لوله داخلی و فلز مورد استفاده برای مبدل حرارتی، فناوری کلیدی به منظور دستیابی به بهبود عملکرد کلکتور می‌باشد. یکی دیگر از پیشرفت‌های مهم، ادغام مواد تغییر فاز دهنده با کلکتور لوله خلأ است که تأثیر زیادی بر عملکرد آن دارد. همچنین استفاده از نانو سیال در سیال کاری نیز می‌تواند راندمان جذب حرارت را برای کلکتورهای خلأ بهبود دهد.

در چند سال گذشته، هوا گرم‌کن خورشیدی صفحه تخت به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن جدای از مبدل‌های حرارتی معمولی مورد توجه قرار گرفته است. در این نوع گرم‌کن‌های هوا، انرژی تابشی خورشید به انرژی درونی تبدیل می‌شود. سپس از انرژی درونی برای گرم کردن هوای عبور از طریق یک سیستم مجرای که بین کف و صفحه جاذب قرار گرفته است، استفاده می‌شود. هوای گرم به دست آمده برای گرم کردن فضا، خشک‌کن‌ها و سایر مصارف استفاده می‌شود. نوع دیگر فناوری گرمایش هوای خورشیدی، به‌کارگیری از آب گرم‌کن خورشیدی لوله خلأ برای تولید هوای گرم است که در آن آب به‌عنوان یک واسط جهت انتقال حرارت عمل می‌کند و از یک مبدل حرارتی برای انتقال گرما از آب به هوا استفاده می‌شود. نوع دیگر کلکتور لوله خلأ، با عبور هوا از درون لوله‌های خلأ بدون واسطه می‌تواند عمل گرمایش هوا را برای مصارف گوناگون انجام دهد که از نظر ساختار هندسی مشابه آب گرم‌کن لوله خلأ خورشیدی است.

با توجه به اینکه با روش‌های گوناگون می‌توان انرژی گرمایی حاصل از خورشید را ذخیره‌سازی کرد.

بعضی از این تجهیزات یا مواد به صورت تغییر فاز این کار را انجام می دهند و مواد دیگری نیز با دریافت حرارت می توانند انرژی در خود ذخیره کنند و در زمان دلخواه قابلیت بازگرداندن انرژی جذب شده و تأمین حرارت دارند. همچنین با ایجاد شرایط آشفته در جریان سیال نیز می توان راندمان سیستم گرمایش را افزایش داد.

این تحقیق باهدف بهبود عملکرد سیستم گرمایش هوای خورشیدی با تکیه بر شیوه های بهبوددهنده کارایی سیستم، نظیر تجهیزات یا روش های افزایش دهنده ضریب انتقال حرارت می خواهد کلکتورهای لوله خلأ خورشیدی را مورد ارزیابی قرار دهد. همچنین امکان ارزیابی سیستم گرمایش هوای لوله خلأ خورشیدی مدل سازی شده در حالت خشک کن نیز وجود دارد. بنابراین در اینجا با استفاده از روش جدیدی، از حرارت جذب شده توسط تابش خورشیدی به طور مستقیم، جهت تولید هوای گرم بهره می گیریم.

## ۱-۴ اهمیت و ضرورت تحقیق

طبق مطالعات و تحقیقات، مصرف انرژی در جهان هر بیست سال دو برابر می شود [۵۴]. جهان برای تأمین منابع جایگزین انرژی در رقابت شدید است زیرا منابع سوخت متعارف به طور مداوم در حال از بین رفتن هستند. با این حال، در دهه های اخیر، تمایل به استفاده از انرژی های تجدید پذیر و نو، به خصوص انرژی خورشیدی، افزایش یافته است. مهم ترین منبع انرژی، خورشید است که آن را می توان به شکل های مختلفی ذخیره کرد. به عنوان نمونه، تابش خورشیدی را می توان با استفاده از کلکتورهای حرارتی خورشیدی که انرژی گرمایی تولید می کند و متعاقباً به سیال کاری منتقل می شود، به دست آورد. به طور کلی، در بین کلکتورهای ساکن، کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ (ETSCs) عملکرد بهتر نسبت به کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت<sup>۱</sup> (FPCs) دارند، زیرا اتلاف گرما در ETSCs بسیار کمتر بوده و

---

<sup>۱</sup> Flate-Plate Collectors

در نتیجه عملکرد حرارتی بسیار بالاتر است. ETSCs همچنین نصب سریع و قابلیت حمل آسان را ممکن می‌سازند. علاوه بر این، خلأ داخلی بین لوله‌های شیشه‌ای باعث کاهش اتلاف حرارت از نوع همرفت و رسانش می‌شود و این امر باعث می‌شود که ETSCs در دماهای بالا فعالیت کند. کلکتورهای لوله‌های خلأ قادر به تولید حرارت بالای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد با هزینه نسبت پایین هستند [۵۵]. آژانس بین‌المللی انرژی گزارش داد که در سال ۲۰۱۰ بیش از ۵۰ درصد از کل مجموعه کلکتورهای خورشیدی که به‌طور گسترده نصب شده‌اند از نوع ETC هستند [۵۶].

حدود ۷۴ درصد از سیستم‌های حرارتی خورشیدی نصب شده در اروپا تا پایان سال ۲۰۱۶ برای مصرف آب داغ خانگی بوده است. با تکیه بر این نوع سیستم، مشاهده شد که سهم سیستم‌های گردش اجباری در اروپا ۶۱ درصد بوده است. این سیستم‌ها در اروپای مرکزی و شمالی رایج‌تر هستند. با اشاره به منطقه کلکتور نصب شده در اروپا، مجموعه کلکتورهای لوله خلأ 13.7% درصد از کل ظرفیت عملیاتی تا پایان سال ۲۰۱۶ را نشان می‌دهد [۵۷]. همچنین شایان ذکر است که بیش از ۳۰۰۰ برابر تقاضای کنونی انرژی جهانی را می‌توان از منابع انرژی تجدید پذیر تأمین نمود [۵۸]. بنابراین، باید آگاهانه سهم انرژی‌های تجدید پذیر را در ترکیب انرژی جهانی افزایش دهیم. در حال حاضر، اغلب مناطق روستایی به‌ویژه در مناطق جنوبی جهان فاقد دسترسی به انرژی نو هستند که اتخاذ و بهره‌برداری از خشک‌کن‌های پیشرفته به آن وابسته هستند.

استفاده از انرژی خورشیدی برای کاربردهای خشک کردن در حال تبدیل شدن به یک جایگزین مهم و پایدار است چراکه مصرف انرژی را ۲۷-۸۰ درصد برای سیستم کلکتور خورشیدی در بازه متوسط تا ۴۰ درصد کاهش می‌دهد [۵۹]. علی‌رغم برخی موانع، پیش‌بینی شده است که فناوری انرژی تجدید پذیر می‌تواند یک استراتژی مناسب برای خشک کردن غذا باشد که مزایای مفیدی مانند هزینه پایین، کارایی بالا، افزایش فرصت‌های شغلی و موارد دیگر را به ارمغان می‌آورد.

## ۱-۵ روش تحقیق

در تمام سیستم‌های گرمایش خورشیدی، از روش‌های مختلف برای افزایش کارایی و بهینه‌سازی انرژی استفاده شده است که از جمله روش‌های مناسب برای تحلیل استفاده از حل عددی می‌باشد. همچنین مفید بودن دینامیک سیالات محاسباتی برای ارزیابی عملکرد در این سیستم‌ها امری اثبات شده است. علاوه بر این، در مدل‌های عددی نسبت به مدل‌های فیزیکی توان تحلیل روی هندسه مدل و دقت انجام کار بسیار مطلوب خواهد بود. ما در این پروژه قصد داریم هندسه‌ای از یک مدل کلکتور لوله خلأ خورشیدی را مدل‌سازی کنیم سپس بر اساس این مدل از روش دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۱</sup> (CFD)، با کمک نرم‌افزار تحلیلی فلوئنت<sup>۲</sup> به شبیه‌سازی سامانه هوا گرم‌کن خورشیدی لوله خلأ بپردازیم، سپس نتایج شبیه‌سازی را جهت تحلیل و بررسی با اطلاعات مدل آزمایشگاهی اعتبار سنجی کنیم.

## ۱-۶ نتیجه‌گیری

امروزه بهره‌گیری از انرژی خورشیدی برای حفظ محیط‌زیست و کاهش هزینه‌های سوخت امری اجتناب‌ناپذیر است. کشور ایران با توجه به قرار گرفتن در جغرافیای مناسب از نظر کسب تابش خورشیدی، موقعیت مناسبی برای توسعه در زمینه‌ی انرژی‌های نو و تجدید پذیر دارد. بنابراین کار بر روی این زمینه تحقیقاتی از توجیه‌پذیری مطلوبی برخوردار است.

در این تحقیق می‌خواهیم عملکرد سیستم گرمایش هوای خورشیدی را با استفاده از سیستم کلکتور لوله خلأ خورشیدی مورد ارزیابی قرار دهیم. این کلکتور از نظر ساختاری مشابه آب گرم‌کن‌های لوله خلأ می‌باشد، با این تفاوت که از هوا به عنوان سیال کاری بهره می‌گیرد. همچنین امکان ارزیابی سیستم گرمایش هوای لوله خلأ خورشیدی مدل‌سازی شده، در حالت خشک‌کن نیز وجود دارد. بنابراین می‌خواهیم با استفاده از روش عددی، به تحلیل مدل‌سازی هوا گرم‌کن خورشیدی با کلکتور از نوع لوله

---

<sup>1</sup> Computational Fluid Dynamic

<sup>2</sup> Fluent

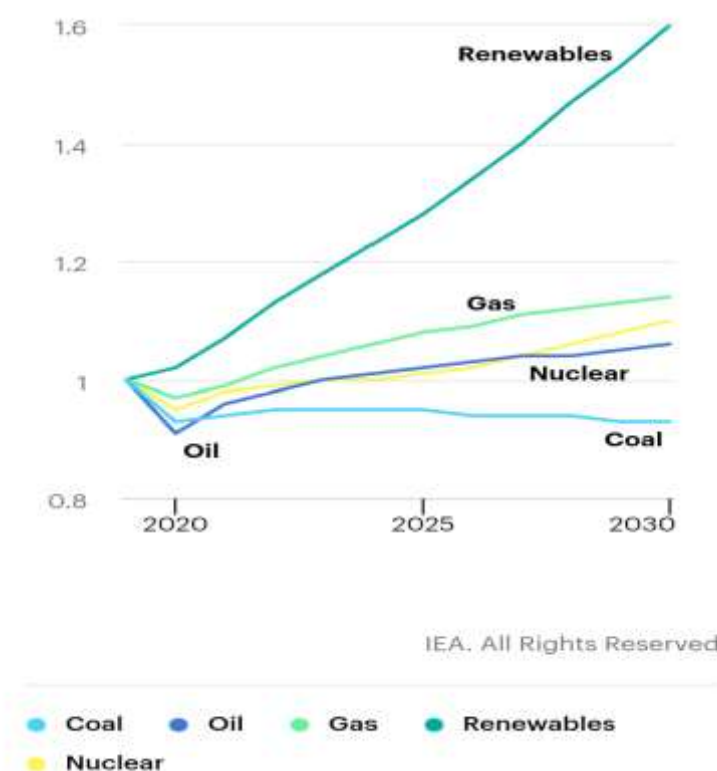
خلاً بپردازیم. در انتهای این پایان نامه هدف ما بررسی مدلی از هوا گرم کن خورشیدی لوله خلاً به صورت عددی و مقایسه نتایج آن با اندازه گیری آزمایشگاهی است. سپس در حالت های مختلف به بررسی کاهش نوسانات دمایی در طول روز جهت بهبود عملکرد حرارتی هوا گرم کن می پردازیم.



## فصل ۲: آشنایی با کلتورهای خورشیدی

## ۲-۱ مقدمه

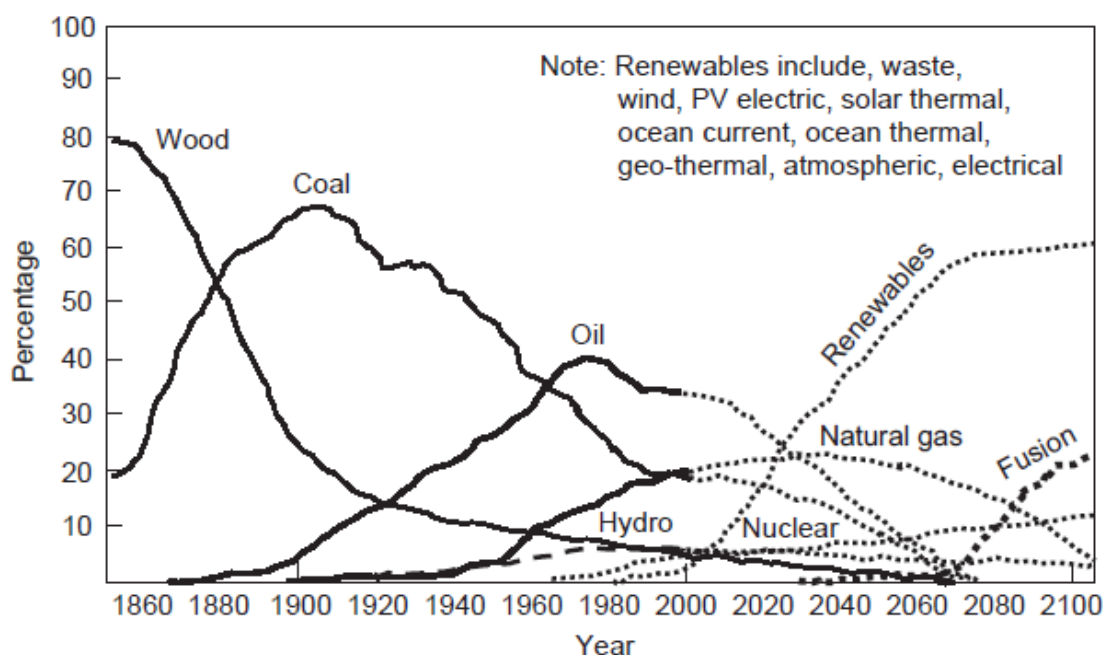
با افزایش یافتن جمعیت در سال‌های اخیر و ارتقاء استانداردهای سطح زندگی، امروزه جهان با مشکل بحران بزرگی به نام بحران انرژی مواجه شده است. اگر رشد جمعیت با همین سرعت افزایش یابد، شرایط از بد به وضعیت بحرانی تغییر می‌کند. منابع انرژی چون زغال‌سنگ، نفت و گاز طبیعی، با توجه به افزایش تقاضا، به سرعت در حال تمام شدن است، بنابراین نیاز به جستجو برای منابع دیگر انرژی به این دلیل است که بتواند این افزایش تقاضا را پاسخ دهد. طبق پیش‌بینی سازمان انرژی (IEA) با افزایش تقاضای جهان به انرژی تا سال ۲۰۳۰ انتظار می‌رود به میزان ۶۰ درصد از ذخایر انرژی با کاهش مواجه شود [۶۰].



شکل ۲-۱ شاخص تقاضای جهانی انرژی بر اساس سوخت بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۳۰ میلادی [۶۰]

با توجه به افزایش بهای نفت و گاز و محدودیت منابع و همچنین مشکلات زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی، استفاده از انرژی تجدید پذیر مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته است و لزوم بهره‌گیری از انرژی‌های

پاک برای کاهش اثرات گلخانه‌ای و تأثیرات نامطلوب آن بر آب‌وهوا بیش‌ازپیش آشکار شده است. به همین دلیل کشورهای مختلف به استفاده از انرژی‌های جدید ترغیب شده و برنامه‌ریزی‌های وسیعی را در این زمینه آغاز کرده‌اند. شکل ۲-۲ آینده جهانی مصرف انرژی را نشان می‌دهد. مطابق این شکل، انرژی‌های تجدید پذیر از سال ۲۰۲۵ به بعد یکی از منابع پرکاربرد برای تأمین انرژی در جهان خواهد بود [۶۱].



شکل ۲-۲ آینده جهانی مصرف انرژی [۶۱]

بنابراین، پتانسیل انرژی‌های تجدید پذیر باید بررسی شود. انرژی تجدید پذیر انرژی حاصل از اشکال طبیعی و غیرطبیعی موجود انواع انرژی از جمله باد، زیست‌توده، خورشید و انرژی گرمایی اتلاف حاصل از فعالیت‌های مختلف انسانی است [۵۹]. انرژی خورشیدی عظیم‌ترین منبع انرژی در جهان است که به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی در تولید انرژی استفاده می‌شود. این انرژی در دسترس، پاک، ارزان و بی‌پایان بوده و در تمام مناطق کشورمان و جهان قابل استحصال می‌باشد. یکی از راه‌ها برای تأمین انرژی حرارتی به‌کارگیری از سیستم‌های گرمایش خورشیدی است. کلکتورهای هوا گرم‌کن

خورشیدی از طریق جذب انرژی خورشید توسط صفحات جاذب عملکرد مطلوبی دارند و راندمان حرارتی آن‌ها برحسب نوع کلکتور مورد استفاده متفاوت می‌باشد [۶۲].

## ۲-۲ هوا گرم‌کن خورشیدی

تبدیل انرژی تابشی خورشید به گرما از زمان‌های تاریخی تا به امروز بسیار رایج است و امروزه به یک نوع فناوری خورشیدی تبدیل شده که به‌خوبی توسعه یافته است. اصل اساسی سیستم حرارتی خورشیدی این است که وقتی پرتو خورشیدی به یک سطح برخورد می‌کند، بخشی از آن جذب می‌شود و در نتیجه دمای سطح افزایش می‌یابد. کارایی آن سطح به‌عنوان یک کلکتور خورشیدی نه تنها به راندمان جذب بستگی دارد، بلکه به این بستگی دارد که چگونه تلفات حرارتی و تابش مجدد به محیط به حداقل برسد و اینکه چگونه انتقال انرژی از کلکتور برای اهداف کاربردی صورت می‌گیرد.

هوا از زمان جنگ جهانی دوم به‌عنوان سیال عامل در سیستم‌های گرمایش خورشیدی استفاده شده است. در هوا گرم‌کن، انرژی خورشیدی به‌وسیله صفحه جاذب حرارت دریافت می‌شود و با انتقال آن به هوا برای گرمایش هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نتیجه برای تولید هوای گرم با استفاده از انرژی خورشیدی از کلکتورهای هوا گرم‌کن خورشیدی استفاده می‌شود. بنا بر نوع کاربرد هوا گرم‌کن، کلکتورهای مختلفی را می‌توان برای آن طراحی کرد. سیستم‌های هوا گرم‌کن برای گرمایش در مصارف مسکونی، تجاری و صنعتی قابلیت استفاده دارد. علاوه بر این، برای نگهداری و خشک کردن محصولات کشاورزی، تهویه مطبوع و پیش گرم کردن هوا در فرآیندهای خاص کاربرد مناسبی دارند.

از جمله معایب سیستم هوا می‌توان به ضعف انتقال حرارت که ناشی از خواص هوا است، اشاره کرد. نیاز به فضای زیاد برای کانال‌های انتقال هوا به دلیل محدودیت‌های فضا مانعی برای استفاده از سیستم‌های هوا گرم‌کن در ساختمان‌های بزرگ است. اما معمولاً در ساختمان‌ها به نسبت کمتری از سیستم‌های مایع استفاده شده است و سیستم‌های هوا دارای چندین مزیت هستند که می‌تواند دلیلی بر استفاده از آن‌ها در

تأسیسات خانه‌های کوچک باشد. با این حال، اگر سیستم هوا به‌طور خوبی عایق شده باشد، عملکرد حرارتی و هزینه‌ها در هر دو سیستم با سیال عامل آب و هوا تقریباً یکسان است.

در سیستم‌های گرمایش خورشیدی مبتنی بر هوا، می‌توان از دستگاه ذخیره‌سازی تخت سنگریزه‌ای استفاده کرد. اگرچه آب چگالی ذخیره‌سازی انرژی بالاتری نسبت به سایر جامدات ارائه می‌دهد، اما عدم توجه‌پذیری اقتصادی در تبدیل حرارت از جریان هوا به ذخیره‌ساز جریان مایع، مانعی برای استفاده از آن می‌شود [۸۲].



شکل ۲-۳ نمایی از ساختار کلکتور خورشیدی مورد مطالعه در آزمایشگاه

## ۲-۳ کلکتور خورشیدی

کلکتور خورشیدی اصلی‌ترین جزء سیستم گرمایش خورشیدی است. عمل جذب تابش خورشیدی و انتقال گرما به سیال توسط این قسمت انجام می‌شود. کلکتور حرارتی خورشیدی باید دارای خواص انتقال حرارت خوب، ضریب هدایت حرارتی مناسب و ضریب جذب بالا بوده و در مقابل دماهای بالا پایدار باشد.

همچنین بایستی در مقابل خوردگی داخلی و خارجی مقاوم باشند. بازده کلکتور بستگی کامل به شرایط و جنس مواد استفاده شده در ساخت آن دارد. کلکتورهای حرارتی خورشیدی به عنوان بخش اصلی سامانه گرمایش خورشیدی وظیفه جذب انرژی خورشید را بر عهده دارند. این کلکتورها به دودسته کلی متمرکز کننده و غیرمتمرکز کننده تقسیم می گردند. که برای تأمین آب گرم و گرمایش فضا به کار می روند [۴].

کلکتورهای خورشیدی مانند مبدل های حرارتی کار می کنند به این صورت که، در آن ها انرژی از شکل تابشی خورشیدی به حالتی دیگر از انرژی، یعنی انرژی حرارتی ذخیره شده در آب یا هوا تبدیل می شوند. به طور کلی وسیله ای که چنین فرآیندی را انجام می دهد کلکتور خورشیدی نامیده می شود. بنابراین می توان این طور بیان کرد که کلکتور خورشیدی، انرژی تابشی خورشید را جذب کرده و آن را به حرارت تبدیل می کند. سپس این حرارت توسط سیال عاملی که داخل کلکتور خورشیدی قرار دارد جذب می شود.

انرژی خورشیدی که شیوه دریافت و تبدیل آن توضیح داده شد توسط سیالی عامل و یا یک سیال به عنوان سیال واسطه به محلی که باید در آنجا مورد مصرف قرار گیرد انتقال می یابد و یا در مخزن های ذخیره انرژی، برای مصرف در هنگام نیاز ذخیره سازی می شود. در مجموع برای نصب کلکتورهای خورشیدی دو شیوه مختلف وجود دارد. کلکتورهایی که به صورت ثابت نصب می شوند و یا کلکتورهایی که به صورت متحرک یعنی ردیاب خورشید می توان آن ها را در محل نصب کرد. اگر بخواهیم که پایه نگه دارنده کلکتور به صورت ثابت نصب شود باید محاسبات مربوط به زاویه ی قرارگیری نسبت به سمت جنوب و شیب کلکتور، در زمان طراحی انجام شود تا کلکتور در مناسب ترین وضعیت ممکن نصب شود. در این نوع از نصب کلکتور در تمام طول سال و تمام فصول و ساعات در همان وضعیت و با زاویه محاسبه شده، ثابت باقی خواهد ماند. ولی در حالت نصب به صورت ردیاب خورشید زاویه ی سطح کلکتور با تغییر زاویه شیب تابش در هر ساعت و هرروز به دلیل دریافت بالاترین جذب انرژی تابشی از خورشید متغیر خواهد بود [۵].

## ۲-۴ انواع کلکتورهای خورشیدی

کلکتورهای حرارتی خورشیدی به عنوان قلب سامانه های گرمایش خورشیدی وظیفه جذب انرژی خورشید را بر عهده دارند. به طور کلی چندین نوع کلکتور خورشیدی متداول وجود دارند. این کلکتورها به دودسته کلی متمرکز کننده<sup>۱</sup> و غیرمتمرکز کننده<sup>۲</sup> تقسیم بندی می گردند. کلکتورهای متمرکز کننده از سهموی هایی تشکیل شده اند که نور خورشید را بر نقطه کانونی خود منعکس می کنند. با کنار هم قرار دادن این سهموی ها و حرکت دادن یک سیال از روی نقطه کانونی آن ها می توان گرمای تابشی خورشید را جذب کرد و برای گرمایش و یا تولید برق استفاده کرد. کلکتورهای غیرمتمرکز کننده شامل کلکتورهای صفحه تخت و کلکتورهای لوله خلاء هستند [۶۳]. مبنای سنجش کیفیت کلکتورهای خورشیدی میزان راندمان آن ها است که رابطه مستقیم با کیفیت صفحات جاذب دارد.

انواع کلکتورهای حرارتی خورشیدی از کلکتورهای خورشیدی صفحه تخت بدون لعاب شیشه که در محدوده دمای ۵ تا ۱۰ درجه سانتی گراد بالاتر از محیط کار می کنند تا کلکتورهای متمرکز گیرنده مرکزی که در دمای کاری بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد تقسیم بندی می شوند. جدول ۲-۱ انواع مختلف کلکتورهای حرارتی خورشیدی در محدوده دمای کاری و نسبت تمرکز آن ها را فهرست می کند.

جدول ۲-۱ انواع کلکتورهای حرارتی خورشیدی و محدوده دمای کاری آن ها [۸۲]

| Type of Collector                    | Concentration Ratio | Typical Working Temperature Range (°C) |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| Flat-plate collector                 | 1                   | ≤70                                    |
| High efficiency flat-plate collector | 1                   | 60–120                                 |
| Fixed concentrator                   | 3–5                 | 100–150                                |
| Parabolic trough collector           | 10–50               | 150–350                                |
| Parabolic dish collector             | 200–500             | 250–700                                |
| Central receiver                     | 500 to >3000        | 500 to >1000                           |

<sup>۱</sup> Concentrator

<sup>۲</sup> None Concentrator

## ۲-۴-۱ کلکتورهای صفحه تخت

یکی از انواع کلکتورها که به طور گسترده در سیستم‌های گرمایش خورشیدی مورد استفاده قرار می‌گیرد کلکتور موسوم به صفحه تخت<sup>۱</sup> هستند. این کلکتور ساده‌ترین و پراستفاده‌ترین نوع کلکتور به شمار می‌رود. کلکتورهای صفحه تخت معمولاً برای سیستم‌های گرمایش هوا مورد نیاز هستند تا فضای کافی برای انتقال گرما به طور مؤثر از صفحه جذب به جریان هوا را فراهم کنند.

ساختار آن به شکل یک جعبه مستطیل شکل بوده که دارای یک صفحه جاذب فلزی گسترده و صاف است. این موضوع کمک می‌کند تا بخش بیشتری از سطح آن‌ها در معرض تابش خورشید قرار گیرد. جنس صفحه جاذب از مس یا آلومینیوم با پوششی به رنگ‌های غالباً تیره ایجاد می‌شود تا بالاترین میزان جذب انرژی حرارتی خورشید را داشته باشد. در زیر سطح جاذب، لوله‌های کوچکی به نام رایزر<sup>۲</sup> متصل هستند که سیال موجود در سیستم گرمایش خورشیدی، در این لوله‌ها جریان یافته و حرارت جذب شده در سطح جاذب کلکتور، به سیال انتقال می‌یابد. اطراف کلکتور و سطح پایینی آن به منظور کاهش اتلاف حرارتی به طور کامل با عایق حرارتی پوشانده می‌شود. روی سطح کلکتور نیز از شیشه پلاستیک شفاف یا شیشه پوشیده می‌شود و باید کاملاً آب‌بندی و عایق گردد. طرز کار کلکتور صفحه تخت در سیستم گرمایش خورشیدی بسیار ساده است. اما رعایت نکات فنی و تکنیکی بسیار ظریفی در ساخت این کلکتورها می‌تواند بازدهی عملکرد آن‌ها در جذب و انتقال حرارت را به میزان زیادی افزایش دهد. یکی از این نکات استفاده از مناسب‌ترین ماده پوشش‌دهنده برای سطح جاذب حرارت است که بتواند بیشترین میزان ممکن جذب حرارت را از تابشی که به سطح آن می‌رسد داشته باشد و همچنین کمترین میزان تشعشع ممکن را نیز ایجاد نماید. دومین نکته در مورد شیشه بالای سطح کلکتور آب گرم‌کن خورشیدی است که علاوه بر محکم بودن در برابر ضربه باید بیشترین میزان تابشی که قابلیت ایجاد حرارت دارد را به داخل کلکتور عبور داده و مانع خروج پرتوهای انعکاس یافته از سطح صفحه جاذب گردد.

---

<sup>۱</sup> Flat-plate collectors

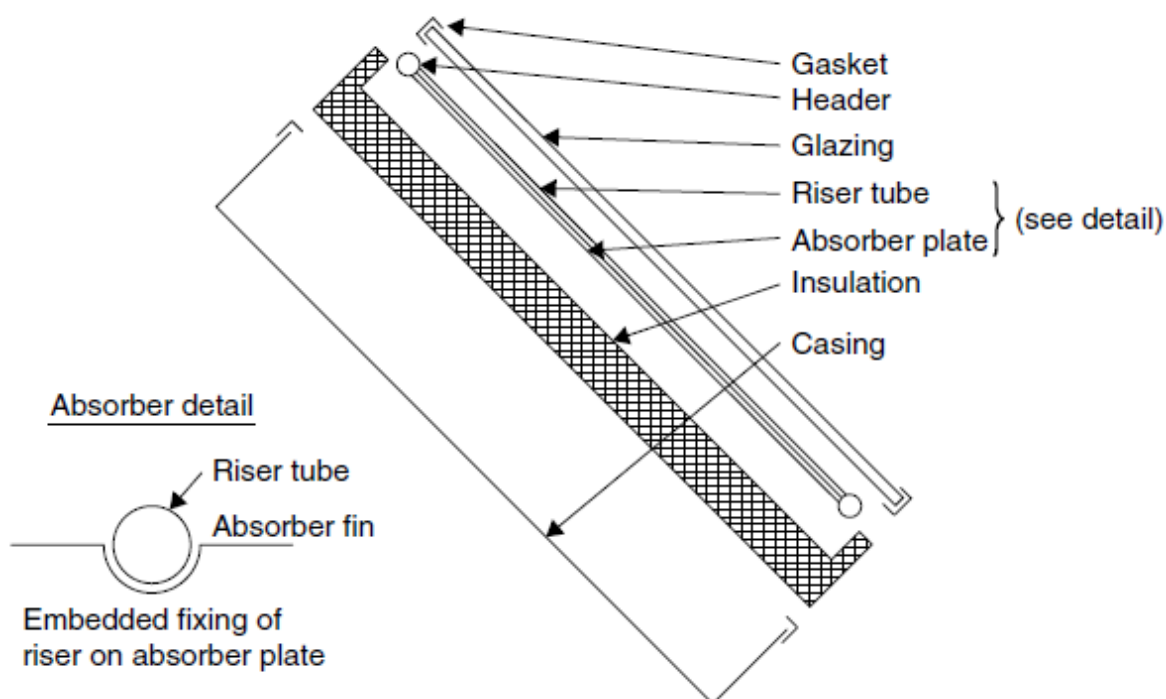
<sup>۲</sup> Riser

کلکتورهای صفحه تخت که در سال ۱۹۵۰ توسط هاتل و ویلیر<sup>۱</sup> توسعه داده شدند، از رایج‌ترین کلکتورها هستند [۶۴]. ساختار آن شامل یک جاذب انرژی خورشیدی از نوع صفحه تخت به رنگ تیره می‌باشد، با یک پوشش شفاف که اجازه عبور انرژی خورشید را می‌دهد و کمترین تلفات گرمایی را دارد، یک سیال انتقال‌دهنده گرما (هوا، ضد یخ یا آب) برای انتقال گرما از سطح جاذب، و یک عایق حرارتی که در ناحیه پایین سطح جاذب قرار دارد. جاذب به شکل یک ورقه جاذب نازک است که شامل نوعی پلیمر پایدار از لحاظ گرمایی، لوله‌ای از جنس آلومینیوم، فولاد یا مس می‌باشد. همچنین یک پوشش سیاه یا ویژه روی آن اعمال شده است. اغلب بر روی صفحه جاذب، شبکه یا کوپلی از اتصالات سیال در یک چهارچوب عایق شده با شیشه یا کاور پلی کربنات قرار می‌گیرد. در پنل‌های گرمایش آب سیال معمولاً از طریق لوله‌ها سیرکوله می‌شود تا حرارت را از طریق جاذب به مخزن آب عایق شده منتقل کند.

یک کلکتور صفحه تخت، تطابق ترمودینامیکی خوبی برای نیازهای دمایی در کاربردهای گرمایش فضا فراهم می‌کند.

---

<sup>1</sup> Hottel and Whillier



شکل ۲-۴ نمای عرضی از جزئیات ساختار کلکتور صفحه تخت [۹۱]

## ۲-۴-۲ کلکتورهای لوله خلأ<sup>۱</sup>

دو روش کلی برای بهبود قابل توجه عملکرد کلکتورهای لوله‌ای خورشیدی، به نسبت بالاتر از توان کارایی کلکتورهای صفحه تخت وجود دارد. روش اول استفاده از متمرکز کننده‌ها است؛ که باعث افزایش شار خورشیدی بر روی گیرنده می‌شود. به این صورت که، می‌توان برای دستیابی به سطح کوچکی از تمرکز (۱,۵ تا ۲,۰) برابر، با استفاده از فرم دهی یک آینه در قسمت پایین سطح مقعر داخلی لوله شیشه‌ای، نرخ تابش دریافتی را افزایش داد. این بازتابنده می‌تواند انرژی تابشی را روی گیرنده داخلی این لوله متمرکز کند. از آنجایی که چنین گیرنده‌ای کاملاً شفاف است، هیچ تلفات ناخواسته‌ای نیز ندارد. همچنین عملکرد یک کلکتور لوله‌ای خلأ نشده را می‌توان با عایق کردن پوشش لوله‌ای با گازهای نجیب که وزن مولکولی بالایی دارند کمی بهبود داد. متمرکز کننده‌های خارجی پرتوهای تابشی نیز می‌توانند با یک گیرنده لوله‌ای ترکیب شوند و عملکرد آن را نسبت به لوله خلأ ساده بهبود بدهند.

<sup>1</sup> collectors Evacuated-tube

روش دوم استفاده از خلأ برای کاهش تلفات حرارتی ناخواسته از سطح گیرنده است. کلکتورهای لوله خلأ، تنها ابزار عملی برای رفع کامل تلفات همرفتی هستند که این کار با احاطه کردن خلأ اطراف گیرنده با فشار خلأ حدود ۱۰-۴ میلی‌متر جیوه فراهم می‌شود. کلکتورهای لوله خلأ شامل چند ردیف، استوانه‌ای هم‌محور دوجداره از جنس شیشه شفاف هستند که به‌صورت موازی کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. هر کلکتور دارای یک لوله شیشه‌ای بیرونی و یک لوله داخلی است که سطح خارجی لوله‌ی داخلی با پوششی نازک از جنس ماده جاذب اندود می‌شود. هوا از فضای بین شیشه‌های دوجداره خارج گردیده و خلأ ایجاد می‌شود تا از اتلاف حرارت جلوگیری کند. ایجاد خلأ بهترین روش برای ایجاد عایق حرارتی است. عملکرد کلکتور لوله خلأ در آب گرم‌کن خورشیدی بسیار شبیه فلاکس‌هایی است که برای گرم نگه‌داشتن آب استفاده می‌شوند. همچنین برای گرمایش فضا، از هوا به‌عنوان سیال کاری استفاده می‌شود.



شکل ۲-۵ لوله‌های خلأ شده

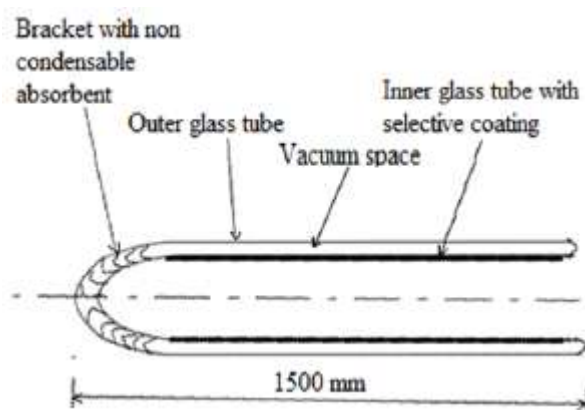
کلکتورهای لوله خلأ غالباً بسیار کارآمدتر از انواع کلکتورهای صفحه تخت هستند اما با توجه به اینکه طراحی و ساختار پیچیده‌ای دارند، تولید آن‌ها هزینه بیشتری نسبت به کلکتورهای صفحه تخت دارد. در این نوع کلکتورها عمل جذب تابش خورشیدی توسط سطح خارجی لوله داخلی که فضای خلأ قرار دارد، صورت می‌گیرد. بنابراین تلفات حرارتی مربوط به انتقال حرارت هدایت و جابجایی حرارتی در کمترین مقدار خود قرار دارد و در نتیجه می‌توان گفت که ضریب بهره‌وری در کلکتورهای لوله خلأ بالا می‌باشد. به

همین دلیل است که برای ساخت لوله‌های خلأ باید از شیشه‌هایی استفاده شود که تحمل فشار بالا را داشته باشند و در مقابل فشار خلأ مقاوم باشند. عملکرد لوله‌های خلأ به گونه‌ای است که کارایی بسیار بالایی ایجاد می‌کنند. به طوری که حتی در شرایط ابری و یا در زمان ابتدا و انتهای روز که تابش خورشید بسیار کم است توانایی این رادارند که عملکرد بسیار بهتری نسبت به کلکتورهای صفحه تخت ایجاد کنند. این نوع از کلکتورها معمولاً در کاربردهایی که دمایی بین ۲۵ تا ۵۲ درجه سانتی‌گراد نیاز است، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مزیت این نوع کلکتور توانایی در ایجاد دمای بالاتر می‌باشد. در حال حاضر سه نوع عمده از کلکتورهای لوله خلأ تولید و مورد استفاده قرار می‌گیرد و در شکل (۲-۷) می‌توان نمایی از کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ را مشاهده نمود.

کلکتورهای لوله خلأ به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌گردند [۶۵]:

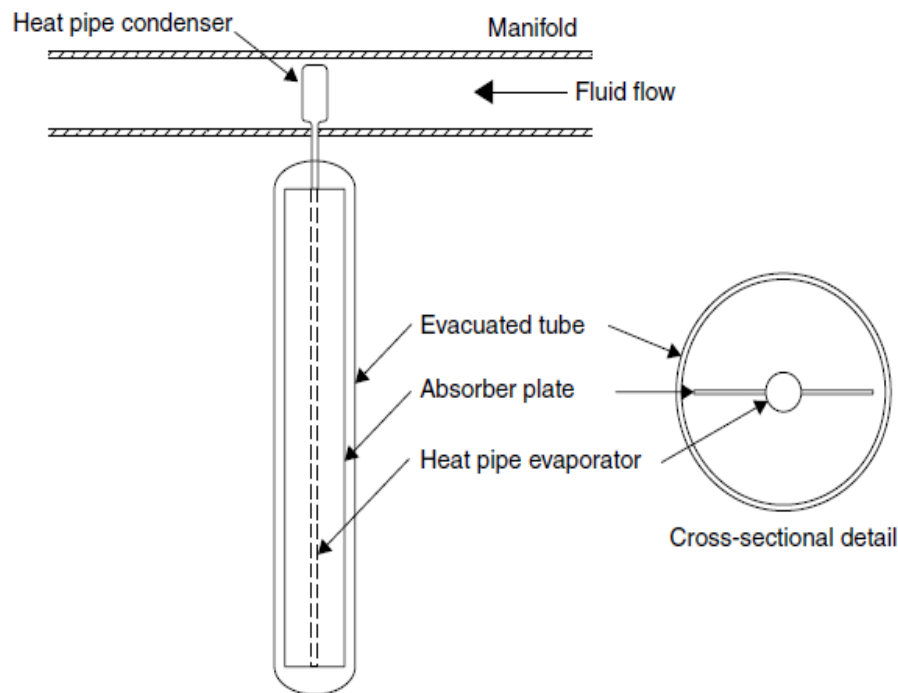
(۱) کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ نوع ساده که شامل شیشه‌های دوجداره عایق هستند و سیالی از نوع هوا یا آب در داخل آن‌ها به صورت مستقیم جریان پیدا می‌کند و گرم می‌شود.



شکل ۲-۶ شماتیک برش عرضی از لوله خلأ از نوع ساده [۹۲]

(۲) کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ از نوع لوله حرارتی که شامل شیشه‌های دوجداره عایق هستند که درون آن لوله‌ای مسی دارای سیال کاری ویژه قرار دارد. که مطابق شکل ۲-۶

یک سمت آن در مخزن و سر دیگر، در مرکز محور لوله‌های کلکتور قرار دارد. با تابش خورشید بر روی شیشه‌های کلکتور سیال درون لوله مسی شروع به گرم شدن می‌کند و با حرکت طبیعی درون لوله گرما را به سمت مخزن منتقل می‌کند. سپس به شکل یک مبدل حرارتی، سیال درون مخزن را گرم می‌کند. در اصطلاح این نوع کلکتورها را لوله حرارتی<sup>۱</sup> می‌نامند.



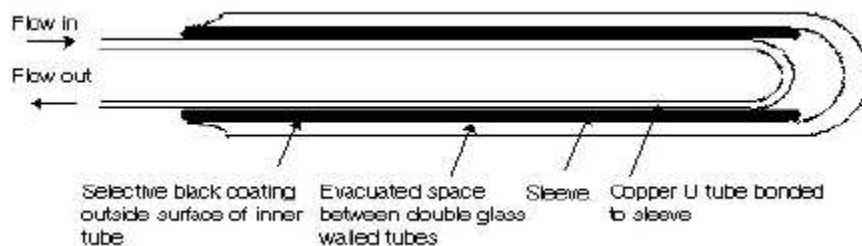
۷-۲ شماتیک کلکتور لوله خلأ از نوع لوله حرارتی [۹۱]

۳) کلکتورهای خورشیدی لوله خلأ از نوع U-شکل<sup>۲</sup> که شامل شیشه‌های دوجداره و لوله مسی متصل به صفحه جاذب می‌باشد. که مطابق شکل ۷-۲ یک سر آن در مخزن و سمت دیگر آن درون لوله خلأ قرار دارد. صفحه جاذب به کاررفته در لوله‌ها با ضخامتی باریک ساخته شده است که شیوه عملکرد آن مانند صفحه جاذب کلکتورهای صفحه تخت می‌باشد. آب سرد از مخزن وارد لوله‌های مسی شده و انرژی تابشی خورشید از طریق

<sup>۱</sup> Heat Pipe

<sup>۲</sup> U-Type

صفحه جاذب، جذب شده و سپس از سمت دیگر خارج می شود. این نوع از کلکتورها در اصطلاح لوله ی U<sup>۱</sup> یا شیشه فلز<sup>۲</sup> نیز نامیده می شوند.



شکل ۸-۲ نمایی شماتیک از کلکتور لوله خلأ نوع U-شکل [۹۰]

## ۲-۴-۳ کلکتورهای متمرکز کننده خورشیدی

سومین نوع از انواع رایج کلکتورهای سیستم های گرمایش خورشیدی، کلکتورهای متمرکز کننده هستند. در این کلکتورها، با متمرکز کردن تابش خورشید بر روی نقطه کانونی یک جاذب، شار حرارتی خورشید را افزایش می دهند. این کار معمولاً با استفاده از آینه ها انجام می شود، که با توجه به نوع کلکتور متمرکز کننده، شکل آینه مورد استفاده برای آن نیز متفاوت است. انواع این کلکتورها شامل سهموی خطی<sup>۳</sup>، انعکاس دهنده فرزنل<sup>۴</sup>، بشقاب سهموی<sup>۵</sup>، دریافت کننده مرکزی<sup>۶</sup> و فتوولتائیک های متمرکز کننده<sup>۷</sup> می باشد. کلکتورهای متمرکز کننده نسبت به نوع صفحه تخت، به دلیل اتلاف حرارتی کمتر، عملکرد دمایی بالاتری دارد. استفاده از این نوع کلکتورها در سیستم گرمایش خورشیدی خانگی بسیار نادر است. همچنین عموماً در مقیاس های بزرگ، برای تهیه بخار برای توربو ژنراتورها در نیروگاه های خورشیدی از کلکتورهای سهموی استفاده می شود [۸۰].

<sup>۱</sup> U Tube

<sup>۲</sup> Metal Glass

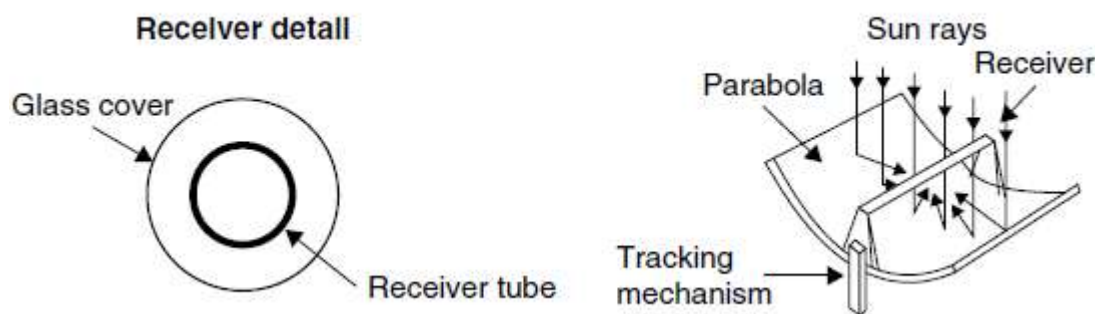
<sup>۳</sup> Parabolic trough collector

<sup>۴</sup> Linear Fresnel reflector

<sup>۵</sup> Parabolic dish

<sup>۶</sup> Central receiver

<sup>۷</sup> Concentrator photovoltaic



شکل ۹-۲ شماتیک کلکتور سهموی خطی [۹۱]

## ۵-۲ سیستم‌های گرمایش خورشیدی

سیستم‌های خورشیدی را برحسب نوع ایجاد جریان در آن، نوع تماس بین دو سیال و نوع سیستم کمکی استفاده در آن‌ها می‌توان دسته‌بندی کرد؛ که در این بخش به شرح آن می‌پردازیم.

### ۱-۵-۲ سیستم‌های فعال و غیرفعال

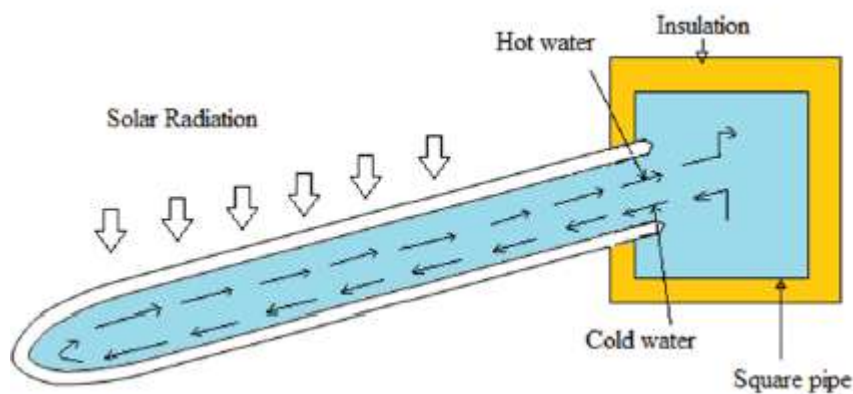
هوا گرم‌کن‌های خورشیدی را می‌توان بر اساس نوع عملکرد سیکل جریان سیال در آن به دودسته فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی کرد. در سیستم‌های کنترل غیرفعال<sup>۱</sup> فاقد پمپ گردش سیال است که عمدتاً جریان گردش هوا به‌صورت طبیعی و بر اساس اختلاف وزن مخصوص بین هوای گرم و هوای سرد به چرخش می‌افتد. اما در سیستم‌های کنترل فعال<sup>۲</sup> که دارای پمپ گردش هوا می‌باشد، جریان گردش هوا توسط نیروی محرکه خارجی، مانند دمنده، صورت می‌پذیرد. وجود سیستم طبیعی ضرورتاً با حذف سیستم مکانیکی همراه نیست، بلکه ترکیب این دو سیستم باعث می‌شود در روزهای ابری که سیستم طبیعی پاسخگوی نیاز گرمایشی نیست، با استفاده از سیستم کمکی (استفاده از سوخت یا الکتریسیته) شرایط آسایش مصرف‌کننده فراهم گردد. همچنین در سایر ایام سال میزان مصرف انرژی فسیلی و یا الکتریسیته در ساختمان به حداقل کاهش یابد [۸۱].

<sup>۱</sup> passive

<sup>۲</sup> active

## ۲-۵-۱-۱ سیستم‌های غیرفعال

سیستم گردش طبیعی سیال ساختاری ساده‌ای دارد و در این سیستم تجهیزات جانبی اضافه‌ای وجود ندارد، در نتیجه هزینه‌ی ساخت آن به نسبت کمتر است و هزینه‌ی تعمیرات و نگهداری آن نیز پایین می‌باشد. همچنین این سیستم می‌تواند برای مناطقی از کره زمین که دارای آب‌وهوای گرم نیستند نیز مورد استفاده قرار گیرد. سیستم‌های گردش طبیعی غالباً، سیستم‌های ترموسیفون نامیده می‌شوند. در شکل ۲-۶ می‌توان نمایی از این نوع سیستم‌ها را مشاهده نمود. همچنین در شکل ۲-۷ می‌توان شماتیکی از یک سیستم آب گرم کن خورشیدی از نوع ترموسیفون را به همراه سایر اجزاء اصلی آن مشاهده کرد.



شکل ۲-۱۰ نمایی شماتیک از کلکتور لوله خلأ ترموسیفون بر پایه آب [۹۲]

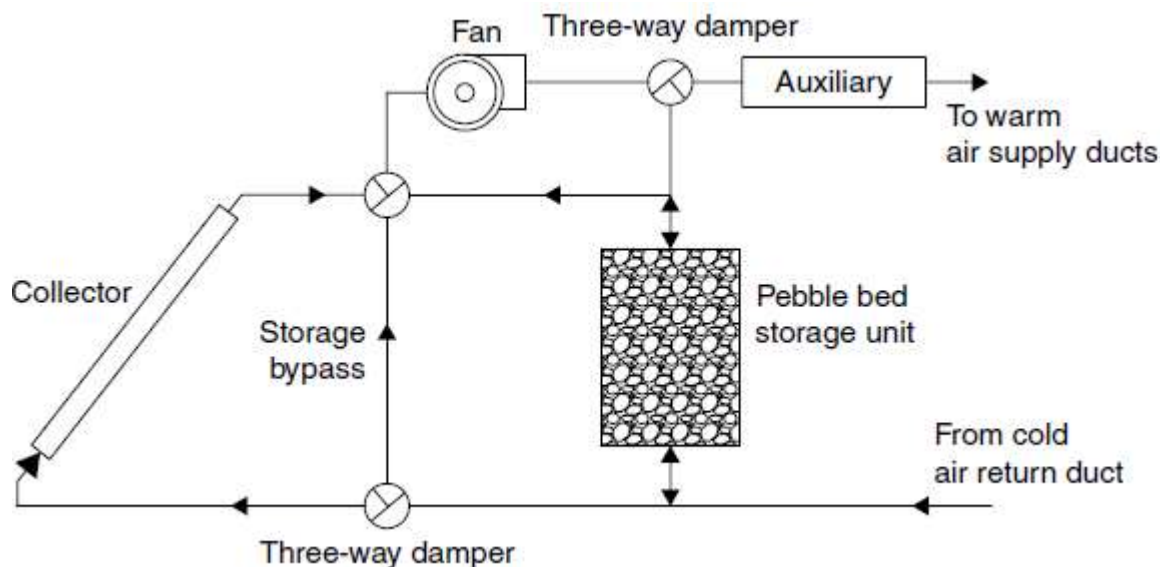
سیستم ترموسیفون از خاصیت بالا رفتن سیال در زمانی که کلکتور با تابش خورشید گرم می‌شود، استفاده می‌کند. مطابق شکل ۲-۱۰ در این سیستم یک تانک ذخیره در ارتفاعی بالاتر از کلکتور نصب می‌شود. هنگامی که سیال گرم‌تر می‌شود، چگالی آن کاهش یافته و سبک‌تر می‌شود سپس به طور طبیعی به طرف بالاترین نقطه داخل منبع ذخیره جریان می‌یابد. از طرف دیگر، سیال سردتر از پایین منبع وارد لوله‌ها شده و به طرف پایین‌ترین نقطه کلکتور جریان پیدا می‌کند و یک گردش طبیعی در سیستم به وجود می‌آید. در لحظه‌ای که دمای داخل کلکتور از دمای داخل تانک ذخیره کمتر شود، گردش در

سیستم متوقف می‌شود. این امر از انتقال حرارت سیستم به محیط در شب، هنگامی که دمای کلکتور کمتر از منبع ذخیره است، جلوگیری می‌کند.

## ۲-۵-۱-۲ سیستم‌های فعال

در سیستم‌های فعال جریان به‌صورت اجباری با پمپ کردن سیال ایجاد می‌شود. بنابراین، با استفاده از یک پمپی که در این نوع از سیستم وجود دارد، سیال به‌صورت اجباری به داخل کلکتورها ارسال می‌شود و با گردش مداوم سیال، کلکتور اقدام به گرم کردن مخزن می‌کند. همچنین در این سیستم، مخزن ذخیره‌سازی دوجداره عایق می‌تواند در داخل ساختمان قرار گرفته و تنها کلکتور بر روی پشت‌بام قرار گیرد. به‌طور کلی، در این دسته از گرم‌کن‌های خورشیدی که معمولاً به‌صورت غیرمستقیم هستند، برای انجام بهتر عمل گردش سیال کاری از پمپ استفاده می‌شود. سیستم‌های غیرفعال معمولاً جهت گرمایش مصارف بزرگ مورد استفاده قرار می‌گیرند و علاوه بر این در سیستم‌های خانگی نیز می‌تواند کاربرد داشته باشد.

در این مدل کلکتور، می‌توان از سیستم کمکی برای جبران افت انرژی در شرایط اضطراری که انرژی خورشیدی در دسترس نیست استفاده کرد. سیستم کمکی را می‌توان با المنت برقی و یا یک هیتر گازی در مناطقی که دارای لوله‌کشی گاز شهری است، ایجاد کرد. این نوع سیستم‌ها معمولاً مجهز به سیستم کنترل هوشمند برای عملکرد بهینه پمپ می‌باشند. این سیستم مجهز به یک کنترل‌کننده دما بوده که در زمان ضروری به پمپ یا فن دستور قطع و اتصال می‌دهد. شیوه عملکرد کنترل‌کننده به این صورت هست که اختلاف دمای بین خروجی مخزن و کلکتور را تعیین می‌کند و پس از مقایسه با دمای تنظیم‌شده روی این کنترل‌کننده، فرمان قطع یا اتصال جهت عمل سیرکولاسیون سیال در مدار را می‌دهد. مهم‌ترین ویژگی‌ها و مزایای سیستم‌های فعال می‌توان به حذف شدن بار مخزن از روی پشت‌بام، طول عمر بیشتر و اتلاف دمایی کمتر، کارایی بالاتر و قابلیت استفاده از سیستم گرم‌کن کمکی نظیر گازی یا برقی اشاره کرد.



شکل ۱۱-۲ شماتیکی از سیستم فعال بر پایه هوا گرم کن [۹۱]

## ۲-۶ مدل فیزیکی و شرح عملکرد هوا گرم کن

مدل آزمایشگاهی مورد بررسی در این تحقیق، یک کلکتور خورشیدی از نوع لوله خلأ است که در سایت خورشیدی دانشگاه صنعتی شاهرود (شکل ۲-۱۳) قرار دارد. اجزای این دستگاه شامل یک واحد خارجی متشکل از دمنده، مخزن، لوله‌ی برگشت هوا و کلکتورهای لوله خلأ است و واحد داخلی شامل سیستم انتقال جریان و سیستم‌های کنترلی می‌باشد. این مجموعه کلکتور، دارای پنج لوله خلأ خورشیدی است که نقش جاذب تابش خورشیدی را دارند. در بالای این مجموعه بخش مخزن کلکتور قرار دارد که لوله‌های خلأ به‌طور شیب‌دار با زاویه ۴۵ درجه نسبت به سطح زمین به آن متصل هستند. هوا پس از گرم شدن در کلکتور وارد بخش مخزن می‌شود و در سمت کناری مخزن لوله‌ای قرار گرفته که به واسطه دمنده‌ای که در قسمت راست آن تعبیه شده هوا را به سمت چپ مخزن برگشت می‌دهد، این کار موجب ایجاد جریان اجباری در مخزن می‌شود.



شکل ۲-۱۲ نمایی از کلکتور خورشیدی لوله خلأ مورد مطالعه

این مجموعه که یک سیستم غیرفعال است و از پدیده ترموسیفون برای جریان سیال استفاده می‌کند. نحوه عملکرد سیکل انتقال حرارت در این کلکتور به این شکل است که، پس از تابش پرتوهای خورشیدی روی سطح جاذب کلکتور، انرژی تابشی به شار حرارتی تبدیل می‌شود و موجب افزایش دما در جدار داخلی کلکتور می‌شود. این افزایش دما موجب گرم شدن هوای داخل کلکتور از طریق جابجایی طبیعی می‌شود. سپس جریان هوای گرم به سمت ناحیه بالای کلکتور که مخزن قرار دارد می‌رود. هوای درون مخزن بعد از مدتی انرژی خود را از دست می‌دهد و با کاهش دما مجدداً به ناحیه گرم کلکتور بازمی‌گردد و جای هوایی را که در محیط کلکتور گرم شده و تمایل به بالا رفتن دارد را می‌گیرد. این گردش هوا به صورت دائم توسط گرمای حاصل از تابش خورشید ادامه می‌یابد. این سیکل طبیعی چرخش هوا به صورت دائم تا زمانی که تابش خورشید هوای گرم تولید می‌کند ادامه دارد.

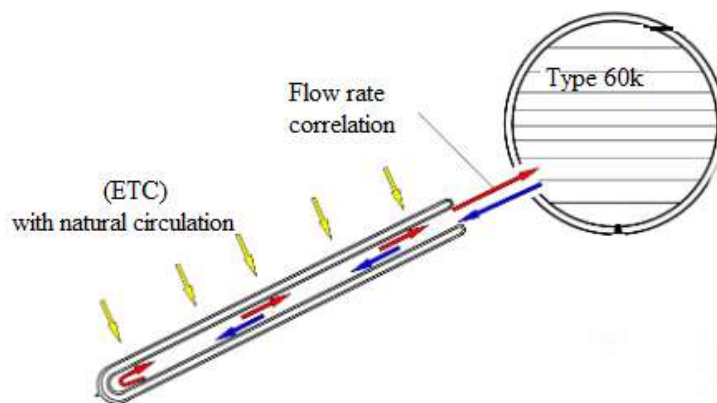
جریان همرفت طبیعی برای سیال موجب جابجایی هوا در سیستم بسته می‌شود، بنابراین جریانی از نوع ترموسیفون شکل می‌گیرد. این سامانه در واقع یک چرخه جابجایی طبیعی خالص است. در این

سامانه، مرحله جذب انرژی می‌تواند توسط کلکتوری متصل به مخزن هوا گرم‌کن و یا کاملاً در محیطی جداگانه صورت گرفته و حرارت جذب‌شده توسط کانال به فضای موردنظر هدایت و در مکان مناسبی که معمولاً بالاتر از سطح جذب‌کننده قرار دارد، ذخیره یا استفاده گردد.

این سامانه یک سیستم گرمایش خورشیدی بوده و از آنجایی که مخزن بخشی از ساختار است، جهت ذخیره انرژی استفاده می‌گردد. همچنین از انواع ذخیره‌کننده‌های انرژی نیز می‌توان جهت ذخیره انرژی در مخزن استفاده کرد. برای انجام فرآیند ذخیره‌سازی حرارت می‌توان هوای گرم شده را داخل یک نوع بستر ذخیره‌ساز حرارت به جریان انداخت. در این حالت هوای گرم به ذخیره‌ساز منتقل می‌شود و انرژی در آن ذخیره می‌شود. سپس جهت انتقال گرما از بستر ذخیره‌ساز به داخل مخزن، سیال درون مخزن در مسیر ذخیره‌ساز جریان می‌یابد و در آنجا با گرم شدن مجدداً وارد مخزن می‌شود. پس در ساخت این سامانه باید توجه داشت که بخش مخزن در ارتفاع بالاتری از کلکتور نصب شود تا جریان هوا در این سامانه تحت تأثیر جابجایی طبیعی قرار گیرد. در نتیجه قرارگیری عمودی اجزاء جهت عملکرد مناسب سامانه ضروری هست.

برای بالا بردن میزان حرارت کسب‌شده در کلکتور، از استوانه شیشه‌ای دوجداره که بین آن‌ها فضای خلاء است استفاده می‌شود تا هوا با بالاترین راندمان گرم شده و به مخزن انتقال یابد. ایجاد خلاء در اطراف کلکتور بهترین روش برای عایق حرارتی است و تلفات حرارتی را کاهش می‌دهد. روی سطح شیشه استوانه‌ای داخلی نیز با موادی مناسب پوشش‌دهنده می‌شود که آن را به یک سطح جاذب تابش خورشید باراندمان حرارتی بالا تبدیل می‌کند.

بنابراین جهت بهبود بازدهی در تجهیزات مذکور هرگونه تلاشی که منجر به افزایش نرخ تولید هوای گرم و تأثیر مثبت در نوع کاربری این سامانه شود، می‌تواند عملکرد حرارتی را ارتقاء دهد. بدین منظور، هرگونه روش و شیوه‌ای جهت رسیدن به این هدف ابتدا باید موردبررسی و تحلیل قرار گیرد تا میزان اثربخشی آن مشخص شود.



شکل ۲-۱۳ نمای شماتیک از سیرکولاسیون جریان هوا در کلکتور لوله خلأ [۹۳]

## ۷-۲ معرفی پژوهش و نوآوری

در این پژوهش می‌خواهیم مدلی از کلکتور لوله خلأ را شبیه‌سازی کنیم و با حل عددی به تحلیل آن بپردازیم. این کار با نرم‌افزار فلوئنت انجام می‌شود و تحلیل انجام‌شده از نوع حجم محدود خواهد بود. به این صورت که ابتدا مدل مدنظر طراحی می‌شود و با شبکه‌بندی هندسه و انتخاب حل گر مناسب شروع به حل مسئله می‌کنیم.

مدل‌سازی بر اساس نمونه هوا گرم‌کن با کلکتور لوله خلأ خورشیدی است که با روش آزمایشگاهی دمای تولیدی آن بررسی شده است. این مدل از کلکتور تابه‌حال برای مصارف خشک‌کن بکار گرفته نشده است و در حال حاضر به‌عنوان خشک‌کن خورشیدی کارهای پژوهشی روی آن در حال انجام است. همچنین حل عددی برای هوا گرم‌کن لوله خلأ به‌ندرت مورد مطالعه قرار گرفته و استفاده از لوله خلأ جهت گرمایش هوا کمتر استفاده شده است. بنابراین ما قصد داریم تحلیلی عددی روی این نوع از هوا گرم‌کن‌ها انجام دهیم و نتایج حاصل را با داده‌های حاصل از نتایج تجربی اعتبار سنجی کنیم. در انتها با بررسی تغییرات دمای کلکتور در طول روز، عملکرد حرارتی آن را مورد ارزیابی قرار دهیم.



فصل ۳: روش مدل سازی گلکتور

خوشیدی و شیه سازی عددی

### ۳-۱ مقدمه

در فصول قبل به بررسی و بیان مسئله و اهداف موردبررسی در این پروژه پرداختیم. سپس پژوهش‌های تجربی و عددی انجام‌شده در زمینه کلکتورهای خورشیدی و روش‌های بهبود عملکرد حرارتی در آن‌ها پرداخته شد. همچنین توضیحاتی در مورد انواع کلکتورها و ویژگی‌های آن‌ها داده شد و گفتیم، یکی از روش‌های تولید هوای گرم، استفاده از هوا گرم‌کن‌های خورشیدی می‌باشد.

در این فصل به بیان تئوری و معادلات حاکم بر مسئله و انتخاب نرم‌افزار می‌پردازیم. سپس روش شبیه‌سازی برای حل مسئله انتقال حرارت در هوا گرم‌کن خورشیدی را مطرح می‌کنیم. در انتها، به بررسی کارایی و عملکرد کلکتور هوا گرم‌کن خورشیدی در حالت گذرا و به‌صورت مدل سه‌بعدی با در نظر گرفتن جریان آشفته و انتقال حرارت تشعشعی می‌پردازیم.

### ۳-۲ روش تحلیل مسائل مهندسی

در علوم مختلف از روش‌های متفاوت و مخصوص برای مطالعه و بررسی استفاده می‌شود تا شناخت موضوع تحت بررسی را ممکن گردانند. در مهندسی برای حل مسائل سیالاتی، انتقال حرارت و جامداتی از روش‌های تحقیقی گوناگونی می‌توان به حل مسئله پرداخت. که به‌طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش تحلیل دقیق<sup>۱</sup>، حل عددی<sup>۲</sup> و تجربی<sup>۳</sup> وجود دارد.

در روش تجربی با آزمایش مسئله به‌صورت فیزیکی نتایج را به دست می‌آوریم و با توجه به اینکه مبتنی و برگرفته از خود واقعیات است، روشی مناسب اما پرهزینه و زمان‌بر محسوب می‌شود. برای حل دقیق‌تر از روش تحلیلی با اعمال یک دسته از فرضیات بر معادلات دیفرانسیل حاکم بر میدان‌های فیزیکی همچون میدان تنش، میدان حرارتی و سیالاتی می‌توان دستگاه معادلات را حل کرد که البته این روش

---

<sup>1</sup> Exact Solution

<sup>2</sup> Numerical Solution

<sup>3</sup> Experimental Method

زمان بر است و هر مسئله‌ای را نمی‌تواند حل کند. همچنین به کمک روش عددی و با بهره‌گیری از کامپیوتر، دستگاه معادلات غیرخطی را به صورت تقریبی حل می‌کنیم؛ که مزیت این روش نسبت به سایر روش‌ها سرعت بالا، کم‌هزینه بودن، حل مسائل با شرایط مرزی پیچیده و تحلیل مدل‌هایی با هندسه پیچیده است.

برای انجام یک شبیه‌سازی عددی به شیوه صحیح، داشتن اطلاعات و شرایط کافی در سه زمینه مختلف شامل الگوریتم حل عددی، معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی، سخت‌افزارها و منابع محاسباتی الزامی است. به‌طور کلی دینامیک سیالات محاسباتی یک روش برای حل عددی و تحلیل مسائل سیالاتی است که کار آن جایگزین کردن انتگرال‌ها و مشتقات جزئی با عبارات ساده جبری است. این معادلات در فرم جدید قابل حل بوده و جواب‌های عددی را برای مشخصه‌های میدان جریان در نقاط مشخصی از زمان و فضا ارائه می‌دهد.

### ۳-۳ معرفی و انتخاب نرم‌افزار

در این پروژه از نرم‌افزار فلونت<sup>۱</sup> به منظور شبیه‌سازی و شبکه‌بندی کلکتور خورشیدی استفاده شده است. نرم‌افزار فلونت یک نرم‌افزار مهندسی با توانایی بالا برای حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی است که کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف برای مدل‌سازی جریان سیال، انتقال حرارت و فرایندهای شیمیایی دارد. این نرم‌افزار بر پایه زبان برنامه‌نویسی سی<sup>۲</sup> نوشته شده است و با بهره‌گیری از روش حجم محدود به حل معادلات می‌پردازد که روش کارآمدی برای حل مسائل دینامیک سیالات محاسباتی است. این نرم‌افزار هم‌اکنون توسط شرکت انسیس<sup>۳</sup> ارائه می‌گردد و با محیط‌های مختلف آن ارتباط متقابل دارد.

---

<sup>۱</sup> Fluent

<sup>۲</sup> C

<sup>۳</sup> ANSYS

مدل هندسی را می‌توان در محیط دیزاین مدلر<sup>۱</sup> یا در سایر نرم افزارهای طراحی مدل که انسیس در فراخوانی، با آن‌ها سازگاری دارد فراخوانی ایجاد کرد. در این پژوهش مدل‌سازی هندسه کلکتور را توسط نرم‌افزار کتیا<sup>۲</sup> طراحی کردیم و به محیط انسیس وارد شده است. بعد از فراخوانی هندسه موردنظر به انسیس، در محیط دیزاین مدلر از لحاظ وجود نقص‌های احتمالی و کیفیت طراحی، کنترل شد. در انتها پس از اعمال تغییرات، هندسه موردنظر را به صورت نهایی ایجاد کردیم.

هندسه ایجاد شده به بخش مشینگ<sup>۳</sup> وارد می‌شود تا شبکه‌بندی شده، سپس کیفیت شبکه‌بندی نیز مورد ارزیابی و کنترل قرار می‌گیرد. با توجه به نوع هندسه برای هر مسئله‌ای گزینه‌های مختلفی برای ایجاد مناسب‌ترین حالت شبکه‌بندی وجود دارد. امکان ایجاد مش‌های مثلثی، مربعی، چهاروجهی، شش‌وجهی، هرمی و همچنین تغییر اندازه شبکه در ناحیه‌ای دلخواه؛ این توانایی را به کاربر می‌دهد که شبکه‌بندی پیچیده و دقیق‌تری ایجاد کند. این ویژگی می‌تواند به کاهش مدت‌زمان حل مسئله و افزایش دقت تحلیل کمک کند.

با توجه به قابلیت‌های این نرم‌افزار جهت تعریف مسئله‌هایی با شرایط پیچیده می‌توان شرایط مرزی مختلفی را برای حل مسائل اعمال کرد که پدیده‌های متنوع به کمک این نرم‌افزار قابل تحلیل می‌باشند. فلونت برای تحلیل کارایی و عملکرد کلکتور مورد مطالعه، روش‌های شبیه‌سازی کامپیوتری متعددی را بکار می‌برد و نرم‌افزار برای راحتی کار، تعریف مسئله، محاسبه و دیدن نتایج، منوهای مختلفی در نظر گرفته است.

---

<sup>1</sup> Design Modeler

<sup>2</sup> Catia

<sup>3</sup> Meshing

### ۳-۴ معادلات حاکم

دینامیک سیالات محاسباتی روشی جهت تحلیل مسائل و پدیده‌های انتقال بوده که برای این منظور، معادلات حاکم بر جریان سیال یا ناویر استوکس<sup>۱</sup> که شامل قانون بقای جرم (معادله پیوستگی)، بقای اندازه حرکت (مومنتوم<sup>۲</sup>) و بقای انرژی است، برای حل مسئله استفاده می‌گردند. این معادلات بر تمام نقاط یک المان از سیال حاکم می‌باشد. در اینجا به دلیل وجود انتقال حرارت از نوع جابجایی طبیعی خالص در محیط بسته، معادلات حاکم به شکل موردنظر مدل‌سازی شده‌اند. این روابط به ترتیب به صورت زیر می‌باشند [۸۳]:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (۱-۳)$$

معادله اندازه حرکت:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (۲-۳)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - g [1 - \beta(T - T_0)] \quad (۳-۳)$$

معادله انرژی:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (۴-۳)$$

در روابط بالا؛ t معرف زمان، ρ دانسیته، ν سرعت سیال، p فشار سیال، g شتاب گرانش و T دما است.

α ضریب نفوذ حرارتی است:

<sup>۱</sup> Navier Stokes

<sup>۲</sup> Momentum

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (5-3)$$

$\beta$  ضریب انبساط حجمی است که معیاری از میزان تغییر چگالی نسبت به تغییرات دما در فشار ثابت می باشد که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial T} \right]_p \quad (6-3)$$

$\beta$  را بر اساس رابطه بوزینیسک، می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} = \beta(T_w - T_{ref}) \quad (7-3)$$

در اینجا  $\rho_0$  نشان دهنده چگالی جریان است،  $T_w$  نشان دهنده دمای متوسط در طول لوله بر اساس شار متوسط تابش شده روی سطح لوله و  $T_{ref}$  نشان دهنده دمای سیال ورودی به مخزن ذخیره سازی (دمای کارکرد) است.

بنابراین در نوشتن این معادلات از مدل بوزینیسک تراکم ناپذیر برای سیال استفاده شده است. به عبارتی، چگالی را در همه جا ثابت در نظر گرفتیم، به جز در جمله نیروی حجمی در معادله اندازه حرکت در راستای  $y$ ، که با جمله  $\rho [1 - \beta(T - T_0)]$  جایگزین شده است.

### ۵-۳ جریان در جابجایی طبیعی

در انتقال حرارت جابجایی طبیعی با افزایش دمای سیال چگالی آن افزایش می یابد و با تغییرات چگالی، نیروی شناوری (بویانسی)<sup>۱</sup> پدید می آید، که سیال را وادار می کند در خلاف شتاب جاذبه زمین شروع به حرکت کند. به عبارتی با افزایش دمایی که به موجب آن گرادیان چگالی در دامنه محاسباتی تغییر یابد، بویانسی ایجاد می شود. غلبه نیروی بویانسی بر نیروی ویسکوز موجب حرکت ذرات سیال در خلاف جهت گرانش می شود. رابطه نیروی بویانسی به صورت زیر است:

---

<sup>1</sup> Buoyancy

$$f_B = (\rho - \rho_\infty) g \quad (۸-۳)$$

که در آن  $f_B$  بیانگر نیروی بویانسی،  $\rho$  چگالی و  $g$  نیروی گرانش است.

بنابراین ایجاد انتقال حرارت جابجایی آزاد در حرکت سیال، داخل یک محفظه بسته، به واسطه اثرات شناوری<sup>۱</sup> یعنی اختلاف چگالی بین دو سیال به وقوع می پیوندد. وقتی که جریان سیال به صورت اجباری حرکت می کند عدد رینولدز نوع رژیم جریان سیال را تعیین می کند، اما در انتقال حرارت جابجایی وقتی جریان به واسطه نیروی شناوری حرکت می کند، حرکت سیال از نوع جابجایی آزاد است و برای تعیین رژیم جریان؛ اینکه آرام یا آشفته است، رینولدز مفهومی ندارد.

در بیشتر مسائل انتقال حرارتی، انتقال حرارت جابجایی هم به صورت طبیعی و هم به صورت اجباری ایجاد می شود، به عبارتی باهم ترکیب هستند. برای تشخیص نوع جابجایی غالب و اینکه بفهمیم چه موقع باید اثرات نیروی شناوری را در محاسبات وارد کنیم، می توانیم از مقدار نسبی اعداد گراشف و رینولدز به صورت زیر استفاده کنیم:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta\Delta TD}{v^2} \quad (۹-۳)$$

که در آن  $Gr$  عدد گراشف،  $Re$  عدد رینولدز،  $g$  شتاب گرانش،  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی،  $\Delta T$  تغییرات دما،  $D$  قطر لوله و  $v$  لزجت سینماتیکی است.

وقتی مقدار نسبی این کسر در یک جریان بزرگتر از یک باشد باید در محاسبات اثرات نیروی شناوری را شرکت داد. در جابجایی طبیعی خالص از اثرات نیروی اینرسی در برابر شناوری صرف نظر می شود. اندازه و قدرت نیروی شناوری با عدد رایلی تعیین می شود که در ادامه به آن می پردازیم.

برای تعیین آشفتگی یا آرام بودن جریان جابجایی آزاد از عدد بی بعد گراشف استفاده می کنیم. این عدد، همانند نقش عدد رینولدز در جابجایی اجباری را، در جابجای طبیعی ایفا می کند. عدد گراشف

---

<sup>1</sup> Buoyancy effects

به صورت نسبت نیروی شناوری به نیروی لزجت بیان می شود. نیروی شناوری همان نیرویی است که جابجایی طبیعی را با بالا رفتن سیال گرم و پایین رفتن سیال سرد ایجاد می کند و در مقابل آن نیروی لزجت سعی دارد که آن را متوقف کند. با محاسبه این نسبت قادر خواهیم بود تا پیش بینی کنیم که جابجایی طبیعی غالب است یا اجباری و سپس می توانیم از روش های ساده تری برای محاسبه انتقال حرارت استفاده کنیم. رابطه عدد گراشف به صورت زیر است:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} \quad (۱۰-۳)$$

که در آن  $Gr$  عدد گراشف،  $g$  شتاب گرانش،  $\beta$  ضریب انبساط حرارتی،  $T_s$  دمای سطح،  $T_\infty$  دمای توده سیال،  $D$  قطر لوله و  $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$  ویسکوزیته سینماتیک است.

برای اینکه بهتر بتوانیم جابجایی اجباری و آزاد را نسبت به هم تفکیک کنیم باید از پارامترهای بی بعد استفاده کنیم. در انتقال حرارت جابجایی آزاد مهم ترین ویژگی عدد رایلی می باشد که نشان دهنده نوع رژیم جریان است. پارامتر بی بعد رایلی نشان دهنده نسبت نیروی شناوری به پخش گرمایی است. گذار در یک لایه مرزی جابجایی آزاد به بزرگی نسبی نیروی شناوری و ویسکوز در سیال بستگی دارد. عدد رایلی می تواند معیاری برای نشان دادن توسعه نیروی شناوری باشد. در کلکتور لوله خلأ چون انتقال حرارت غالب جابجایی طبیعی خالص است، اگر عدد رایلی بیشتر از مقدار  $10^9$  باشد نشان دهنده گذار به آشفتگی در جریان می باشد. که رابطه رایلی به صورت زیر بیان می شود:

$$Ra = Gr Pr = \frac{g\beta}{\nu\alpha}(T_s - T_\infty)D^3 \quad (۱۱-۳)$$

البته درواقع، این عدد گراشف از مرتبه  $10^9$  است که نشان دهنده وقوع گذار در سیالات است اما در سیالاتی که عدد پرانتل از مرتبه ۱ است (مانند هوا)، با توجه به رابطه  $Ra = Gr Pr$ ، می توان این طور بیان کرد که معیار گذار  $Gr \sim 10^9$  بر معیار مرسوم  $Ra \sim 10^9$  منطبق می شود.

در رابطه بالا که بیانگر عدد رایلی برای یک لوله است،  $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$  ضریب پخش دمایی و  $Pr$  عدد بی بعد

پرانتل می باشند.

عدد رایلی را می‌توان به صورت حاصل ضرب اعداد گراشف و پرانتل نیز نوشت. عدد پرانتل بیانگر نسبت نفوذ اندازه حرکت (ویسکوزیته سینماتیک) به نفوذ گرمایی است که به صورت زیر است:

$$Pr = \frac{v}{\alpha} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (۱۲-۳)$$

که در آن  $C_p$  ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت به ازای واحد جرم سیال،  $k$  ضریب هدایت گرمایی و  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی است.

### ۳-۶ مدل آشفته‌گی

جریان توربولانس به حالتی از حرکت سیال گفته می‌شود که همراه با گردابه‌هایی به صورت نامنظم و سه‌بعدی همراه است. در جریان آشفته ترم‌های معادلات ناویر استوکس برحسب زمان و مکان دارای تغییرات نوسانی هستند. آشفته‌گی در انتقال حرارت جابجایی آزاد به دلیل قرار گرفتن جریان سیال تحت نوسانات اندازه چگالی رخ می‌دهد.

معیار تشخیص آشفته‌گی در جریان جابجایی طبیعی، عدد بی‌بعد گراشف ( $Gr = \frac{Ra}{Pr} \geq 10^9$ ) می‌باشد. به خاطر درهم بودن رژیم جریان در محدوده گراشف بحرانی<sup>۱</sup> بررسی شده، در انجام محاسبات عددی برای حل معادلات جریان درهم از مدل دو معادله‌ای  $k-\epsilon$  استفاده می‌گردد. این مدل حل را به سادگی انجام می‌دهد و تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که در اکثر شبیه‌سازی‌ها از آن استفاده شده است. همچنین برای زمانی که جریان همراه با جدایش یا گردایان معکوس است، مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر<sup>۲</sup> توانایی حل بالایی دارد. در ادامه به طور جامع به تشریح مدل‌های حل جریان آشفته موجود در فلوئنت می‌پردازیم و مزایای استفاده از مدل  $k-\epsilon$  تحقق‌پذیر برای مسئله جابجایی طبیعی را شرح می‌دهیم.

● مدل متوسط رینولدز ناویر استوکس

<sup>۱</sup> Critical gerashof

<sup>۲</sup> K-Epsilon Ralizable model

در این تحقیق از مدل‌های متوسط رینولدز ناویر استوکس (RANS)<sup>1</sup> برای حل عددی جریان آشفته در معادلات استفاده می‌شود. روش‌های متوسط رینولدز بر اساس میانگین‌گیری از معادلات ناویر استوکس توسعه‌یافته‌اند، که از یک مدل برای پیش‌بینی اثرات آشفتگی استفاده می‌کند. در مدل متوسط رینولدز، با متوسط‌گیری زمانی از معادلات ناویر استوکس ترم جدیدی به معادلات اضافه می‌شود که تنش رینولدز نام دارد و ماهیت آن از نوع تانسور تنش است. معادلات متوسط‌گیری شده ناویر استوکس بر متوسط جریان حاکم هستند. مدل‌های متوسط رینولدز برای محاسبه معادلات حاکم بر جریان، از روش‌هایی جهت مدل‌سازی و تخمین این ترم استفاده می‌کند.

به‌طور کلی انتخاب مدل آشفتگی برای حل از بین مدل‌های مختلف فلوئنت بر اساس پدیده‌های جریانی غالب در مسئله، میزان دقت محاسباتی، زمان محاسبه و رژیم جریان انتخاب می‌شود. مدل‌های آشفتگی به‌دست‌آمده از معادلات متوسط رینولدز به مدل‌های مختلفی توسعه پیدا کرده است که از جمله مدل‌های پرکاربرد می‌توان به: ۱- مدل‌های صفر معادله‌ای ۲- مدل‌های یک معادله‌ای ۳- مدل‌های دو معادله‌ای ۴- معادلات چهار معادله‌ای ۵- مدل تنش رینولدز<sup>۲</sup> (انتقال تنش) اشاره کرد.

مدل‌های صفر معادله‌ای؛ تنها برای جریان‌های ساده کارایی دارد چراکه این مدل اثرات انتقالی آشفته را در نظر نمی‌گیرند و برای مسائلی که فرایند جابجایی و پخش مهم است مناسب نیست. به‌طور کلی برای اعداد رینولدز پایین و نواحی متأثر از لزجت در داخل لایه مرزی کاربرد دارد.

ساده‌ترین مدل آشفته، مدل‌های دو معادله‌ای می‌باشند که دو معادله انتقال جداگانه را حل می‌کنند تا پارامترهای سرعت آشفتگی و مقیاس طولی را به‌صورت مستقل به دست آورند. مدل دو معادله‌ای شامل دو مدل  $k - \varepsilon$  و  $k - \omega$  است که هر کدام به چند فرم مختلف وجود دارند.

---

<sup>1</sup> Reynolds Average Navier Stokes models

<sup>2</sup> Reynolds stress model

### ۳-۶-۱ مدل آشفتگی $k - \omega$

مدل  $k - \omega$  در دسته معادلات دو معادله‌ای قرار دارد. در این مدل میدان آشفته بر اساس دو متغیر آشفتگی  $k$  و  $\omega$  بیان می‌شود. متغیر  $k$  بیانگر انرژی جنبشی آشفتگی و متغیر  $\omega$  بیانگر نرخ اضمحلال انرژی جنبشی آشفتگی است. در اینجا به تشریح دو نوع مختلف از مدل  $k - \omega$  می‌پردازیم.

#### ● مدل استاندارد $k - \omega$

یکی از انواع مدل‌های  $k - \omega$  آشفتگی، مدل  $k - \omega$  استاندارد<sup>۱</sup> می‌باشد که نسبت به مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد در شبیه‌سازی جریان‌هایی که جدایش ناشی از گرادیان‌های فشار منفی و کاهش سرعت داریم (رینولدز پایین) بهتر عمل می‌کند. به‌طور کلی برای شبیه‌سازی تغییرات آشفتگی در نواحی لایه‌مرزی نزدیک دیواره و پیش‌بینی نقطه جدایش مناسب است. ترم اضافه در معادله انرژی جنبشی این مدل، جریان‌های دارای چرخش زیاد را نشان می‌دهد.

#### ● مدل SST $k - \omega$

مدل آشفتگی SST  $k - \omega$ <sup>۲</sup> به‌منظور فرمول‌بندی دقیق‌تر ایجاد شده است که بدین منظور، مدل  $k - \omega$  در ناحیه نزدیک دیواره با مدل  $k - \varepsilon$  مستقل از جریان آزاد، در نواحی بیرون لایه‌مرزی ترکیب شده‌اند. این مدل پیش‌بینی جریان‌هایی تحت گرادیان فشار معکوس قوی و جدایش را بهبود می‌بخشد. همچنین اغلب با رفتارهای ناپایداری و همگرایی ضعیفی مواجه است.

### ۳-۶-۲ مدل آشفتگی $k - \varepsilon$

مدل  $k - \varepsilon$  معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای می‌باشد که در آن میدان آشفته بر اساس دو متغیر  $k$  و  $\varepsilon$  حل می‌شود. متغیر  $k$  بیانگر انرژی جنبشی آشفتگی است و متغیر  $\varepsilon$  بیانگر نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی

<sup>۱</sup> Standard  $k - \varepsilon$  model

<sup>۲</sup> Shear-Stress Transport

جنبشی آشفتگی است. عملکرد این مدل بر اساس تغییر دادن انرژی جنبشی آشفتگی است. این مدل برای انتقال خواص آشفتگی توسط جابجایی و نفوذ و همچنین برای محاسبه نرخ تولید و اتلاف آشفتگی مناسب است. در اینجا به تشریح سه نوع مختلف از این معادله می‌پردازیم. هر سه مدل شکل‌های مشابهی در معادلات انتقال برای  $k$  و  $\varepsilon$  دارند. تفاوت اساسی تنها در روش محاسبه لزجت آشفتگی و ترم‌های تولید و اتلاف در معادله  $\varepsilon$  است.

● مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد

مدل  $k - \varepsilon$  استاندارد (SKE)<sup>1</sup> مدلی نیمه تجربی بر مبنای مدل کردن معادلات انتقال برای انرژی جنبشی  $k$  و نرخ اتلاف آن  $\varepsilon$  است. این مدل معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای با استفاده از تخمین بوزینیسک می‌باشد که برای طیف وسیعی از مسائل کاملاً آشفته مناسب است. همچنین تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. این مدل برای جریان‌های با گرادیان فشار بالا و جدایش شدید توصیه نمی‌شود. علاوه بر این، برای جریان‌های دارای چرخش بزرگ مناسب نیست و پروفیل‌ها را کشیده‌تر به نمایش می‌گذارد که یکی از ضعف‌های این مدل است. برای این دسته از شبیه‌سازی‌ها باید از مدل‌هایی دیگر مانند  $k - \omega$  استفاده گردد. این مدل برای محاسبه جریان جابجایی آزاد و جریان هوا در فضای بسته داخلی کاربرد دارد. در صورتی از این مدل در کنار مدل بوزینیسک استفاده شود، کارایی این مدل برای شبیه‌سازی بهتر خواهد بود.

● مدل  $k - \varepsilon$  RNG

مدل آشفتگی  $k - \varepsilon$  RNG<sup>2</sup>، بهبودیافته مدل استاندارد است. به واسطه اصلاح معادله  $\varepsilon$  و لحاظ شدن اثر چرخش جریان روی لزجت آشفتگی، توانایی در تحلیل مسائل آشفته تحت کرنش شدید و جریان‌های با سطوح انحناء زیاد بهبود پیدا کرده است. انتقال جرم و مونوم از دیواره در این مدل بهتر شبیه‌سازی

<sup>1</sup> Standard  $k - \varepsilon$  model

<sup>2</sup> Renormalized Group

می‌شود. درحالی‌که مدل استاندارد برای شبیه‌سازی در عدد رینولدز بالا می‌باشد، مدل RNG برای اثرات لزجت در عدد رینولدز پایین هم مناسب می‌باشد. همچنین در مدل‌سازی جریان‌های گذرا توانمند است. به‌طورکلی این مدل نسبت به مدل SKE، عملکرد بهتری در شبیه‌سازی جریان تحت گرادیان‌های فشار معکوس شدید، جدایش و جریان چرخشی دارد. در شبیه‌سازی مسائلی نظیر جریان‌های برشی پیچیده، جدایش لایه‌مرزی، تهویه و جریان‌های وابسته به زمان می‌توان از این مدل استفاده کرد.

#### ● مدل $k - \varepsilon$ تحقق‌پذیر

مدل  $k - \varepsilon$  تحقق‌پذیر<sup>۱</sup> (RKE)، شکل بهبودیافته‌ای از مدل استاندارد است که برای شبیه‌سازی جریان‌های چرخشی و پیچیده مناسب است. در زمان‌هایی که جواب‌های حل مدل استاندارد در مقایسه با نتایج تجربی دقت خوبی ندارند، این مدل می‌تواند مشکل را مرتفع کند. همچنین نسبت به مدل RNG دارای دقت و همگرایی بهتری است. به‌طورکلی در جریان‌های دارای گرادیان معکوس و جدایش بسیار مناسب است. در شبیه‌سازی مسائلی نظیر شبیه‌سازی شناوری، جریان دارای چرخش، جدایش و نرخ کرنش زیاد می‌توان از این مدل استفاده کرد. مدل تحقق‌پذیر در شرایطی که جریان تحت چرخش، انحنای شدید و ورتیسیته است، نسبت به حالت استاندارد نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

هدف نهایی مدل‌های توسعه‌یافته در متوسط‌گیری ناویر استوکس محاسبه دقیق‌ترین مقدار  $\mu_t$  می‌باشد. به‌طورکلی معادلات اصلی  $k$  و  $\varepsilon$  و همچنین سایر روابط در مدل  $k - \varepsilon$  تحقق‌پذیر به‌صورت زیر می‌باشند [۸۴]:

مشخصه‌ی ویسکوزیته گردابه:

$$\mu_t = \rho C_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (۱۳-۳)$$

که در آن:

<sup>۱</sup> Realizable

$$C_u = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (۱۴-۳)$$

معادله انتقالی انرژی جنبشی آشفتگی (k):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (۱۵-۳)$$

معادله انتقالی نرخ اتلاف آشفتگی ( $\varepsilon$ ):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (۱۶-۳)$$

در روابط بالا؛ k انرژی جنبشی،  $\varepsilon$  تلفات انرژی،  $G_k$  ترم تولید انرژی ناشی از گرادیانهای سرعت متوسط جریان،  $G_b$  ترم تولید انرژی ناشی از بویانسی (برای جریانهای بدون جاذبه و انتقال حرارت صفر خواهد بود)،  $Y_M$  ترم تولید انرژی جنبشی ناشی از اثرات تراکمپذیری جریان (برای جریانهای تراکمپذیری صفر است)،  $\sigma_k$  و  $\sigma_\varepsilon$  اعداد پراوتل متناسب با k و  $\varepsilon$  هستند،  $S_k$  و  $S_\varepsilon$  ترمهای چشمه قابل تعریف توسط کاربر هستند [۸۴].

سایر ضرایب ارتباطدهنده عبارتاند از:

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] . \eta = S \frac{K}{\varepsilon} . S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} . C_{1\varepsilon} = 1.44 . C_2 = 1.9 \quad (۱۷-۳)$$

و

$$\sigma_k = 1.2 . U^* \equiv \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}} . \tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (۱۸-۳)$$

و

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k . A_0 = 4.04 . A_s = \sqrt{6} \cos \varnothing \quad (۱۹-۳)$$

با حل معادلات بالا مقادیر انرژی جنبشی و تلفات انرژی تعیین شده و سپس به کمک معادله  $\mu_t$  ویسکوزیته جریان درهم محاسبه می‌گردد. بنابراین با توجه به اینکه جریان غالب در این مسئله از نوع انتقال حرارت جابجایی آزاد هست؛ برای در نظر گرفتن اثر شناوری بر حل مسئله باید از مدل  $k - \epsilon$  تحقق‌پذیر استفاده کنیم.

### ۳-۷ روش حل عددی حجم محدود

به‌طور کلی برای حل معادلات حاکم بر سیال از سه روش حجم محدود<sup>۱</sup>، المان محدود<sup>۲</sup> و اختلاف محدود<sup>۳</sup> برای حل عددی مسائل دینامیک سیالات محاسباتی استفاده می‌شود.

از روش المان‌های محدود یا اجزاء محدود می‌توان برای حل مسائل جامداتی و سازه‌ای استفاده نمود؛ که در آن، هندسه مدل به المان‌های متعددی که در گره‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند، تقسیم می‌گردد. میدان کلی حل در داخل ناحیه حل مسئله با استفاده از توابع درون‌یابی در داخل هر المان تقریب زده می‌شود. این توابع مقادیر حل را در گره‌های المان درون‌یابی می‌نمایند. در انتها با حل یک دسته معادله می‌توان پارامترهای مدنظر را محاسبه نمود.

در روش حجم محدود، انسیس فلونت با استفاده از روشی که بر اساس حجم کنترل است؛ اقدام به تبدیل معادله انتقال اسکالر کلی، به یک معادله جبری می‌کند که می‌توان آن را به‌صورت عددی حل نمود. در این روش ناحیه‌ای از مدل محاسباتی را به تعدادی حجم محدود، یعنی به‌صورت چند سلول تقسیم می‌کنیم و معادلات بقاء را به همه متغیرها در سطح کنترل‌های موجود دامنه محاسباتی اعمال می‌کنیم و در هر سلول مورد محاسبه قرار می‌دهیم. بنابراین یک دستگاه معادلات جبری برای حجم کنترل‌ها و سطح کنترل‌ها گسسته سازی می‌کنیم. معادله گسسته شده بیانگر قوانین بقاء در حجم کنترل مبنا است.

<sup>۱</sup> Finite-Volume Methods (FVM)

<sup>۲</sup> Finite-Element Methods (FEM)

<sup>۳</sup> Finite-Difference Methods (FDM)

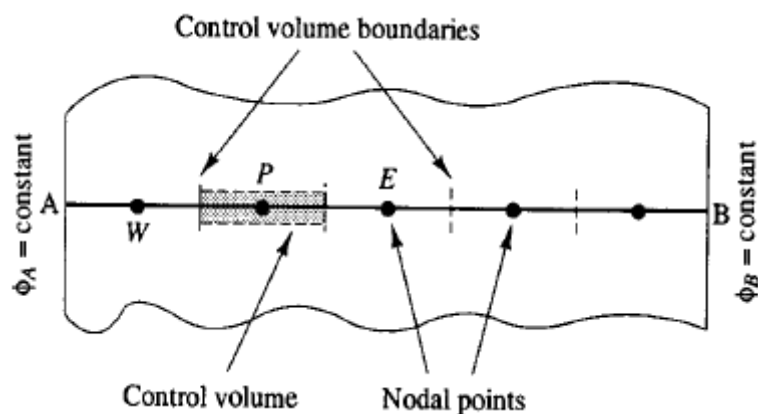
روش حجم محدود بر پایه فرم انتگرالی معادله بقا می‌باشد و قدم ابتدایی برای حل معادله به روش حجم محدود؛ انتگرال‌گیری از معادلات حاکم بر جریان سیال روی تمام حجم کنترل‌های مربوط به میدان حل انجام می‌شود. اگر معادله کلی مومنوم در راستای محور طولی به صورت زیر باشد:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\text{grad} u) + S_{Mx} \quad (20-3)$$

گسسته سازی معادله بقایی بر اساس خاصیت کلی  $\phi$ ، که یک کمیت اسکالر است، را می‌توان به صورت کلی زیر بیان کرد:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho \phi \mathbf{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (21-3)$$

که در آن  $\Gamma$  ضریب انتشار (نفوذ)<sup>۱</sup>،  $S_{\phi}$  ترم چشمه (منبع)<sup>۲</sup> و مقادیر مرزی خاصیت  $\phi$  از یک حجم کنترل می‌باشد که در شکل ۱-۳ بین نقاط A تا B نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ حجم کنترل استفاده شده برای گسسته سازی معادله بقا

این معادله برای انواع روش‌های محاسبات حجم محدود استفاده می‌شود و با جایگذاری خاصیت‌های مختلف به جای خاصیت کلی این معادله می‌توانیم تمام معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای شامل پیوستگی جرم،

<sup>۱</sup> Diffusion coefficient

<sup>۲</sup> Source term

مومنوم و انرژی را به فرم حجم محدود تبدیل کنیم. فرآیندهای جریان شامل اثرات ناشی از جابجایی و نفوذ هستند. پدیده‌های نفوذ در تمام جهات به‌طور مساوی اثر می‌گذارند اما پدیده‌های جابجایی منحصرأ شامل نفوذ در جهت جریان هستند. در اینجا به دنبال معادله شار پخش خالص به همراه تولید یا از بین رفتن خاصیت  $\Phi$  در داخل حجم کنترل هستیم. معادله پایای پخش<sup>۱</sup> از فرم کلی معادله انتقال<sup>۲</sup> با حذف بخش‌های گذرا<sup>۳</sup> و همرفتی<sup>۴</sup> به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$div(\Gamma grad\Phi) + S_{\Phi} = 0 \quad (22-3)$$

در معادله فوق انتگرال روی حجم کنترل که فرآیند کلیدی در حل به روش حجم محدود است که به عبارت زیر منجر می‌شود:

$$\int_{CV} [\nabla \cdot (\Gamma \nabla \Phi) + S_{\Phi}] dv = \int_{CV} div(\Gamma grad\Phi) + \int_{CV} S_{\Phi} dv = 0 \quad (23-3)$$

اساس روش حجم محدود، اعمال تئوری گاوس بر فرم انتگرالی معادله انتقال است.

$$\int_{CV} \nabla \cdot \vec{\Phi} dV = \int_A \vec{n} \cdot \vec{\Phi} dA \quad (24-3)$$

بنابراین انتگرال حجمی درون المان سیال، با انتگرال سطحی که با جمع انتگرال‌ها روی وجوه المان سیال تعیین شده است، جایگزین می‌شود. که در آن جهت بردار  $n$  عمود بر سطح المان  $dA$  است.  $\Phi$  یک خاصیت کلی و  $V$  یک حجم کنترل است.

با اعمال قضیه دیورژانس گاوس<sup>۵</sup> در معادلات بالا داریم:

---

<sup>1</sup> diffusion  
<sup>2</sup> transport  
<sup>3</sup> transient  
<sup>4</sup> convective  
<sup>5</sup> Gauss divergence

$$\int_A \vec{n} \cdot (\Gamma \nabla \Phi) dA + \int_{CV} S_\phi dv = 0 \quad (25-3)$$

که مؤلفه بردار  $\Gamma \nabla \Phi$  در جهت بردار  $\vec{n}$  و عمود بر سطح المان  $dA$  است.

در نتیجه، در روش حجم محدود معادله یک المان یک بعدی، به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) + S = 0 \quad (26-3)$$

این روش همچنین برای به دست آوردن معادلات پخش دو و سه بعدی نیز کاربرد دارد.

### ۳-۸ تولید شبکه

در ریاضیات دو فضای پیوسته و گسسته داریم که برای حل مسائل به روش دینامیک سیالات محاسباتی از فضای گسسته استفاده می شود. در این روش معادلات حاکم بر مسئله در یک فضای گسسته حل می شوند. برای انجام محاسبات در فضای گسسته، ناحیه<sup>۱</sup> حل با شبکه بندی، به چند زیر ناحیه<sup>۲</sup> تقسیم می شود. این زیر ناحیه ها، فضایی شامل سلول ها<sup>۳</sup> و گره هایی<sup>۴</sup> هستند که از برخورد خطوط شبکه ایجاد می شوند. به صورت کلی نیز می توان این گونه بیان کرد که مجموع این سلول ها یک شبکه را تشکیل می دهند.

حال معادلات را در این زیر ناحیه با گسسته سازی حل می کنیم. فضای گسسته شامل شبکه و گره هایی است که با حل دستگاه معادلات خصوصیات مدنظر را در آن شبکه به دست می آید. پس برای شبیه سازی یک مسئله در دینامیک سیالات محاسباتی نیاز به ایجاد شبکه بر روی دامنه حل می باشد.

<sup>1</sup> Domain

<sup>2</sup> Sub-Domain

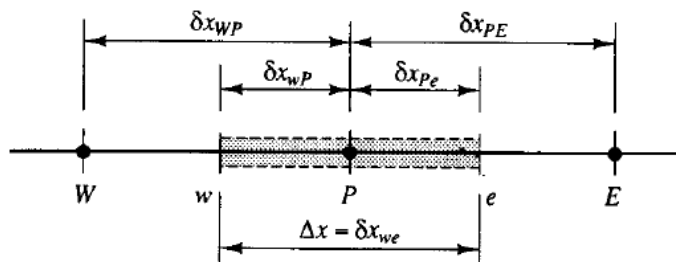
<sup>3</sup> Cells

<sup>4</sup> Nodes

شبکه را در ادبیات علمی مهندسی مکانیک، مش<sup>۱</sup> نیز می‌نامند.

اولین قدم در روش حجم محدود، تقسیم یک ناحیه از میدان جریان به حجم کنترل‌های گسسته است. یعنی دامنه حل به وسیله شبکه به تعدادی محدودی حجم کنترل کوچک تقسیم می‌شود. این شبکه برخلاف شبکه روش تفاضل محدود، که گره‌های محاسباتی را تشکیل می‌دهد، مرزهای حجم کنترل را مشخص می‌کند.

روش معمول در ایجاد شبکه در شکل ۲-۳ نمایش داده شده است. بنابراین مطابق این شکل لازم است تا یک سیستم علامت‌گذاری برای این روش تعیین شود. یک گره در مرکز ناحیه انتخابی به نام P داریم و در همسایگی آن گره‌های W و E را داریم. سطح سمت چپ W و سطح سمت راست e نام‌گذاری می‌شود. اختلاف بین نقاط W و E تا نقطه P همان‌طور که در شکل ۲-۳ مشاهده می‌کنیم،  $\delta x_{WP}$  و  $\delta x_{PE}$  است.



شکل ۲-۳ روش ایجاد شبکه

برای گسسته سازی معادله در نقطه P از فرآیند نفوذ حالت پایا یک‌بعدی مطابق رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$\frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) + S = 0 \quad (27-3)$$

که با انتگرال‌گیری روی حجم کنترل داریم:

<sup>1</sup> Mesh

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\Phi}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S dV = 0 \quad (28-3)$$

پس از انتگرال گیری به فرم دیفرانسیلی زیر خواهیم رسید:

$$\left( \Gamma A \frac{d\Phi}{dx} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{d\Phi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (29-3)$$

در این معادله  $A$  سطح مقطع حجم کنترل و  $\Delta V$  حجم و  $\bar{S}$  مقدار متوسط چشمه روی حجم کنترل است. در گسسته سازی معادلات باید شکلی از تقریب‌های اختلاف محدود را برای عبارت‌های داخل معادله انتگرالی جایگزین کنیم؛ که فرآیندهای جریان مثل جابجایی، نفوذ، و چشمه‌ها را نشان می‌دهد. درواقع برای محاسبه گرادیان‌ها در سطوح حجم کنترل، یک توزیع تقریبی برای خواص بین نقاط گره استفاده می‌شود. این کار معادلات انتگرالی را به دستگاهی از معادلات جبری تبدیل می‌کند. مقادیر درونیابی شده خطی از یک شبکه یکنواخت برای  $\Gamma_w$  و  $\Gamma_e$  به صورت زیر خواهد بود:

$$\Gamma_w = \frac{\Gamma_w + \Gamma_p}{2} \quad (30-3)$$

و

$$\Gamma_e = \frac{\Gamma_p + \Gamma_e}{2} \quad (31-3)$$

بخش‌های شار پخشی نیز به صورت زیر هستند:

$$\left( \Gamma A \frac{d\Phi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left( \frac{\Phi_w - \Phi_p}{\delta x_{PE}} \right) \quad (32-3)$$

و

$$\left( \Gamma A \frac{d\Phi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left( \frac{\Phi_w - \Phi_p}{\delta x_{WP}} \right) \quad (33-3)$$

ترم چشمه ممکن است تابعی از متغیر وابسته باشد و در چنین حالتی می‌توان آن را به فرم خطی زیر بیان کرد:

$$\bar{S}\Delta V = S_u + S_P\Phi_P \quad (34-3)$$

با جاگذاری معادلات بالا در معادله انتگرال‌گیری شده و با فرض وجود تغییرات خطی در معادلات به معادله زیر خواهیم رسید:

$$\Gamma_e A_e \left( \frac{\Phi_w - \Phi_p}{\delta x_{PE}} \right) - \Gamma_w A_w \left( \frac{\Phi_w - \Phi_p}{\delta x_{WP}} \right) + S_u + S_P \Phi_P = 0 \quad (35-3)$$

با مرتب‌سازی به فرم زیر می‌رسیم:

$$\left( \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w - S_P \right) \Phi_P = \left( \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w \right) \Phi_w + \left( \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e \right) \Phi_E + S_u \quad (36-3)$$

اگر ضرایب  $\Phi_w$  و  $\Phi_E$  را  $a_w$  و  $a_E$  تعریف کنیم و ضریب  $\Phi_P$  را  $a_P$  تعریف کنیم، با ساده‌سازی معادله بالا به معادله زیر خواهیم رسید:

$$a_P \Phi_P = a_w \Phi_w + a_E \Phi_E + S_u \quad (37-3)$$

این روش گسسته‌سازی معادله را می‌توان به‌عنوان مرجعی برای حل سایر معادلات نیز بکار برد. برای حل مسئله هر یک گره‌ها باید به ترتیب به فرم معادله بالا گسسته‌سازی شوند. برای حجم کنترل‌هایی که در کنار ناحیه مرزی هستند معادلات گسسته شده اصلی به شرایط مرزی آن‌ها الحاق می‌شود. یعنی هنگامی که مقدار مشخصی از یک متغیر پایستار به خارج از یک حجم کنترل انتقال می‌یابد، همان مقدار به حجم کنترل‌های مجاور داخل می‌شود. البته این به معنای تولید یا نابودی متغیرهای پایستار نیست. در انتها دستگاه معادلات جبری خطی با استفاده از یک روش تکرار حل می‌شود تا توزیع خاصیت  $\Phi$  در هر گره را به دست آوریم.

### ۳-۹ انتقال حرارت تشعشی

تشعشع را می‌توان صورتی از انتشار امواج الکترومغناطیسی در نظر گرفت که می‌تواند انرژی را بین دو محیط جدا از هم منتقل کند. هر ماده‌ای که دمای بالاتر از صفر مطلق دارد، از خود انرژی تابش می‌کند. تشعشع حرارتی شامل محدوده‌ای از طیف موج الکترومغناطیسی است که انرژی گرمایی تولید می‌کند. برخلاف دو مود دیگر انتقال حرارت، خواص تابشی مواد علاوه بر موقعیت مکانی تابعی از طول موج و جهت پرتو نیز هستند.

برای انتقال حرارت تشعشی نیازی به محیط مادی نیست و این عمل می‌تواند در محیط خلأ نیز رخ دهد. بنابراین در کاربردهایی که فضای خلأ داریم انتقال حرارت تشعشی پدیده غالب خواهد بود و باید لحاظ شود. همچنین در محیط‌هایی که دمای بالایی دارند در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی ضروری می‌باشد.

تابش در محیط به دو صورت تابش حجمی و تابش سطحی وجود دارد. در گازها و جامدات نیمه شفاف مانند شیشه و کریستال‌های نمک، تابش یک پدیده حجمی است. به این معنا که تابش کلی ماده از جمع کل تابش‌های مولکول‌های تشکیل‌دهنده آن به دست می‌آید (انتگرال روی کل حجم). علاوه بر این در بیشتر جامدات و مایعات تابش مولکول‌های داخلی به شدت توسط مولکول‌های اطراف جذب می‌گردد. بنابراین، تابش خروجی از این مواد ناشی از تابش مولکول‌هایی است که در فاصله  $1\ \mu\text{m}$  از سطح قرار گرفته‌اند.

### ۳-۱۰ مفاهیم تابشی

در ابتدا لازم است که برخی از مفاهیم تابشی را تشریح کنیم که در ادامه، برای مدل‌سازی از آن‌ها استفاده می‌کنیم. بنابراین، به تشریح این موارد می‌پردازیم:

● شدت تابش

شدت تابش<sup>۱</sup> در مختصات کروی به صورت نرخ انرژی تابشی ساطع شده از یک منبع تابش در طول موج  $\lambda$  در جهتهای  $(\theta, \phi)$  بر ناحیه عمود بر سطح صدور این جهت  $(dA \cos \theta)$ ، بر زاویه فضایی<sup>۲</sup>  $(d\omega)$  و بر واحد طول موج  $(d\lambda)$  تعریف می شود.

$$I_{\lambda} = \frac{dq}{(dA \cos \theta)(d\lambda)(d\omega)} \quad ; \quad dq = \frac{Q}{t} \quad [j/s] \quad (38-3)$$

که در آن  $dq$  شار تابشی است که از نسبت انرژی تابشی (ژول) بر زمان به دست می آید و آن را با واحد وات (W) نشان می دهند.

• توان صدور

نرخ انرژی ساطع شده از یک ماده بر واحد سطح را توان صدور<sup>۳</sup> گویند.

$$dE_{\lambda} = \frac{dq}{dA d\lambda} = I_{\lambda} \cos \theta d\omega \quad (39-3)$$

اگر بخواهیم کل توان صدور را به دست آوریم باید از مجموع شدت تابش  $(I_{\lambda})$  روی کل دامنه موردنظر  $(\theta, \phi)$  انتگرال بگیریم.

$$E_{\lambda} = \int_{\phi} \int_{\theta} I_{\lambda} \cos \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (40-3)$$

بنابراین مجموع شدت تابش را توان صدور می نامیم که هر دو دارای واحد  $\frac{W}{m^2}$  هستند. شدت تابش و توان صدور هر دو همواره تابع طول موج هستند.

• سطح خاکستری

اگر خواص تابشی سطح و یا محیطی به طول موج وابسته نباشد، به آن خاکستری<sup>۱</sup> گویند. عبارت خاکستری یا غیر خاکستری<sup>۲</sup> فقط برای خواص تابشی (قابلیت صدور، عبور پذیری، جذب و بازتابندگی) سطح ماده بکار می رود.

<sup>1</sup> Intensity

<sup>2</sup> Solid Angle

<sup>3</sup> Emissive power

● سطح پخشی<sup>۲</sup> (دیفیوز)

اگر خواص تابشی سطح و یا محیطی به جهت وابسته نباشد، به آن پخشی گویند. که تابش برای یک سطح ایده آل مانند سطح سیاه به صورت پخشی خواهد بود و در غیر این صورت تابش در جهت‌های مختلف متفاوت خواهد بود و بیشترین شدت تابش همواره در راستای محور عمود بر سطح خواهد بود. چون زبری سطح در اغلب قطعات صنعتی باعث ایجاد بازتاب دیفیوز می‌شود، در این کاربردها برای تعیین نوع تابش در دیوارها، حالت دیفیوز مناسب می‌باشد.

● تابش جسم سیاه

جسم (یا سطح) سیاه، یک جسم (یا سطح) ایده آل و پخشی است که تمام پرتوهای فرودی را جذب می‌کند. همچنین هیچ جسمی (سطحی) نمی‌تواند بیشتر از جسم (سطح) سیاه تابش کند.

استفان و بولتزمن توانستند نشان دهند، توان صدور جسم سیاه مطابق رابطه زیر می‌باشد [۸۵]:

$$E_b = n^2 \sigma T^4 ; \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[ \frac{W}{m^2 K^4} \right] \quad (۴۱-۳)$$

که در آن  $n^2$  ضریب شکست محیط است،  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن و  $T$  دما است.

تابش سطحی در محدوده‌ی یک نیم‌کره اعمال می‌شود و برای تابش نیم کره‌ی در محدوده‌ی عملکرد

$$0 \leq \theta \leq \pi/2 \text{ و } 0 \leq \phi \leq 2\pi \text{ داریم:}$$

$$E_b = \pi I_b ; I_b = \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (۴۲-۳)$$

بنابراین اگر دمای مشخصه را داشته باشیم. با استفاده از رابطه فوق می‌توانیم شدت تابش در آن محیط را

محاسبه کنیم. توان صدور جسم سیاه تنها تابع دما است و به ویژگی‌های سطحی ارتباطی ندارد.

● قابلیت صدور<sup>۴</sup> (گسیلندگی)

<sup>۱</sup> Gray surface

<sup>۲</sup> Non-Gray

<sup>۳</sup> Diffuse surface

<sup>۴</sup> Emissivity

هر جسمی به دلیل دمایی که دارد پرتوهایی را که ناشی از انرژی تابشی سطح خود است منتشر می‌کند که صدور<sup>۱</sup> می‌گوییم. جسم‌های واقعی هرگز نمی‌توانند به اندازه‌ی جسم سیاه تابش داشته باشند. بنابراین، تابش جسم واقعی، کسری از تابش جسم سیاه است. ضریب صدور یک سطح واقعی به معنای نسبت تشعشع صادرشده از سطح به تشعشع صادرشده توسط یک جسم سیاه در همان دما می‌باشد.

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (43-3)$$

به این ضریب در اصطلاح قابلیت تابش (گسیلندگی) گفته می‌شود.

$$E = \varepsilon E_b ; \quad I = I_b = \frac{\varepsilon n^2 \sigma T^4}{\pi} \quad (44-3)$$

که در آن  $\varepsilon$  کسری از انرژی تابشی نسبت به جسم سیاه (گسیلندگی) است. همچنین می‌توان طبق رابطه بالا این‌طور برداشت کرد که جسم سیاه تابع طول‌موج است و یک جسم پخشی می‌باشد و تابعیت جهت ندارد. در نتیجه صدور تابش از نوع پخشی می‌باشد که در انسیس فلوننت نیز لحاظ شده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که در سطوح خاکستری، ضرایب صدور و جذب مستقل از طول‌موج هستند و در سطوح پخشی (دیفیوز)، ضرایب صدور و جذب مستقل از جهت هستند.

#### ● تابش فرودی

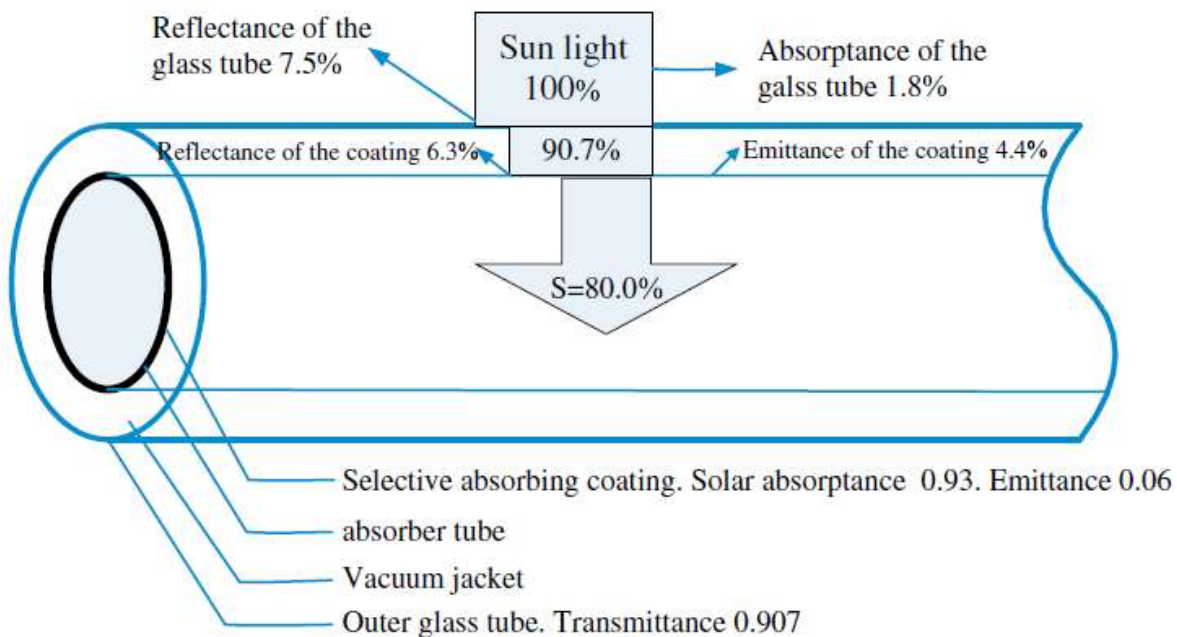
میزان انرژی تابشی واردشده بر واحد یک سطح در واحد زمان به واسطه تابش مستقیم خورشید را تابش فرودی<sup>۲</sup> می‌گویند که همانند تابش خروجی از یک منبع تابشی (مانند مفهوم توان صدور تابش) است که با  $G_\lambda$  نشان می‌دهند.

#### ● خواص تابشی مواد

<sup>1</sup> Emission

<sup>2</sup> incident radiation (Irradiation)

وقتی تابش به سطح یک محیط واقعی برخورد می‌کند، در سه بخش مختلف ممکن است بازتاب شود، جذب شود و یا از آن محیط عبور کند. چگونگی وقوع این فرآیند در هنگام عبور پرتوی خورشیدی از جداره‌ی کلکتور، در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ شماتیک خواص تابشی مواد شفاف در کلکتور لوله خلأ [۹۴]

کسری از انرژی تابشی ورودی که توسط سطح جذب می‌شود را با  $\alpha_\lambda$  نشان می‌دهیم و به آن قابلیت جذب<sup>۱</sup> می‌گوییم. کسری از انرژی تابشی ورودی که توسط سطح بازتابیده می‌شود را با  $\rho_\lambda$  نشان می‌دهیم و به آن قابلیت بازتابندگی<sup>۲</sup> می‌گوییم. کسری از انرژی تابشی ورودی که از سطح یا محیط عبور می‌کند را با  $\tau_\lambda$  نشان می‌دهیم و به آن قابلیت عبور پذیری<sup>۳</sup> می‌گوییم.

مجموع این سه مقادیر باید برابر با یک باشد، بنابراین داریم:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1 \quad (۴۵-۳)$$

<sup>۱</sup> absorptivity

<sup>۲</sup> Reflectivity

<sup>۳</sup> Transmissivity

طبق قانون کیرشهف<sup>۱</sup> بیان می‌شود ضریب جذب و قابلیت صدور باهم برابرند.

$$\alpha_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \quad (۴۶-۳)$$

اما باید به این نکته توجه کرد که ضریب جذب و قابلیت صدور تنها در طول موج‌های مشابه باهم برابرند و در حالت عادی باهم برابر نیستند. بنابراین اگر برای جسمی مانند شیشه که در طول موج‌های متفاوت رفتاری کاملاً متفاوت از خود نشان می‌دهد. شیشه در طول موج‌های پایین (دماهای بالا) کاملاً عبور پذیر است. پس قابلیت جذب بسیار پایینی نزدیک به صفر دارد و در نتیجه صدور پذیری بسیار پایین دارد. اما در دماهای معمولی که طول موج‌های بزرگی را برای ما ایجاد می‌کند (به دلیل اینکه پرتوهای تابیده شده انرژی بالایی ندارد)، شیشه رفتاری کاملاً کدر خواهد داشت. یعنی چیزی را از خود عبور نمی‌دهد و ضرایب جذب و صدور شیشه نزدیک به ۰.۹ خواهد بود، که در بعضی موارد نزدیک به ۱ در نظر می‌گیرند. بنابراین شیشه در کاربردهای خورشیدی که تابش‌های خورشیدی را از خودش عبور می‌دهد، در طول موج‌های انرژی خورشیدی ضرایب جذب و صدور بسیار پایین یعنی نزدیک به صفر دارد. اما برای کاربردهایی که مثلاً پرتو وارد محیط اتاقی شود، آنگاه انرژی خودش را از دست می‌دهد و طول موج بلندتری پیدا می‌کند، شیشه هرگز به آن پرتو اجازه عبور نمی‌دهد و تقریباً تمام آن پرتو را جذب می‌کند. بنابراین در طول موج‌های مربوط به دماهای معمولی (یعنی بین ۳۰۰ تا ۳۳۰ کلوین)، شیشه رفتاری کاملاً کدر از خودش نشان می‌دهد و قابلیت جذب و صدور بسیار بالایی خواهد داشت.

#### ● رادیوسیتی

به مجموع پرتوهای صدور و سهمی از پرتوهای فرودی که بازتابانده می‌شوند در اصلاح رادیوسیتی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. به عبارتی شدت تشعشع خروجی از سطح در واحد زمان رادیوسیتی است.

$$J_{\lambda} = E_{\lambda} + \rho_{\lambda} G_{\lambda} \quad (۴۷-۳)$$

<sup>۱</sup> Kirchhoff's law

<sup>۲</sup> Radiosity

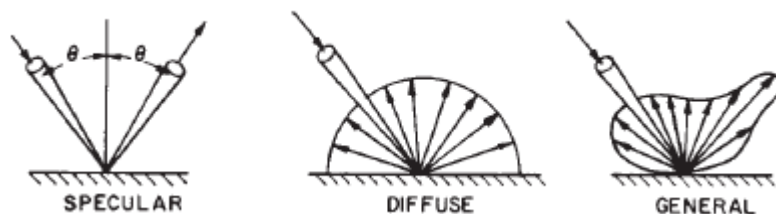
که در آن  $E$  صدور تابش است و  $\rho G$  سهمی از انرژی فرودی است که بازتاب داده می‌شود. و اگر خواص تابشی سطح را به صورت خاکستری در نظر بگیریم (یعنی تابعیت طول موج را از آن بگیریم)، آنگاه:

$$J = E + \rho G \quad ; \quad J = \varepsilon E_b + (1 - \varepsilon) G \quad (3-48)$$

● رفتار پخشی در برابر رفتار جهتی<sup>۱</sup>

تابش ساطع شده از یک محیط (سطح) معمولاً پخشی در نظر گرفته می‌شود. اما بازتاب و عبور پرتو از یک محیط (سطح) می‌تواند پخشی، جهتی (آینه‌ای) و یا تلفیقی از هر دو حالت باشند. تابش جهتی یعنی زاویه پرتوی تابشی و بازتابشی برابر هستند.

اگر سطح کاملاً صاف و صیقلی نباشد، همواره شاهد رفتار پخشی خواهیم بود. بنابراین برای سطوح واقعی همواره تلفیقی از رفتار پخشی و آینه‌ای (جهتی) در نظر می‌گیریم. این کار در انسیس فلونت با استفاده از گزینه‌ی نسبت پخشی<sup>۲</sup> انجام می‌گیرد. همچنین باید به این نکته دقت کنیم که رفتار پخشی یا جهتی صرفاً برای بازتاب یا عبور از محیط حاکم است و برای تنظیم پارامترهای تابشی ضروری است تا آن را لحاظ کنیم. پس برای محیطی که بازتاب و یا عبور پرتو ندارد (تمام پرتوهای تابش را جذب می‌کند) نیاز به تعیین پارامترهای پخشی و آینه‌ای نیست.



شکل ۳-۴ رفتار پرتوی خورشیدی در هنگام بازتابش از سطوح [۸۹]

● سطح کدر

<sup>۱</sup> Diffuse vs Specular

<sup>۲</sup> Diffuse Fraction

سطحی که هیچ پرتویی از آن عبور نکند، سطح کدر<sup>۱</sup> (مات) نامیده می‌شود. به‌طوری‌که با قرار گرفتن در مقابل نور یک سایه در پشت آن تشکیل می‌شود. بنابراین، بخشی از تابش فرودی بعد از برخورد به سطح جذب می‌شود و مابقی انرژی به‌صورت انتشار (همان‌طور که قبلاً گفتیم از نوع پخشی) و بازتاب دیفیوز یا آینه‌ای از سطح خارج می‌شود.

#### ● سطح نیمه شفاف

سطحی که بخشی از پرتو یا کل پرتو فرودی را از خود عبور می‌دهد، سطح نیمه شفاف<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. بخشی از تابش فرودی به این سطح به‌صورت پخشی و آینه‌ای بازتاب می‌کند و بخشی دیگر به‌صورت پخشی و آینه‌ای از سطح عبور می‌کند. همچنین با توجه به خواص نور، اگر پرتویی به‌صورت آینه‌ای از محیطی عبور کند قطعاً با توجه به ضریب شکست آن محیط زاویه پرتو تغییر خواهد کرد. در شبیه‌سازی‌هایی که در آن شیشه بکار می‌رود از سطح نیمه شفاف استفاده می‌شود.

#### ● ضریب دید (ضریب شکل)

ضریب دید<sup>۳</sup> یک پارامتر هندسی است و تنها به هندسه جهت‌گیری، شکل و فاصله‌ی بین دو سطح که تبادل تابش می‌کنند بستگی دارد. این پارامتر به خواص تابشی و جنس ماده ارتباطی ندارد. کسری از انرژی تابشی که از سطح پخشی  $dA_i$  خارج شده و مستقیماً به سطح پخشی  $dA_j$  برخورد می‌کند ضریب دید گفته می‌شود.

رابطه ضریب دید  $F_{ij}$  بین دو سطح که باهم تبادل تابشی می‌کنند را به‌طور کلی می‌توانیم به‌صورت

زیر بنویسیم:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi R^2} dA_i dA_j \quad (۴۹-۳)$$

<sup>۱</sup> Opaque

<sup>۲</sup> Semi-Transparent

<sup>۳</sup> View Factor

از این پارامتر برای در نظر گرفتن اثرات جهت و موقعیت قرار گرفتن سطوح بر روی انتقال حرارت تشعشعی استفاده می‌شود.

#### ● اثر محیط بر انتقال حرارت تابشی

وقتی تابش وارد یک محیط واقعی می‌رسد، آن محیط می‌تواند چند اثر روی پرتو داشته باشد. می‌تواند توسط ذرات محیط جذب شود و یا از مسیر اصلی خودش به مسیرهای دیگر پراکنده (منحرف<sup>۱</sup>) شود. همچنین ذرات سازنده‌ی آن محیط می‌توانند به دلیل داشتن دمای بالاتر از صفر مطلق از خودشان انرژی تابشی صدور (ساطع) کنند و اگر این انرژی ساطع شده از ذرات محیط با پرتوی ورودی به محیط هم‌راستا شوند، آنگاه محیط باعث تقویت پرتوی ورودی شده است. چنین محیطی را که اثراتی را روی پرتوی ورودی می‌گذارد، به‌عنوان محیط فعال<sup>۲</sup> تعریف می‌کنیم.

حال اگر محیط اثرات قابل‌ملاحظه‌ای را روی پرتوهای ورودی نداشته باشد. یعنی جذب سطح ناچیز باشد، صدور محیط ناچیز باشد، پرتوهای ورودی توسط ذرات محیط از راستای اصلی منحرف نشوند و درصد انحراف قابل چشم‌پوشی باشد؛ در این صورت محیط را غیرفعال<sup>۳</sup> می‌نامیم.

### ۳-۱۱ مدل سازی تابش

انسیس فلونت برای گستره‌ی کاربردهای انتقال حرارت تابشی شش مدل مختلف را ارائه می‌دهد که به ما اجازه می‌دهد تابش را در محیط غیرفعال یا محیط فعال در شبیه‌سازی‌های انتقال حرارت مدل‌سازی کنیم. (محیط غیرفعال محیطی است که تأثیری بر انتقال حرارت تابشی نمی‌گذارد).

● مدل تشعشعی انتقالی مجزا<sup>۴</sup> (DTRM)

● مدل تشعشعی P-1

---

<sup>1</sup> Scattering

<sup>2</sup> Participating Medium

<sup>3</sup> Non-Participating Medium

<sup>4</sup> Discrete Transfer

• مدل تشعشعی روسلند (Roseland)

• مدل تشعشعی سطح به سطح<sup>۱</sup> (S2S)

• مدل تشعشعی جهت‌های مجزا<sup>۲</sup> (DO)

• مدل تشعشعی مونت کارلو<sup>۳</sup> (MC)

در این مدل‌های تابشی می‌توان سطوحی که گرمایش یا سرمایش در آن‌ها به واسطه تابش ایجاد می‌شود و چاه‌ها یا چشمه‌های حرارتی که در اثر تابش داخل فاز سیال به وجود می‌آیند را با استفاده از یکی از مدل‌های تابشی در شبیه‌سازی فرایند تابش لحاظ کنیم. علاوه بر این مدل‌های تابشی، انسیس فلونت یک مدل بار خورشیدی نیز ارائه می‌کند که به ما امکان می‌دهد اثرات تابش خورشیدی را در شبیه‌سازی خود در نظر بگیریم.

#### • معادله انتقال تابشی

معادله انتقال تابشی (RTE) برای یک محیط فعال که جذب‌کننده، صادرکننده و پخش‌کننده در موقعیت  $\vec{r}$  و جهت  $\vec{s}$  است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = a \frac{n^2 \sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (50-3)$$

که در آن  $\vec{r}$  بردار مکان،  $\vec{s}$  بردار جهت،  $\vec{s}'$  بردار جهت پخش،  $s$  طول مسیر،  $a$  ضریب جذب (اثر تضعیفی جذب پرتو)،  $\sigma_s$  ضریب پخش (اثر تضعیفی پراکندگی از مسیر)،  $n$  ضریب شکست محیط،  $\sigma$  عدد ثابت استفان بولتزمن ( $5.669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$ )،  $I$  شدت تابش که به جهت‌های  $\vec{r}$  و مکان  $\vec{s}$  وابسته است،  $T$  دمای محلی،  $\Phi$  تابع فاز پراکندگی و  $\Omega'$  زاویه فضایی بر اساس استرادیان است.  $(a + \sigma_s)$  ضخامت

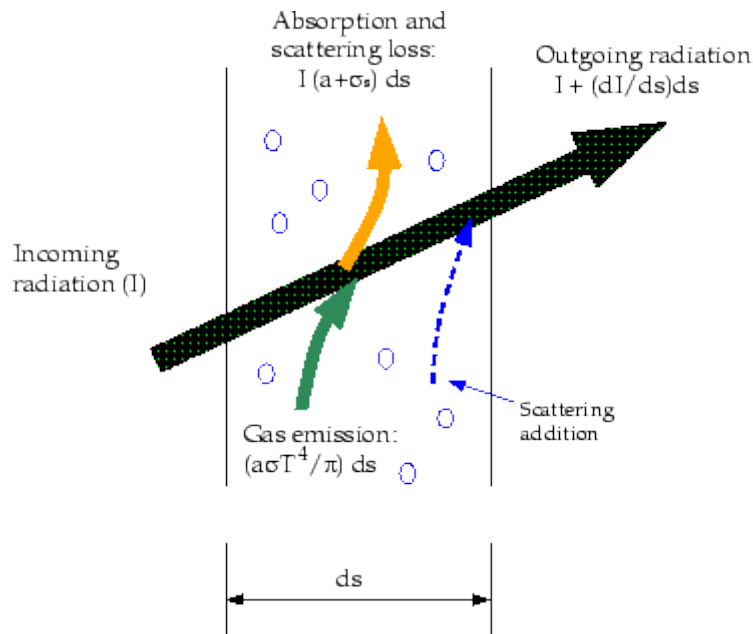
<sup>1</sup> Surface to Surface

<sup>2</sup> Discrete Ordinates

<sup>3</sup> Monte Carlo

<sup>4</sup> Radiative Transfer Equation

نوری<sup>۱</sup> یا کدري<sup>۲</sup> محیط است که تضعیف شدت پرتو را نشان می‌دهد. ضریب شکست  $n$  وقتی مهم است که تشعشع در محیط‌های نیمه شفاف در نظر گرفته شود.



شکل ۳-۵ فرآیند انتقال حرارت تابشی در محیط فعال [۸۴]

در انسیس فلونت تمام مدل‌هایی که برای مدل‌سازی تابش بیان می‌شوند (به‌غیر از مدل سطح به سطح که یک معادله‌ی ماتریسی را حل می‌کند)، روش‌هایی برای حل معادله انتقال تابشی هستند. همچنین این معادله جز در موارد بسیار محدود و تحت شرایط بسیار خاص حل تحلیلی ندارد و پژوهشگران به دنبال یافتن روش‌های مختلف عددی برای حل این معادله هستند.

می‌دانیم معادله‌ی انتقال انرژی در شکل کلی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot (k \nabla T) - P \nabla \cdot V + \mu \Phi + S_h \quad (51-3)$$

که در آن  $\Phi$  ترم استهلاک است و  $S_h$  بیانگر ترم چشمه است.

در انتقال حرارت تابشی، ترم چشمه به‌صورت  $-\nabla \cdot q_{rad}$  است. بنابراین وقتی می‌خواهیم انتقال حرارت تابشی را محاسبه کنیم، همه‌ی مدل‌های تابشی در حال حل کردن معادله انتقال تابش هستند تا

<sup>1</sup> Optical Thickness

<sup>2</sup> Opacity

ترم چشمه را به دست آورند.

### ۳-۱۱-۱ تئوری مدل تابش سطح به سطح ( $S2S$ )

برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تابشی در ناحیه‌ای بسته و بدون وجود محیط فعال در آن، مانند سیستم‌های کلکتور خورشیدی، مدل سطح به سطح مناسب است.

در روش سطح به سطح، تبادل تابش بین سطوح به صورت خاکستری، پخشی و کدر فرض می‌شوند. بنابراین به دلیل فرض خاکستری و کدر بودن قابلیت جذب و میزان صدور باهم برابر خواهند بود به عبارتی ( $\alpha = \epsilon$ ) است. در گذشته گفتیم که ضریب جذب و صدور در یک طول‌موج خاص باهم برابرند اما از آنجاکه سطوح خاکستری فرض شدند تابعیت طول‌موج نخواهند داشت و همواره قانون کریشف<sup>۱</sup> برقرار است. برای یک سطح پراکنده، بازتاب مستقل از جهت‌های خروجی یا ورودی است.

در این مدل تبادل انرژی تابشی بین سطوح عملاً تحت تأثیر محیطی که آن‌ها را از هم جدا می‌کند قرار ندارد. بنابراین، با توجه به مدل جسم خاکستری، اگر مقدار معینی از انرژی تابشی ( $E$ ) به یک سطح برخورد کند، کسری ( $\rho E$ ) منعکس می‌شود، کسری ( $\alpha E$ ) جذب می‌شود و کسری ( $TE$ ) منتقل می‌شود. از آنجایی که برای اکثر کاربردهای صنعتی سطوح موردنظر مسئله نسبت به تابش حرارتی کدر هستند (در طیف مادون قرمز)، سطوح را می‌توان کدر در نظر گرفت. بنابراین، قابلیت عبور<sup>۲</sup> را در جسم کدر می‌توان نادیده گرفت ( $\tau = 0$ ).

در این مدل سطح کدر فرض می‌شود، پس ضریب عبور نداریم و از پایستگی انرژی خواهیم داشت:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (۵۲-۳)$$

علاوه بر این قابلیت انتشار برای جسم خاکستری برابر با قابلیت جذب است ( $\alpha = \epsilon$ )، بنابراین ضریب بازتابش به صورت زیر نتیجه خواهد بود:

<sup>۱</sup> Kirchhoff's law

<sup>۲</sup> Transmissivity

$$\rho = 1 - \varepsilon \quad (53-3)$$

در نتیجه برای سطح کدر در این روش تنها لازم است مقدار ضریب صدور را مشخص کنیم.

تبادل تابش صدوری خالص در یک سطح را می‌توانیم به صورت زیر بیان کنیم:

$$q_i = \frac{E_{b,i} - J_i}{R_i} \quad (54-3)$$

که در آن  $E_{b,i}$  تابش جسم سیاه،  $J_i$  رادیوسیتی (شدت تشعشع خروجی از سطح در واحد زمان) و عبارت  $R_i$  در اصطلاح مقاومت سطحی نامیده می‌شود.

$$q_i = \frac{E_{b,i} - J_i}{(1 - \varepsilon_i)/\varepsilon_i A_i} \quad (55-3)$$

همچنین تبادل خالص انرژی تشعشعی بین دو سطح  $i$  و  $j$  به صورت زیر می‌باشد:

$$q_{ij}[w] = \frac{J_i - J_j}{R_{ij}} \quad ; \quad q_{ij} = \frac{J_i - J_j}{\frac{1}{A_i F_{ij}}} \quad (56-3)$$

که در آن  $F_{ij}$  ضریب دید و  $J_j$  رادیوسیتی سطح هستند. عبارت  $R_{ij}$  در اصطلاح مقاومت فضایی نامیده می‌شود.

به طور کلی اگر محیط مداخله‌ای در تابش نداشته باشد به عبارتی یک محیط غیرفعال داشته باشیم و سطوح پخشی، خاکستری و کدر باشند، آنگاه تابش‌ها را می‌توان به صورت یک مدار الکتریکی مدل کرد. بنابراین تابش جسم سیاه باید از یک مقاومت سطحی عبور کند تا به حالت ایده آل نزدیک شود و به نسبت مقاومتی که بین آن سطح و سطوح دیگر قرار گرفته است، شار تابشی به سمت آن‌ها ارسال می‌کند. مدل تابش سطح به سطح را می‌توان برای محاسبه تبادل تابش در محفظه‌ای از سطوح پخشی خاکستری استفاده کرد. تبادل انرژی بین دو سطح تا حدی به اندازه، فاصله و جهت آن‌ها بستگی دارد. این پارامترها توسط یک تابع هندسی به نام "ضریب دید" محاسبه می‌شوند.

مدل سطح به سطح نمی‌تواند اثرات محیط بر روی تابش را در نظر بگیرد. بنابراین صرفاً برای مسائلی قابل استفاده خواهد بود که خلأ کامل داشته باشیم. پس در این صورت محیط هیچ اثری را روی پرتوهای

ورودی ندارد. یا اینکه محیط اثر قابل ملاحظه‌ای را روی پرتوها نداشته باشد.

فرض اصلی مدل S2S این است که هرگونه جذب، انتشار یا پراکندگی (انحراف از مسیر) پرتو را در طول مسیر تابش می‌توان نادیده گرفت. به عبارتی انتقال تشعشع را در یک محیط غیرفعال در نظر می‌گیرد. بنابراین، فقط تابش "سطح به سطح" باید برای تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شود. این روش به زمان کمتری در هر تکرار برای محاسبه تابش نیاز دارد.

### ۳-۱۱-۲ مدل بار خورشیدی

انسیس فلونت یک مدل بار خورشیدی<sup>۱</sup> را ارائه می‌دهد که می‌تواند برای محاسبه اثرات تابش پرتوهای خورشید که وارد یک میدان محاسباتی می‌شوند، استفاده شود. در این مدل برای وارد کردن انرژی خورشیدی به‌طور مستقیم به مرز، دو حالت مختلف ردیابی پرتو خورشیدی<sup>۲</sup> و شدت تابش ورودی راستهای مجزا (DO<sup>۳</sup>) وجود دارد. در ردیابی پرتو خورشیدی، بارهای خورشیدی را به‌عنوان چشمه‌های حرارتی<sup>۴</sup> در نظر می‌گیرد و آن‌ها را در معادله انرژی وارد می‌کند. ولی در روش شدت تابش ورودی DO؛ می‌توان به‌طور مستقیم جهت پرتو نور خارجی (نور خورشید) و پارامترهای شدت تشعشع ورودی را وارد کرد. بنابراین شار تابشی مستقیماً به دیوارهای نیمه شفاف (که ما مشخص می‌کنیم) به‌عنوان یک شرط مرزی اعمال می‌شود و انتقال حرارت تابشی از حل معادله انتقال تابشی DO به دست می‌آید. برای تابش DO در دیوارهای نیمه شفاف، لازم است تابش مستقیم، تابش پراکنده و جهت پرتو به‌عنوان ورودی تعیین شوند.

از طرف دیگر در مدل بار خورشیدی یک ابزار محاسبه کننده خورشیدی قرار گرفته است که می‌تواند برای تعیین موقعیت خورشید و جهت تابش در آسمان برای یک‌زمان از روز، تاریخ و وضعیت مکانی معین

---

<sup>1</sup> Solar Load Model

<sup>2</sup> Solar Ray Tracing

<sup>3</sup> Discrete Ordinates Irradiation

<sup>4</sup> Heat Sources

استفاده شود. این مقادیر را می‌توان به‌عنوان ورودی به مدل ردیابی پرتو خورشیدی یا به‌عنوان شرایط مرزی دیوار نیمه شفاف برای مدل شدت تابش ورودی راس‌های مجزا استفاده کرد.

#### ● محاسبه‌کننده خورشیدی

انسیس فلونت دو روش برای محاسبه بار خورشیدی ورودی ارائه می‌دهد: روش شرایط آسمان صاف<sup>۱</sup> که بار خورشیدی را کمی غیردقیق محاسبه می‌کند و روش تئوری بیشینه<sup>۲</sup> که توسط موسسه استاندارد آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر آمریکا (NREL<sup>۳</sup>) تهیه شده است. اگرچه این روش‌ها مشابه هستند، اما یک تفاوت اساسی وجود دارد. روش شرایط آسمان صاف میرایی بیشتری را بر بار خورشیدی تحمیل می‌کند، که برای شرایط جوی نسبتاً صاف و نه کاملاً صاف و پاک مناسب است و توسط استاندارد سازمان انرژی (انجمن گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع آمریکا)<sup>۴</sup> ارائه شده است [۸۶].

ورودی‌های موردنیاز برای محاسبه‌کننده خورشیدی شامل، موقعیت جهانی (طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، منطقه زمانی)، تاریخ و زمان شروع، جهت مش، روش تابش خورشیدی و فاکتور پرتو خورشید است.

موقعیت جهانی شامل عرض جغرافیایی، طول جغرافیایی و منطقه زمانی نسبت به گرینویچ است. زمان روز برای یک شبیه‌سازی گذرا، زمان شروع به‌اضافه زمان جریان<sup>۵</sup> است. برای جهت‌گیری مش، باید بردار جهت شمال و شرق شبکه را در سیستم مختصات شبکه محاسباتی (دامنه محاسباتی مسئله) مشخص کنیم. روش پیش‌فرض تابش خورشیدی، شرایط آب و هوایی صاف است. همچنین می‌توان روش تئوری بیشینه را انتخاب کنیم. ضریب تابش آفتاب<sup>۶</sup> صرفاً یک پارامتری است، که ابری بودن هوا و تأثیر آن بر کاهش شدت بار را به‌صورت خطی و ساده محاسبه می‌کند.

---

<sup>1</sup> Fair Weather Condition

<sup>2</sup> Theoretical Maximum

<sup>3</sup> National Renewable Energy Laboratory

<sup>4</sup> ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)

<sup>5</sup> flow time

<sup>6</sup> Sunshine Factor

هر زمان دستور شروع به حل توسط محاسبه کننده خورشیدی را تأیید کنیم در نهایت مقادیر زیر توسط محاسبه کننده خورشیدی محاسبه می‌شوند و برای ما نمایش داده می‌شود:

• بردار جهت خورشید

• کسر آفتاب

• تابش عمودی مستقیم خورشیدی معمولی در سطح زمین

• تابش پراکنده خورشید - سطح عمودی و افقی

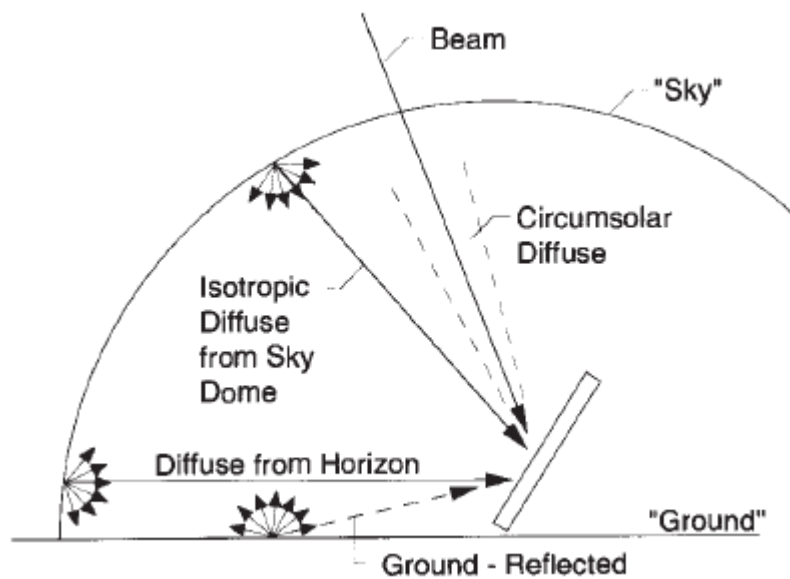
• تابش خورشیدی منعکس شده (پراکنده) زمین - سطح عمودی

زمانی که روش شرایط آسمان صاف انتخاب شود، تابش مستقیم خورشیدی عمود با استفاده از روش استاندارد اشری در شرایط آسمان صاف محاسبه می‌شود [۸۶]. زمانی که روش تئوری بیشینه انتخاب شود، مقادیر تابش مستقیم خورشیدی عمود و تابش خورشیدی پراکنده با استفاده از روش تئوری بیشینه آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر آمریکا محاسبه می‌شود. در حقیقت، این مقادیر بعید است به دلیل شرایط جوی تجربه شوند.

انسیس فلونت مؤلفه‌های تابش خورشیدی پراکنده (عمودی و افقی) را به صورت داخلی برای هر وجه در دامنه محاسباتی محاسبه می‌کند. هنگامی که روش تئوری بیشینه انتخاب می‌شود، مقادیر تابش پراکنده تخمین‌هایی را برای حداکثر اثرات سطح افقی و عمودی ارائه می‌دهد.

### ۳-۱۱-۳ تئوری محاسبه بار خورشیدی

کلکتور لوله خلأ در شرایط آسمان صاف، سه مؤلفه از تابش خورشیدی شامل تابش مستقیم، پراکنده و بازتابش شده از زمین را دریافت می‌کند. این سه مؤلفه تابشی را می‌توان در شکل ۳-۵ مشاهده کرد.



شکل ۳-۶ مؤلفه‌های تابشی مستقیم، پراکنده و بازتاب شده از سطح زمین برای یک سطح شیب‌دار [۸۹]

معادله تابش مستقیم عمود با استفاده از روش شرایط آب و هوایی صاف می‌باشد که از استانداردهای اشری گرفته شده است [۸۶]:

$$G_D = \frac{A}{\frac{B}{e^{\sin(\beta)}}} \quad (۳-۵۷)$$

در رابطه فوق؛  $A$  تابش خورشیدی آشکار در جرم هوا ( $m = 0$ ) و  $B$  ضریب اتلاف اتمسفری هستند. این مقادیر بر اساس سطح زمین در یک روز صاف است.  $\beta$  زاویه فراز خورشیدی<sup>۱</sup> (برحسب درجه) بالای افق است.

انسیس فلونت یک مدل بار خورشیدی برای حل معادله انتقال تابشی<sup>۲</sup> ارائه می‌دهد. این مدل تابش مستقیم خورشید و تابش خورشیدی پراکنده را محاسبه می‌کند. معادله تابش مستقیم خورشیدی که برای روش بیشینه تئوری استفاده می‌شود با استفاده از استاندارد موقعیت خورشیدی آزمایشگاه ملی انرژی تجدید پذیر آمریکا محاسبه شده است:

<sup>۱</sup> altitude angle

<sup>۲</sup> Radiative Transfer Equation

$$G_D = \text{SetrnSunprime} \quad (58-3)$$

که در آن Setrn تابش خورشیدی مستقیم عمود خارج از جو زمین و Sunprime ضریب تصحیحی است که کاهش بار خورشیدی داخل جو زمین را در نظر می‌گیرد.

محاسبه بار پراکنده در مدل خورشیدی بر اساس رویکرد پیشنهادشده در استاندارد اشری است. معادله تابش پراکنده خورشید بر روی سطح عمودی به شرح زیر می‌باشد:

$$G_d = \text{CYG}_D \quad (59-3)$$

که در آن C ثابتی وابسته به ماه است که مقادیر آن در جدول ۷ از فصل ۳۰ کتاب استاندارد اشری آورده شده است. Y نسبت تابش پراکنده آسمان در یک سطح عمودی به سطح افقی است (به‌عنوان تابعی از زاویه برخورد در نظر گرفته‌شده). و  $G_D$  تابش مستقیم عمود در سطح زمین در یک روز صاف است.

معادله تابش پراکنده خورشید برای سطوحی غیر از سطوح عمودی با استفاده از معادله زیر به دست می‌آید:

$$G_d = \text{CG}_D \frac{1 + \cos\theta}{2} \quad (60-3)$$

که در آن  $\theta$  زاویه شیب سطح (برحسب درجه) برای صفحه افقی است.

معادله تابش خورشیدی منعکس‌شده از زمین بر روی یک سطح به‌صورت زیر به‌دست آمده است.

$$G_r = G_D(C + \sin\beta)\rho_g \frac{1 - \cos\theta}{2} \quad (61-3)$$

که در آن  $\rho_g$  بازتابش زمین است و مجموع تابش پراکنده روی سطح معین به‌صورت مجموع معادلات  $G_d$  و  $G_r$  خواهد بود وقتی ورودی تابش پراکنده خورشید از ماشین حساب خورشیدی گرفته شود. در غیر این صورت، اگر گزینه ثابت در کادر محاوره‌ای تابش انتخاب شود، سپس کل تابش پراکنده همان چیزی خواهد بود که به‌عنوان پیش‌فرض مشخص شده است.

## ۱۲-۳ محاسبه تابش خورشید روی سطح شیب‌دار

برای تخمین تابش دریافتی بر مبنای داده‌های اندازه‌گیری شده، مدل‌های مختلفی ارائه شده است. برای ارزیابی تنوع این مسئله می‌توان از رابطه مدل غیر همسانگرد<sup>۱</sup> که مدلی بهبودیافته و کامل است، استفاده کرد تا مقدار شدت تابش بر روی سطح یک کلکتور لوله خلأ شیب‌دار که نسبت به محور افقی تحت زاویه  $\beta$  قرار دارد را محاسبه کنیم.

پژوهشگران روابط تجربی مختلفی را برای محاسبه تابش فرودی همسانگرد و ناهمسانگرد ارائه دادند. دیویس و های در سال ۱۹۸۰؛ رابطه تجربی مدل ناهمسانگرد را برای مؤلفه‌های تابش فرودی بر یک سطح شیب‌دار به صورت زیر ارائه دادند [۸۷].

$$G_T = (G_b + G_a A_i) R_b + G_a (1 - A_i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (G_b G_a) \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (۶۲-۳)$$

در رابطه فوق  $G_T$  تابش روی سطح شیب‌دار،  $G_b$  تابش مستقیم،  $G_a$  تابش پراکنده،  $\beta$  زاویه شیب کلکتور نسبت به سطح افقی،  $\rho_g$  ضریب بازتابش زمین و  $R_b$  نسبت تابش مستقیم روی سطح شیب‌دار به سطح افقی می‌باشند.

$A_i$  شاخص ناهمسانگردی<sup>۲</sup> و تابع عبور تشعشع مستقیم از اتمسفر است. هنگامی که تابش مستقیم نداشته باشیم،  $A_i$  صفر خواهد بود و محاسبات تابش مانند مدل تابش پخش همسانگرد<sup>۳</sup> خواهد بود. این شاخص سهمی از تابش پراکنده افقی را تعیین می‌کند که به آن تابش پراکنده تابیده از جو گفته می‌شود.

$$A_i = \frac{G_{bn}}{G_{on}} = \frac{G_b}{G_o} \quad (۶۳-۳)$$

که در آن  $G_{on}$  تابش خارج از جو عمود بر صفحه و  $G_{bn}$  تابش مستقیم عمود بر صفحه است.

در رابطه (۶۲-۳)،  $\rho_g$  ضریب بازتابش زمین است که برای زمین مسطح معمولی حدود ۰٫۲ است.

<sup>۱</sup> Anisotropic model

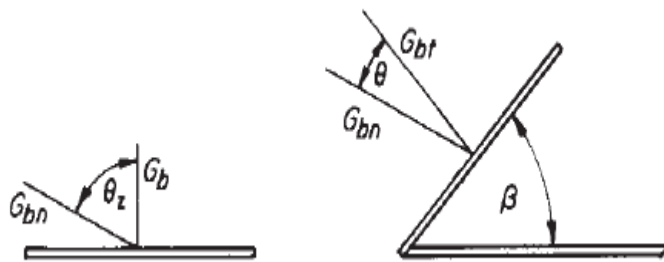
<sup>۲</sup> Anisotropy

<sup>۳</sup> Isotropic diffuse model

ضریب  $R_b$  نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$R_b = \frac{G_{b.T}}{G_b} = \frac{G_{b.n} \cos \theta}{G_{b.n} \cos \theta_z} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (۶۴-۳)$$

که  $\theta$  زاویه تابش نسبت به خط عمود بر صفحه شیب‌دار و  $\theta_z$  زاویه تابش نسبت به خط عمود بر صفحه، مطابق شکل (۲-۳) به دست می‌آیند.



شکل ۲-۳ تابش مستقیم روی سطح افقی و شیب‌دار [۸۹]

معادله حاکم ارائه‌شده برای مدل تابشی غیر همسانگرد است، که بیان‌کننده میزان کل تابش دریافتی اعم از پراکنده (همسانگرد و غیر همسانگرد)، مستقیم (همسانگرد و غیر همسانگرد) و بازتابش از محیط روی یک سطح شیب‌دار در آسمان صاف می‌باشد.

### ۳-۱۳ آنالیز عملکرد حرارتی کلکتور

برای تعیین عملکرد کلکتور بر مبنای بیان تعادل انرژی در قانون اول ترمودینامیک داریم:

$$E_{in} = E_{out} \quad (۶۵-۳)$$

<sup>1</sup> Incident angle

<sup>2</sup> Zenith angle

انرژی تولیدشده برابر با انرژی جذبشده است. میزان انرژی لازم برای افزایش دمای سیال کاری برابر با میزان انرژی جذبشده توسط کلکتور خورشیدی است. انرژی مفید تولیدشده را می‌توان به صورت  $Q_u$  نشان داد.

$$Q_u = m \cdot C_p [T_o - T_i] \quad (۶۶-۳)$$

که،  $m$  نرخ جرمی جریان برای سیال کاری هوا،  $C_p$  گرمای ویژه سیال عامل،  $T_i$  دمای هوای ورودی،  $T_o$  دمای هوای خروجی از کلکتور است.

هنگامی که انرژی تابشی خورشید به وسیله کلکتور جذب می‌شود از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$Q_u = A_c F_R [G_t (\tau \alpha)_{av} - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (۶۷-۳)$$

که در آن،  $A_c$  مساحت سطح کلکتور،  $F_R$  فاکتور جابجایی حرارت،  $G_t$  تشعشع خورشید،  $(\tau \alpha)_{av}$  مقدار ضریب عبور در ضریب جذب مؤثر تابش (بر اساس نسبت تابش مستقیم، پخش و بازتاب از زمین)،  $U_L$  ضریب اتلاف حرارتی کلی کلکتور،  $T_{fi}$  دمای سیال ورودی به کلکتور و  $T_a$  دمای محیط است. در رابطه فوق  $F_R U_L$  به معنای چگونگی اتلاف حرارت و  $F_R (\tau \alpha)_{av}$  به معنای چگونگی جذب حرارت است.

در رابطه (۳-۴۱)، افت حرارتی کلکتور را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$Q_L = S - Q_u = U_L A_c (T_p - T_a) \quad (۶۸-۳)$$

که در آن  $U_L$  ضریب اتلاف حرارت کلی در سطح  $A_c$ ،  $T_p$  دمای سطح جاذب،  $S$  مقدار انرژی جذبشده توسط پوشش جذب‌کننده انتخابی و  $Q_u$  مقدار خالص گرمای جذبشده توسط سیال عامل است.

ضریب اتلاف حرارتی کلی برای کلکتور لوله خلأ را می‌توان به شکل زیر نشان داد:

$$U_L = U_t + U_e \quad (۶۹-۳)$$

که در آن  $U_t$  ضریب تلفات حرارتی سطح جاذب و  $U_e$  ضریب تلفات حرارتی سر<sup>۱</sup> لوله می باشد.

راندمان کلکتور خورشیدی به صورت نرخ انرژی مفید کسب شده توسط سیال کاری به تشعشع

خورشیدی ورودی به سطح کلکتور تعریف می شود.

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c G_t} \quad (70-3)$$

که در آن  $\eta_c$  راندمان کلکتور،  $Q_u$  گرمای مفید دریافت شده توسط سیال کاری و  $A_c = 2DL$  مساحت سطح کلکتور است.

با استفاده از معادله ۳-۴۰ و ۳-۳۹ راندمان لحظه ای کلکتور را می توانیم به این شکل بنویسیم:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A_c G_t} = \frac{m \cdot C_p [T_o - T_i]}{A_c G_t} \quad (71-3)$$

و

$$\eta_i = \frac{A_c F_R [G_t (\tau \alpha) - U_l (T_{fi} - T_a)]}{A_c G_t} \quad (72-3)$$

این معادلات بر اساس استاندارد ASHRAE/ANSI 93-2003 می باشد، که توسط استاندارد اتحادیه اروپا

EN12975-1:2000 و EN12975-1:2001 پذیرفته شده است. نتایج روش های آزمون استاندارد بر اساس

میانگین گیری از دمای ورودی و خروجی سیال به کلکتور به دست می آید.

$$\eta_i = F_{av} (\tau \alpha) - \frac{F_R U_l (T_{f,av} - T_a)}{G_t} \quad (73-3)$$

روش هایی برای بهبود داده های آزمایشی نیز می توان ایجاد کرد. برای مثال دانکل و کوپر در سال ۱۹۸۱؛

تحلیل یک کلکتور غیرخطی را ارائه دادند، که در آن ضریب تلفات کلی را به شکل تابع خطی از اختلاف

دما بین سیال و محیط در نظر گرفتند [۸۸].

$$F_R U_l = a + b(T_i - T_a) \quad (74-3)$$

---

<sup>1</sup> header

تا زمانی که  $U_l$  ثابت باقی بماند، معادله راندمان کلکتور بر اساس تابعی از  $\frac{(T_{fi}-T_a)}{G_t}$  می‌تواند ایجاد شود و

رابطه خطی بین هر دو پارامتر، می‌تواند در معادله راندمان کلکتور به صورت زیر بیان شود:

$$\eta_i = F_R(\tau\alpha) - a \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_t} - b \frac{(T_{fi} - T_a)^2}{G_t} \quad (75-3)$$

که  $F_R(\tau\alpha)$  بیشینه‌ی راندمان کلکتور،  $a$  و  $b$  ثابت‌های اختلاف دمایی وابسته به ضریب انتقال حرارت

هستند. گاهی اوقات نیز بجای ضرایب  $F_R$ ،  $a$  و  $b$  از نمادهای  $\eta_0$ ،  $a_1$  و  $a_2$  استفاده می‌شود.

در این مسئله برای محاسبه‌ی عملکرد حرارتی کلکتور از رابطه تجربی ۷۶-۳ استفاده می‌شود. این

رابطه توسط بهنیا و موریسون و بودیخواردو از نتایج تجربی به صورت زیر ارائه شده است [۹۷]:

$$\eta = 0.536 - 0.0069 \frac{(T_f - T_a)^2}{G_t} - 0.824 \frac{(T_f - T_a)}{G_t} \quad (76-3)$$

در رابطه فوق  $\eta$  بازدهی حرارتی کلکتور،  $G_t$  شار تابشی خورشید،  $T_f$  دمایی متوسط مخزن و  $T_a$  دمایی سیال در لحظه اول می‌باشد.

## فصل ۴: شبیه سازی عددی و نتایج

## ۴-۱ مقدمه

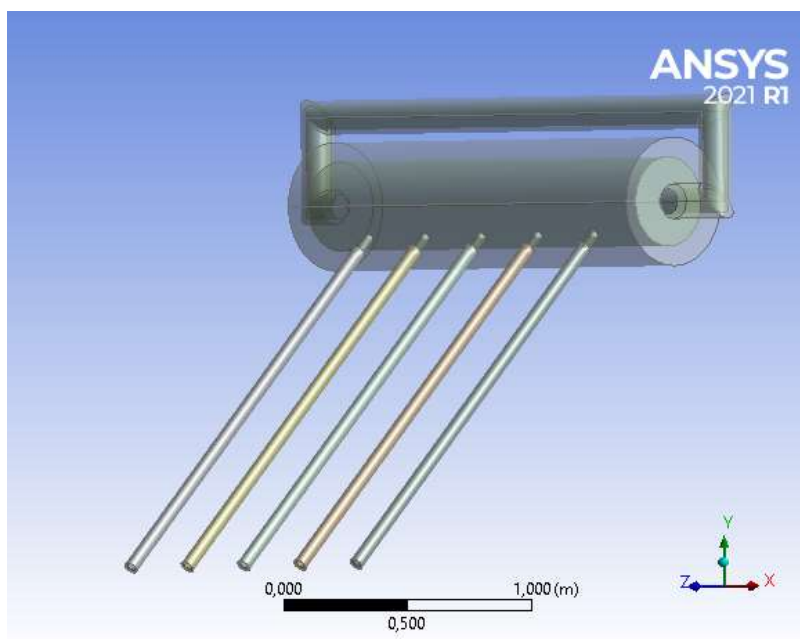
به‌طور کلی کلکتورهای لوله خلأ خورشیدی به دو دسته کلی کلکتورهای هوا گرم‌کن و آب گرم‌کن خورشیدی تقسیم‌بندی می‌شوند. با توجه به کمبود منابع انرژی و همچنین رویکردهای زیست‌محیطی، این دستگاه‌ها نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای مهندسی از جمله سیستم‌های گرمایش ساختمان، خشک‌کن‌های خورشیدی، تهویه مطبوع و غیره یافته‌اند. به‌علاوه ساختار ساده، هزینه پایین ساخت و نگهداری از جمله دیگر مزایای این گونه دستگاه‌های خورشیدی می‌باشند.

در این پژوهش ما با استفاده از روش حل عددی به شبیه‌سازی انتقال حرارت جابجایی آزاد و تشعشعی در کلکتور لوله خلأ خواهیم پرداخت. در این فصل نتایج حاصل از حل عددی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در ابتدای این فصل به تشریح هندسه مورد مطالعه می‌پردازیم سپس برای بررسی استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی، صحت نتایج حاصل از حل عددی با داده‌های تجربی اعتبار سنجی می‌شود. در ادامه شرایط مرزی حاکم برم ساله بیان می‌شود. همچنین پارامترهای حاکم بر مدل تابشی تعریف می‌شود.

## ۴-۲ هندسه مورد مطالعه

نخستین گام در تحلیل عددی یک سیستم سازه‌ای، ایجاد مدل هندسی است. بنابراین باید بتوان مدل هندسی مورد نظر را به‌درستی ایجاد نموده و آن را در صورت نیاز اصلاح نمود و یا قسمت‌های نامطلوب را حذف کرد. در شکل ۴-۱ نمایی از مدل سه‌بعدی طراحی شده را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۱-۴ مدل هندسی ایجادشده در محیط دیزاین مدلر

این سیستم دارای یک مخزن و پنج عدد لوله جاذب در نقش کلکتور است که به صورت شیب دار به مخزن متصل می باشد. علاوه بر این، به سمت جانبی بخش مخزن یک لوله متصل است که برای ایجاد بازگشت هوا و تشکیل جریان اجباری در بخش مخزن، طراحی شده است. این جریان با یک فن الکتریکی که در داخل لوله قرار دارد، ایجاد می شود. مشخصات هندسی و سایر پارامترهای طراحی در جدول ۱-۴ قابل مشاهده است.

جدول ۱-۴ مشخصات هندسی و متغیرهای مسئله

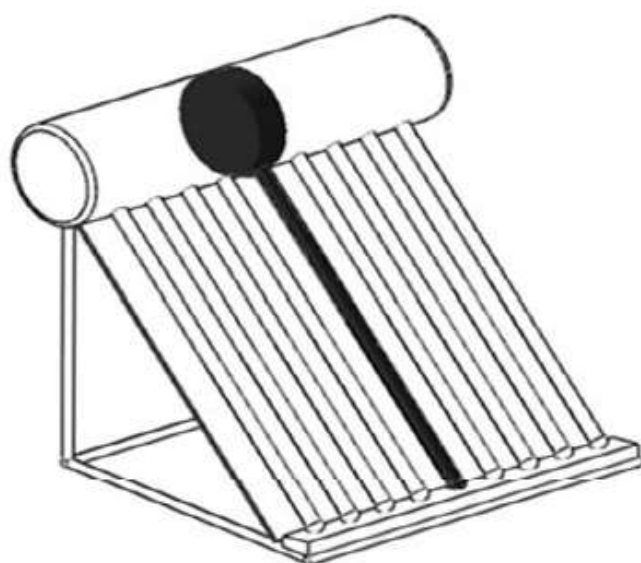
| پارامترها          | مقادیر                           |
|--------------------|----------------------------------|
| نوع کلکتور         | لوله خلاء                        |
| جنس پوشش جاذب      | AL-ALN-SS/Cu                     |
| جنس شیشه           | بوروسیلیکات                      |
| فشار خلأ           | $10^{-3} \times 5 \leq$ (پاسکال) |
| سیال کاری          | هوا                              |
| ضخامت لوله شیشه ای | ۲ میلیمتر                        |
| طول لوله           | ۱/۸ متر                          |

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| قطر داخلی (برای لوله داخلی)  | ۴۰ میلی‌متر |
| قطر خارجی (برای لوله خارجی)  | ۵۸ میلی‌متر |
| فاصله‌ی بین دو لوله          | ۷ میلی‌متر  |
| قطر داخلی مخزن               | ۰/۳۶ متر    |
| طول مخزن                     | ۲ متر       |
| قطر داخلی لوله بازگشت هوا    | ۰/۱ متر     |
| زاویه کلکتور نسبت به سطح افق | ۴۵ درجه     |

در این سامانه، اطراف مخزن به‌طور کامل با فوم پلی اورتان عایق شده است و اطراف لوله‌های خلأ نیز با ایجاد فشار خلأ عایق شده است. خلأ بهترین شیوه برای ایجاد عایق حرارتی است. همچنین این سیستم بدون نفوذ جرم است و در نتیجه هیچ تبادل حرارتی و جرمی با محیط اطراف خودش ندارد. در این پژوهش جریان سیال و انتقال حرارت جابجایی آزاد در کلکتور لوله خلأ مورد بررسی قرار می‌گیرد. نیروهای شناوری ناشی از گرادیان دما و چگالی (طبق رابطه ۳-۸)، سیال را درون محفظه کلکتور به حرکت درمی‌آورند.

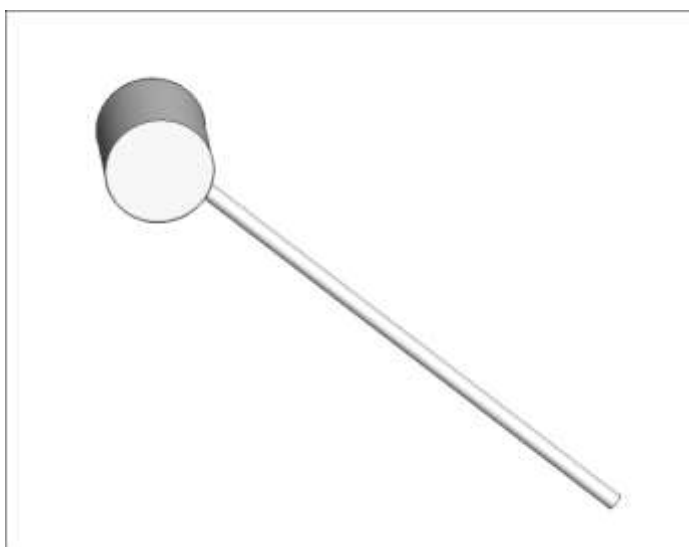
#### • شرط مرزی تقارن

در گام اول برای ساده‌سازی هندسی، بجای اینکه کل دامنه محاسباتی را شبیه‌سازی کنیم، می‌توانیم برای بخشی از دامنه محاسباتی شبیه‌سازی را انجام داده و نتایج به‌دست‌آمده را برای کل مدل تعمیم دهیم؛ که در شکل ۴-۲ به‌صورت شماتیک می‌توان مشاهده کرد. این کار تعداد سلول‌های شبکه را به پنج برابر کاهش می‌دهد که منجر به افزایش سرعت و صرفه‌جویی در هزینه محاسبات می‌شود. بنابراین در اینجا بجای اینکه کلکتور پنج لوله را شبیه‌سازی کنیم؛ یک کلکتور تک لوله‌ای جهت شبیه‌سازی انتخاب می‌شود. علاوه بر این، برای کلکتور تک لوله‌ای، قاعدتاً حجم مخزن آن نیز پنج برابر حجم کوچک‌تری خواهد داشت (مطابق شکل ۴-۳).



شکل ۲-۴ مجموعه‌ی کلکتور لوله خلاً خورشیدی [۹۵]

بنابراین با ساده‌سازی (شرط تقارن) برای کلکتور و مخزن، هندسه مورد مطالعه در این مسئله مطابق شکل ۳-۴ خواهد بود.



شکل ۳-۴ هندسه مورد استفاده برای حل عددی

## ۳-۴ شبکه‌بندی روی مدل

پس از هندسه ایجادشده به شبکه‌بندی مدل می‌پردازیم و کیفیت شبکه‌بندی نیز مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در ادامه به کنترل کیفیت هندسه و مش بندی مدل می‌پردازیم. یکی از نکات مهم برای مش بندی، تنظیم اندازه‌ی المان‌ها می‌باشد که اگر اندازه آن بزرگ انتخاب شود دقت جواب‌ها پایین آمده و از طرفی اگر کوچک باشد زمان حل مسئله بالا خواهد رفت. در نتیجه با توجه به نوع هندسه مدل، انتخاب یک اندازه‌ی مناسب برای المان‌ها بسیار حائز اهمیت است. در شکل ۴-۶ نمای کلی از شبکه‌بندی روی مدل طراحی‌شده را مشاهده می‌کنیم.

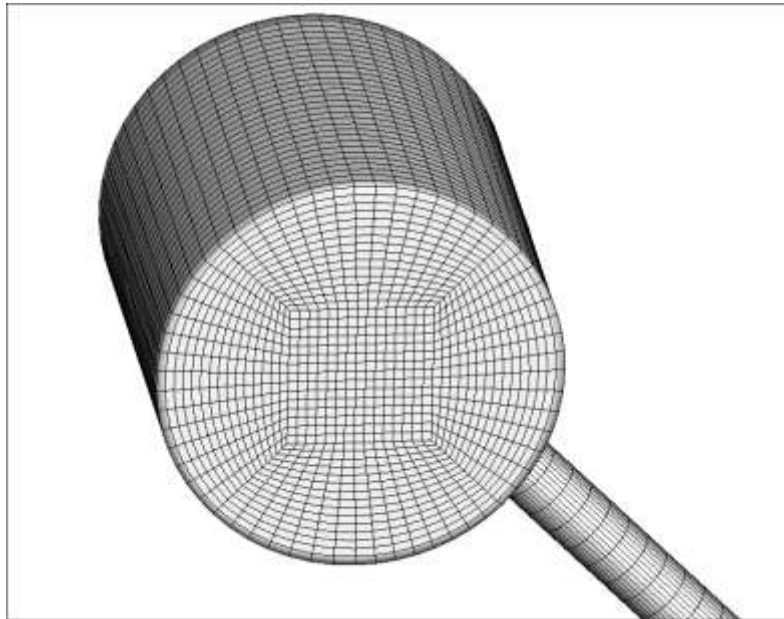


شکل ۴-۶ نمای کلی از شبکه‌بندی هگزاهدرال<sup>۱</sup> روی هندسه مدل

برای حل راحت‌تر این مسئله، با توجه به چند فیزیکی بودن آن (به علت وجود جریان‌های آشفته، مدل‌سازی تشعشع و ماهیت پیچیده جریان ترموسیفون) ترجیح داده‌شده است که از تعداد نودهای مناسب و باکیفیت در شبکه‌بندی مسئله استفاده شود.

---

<sup>۱</sup> Hexa Hedral



شکل ۴-۵ جزئیات مش مورد استفاده

این مسئله دارای دو مرز، کلکتور و مخزن است. یکی از مشخصه‌های تحلیل جریان‌های ترموسیفون، عدم وجود ورودی و خروجی هوا در مسئله است. این مسئله، مرزی برای ورودی سیال و خروجی سیال ندارد و کل جریان و انتقال حرارت در یک سیستم ایزوله جرمی انجام می‌گردد.

#### ● کیفیت شبکه‌بندی مدل

کیفیت شبکه در مدل‌سازی انجام‌شده، دارای ماکزیمم مقدار ضریب رعنائی<sup>۱</sup> عدد ۳۷ است و معیار تعامد<sup>۲</sup> هم ۰/۳۸۶ می‌باشد که معیارهای قابل قبولی برای کیفیت مطلوب شبکه هستند. بنابراین به‌طور کلی می‌توان گفت شبکه از معیار مناسبی برخوردار است.

<sup>۱</sup> Maximum Aspect Ratio

<sup>۲</sup> Minimum orthogonal Quality

## ۴-۴ نتایج مربوط به آزمایش تجربی دستگاه در حالت هوا گرم کن با سیکل بسته هوا

در جدول ۴-۳ و ۴-۴ نتایج آزمایش تجربی برای حالت جریان آزاد و اجباری به دست آمد و برای اعتبار سنجی حل عددی از آن استفاده شد. در آزمایش اول نتایج اندازه گیری مطابق زیر برای حالت بدون فن به دست آمد.

جدول ۴-۲ آزمایش اندازه گیری دمای مخزن (بدون محصول) – ۱۵/۲/۹۹ [۹۸]

(تعداد لوله های خلأ ۵ عدد – فن خاموش)

| ساعت  | دمای محیط | دمای مخزن |
|-------|-----------|-----------|
| ۹:۰۰  | ۱۷        | ۳۲        |
| ۱۰:۰۰ | ۱۸,۳      | ۴۱,۴      |
| ۱۱:۰۰ | ۱۹,۸      | ۴۵,۶      |
| ۱۲:۰۰ | ۲۲,۲      | ۴۷,۸      |
| ۱۳:۰۰ | ۲۲,۹      | ۴۹,۲      |
| ۱۴:۰۰ | ۲۴,۵      | ۴۹,۵      |
| ۱۵:۰۰ | ۲۶,۲      | ۴۹,۸      |
| ۱۶:۰۰ | ۲۸,۵      | ۵۰        |
| ۱۷:۰۰ | ۲۹,۱      | ۴۸,۴      |
| ۱۸:۰۰ | ۲۶,۷      | ۴۵,۵      |
| ۱۹:۰۰ | ۲۴,۵      | ۳۹        |

در آزمایش دوم باوجود فن در هوا گرم کن با کلکتور لوله خلأ، نتایج پارامترهای مسئله مطابق جدول زیر اندازه گیری شد.

جدول ۴-۳ آزمایش اندازه گیری دمای مخزن (بدون محصول) – ۱۷/۲/۹۹ [۹۸]

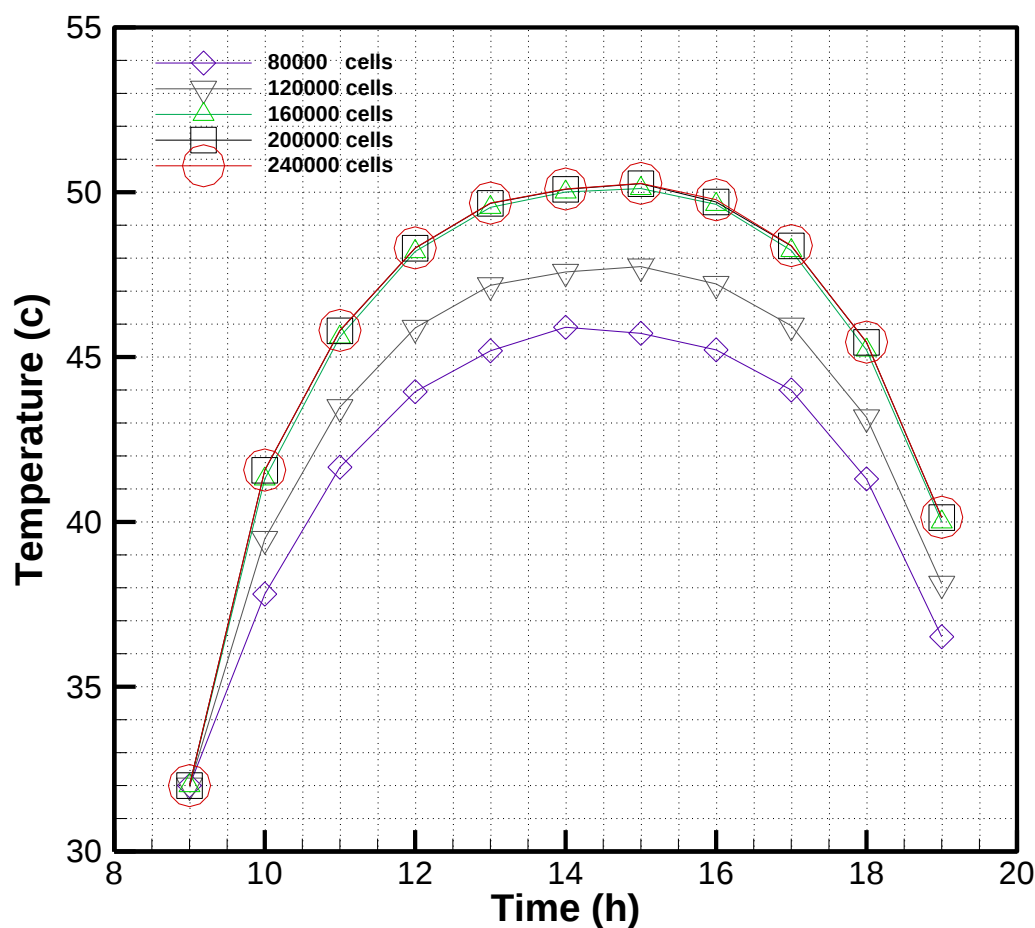
(تعداد لوله‌های خلأ ۵ عدد - سرعت فن ۴ متر بر ثانیه)

| ساعت  | دمای محیط | دمای مخزن |
|-------|-----------|-----------|
| ۹:۰۰  | ۲۰,۸      | ۲۵,۹      |
| ۱۰:۰۰ | ۲۲,۵      | ۳۶,۸      |
| ۱۱:۰۰ | ۲۵,۴      | ۳۳,۷      |
| ۱۲:۰۰ | ۲۶,۵      | ۳۶,۴      |
| ۱۳:۰۰ | ۲۸,۴      | ۳۸,۹      |
| ۱۴:۰۰ | ۲۹,۸      | ۳۹,۹      |
| ۱۵:۰۰ | ۳۰,۱      | ۴۱,۴      |
| ۱۶:۰۰ | ۳۱,۸      | ۴۲,۴      |
| ۱۷:۰۰ | ۳۴,۴      | ۴۷,۶      |
| ۱۸:۰۰ | ۳۲,۸      | ۴۷,۲      |
| ۱۹:۰۰ | ۳۰,۲      | ۴۱,۸      |

## ۴-۵ مطالعه استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

جهت ارزیابی تعداد المان‌های لازم برای انجام شبکه بندی باید استقلال حل از شبکه محاسباتی بررسی شود. برای این منظور ، هندسه با اندازه‌های مختلفی از المان شبکه را تحلیل می‌کنیم تا استقلال نتایج حل عددی از شبکه بررسی شود.

در نتایج بدست آمده مشاهده می‌کنیم که هر چه تعداد المان‌ها افزایش یابد، جواب‌های حل به همدیگر نزدیک می‌شوند. همانطور که در شکل ۴-۶ می‌بینیم، برای پارامتر دمای متوسط کلکتور، تحلیل مساله در تعداد کمتر از ۱۶۰۰۰۰ سلول با خطای زیادی همراه خواهد بود. بنابراین می‌توان این طور بیان که در این تعداد سلول‌ها، حل عددی مستقل از شبکه محاسباتی می‌باشد. همچنین هزینه محاسباتی کمتر خواهد بود.



شکل ۴-۶ استقلال حل عددی از شبکه محاسباتی

## ۴-۶ اعتبار سنجی نتایج شبیه سازی با داده های آزمایشگاهی

در شکل ۴-۷ مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه برای به دست آوردن داده های تجربی را مشاهده می کنیم. در این مدل از پنج لوله خلأ شده استفاده شده که نقش کلکتور را در این سامانه دارند. لوله برگشت هوا در حالت غیر ایستا، جریان اجباری در داخل بخش مخزن ایجاد می کند و این حالت برای شرایطی است که

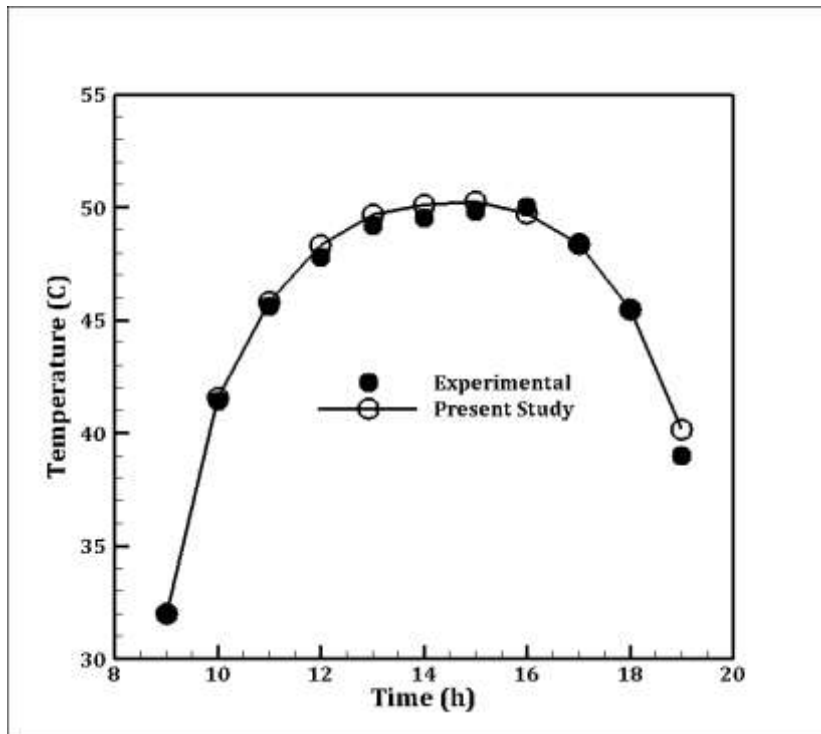
سامانه به عنوان خشک کن استفاده می شود و باید شرایطی حاکم شود که تبخیر سطحی زیاد شود و انتقال جرم افزایش یابد.



شکل ۷-۴ مدل آزمایشگاهی مورد مطالعه در آزمایش تجربی

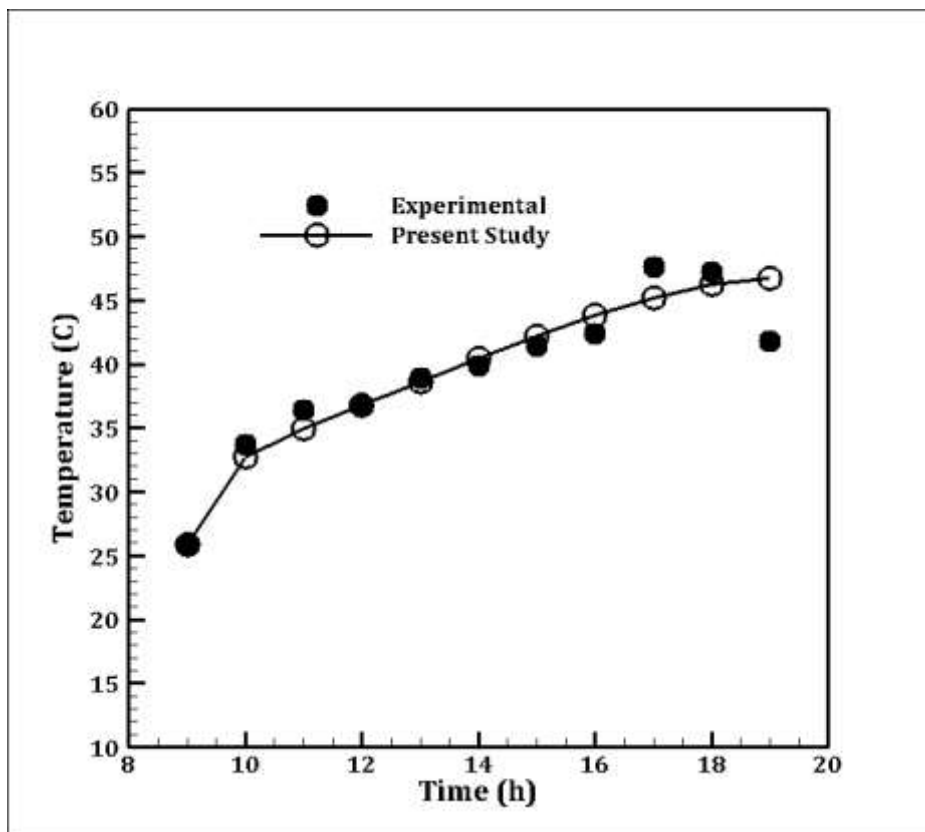
در مدل تجربی ارائه شده شرایط مختلفی برای انجام آزمایش اعمال شد. نتایج حاصل از تغییرات دما در مدل آزمایشگاهی برای دو حالت بدون فن (ایستا) و حالت با فن (جریان اجباری و غیر ایستا) به دست آمد؛ سپس نتایج حل عددی را بر اساس داده های آزمایشگاهی مطابقت دادیم.

شکل ۸-۴ نتایج شبیه سازی عددی را در مقابل داده های آزمایشگاهی گزارش شده نشان می دهد. داده های آزمایشگاهی برای شرایط ایستا گزارش شده است. بر اساس شکل ۸-۴ دما سیستم در نتایج شبیه سازی عددی به دمای اندازه گیری شده بسیار نزدیک می باشد.



شکل ۴-۸ مقایسه تغییرات دمای کلکتور در طول روز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و حل عددی برای حالت بدون فن (ایستا)

شکل ۴-۹ نتایج شبیه‌سازی عددی را در مقابل داده‌های آزمایشگاهی گزارش‌شده نشان می‌دهد. داده‌های آزمایشگاهی برای شرایط جریان در حالت اجباری در مخزن باوجود فن گزارش‌شده است. بر اساس شکل ۴-۹ مشاهده می‌کنیم، پارامتر دما در نتایج شبیه‌سازی عددی با دمای اندازه‌گیری شده برای حالت غیر ایستا بسیار نزدیک به یکدیگر می‌باشند.



شکل ۴-۹ مقایسه تغییرات دمای کلکتور در طول روز بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و حل عددی برای حالت با فن

بنابراین شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ مقایسه تغییرات دمای کلکتور در طول روز از نتایج آزمایشگاهی و عددی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین حل عددی و حل تجربی در شرایط مختلف برقرار است.

## ۷-۴ تنظیمات مدل حل مسئله

بعد از مرحله مش بندی، در محیط تنظیمات حل، پارامترهای جریان برای این مسئله تعیین می‌شوند و شرایط مرزی لازم وارد می‌شوند.

در ابتدای کار، نوع حل به صورت گذرا انتخاب شده می‌شود و راستای نیروی گرانش در جهت مخالف محور  $y$  و مقدار شتاب آن برابر با  $-9.81 \text{ m/s}^2$  در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه جریان تراکم ناپذیر و سرعت پایین است نوع حل گر را از نوع فشار محور انتخاب کردیم. همچنین از آنجایی که سطوح

مدل دارای حرکت انتقالی یا چرخشی نیستند نوع فرمولاسیون سرعت را مطلق در نظر گرفتیم.

اگر بخواهیم در نرم افزار انسیس جابجایی طبیعی را مدل کنیم به دلیل وجود نیروی بویانسی باید جاذبه را در جهت صحیح اعمال کنیم. علاوه بر این برای جابجایی طبیعی در قسمت متریال به دلیل وجود جریان طبیعی، چگالی باید تغییرپذیر انتخاب شود. در اینجا به دلیل اینکه در جریان سیال تغییرات فشار ناچیز است، می تواند تراکم ناپذیر فرض شود. بنابراین برای چگالی وابستگی به دما مهم است که ما برای آن حالت گاز ایده آل تراکم ناپذیر<sup>۱</sup> را انتخاب کردیم.

در مرحله بعد، از منوی انتخاب مدل، مدل هایی باید برای حل این مسئله فعال شود که یک به یک به توضیح آن پرداخته خواهد شد. مدل های فعال شده در این مسئله عبارت اند از:

- معادله انرژی<sup>۲</sup>

- مدل توربولانسی<sup>۳</sup>

- مدل تشعشع<sup>۴</sup>

در منوی توربولانسی، با توجه به اینکه عدد رایلی برای این مسئله بزرگ تر از  $10^{10}$  است در این مسئله انتقال حرارت غالب، انتقال حرارت جابجایی طبیعی است و رژیم جریان در محدوده آشفته می باشد. بنابراین این حل با استفاده از مدل جریان آشفته کا-پسیلون تحقق پذیر<sup>۵</sup>، مدل می شود. علت استفاده از این مدل برای جریان آشفته، سادگی حل و هزینه کمتر محاسباتی آن است. نوع حل جریان بر دیواره ها نیز در حالت استاندارد تنظیم می شود. برای به دست آوردن توزیع دما، معادله انرژی را نیز فعال می کنیم.

---

<sup>1</sup> incompressible ideal gas

<sup>2</sup> Energy Equation

<sup>3</sup> Viscous (Turbulence model)

<sup>4</sup> Radiation

<sup>5</sup> K-Epsilon Realizable

## ۴-۷-۱ مدل حل تشعشع

مدل تشعشعی در این مسئله باید فعال باشد. این موضوع به این علت است که تشعشع خورشید باید توسط لوله‌های جاذب گرما، جذب شود و به هوای درون لوله، وارد شود.

این مسئله با استفاده از مدل تشعشعی S2S حل شده است. علت استفاده از این مدل، سادگی و کارآمدی این مدل برای این مسئله بوده است. در مدل سطح به سطح محیط فعال وجود ندارد و بین دو سطح مدل شار تابشی برقرار است که به فاصله و زاویه بین آن‌ها بستگی دارد. روش S2S قادر نیست اثرات محیط روی تابش را در نظر بگیرد بنابراین صرفاً برای مسائلی بکار می‌رود که یا خلأ کامل داشته باشیم که در این صورت محیط هیچ اثری روی پرتوهای ورودی ندارد و یا محیط اثر فراوانی روی پرتوها ندارد. این روش به حافظه کمتری نیاز دارد و در نهایت می‌تواند روش مناسبی برای شبیه‌سازی کلکتورهای لوله خلأ باشد.

برای در نظر گرفتن شار خورشید، مدل بار خورشیدی را فعال می‌کنیم. برای مدل‌سازی پرتوهای خورشید از قسمت محاسبه گر شار خورشیدی استفاده شده است. در این قسمت، مختصات جهانی شهر شاهرود (۳۶,۳۸ شمال، ۵۴,۹۲ شرق) و همچنین منطقه زمانی بر اساس نصف‌النهار مبدأ گرینویچ وارد شده است. همچنین این مسئله در روز ۴ اردیبهشت و در ساعت ۹ صبح الی ۱۹ عصر، مدل شده است.

برای انتخاب سیال، سیال کاری از نوع هوا با توجه به داده‌های مسئله تعیین می‌شود. علاوه بر این، چگالی هوا همان‌طور که گفتیم با استفاده از مدل گازهای ایده آل تراکم ناپذیر، مشخص شده است.

## ۴-۷-۲ شرایط مرزی

شرط مرزی‌های مورد استفاده در این مسئله از نوع دیوار هست. دیواره کلکتور عایق است و دیواره لوله خارجی کلکتور، مطابق نتایج آزمایشگاهی تابعی از دما می‌باشد که با استفاده از کدنویسی برای این مسئله تعریف شده است.

### • شرط مرزی روی لوله‌های داخلی و خارجی

لوله‌ی داخلی و خارجی کلکتور از نظر حرارتی کوپل در نظر گرفته می‌شوند یعنی تمام شار دریافتی را عبور می‌دهند. بنابراین شرط مرزی کوپل را روی آن اعمال می‌کنیم.

### • شرط مرزی تابش روی لوله داخلی

ضریب عبور، ضریب انعکاس و ضریب جذب تابش خورشیدی برای لوله‌ها با توجه به سطح شفاف و شیشه‌ای طبق مطالعات پیشین که در این زمینه انجام شده و سایر اطلاعات تشعشعی این سیستم، وارد شده است.

جدول ۴-۴ مقادیر ضرایب تابشی برای لوله داخلی و خارجی کلکتور [۹۶]

| Plate           | Boundary condition type | Absorptivity                                                        | Transmissivity                                                      |
|-----------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Absorbing plate | Opaque                  | Direct visible: 0.8<br>Direct IR: 0.8                               | –                                                                   |
| Glass plate     | Semi-transparent        | Direct visible: 0.1<br>Direct IR: 0.1<br>Diffuse hemispherical: 0.1 | Direct visible: 0.8<br>Direct IR: 0.8<br>Diffuse Hemispherical: 0.8 |

به علت سطح شفاف و شیشه‌ای لوله جاذب و لوله بیرونی، مقدار انتقال تابش به سیال با ضرایب موجود در جدول ۴-۴ در نظر گرفته شده و از نوع نیمه شفاف در نظر گرفته شده است.

● شرط مرزی برای سطح داخلی لوله‌ی داخلی

لوله داخلی از جنس شیشه است بنابراین نوع تابش را برای آن نیمه شفاف تعیین می‌کنیم. تنظیمات اطلاعات تشعشعی این بخش این بخش مطابق جدول ۴-۴ مشخص می‌شود.

● شرط مرزی برای سطح خارجی لوله‌ی داخلی

سطح خارجی لوله داخلی از نوع جاذب حرارت است و تابش را جذب می‌کند. بنابراین شرط مرزی کدر را روی آن مدل می‌کنیم. از نظر حرارتی کوپل است و سایر اطلاعات تشعشعی با توجه به جدول ۴-۴ مشخص می‌شود.

● شرط مرزی سطح داخلی لوله خارجی

سطح داخلی لوله خارجی با توجه به اینکه از نوع شیشه است به صورت شفاف مدل می‌شود. بخشی از تابش عبور می‌کند و بخشی بازتاب می‌شود. پس شرط مرزی تابشی از نوع نیمه شفاف را روی آن مدل می‌کنیم و اطلاعات موردنیاز با توجه به جدول وارد می‌شود.

● شرط مرزی سطح خارجی لوله خارجی

این سطح با محیط در تماس است بنابراین به صورت تابعی از دمای محیط با کد نویسی مشخص می‌شود. سطح خارجی لوله خارجی شفاف و شیشه‌ای است، پس مانند سطح داخلی از نوع نیمه شفاف آن را مدل می‌کنیم. سایر اطلاعات تشعشعی با توجه به جدول ۴-۴ به مسئله وارد می‌شود.

● شرط مرزی فن

برای حالتی که جریان اجباری داریم، یک شرط مرزی فن تعریف می‌کنیم که اثر فن را اعمال کنیم. پروفیل سرعت  $4 \text{ m/s}$  در نظر می‌گیریم و محل قرارگیری فن در مسئله تعیین می‌شود.

## ۴-۸ حل مسئله

بعد از انجام این تنظیمات نوبت به حل مسئله در بخش حل عددی می‌رسد. در اینجا ابتدا مسئله مقداردهی اولیه می‌شود. مقدار اولیه دمای اولیه کلکتور در لحظه اول انتخاب شده است. سپس زمان حل مسئله و سایر تنظیمات اعمال می‌شود تا در انتها فرآیند حل برای مدل شبیه‌سازی شده آغاز شود. این مسئله در طول ۱۰ ساعت فیزیکی حل شده است. می‌خواهیم اطلاعات حل مسئله طی هر ۷۲۰ ثانیه با گام زمانی ۵ ثانیه برای هر ساعت ذخیره شود. در طول این مدت، اطلاعات موجود در قسمت سولار لودینگ<sup>۱</sup>، هر ۳۶۰۰ ثانیه به‌روزرسانی می‌شود و حل ادامه پیدا می‌کند.

## ۴-۹ تحلیل نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل، برای بحث و نتیجه‌گیری مطرح می‌شود. نتایج عددی این مطالعه در قسمت پس پردازش نرم افزار فلوئنت به‌دست آمده است. نتایج دوبعدی این قسمت بر صفحه برش عرضی میانه کلکتور نمایش داده شده است. با توجه به اینکه نتایج آزمایشگاهی برای دو حالت بدون فن و با فن داریم. نتایج عددی را برای این دو حالت به دست آوردیم و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردیم. سپس پس از بررسی صحت اعتبار سنجی، نتایج مدنظر را برای کلکتور لوله خلأ به دست آوردیم. در ادامه به بررسی و ارزیابی نتایج می‌پردازیم.

## ۴-۹-۱ نتایج شبیه‌سازی عددی برای حالت بدون فن

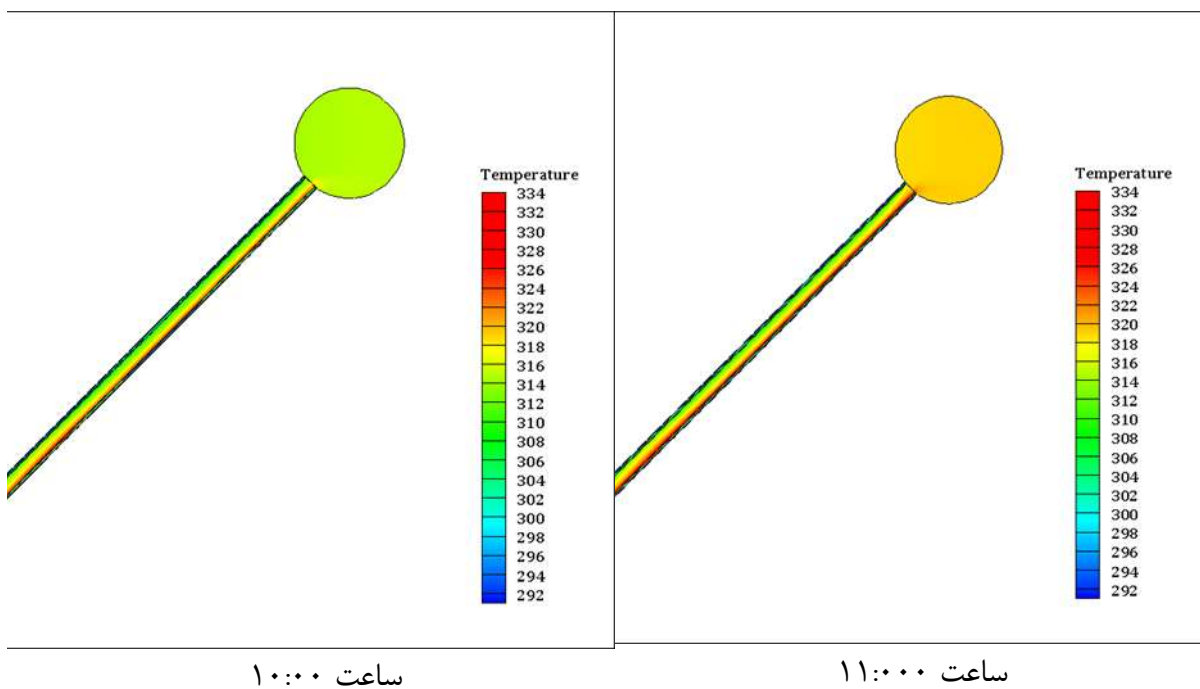
در این حالت نتایج مطابق شرایط اعمال شده در مدل‌سازی مسئله و برای زمانی که در سیستم فن نداریم به‌دست آمده است. کانتورهای دمای سیال کاری و سرعت جریان سیال در ساعات مختلف روز به دست می‌آیند و نتایج به‌دست آمده را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

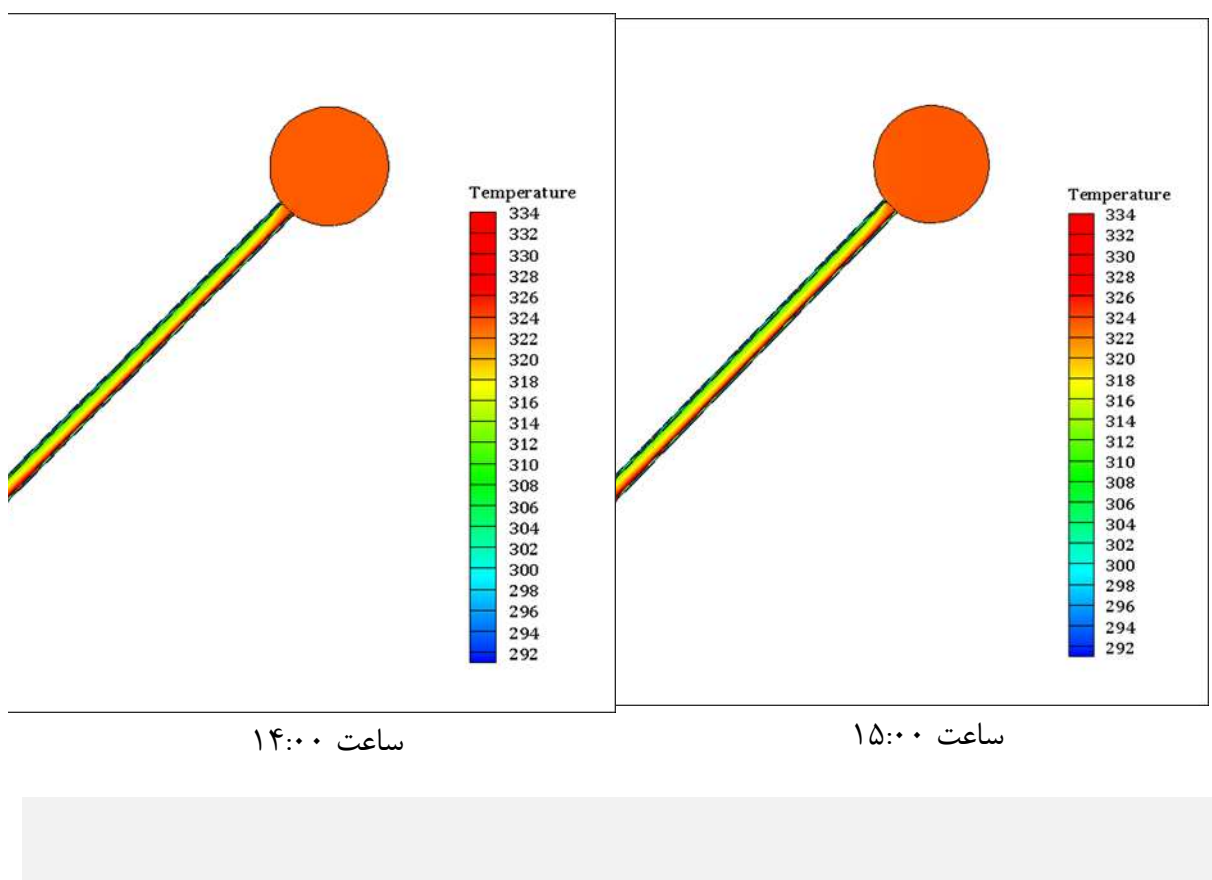
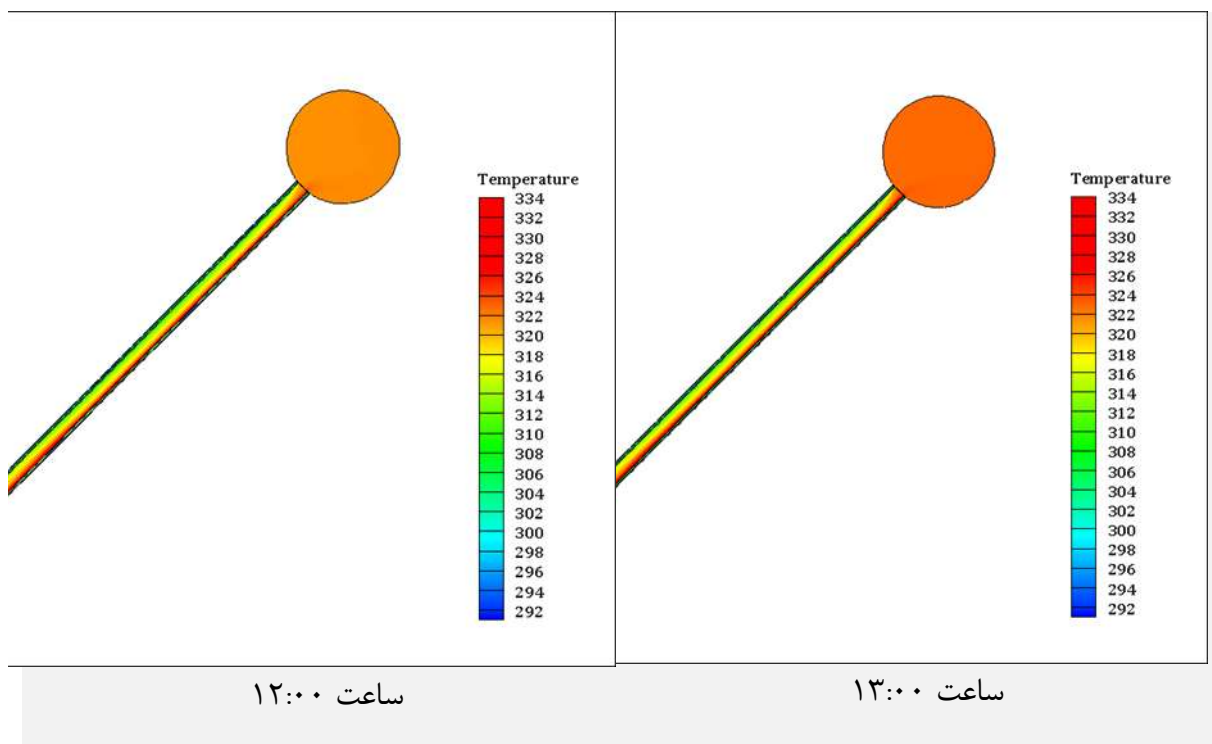
---

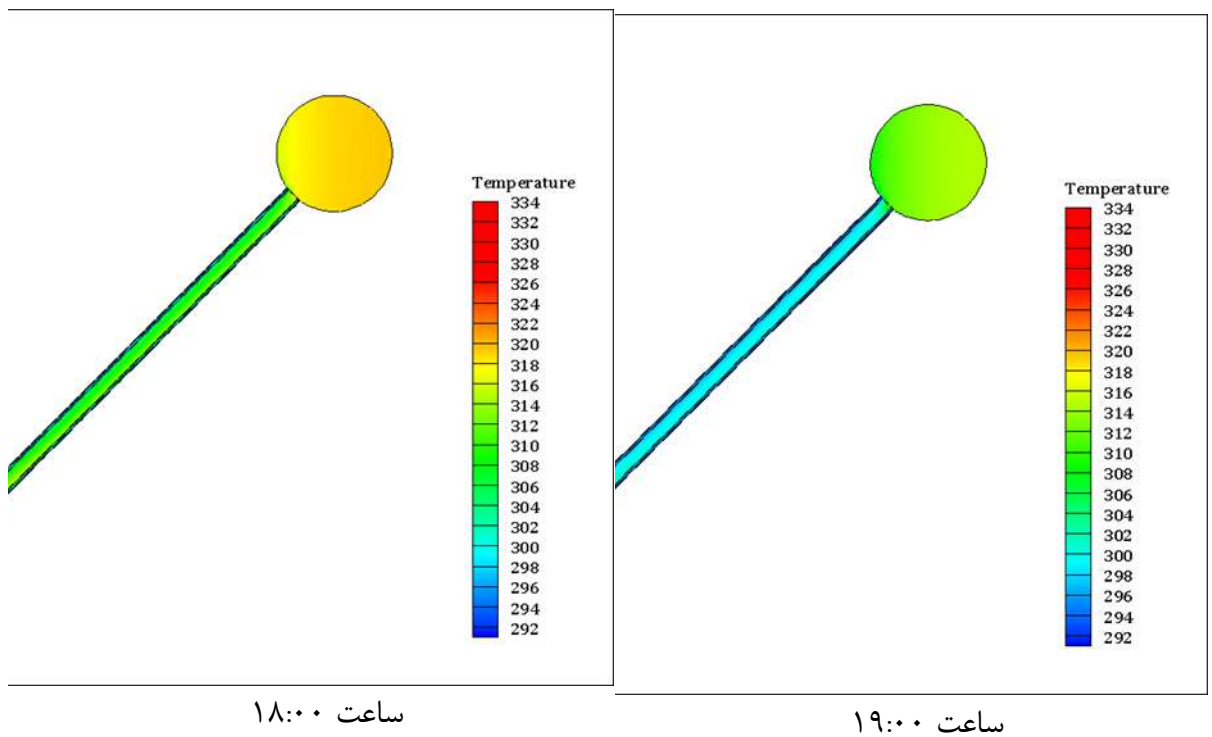
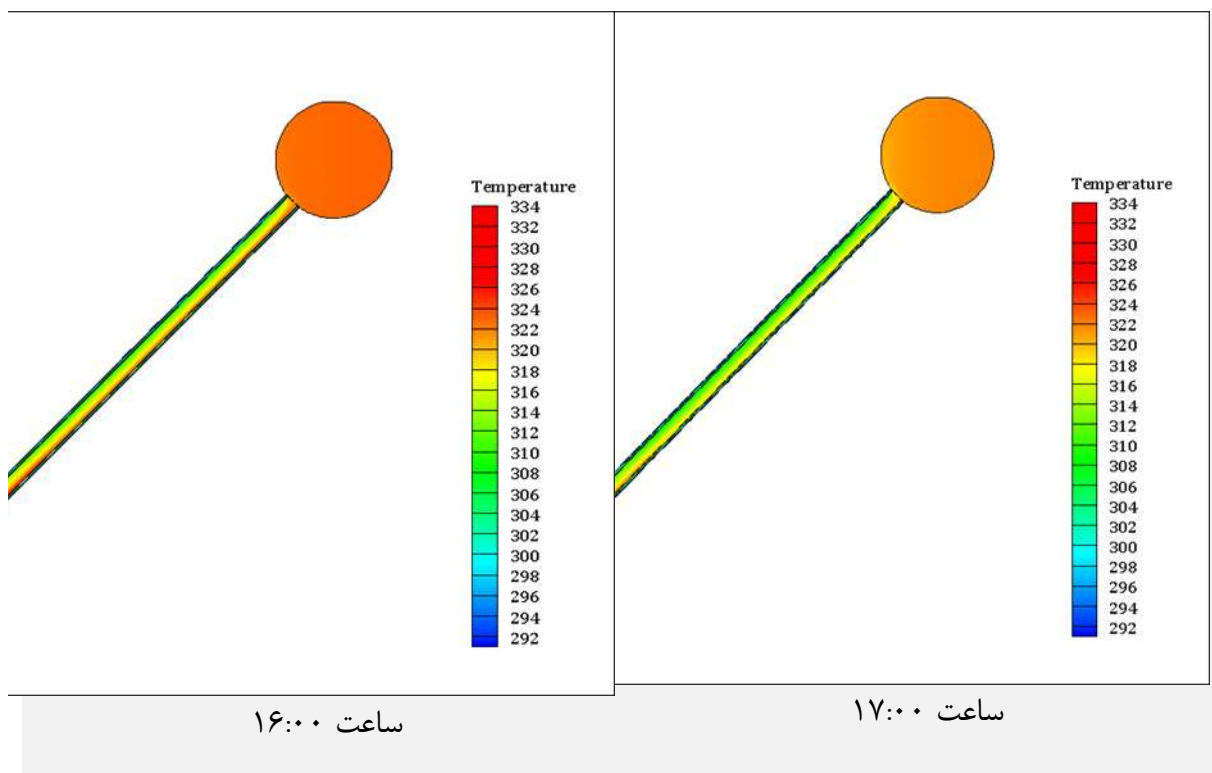
<sup>1</sup> Solar Loading

#### ۴-۹-۱-۱ تغییرات دما در طول روز برای حالت بدون فن

در شکل ۴-۱۰ کانتورهای تغییرات دمای میانگین مخزن را در طول زمان روز برای حالت بدون فن برحسب کلوین به دست آمده است. می‌توانیم تغییرات دما در طول ساعات مختلف را مشاهده کرده و کلکتور را مورد ارزیابی قرار دهیم.





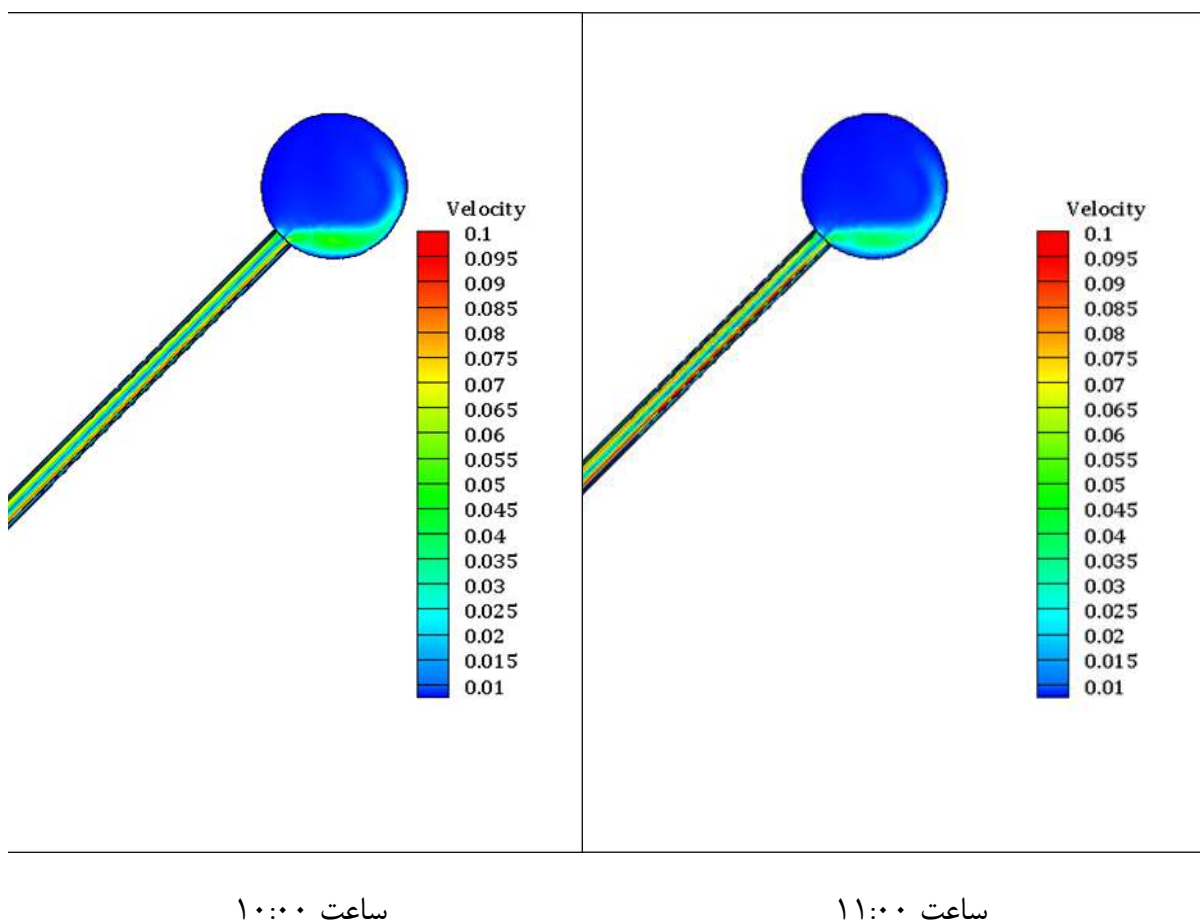


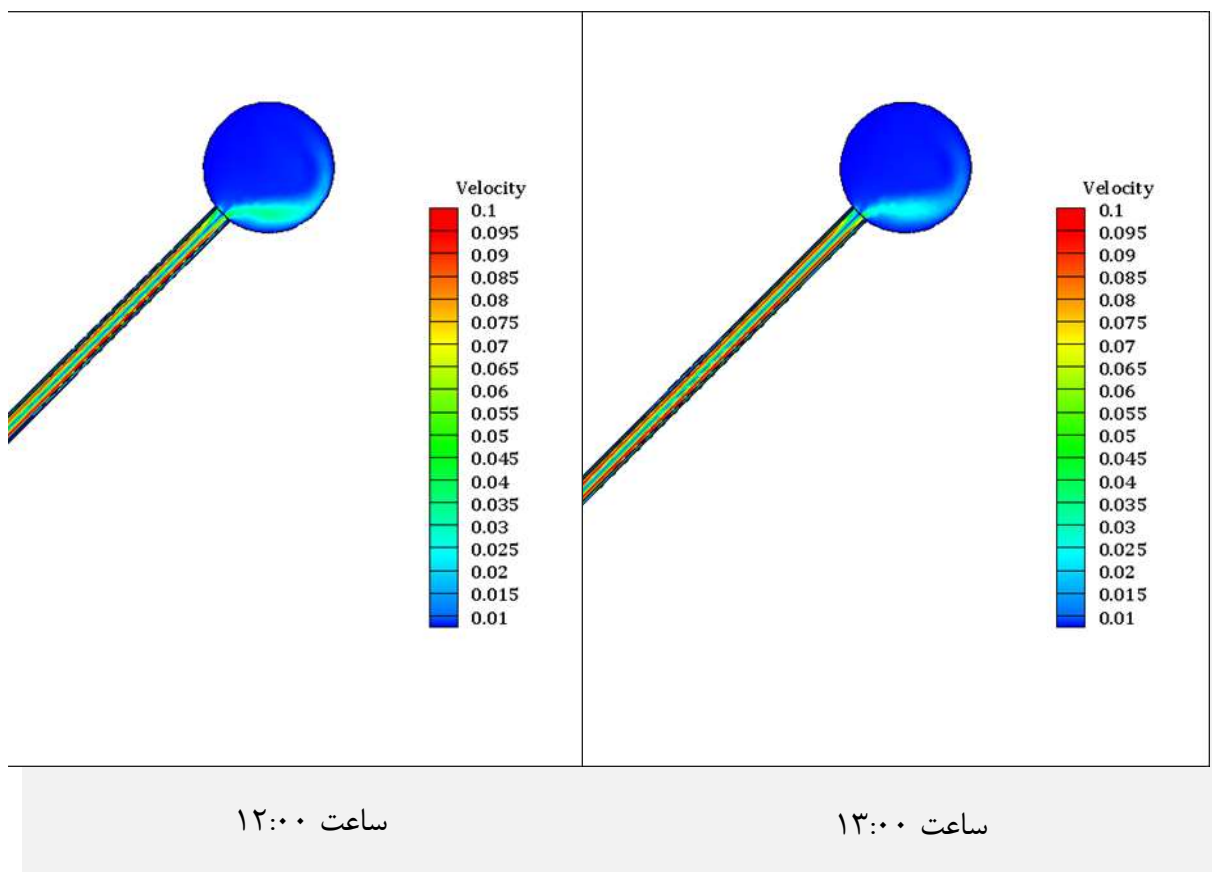
شکل ۱۰-۴ کانتور تغییرات دما در کلکتور برای ساعت ۱۰:۰۰ صبح الی ۱۹:۰۰ عصر

همان‌طور که تغییرات دمای میانگین مخزن را در شکل‌های بالا مشاهده می‌کنیم در ابتدای روز کمترین مقدار دما را در کلکتور داریم و با نزدیک شدن به ظهر خورشیدی بالاترین میزان دما در کلکتور ایجاد می‌شود و هر چه به ساعات پایانی غروب خورشید نزدیک می‌شویم شیب تغییرات دما نیز کم می‌شود. بنابراین کلکتور در ساعت ظهر خورشیدی بالاترین جذب حرارت خود را دارد.

#### ۴-۹-۱-۲ تغییرات سرعت در کلکتور برای ساعت‌های مختلف طول روز

در شکل ۴-۱۱ کانتورهای تغییرات سرعت میانگین در مخزن را در ساعات روز برای حالت جریان انتقال حرارت آزاد به‌دست‌آمده است. می‌توانیم تغییرات سرعت میانگین مخزن در طول ساعات مختلف را مشاهده کرده و کلکتور لوله خلأ را مورد ارزیابی قرار دهیم.





شکل ۴-۱۱ کانتور تغییرات سرعت در ساعت ۱۰

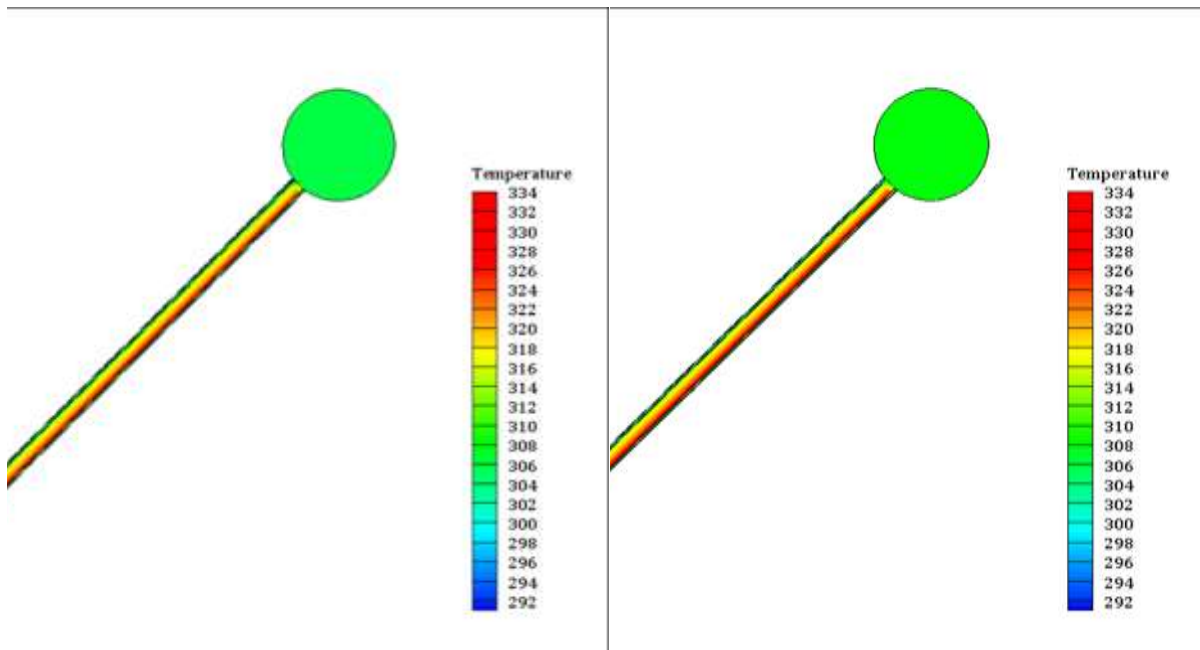
همان‌طور که در کانتورها تغییرات سرعت میانگین برحسب (m/s) را مشاهده می‌کنیم، هرچقدر به ساعات ظهر خورشیدی نزدیک‌تر می‌شویم، گرادیان سرعت جریان سیال در کلکتور افزایش می‌یابد. در نتیجه با افزایش سرعت سیال عملکرد حرارتی سیستم در این ساعت به بالاترین سطح خود خواهد رسید.

#### ۴-۹-۲ نتایج شبیه‌سازی عددی برای حالت با فن

در این حالت نتایج مطابق شرایط اعمال‌شده در مدل‌سازی مسئله و برای زمانی که در سیستم فن با سرعت  $4 \text{ m/s}$  داریم به‌دست‌آمده است. کانتورهای دمای میانگین سیال کاری مخزن و سرعت جریان سیال در ساعات مختلف روز به دست می‌آیند و آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

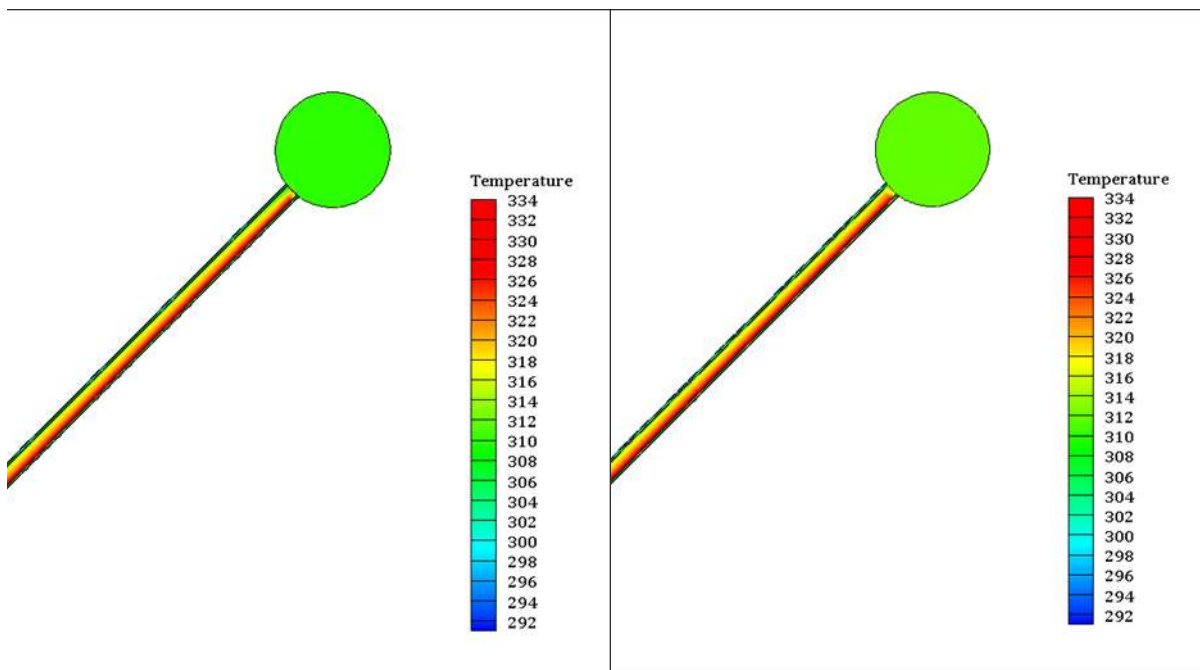
#### ۴-۹-۲-۱ کانتورهای تغییرات دما در طول روز برای حالت با فن

در شکل ۴-۱۲ کانتورهای تغییرات دمای میانگین مخزن را در طول زمان روز برای حالت بدون فن بر اساس کلوین مشاهده می‌کنیم.



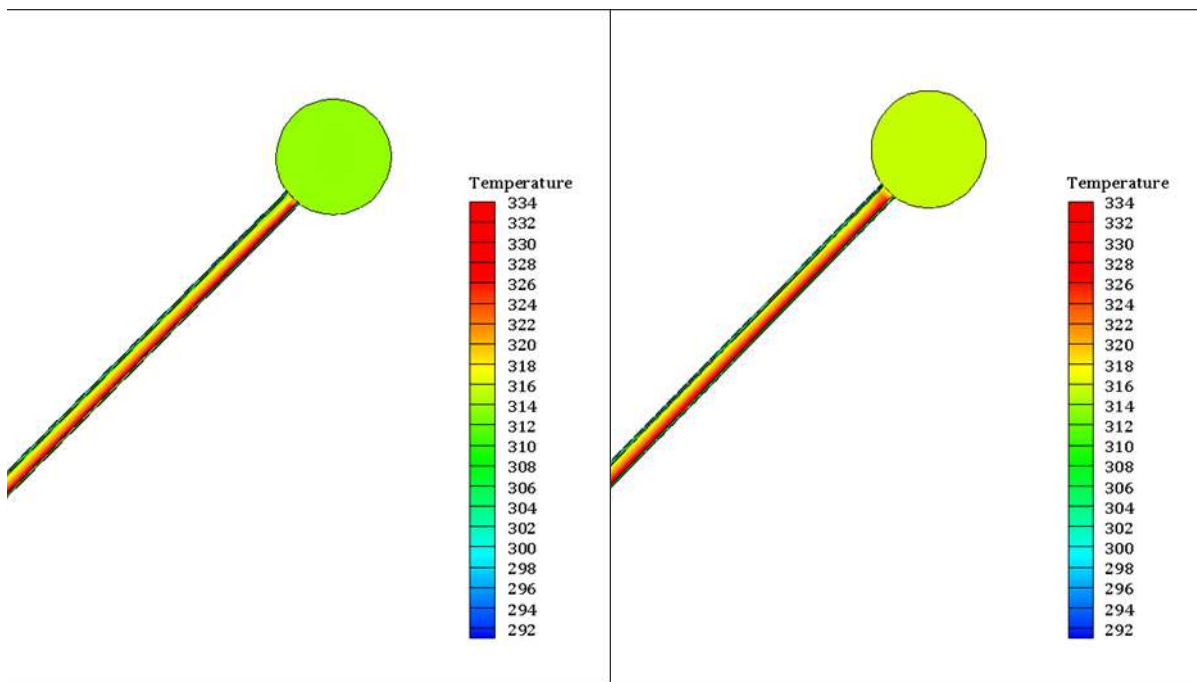
ساعت ۱۰:۰۰

ساعت ۱۱:۰۰



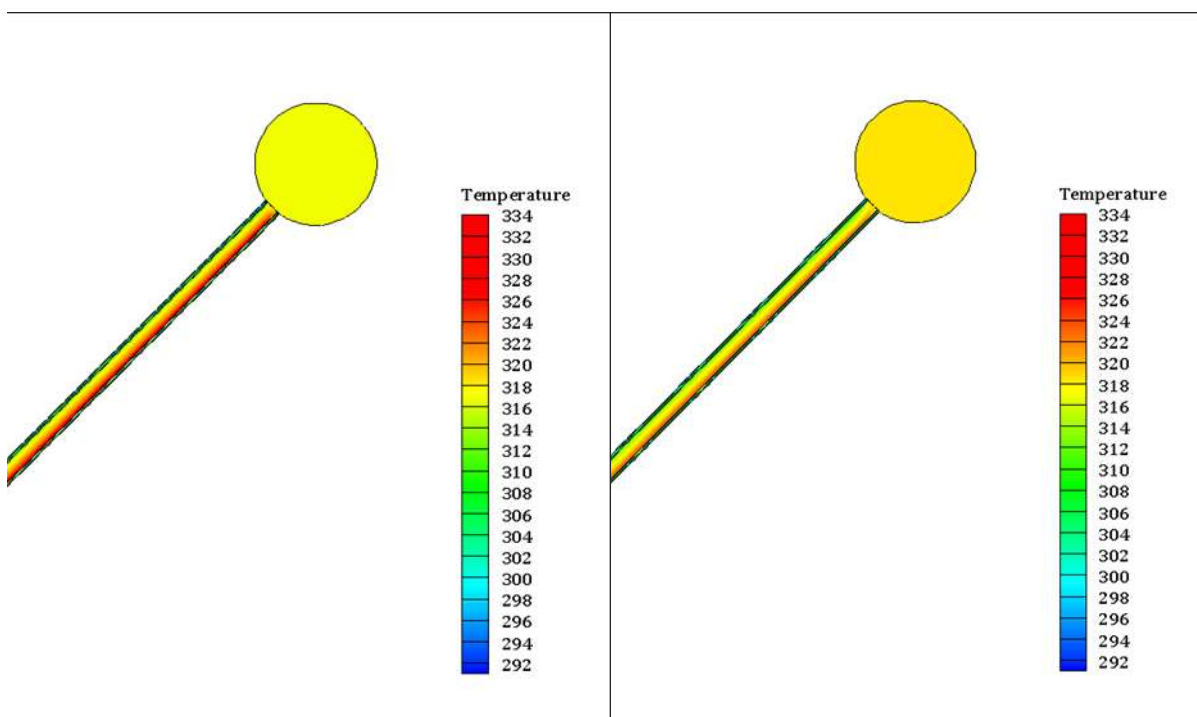
ساعت ۱۲:۰۰

ساعت ۱۳:۰۰



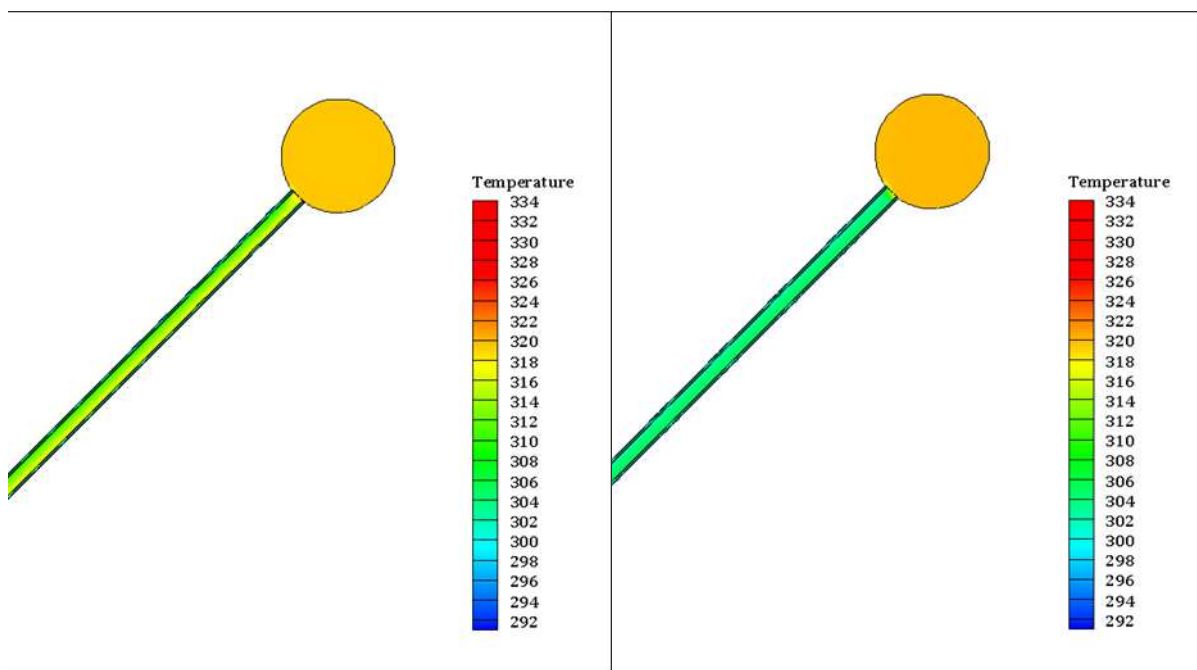
ساعت ۱۴:۰۰

ساعت ۱۵:۰۰



ساعت ۱۶:۰۰

ساعت ۱۷:۰۰



۱۸:۰۰ ساعت

۱۹:۰۰ ساعت

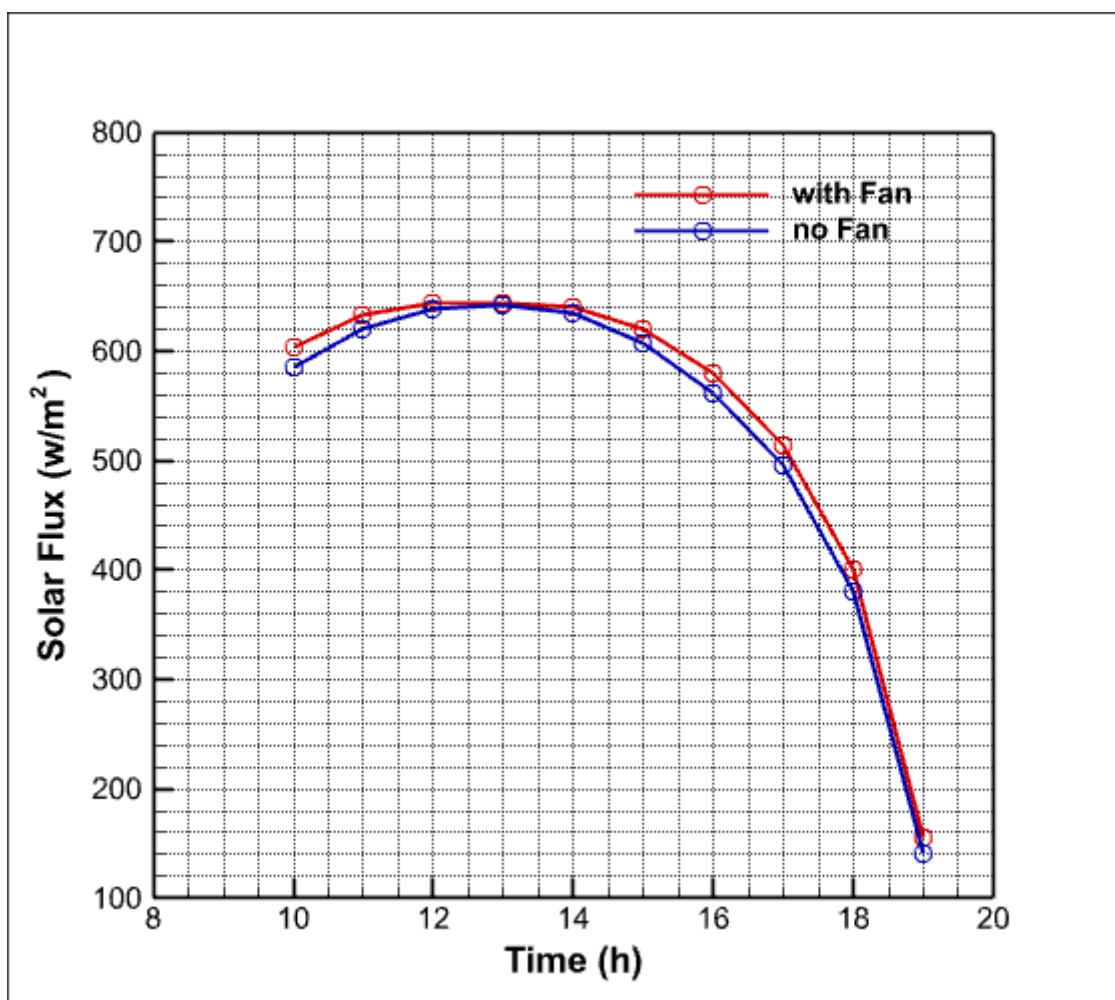
شکل ۴-۱۲ کانتور تغییرات دما در کلکتور در ساعت ۱۰:۰۰ صبح الی ۱۹:۰۰ عصر

همان‌طور که تغییرات دمای میانگین مخزن در طول روز مشاهده می‌کنیم، در حالتی که ما با استفاده از فن، جریان اجباری در بخش مخزن ایجاد می‌کنیم. تغییرات دما در مخزن نسبت به شرایط ایستا کمتر خواهد بود. در ساعت اولیه روز کمترین مقدار دما را داریم و در طول زمان روز دما با شیب مثبتی افزایش می‌یابد و در انتهای روز به کمترین مقدار خود می‌رسد.

استفاده از فن به‌منظور ایجاد جریان اجباری بکار می‌رود و کاربرد آن برای حالتی است که سیستم هوا گرم‌کن در حالت خشک‌کن قرار دارد. بنابراین در این حالت باید شرایط جریان اجباری را ایجاد کنیم تا انتقال جرم در هنگام وجود محصولات جهت خشک‌کردن افزایش یابد و به عبارتی با ایجاد جریان هوای اجباری تبخیر سطحی را زیاد می‌کنیم تا زمان خشک شدن به کمترین مقدار برسد. همچنین کیفیت محصولات تولیدی در خشک‌کن افزایش یابد. پس ایجاد شرایط جریان اجباری در سامانه برای مصارف خشک‌کن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

### ۳-۹-۴ شار تابشی خورشید برای حالت‌های مورد بررسی

در شکل ۱۳-۴ به مقایسه شار خورشیدی برای کلکتور در حالت ایستا و غیر ایستا در دو روز مورد آزمایش می‌پردازیم و آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهیم.



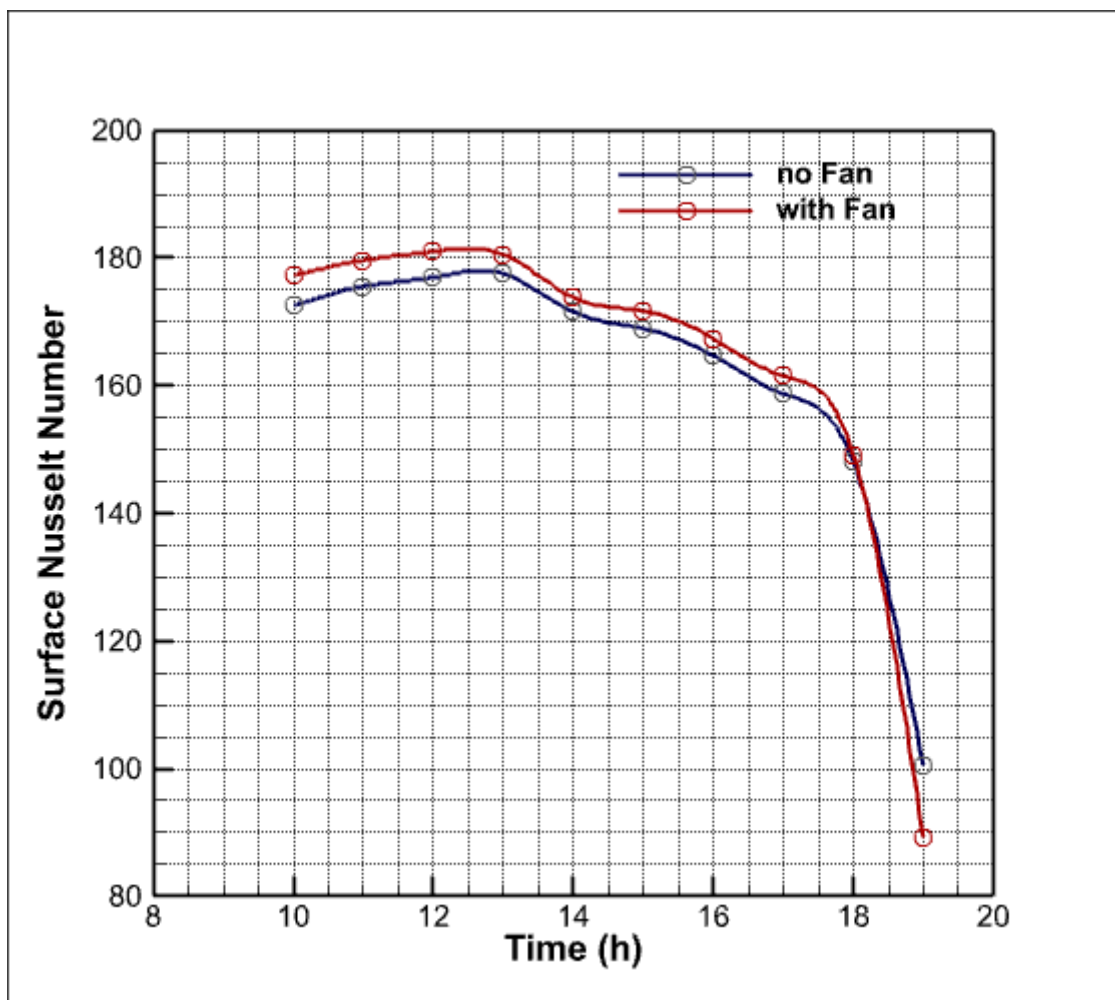
شکل ۱۳-۴ شار خورشیدی در کلکتور برای دو روز مورد بررسی در حالت جریان آزاد و اجباری

همان‌طور که می‌بینیم در دو حالت مورد بررسی شار خورشیدی در طول روز بین مقادیر ۱۴۰ تا ۶۴۳  $\text{w/m}^2$  تغییر می‌کند و در طول ساعات روز مقادیر آن‌ها نسبت به هم اختلاف کمی دارند. با توجه به اینکه آزمایش در دو روز نزدیک به هم انجام شد، انتظار می‌رفت که شار خورشیدی باهم مطابقت داشته باشند. نتایج نشان می‌دهد، بیشترین شار خورشیدی در ساعت ۱۳ است که زمان ظهر خورشیدی

می‌باشد. همچنین، هر چه به ساعت پایانی روز نزدیک می‌شویم از تابش خورشید کاسته می‌شود و در نتیجه شار تابشی دریافتی روی کلکتور لوله خلأ کاهش پیدا می‌کند.

#### ۴-۹-۴ عدد ناسلت برای دو حالت کلکتور

در شکل ۴-۱۴ به مقایسه عدد ناسلت برای کلکتور در حالت ایستا و غیر ایستا می‌پردازیم و آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این مقایسه به منظور ارزیابی تأثیر فن بر عملکرد حرارتی کلکتور لوله خلأ انجام شده است.

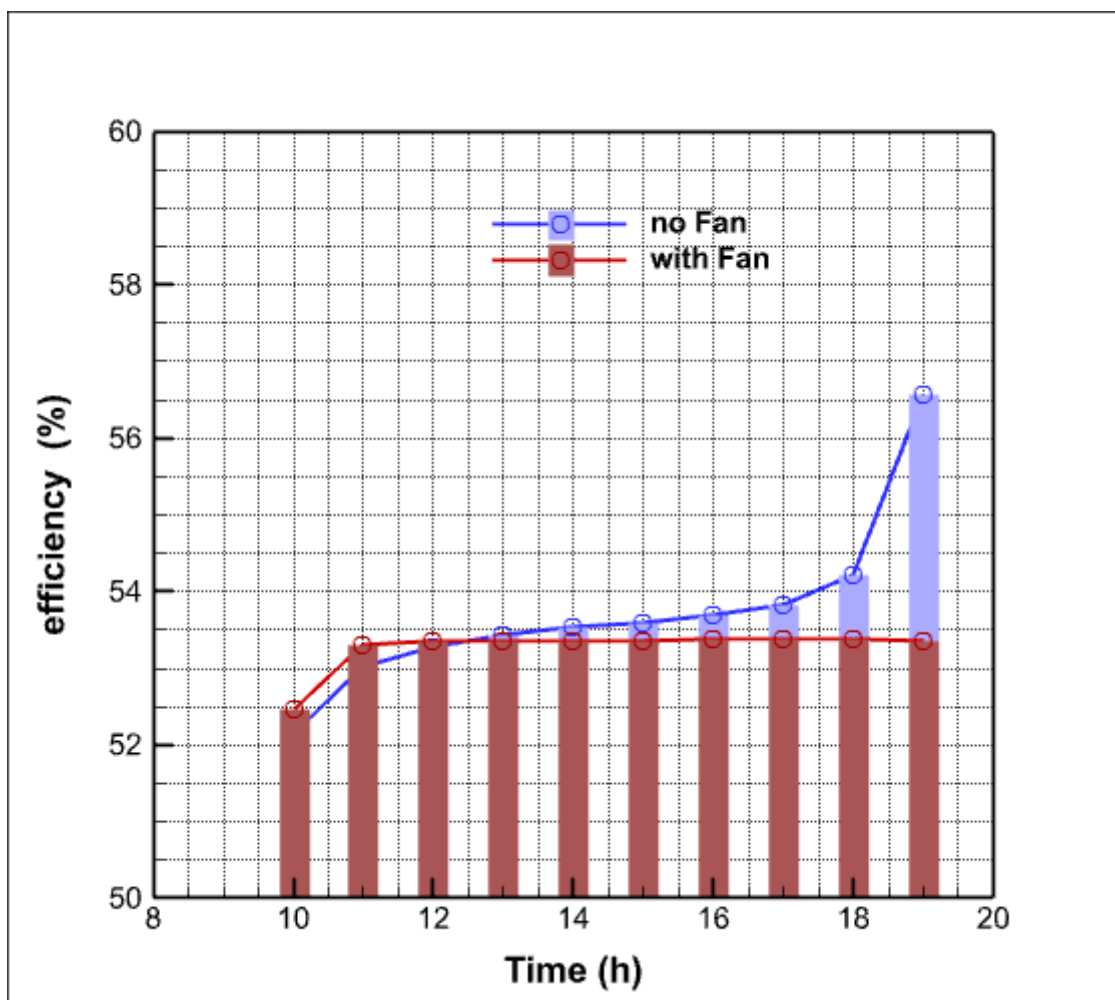


شکل ۴-۱۴ عدد ناسلت برای کلکتور در حالت ایستا و غیر ایستا

همان‌طور که می‌بینیم در دو حالت مورد بررسی ناسلت در طول روز بین مقادیر ۸۹ تا ۱۸۱ تغییر می‌کند و مقادیر آن‌ها در طول ساعات مختلف به هم نزدیک است. در حالتی که از فن استفاده می‌شود به دلیل ایجاد جابجایی اجباری، ناسلت تابع رینولدز خواهد بود و با افزایش سرعت سیال نرخ انتقال گرما بیشتر خواهد بود، بنابراین مقدار ناسلت نسبت به حالت ایستا بیشتر است. از آنجاکه شار خورشیدی در میانه روز بیشتر است، نرخ انتقال حرارت بیشتر خواهد بود و در نتیجه در ساعات میانی روز ناسلت بالاتری خواهیم داشت.

#### ۴-۹-۵ عملکرد حرارتی کلکتور

در شکل ۴-۱۵ بازدهی حرارتی کلکتور در حالت‌های مختلف در طول روز با یکدیگر مقایسه شده است که نتایج آن را در نمودار زیر نشان دادیم.



شکل ۴-۱۵ درصد بازدهی عملکرد حرارتی کلکتور بر اساس زمان در حالت‌های مختلف

همان‌طور که از نمودار فوق مشخص است، عملکرد حرارتی کلکتور با فن در طول ساعات روز با کمترین تغییر و در بازدهی حدود ۵۳٪ می‌باشد. عملکرد حرارتی کلکتور در حالت پایا در طول ساعات روز بین ۵۲٪ تا ۵۶٪ تغییر می‌کند. با توجه به رابطه‌ی ۳-۷۶ و نتایج به‌دست‌آمده روی نمودار به این نتیجه می‌رسیم که هرچقدر اختلاف دما، بین دمای میانگین مخزن و دمای اولیه سیال بالاتر باشد عملکرد حرارتی سیستم کمتر خواهد بود.

در حالتی که از فن استفاده‌شده به دلیل نوسان دمایی کمتر، اختلاف دما در ترم  $\frac{(T_f - T_a)}{G_t}$  (بر اساس رابطه ۳-۷۶) کمتر خواهد بود و در نتیجه کلکتور عملکردی با نوسان کمتر در طول روز خواهد داشت. برای حالتی که سیستم در شرایط پایا قرار دارد، دمای میانگین مخزن با اختلاف بیشتری همراه است.

بنابراین با افزایش اختلاف دما بین دمای میانگین مخزن و دمای اولیه سیال عملکرد حرارتی در طول ساعات روز متفاوت خواهد بود. همان‌طور که می‌دانیم دمای میانگین مخزن حاصل شار تابشی وارد شده به کلکتور است. در نتیجه مطابق نمودار در ساعات بین ۱۴:۰۰ الی ۱۹:۰۰ برای حالت پایا مشاهده می‌کنیم؛ هرچقدر شار تابشی کمتر شود، اختلاف دمای میانگین و دمای اولیه کمتر می‌شود پس بازدهی بیشتر خواهد بود. از طرف دیگر در ساعات بین ۱۰:۰۰ الی ۱۳:۰۰ می‌بینیم هرچقدر به ساعت ابتدایی روز نزدیک‌تر می‌شویم به دلیل بیشتر شدن اختلاف بین مقادیر دمای اولیه و دمای میانگین مخزن بازدهی کاهش می‌یابد.

اگر میانگین بازدهی حرارتی سیستم در طول روز را بررسی کنیم؛ به این نتیجه می‌رسیم که بازدهی حرارتی کلکتور، در حالت ناپایا ۵۳/۲۷٪ و در حالت پایا ۵۳/۷۲٪ خواهد بود. بنابراین در حالت ناپایا کاهش محسوسی در عملکرد حرارتی سیستم مشاهده می‌کنیم که به دلیل، اتلاف حرارتی بسیار ناچیز در سیستم است.



## فصل ۵: نتیجه گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

در این مسئله، مدل سازی یک خشک کن خورشیدی لوله خلأ انجام شد که داده های آزمایشگاهی حاصل از اندازه گیری این مدل برای شبیه سازی عددی در حالت هوا گرم کن مورد استفاده قرار گرفت. بنابراین کلکتور هوا گرم کن خورشیدی را به روش عددی شبیه سازی کردیم و اعتبار سنجی با نتایج حل عددی انجام دادیم. سپس نتایج آن را به صورت نمایه هایی از تغییرات دما و نمودارهایی از میزان شار تابشی و بازدهی عملکرد حرارتی در طول روز به دست آوردیم. در انتها نمودارهای آن جهت ارزیابی از صحت عملکرد مورد مقایسه قرار گرفته اند که بهبود قابل ملاحظه ای از نظر کاهش نوسانات دمایی در طول روز نشان می دهد.

## ۵-۲ نتیجه گیری

در این پژوهش ما سعی کردیم با مدل سازی هوا گرم کن خورشیدی با کلکتور لوله خلأ به شبیه سازی عددی آن با استفاده از نرم افزار تحلیلی فلوئنت بپردازیم و نتایج استخراج شده برای اعتبار سنجی را با داده های آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دهیم. بدین ترتیب که ابتدا مدل مورد نظر را با استفاده از پارامترهای موجود طراحی نموده و سپس شبکه بندی کرده ایم و در ادامه شرایط مرزی مورد نظر را اعمال کرده و حل عددی آن را انجام دادیم. در انتها نتایج پارامترهای تغییرات دما و شار خورشیدی و بازده حرارتی را برای کلکتور به دست آورده و مورد تحلیل قرار دادیم.

نتایج حل عددی نشان می دهد که مدل شبیه سازی شده بر داده های تجربی نزدیک است. این امر بر روی نمودار نشان داده شده است، که مشاهده کردیم انطباق خوبی با یکدیگر دارند و عملکرد مدل حل عددی را مثبت ارزیابی می کند. سپس کلکتور لوله خلأ خورشیدی در دو حالت؛ جریان آزاد و جریان اجباری تحلیل شد. بررسی ها نشان دادند در حالتی که از فن برای ایجاد جریان اجباری استفاده می شود، عدد ناسلت افزایش می یابد. همچنین بازدهی عملکرد حرارتی کلکتور در شرایط ناپایا برای طول زمان

مورد مطالعه نوسان بسیار کمی نسبت به حالت پایا نشان داد. با توجه به شکل ۴-۱۵ روند یکنواخت بازدهی حرارتی در طول ساعات روز بیانگر عملکرد مطلوب این سیستم برای کاربردهای خاص است. نتایج نشان دادند که میانگین بازدهی عملکرد حرارتی سیستم در طول روز برای حالت ناپایا ۵۳/۲۷٪ است. بنابراین با توجه به کاربرد این مدل در مصارف خشک‌کن با استفاده از هوای گرم تولیدی در این سیستم، می‌توان در شرایط خشک‌کن نیز مدل شبیه‌سازی شده را مورد تحلیل و ارزیابی قرارداد. نتایج نشان می‌دهند، در حالت خشک‌کن به دلیل نوسانات دمایی کم در طول ساعات روز، هوای گرم تولیدی مناسب برای مصارف خشک‌کن در شرایط کاری مناسب است.

## ۵-۳ پیشنهادها

سایر بررسی‌ها و مطالعاتی که در زمینه شبیه‌سازی با حل عددی روی کلکتورهای لوله خلأ خورشیدی و سیستم هوا گرم‌کن می‌توان انجام داد به تفکیک در زیر ارائه می‌گردد:

- این شبیه‌سازی برای حالت هوا گرم‌کن انجام شده است اما با توجه به اینکه دستگاه قابلیت استفاده در حالت خشک‌کن را نیز دارد با در نظر گرفتن محصولات در داخل دستگاه می‌توانیم در حالت خشک‌کن هم مدل را شبیه‌سازی کنیم. زمان خشک شدن محصولات و انتقال جرم را مورد ارزیابی قرارداد.
- در شبیه‌سازی مطابق اطلاعات آزمایشگاهی برای حالت پنج لوله نتایج را به دست آوردیم این در حالی است که می‌توان برای مدلی با تعداد لوله‌های بالاتر و مدل‌هایی با تعداد لوله مختلف شبیه‌سازی انجام داد و همچنین می‌توان سرعت چرخش هوای درون بخش مخزن را مقدار بالاتر و متفاوتی در نظر گرفت که قاعدتاً برای پیش‌بینی زمان خشک شدن محصولات و سنجش کارایی سیستم در شرایط متفاوت راهکارهای مفیدی می‌تواند باشد.

- می‌دانیم فرایند تولید هوای گرم برای مصارف مختلف از جمله خشک‌کردن در زمانی که تابش خورشید به هر علتی دچار نوسان و یا افت شدت شود؛ سیستم در پاسخ‌گویی به نیاز بخش مصرف دچار مشکل خواهد شد. بدین منظور با لحاظ کردن ذخیره‌سازها و مواد تغییر فاز دهنده در مدل‌سازی می‌توان عملکرد کلی سیستم را بهبود داد.
- همان‌طور که ذکر کردیم لوله‌های خلأ بر اساس سیکل کاری به چند دسته طبقه‌بندی می‌شوند که فناوری بکار گرفته‌شده در آن‌ها متفاوت است. در این پژوهش، لوله خلأ مورد استفاده در مدل‌سازی از ساده‌ترین نوع بوده که برای بررسی بیشتر می‌توان از سایر مدل‌های لوله خلأ یا مدل‌هایی با نوآوری جدید برای بهبود عملکرد سیستم استفاده کرد.



- [1] Weiss, W. Mauthner, F. Solar Heat Worldwide - Markets and Contribution to the Energy Supply .1. Austria: Solar Heating & Cooling Programme, 2012.
- [2] Arizu, D. Balaya, P. Direct Solar Energy - IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation United Kingdom: Cambridge University Press, 2011.
- [3] Goswami, D.Y. Kreith, F. Kreider, J.F. Principles of Solar Engineering, London: Taylor & Francis, 2000.
- [4] Rayogirou, S.A. Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, 2004.
- [5] Sabiha MA, Saidur R, Mekhilef S, Mahian O. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. Renew Sustain Energy Rev 2015; 51:1038–54.
- [6] Nkwetta DN, Smyth M, Zacharopoulos A, Hyde T. Experimental performance evaluation and comparative analyses of heat pipe and direct flow augmented solar collector. Appl Therm Eng 2013; 60:225–33.
- [7] Siva Kumar S, Mohan Kumar K, Sanjeev Kumar SR. Design of evacuated tube solar collector with heat pipe materials today: proceedings, vol. 4; 2017. p. 12641–6.
- [8] Li ZY, Chen C, Luo HL, Zhang Y, Xue YN. All-glass vacuum tube collector heat transfer model used in forced-circulation solar water heating system. Sol Energy 2010;84(8):1413–21.
- [9] Bracamonte Johane, Parada José, Dimas Jesús, Baritto Miguel. Effect of the collector tilt angle on thermal efficiency and stratification of passive water in glass evacuated tube solar water heater. Appl Energy 2015C 155:648–59.
- [10] Abdulkadir KOCER, Ibrahim ATMACA and Can ERTEKIN, A COMPARISON OF FLAT PLATE AND EVACUATED TUBE SOLAR COLLECTORS WITH F-CHART METHOD, J. of Thermal Science and Technology, 35, 1, 77-86, 2015.
- [11] Amit Kumar and Avadhesh Yadav. Experimental Investigation of an Air Heating System Using Different Types of Heat Exchangers Incorporated with an Evacuated Tube Solar Collector. Environmental Progress & Sustainable Energy Vol.00, No.00; 2016
- [12] Yadav, Y., & Bajpai, V.K. (2012). Thermal performance of one-ended evacuated tube solar air collector at different flow rates: Experimental investigation, International Journal of Ambient Energy, 33, 35–50.
- [13] Mehla, N., & Yadav, A. (2015). Experimental analysis of thermal performance of evacuated tube solar air collector with phase change material for sunshine and offsunshine hours, International Journal of Ambient Energy, doi:10.1080/01430750.2015.1074612.
- [14] Ciril Arkar, Sas'o Medved. Optimization of latent heat storage in solar air heating system with vacuum tube air solar collector. Solar Energy 111 (2015) 10–20.
- [15] Ma LD, Lu Z, Zhang JL, Liang RB. Thermal performance analysis of the glass evacuated tube solar collector with U-tube. Build Environ 2010; 45:1959–67.
- [16] Abdul Waheed Badar, Reiner Buchholz, Yongsheng Lou and Felix Ziegler, CFD based analysis of flow distribution in a coaxial vacuum tube solar collector with

- lamina flow conditions, *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2012, 3:24.
- [17] Liang R, Ma L, Zhang J, Zhao D. Theoretical and experimental investigation of the filled-type evacuated tube solar collector with U tube. *Solar Energy* 2011; 85:1735–44.
  - [18] Li Zhiyong, Chen Chao, Luo Hailiang, Zhang Ye, Xue Yaning. All-glass vacuum tube collector heat transfer model used in forced-circulation solar water heating system. *Sol Energy* 2010; 84:1413–21.
  - [19] Daghighi Roonak, Shafieian Abdellah. An experimental study of a heat pipe evacuated tube solar dryer with heat recovery system. *Renew Energy* 2016; 96:872–80.
  - [20] Jafarkazemia Farzad, Abdi Hossein. Evacuated tube solar heat pipe collector model and associated tests. *Renew Sustain Energy*. 2012; 4:1–13.
  - [21] Kabeel AE, Khairat Dawood Mohamed M, Shehata Ali I. Augmentation of thermal efficiency of the glass evacuated solar tube collector with coaxial heat pipe with different refrigerants and filling ratio. *Energy Convers Manage* 2017; 138:286–98.
  - [22] Rodriguez-Ubinas, E., Ruiz-Valero, L., Vega, S., Neila, J., 2012. Applications of phase change material in highly energy-efficient houses. *Energy Build.* 50 (1), 49–62.
  - [23] Saman, W., Bruno, F., Halawa, E., 2005. Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system. *Sol. Energy* 78 (2), 341–349.
  - [24] Charvat, P., Klimes, L., Ostry, M., 2014. Numerical and experimental investigation of a PCM-based thermal storage unit for solar air systems. *Energy Build.* 68 (A), 488–497.
  - [25] De Gracia, A., Navarro, L., Castell, A., Ruiz-Pardo, A., Alvarez, S., Cabeza, L.F., 2013. Experimental study of a ventilated facade with PCM during winter period. *Energy Build.* 58 (1), 324–332.
  - [26] A.R. Umayal Sundari p. Neelamegam and c.v. Subramanian. Performance of Evacuated Tube Collector Solar Dryer with and Without Heat Sources. *Iranica J. Energy & Environ.*, 4(4): 336-342, 2013.
  - [27] A.G.M.B. Mustayena S. Mekhilefa R. Saidur, Performance study of different solar dryers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 34, June 2014, Pages 463-470
  - [28] E. K. Forson, M. A. Nazha, H. Rajakaruna, Experimental and simulation studies on a single pass, double duct solar air heater, *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 8, pp. 1209-1227, 2003.
  - [29] K. Aharwal, B. Gandhi, J. Saini, Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater, *Renewable energy*, Vol. 33, No. 4, pp.585-596,2008
  - [30] A. Saxena, G. Srivastava, V. Tirth, Design and thermal performance evaluation of a novel solar air heater, *Renewable Energy*, Vol. 77, pp. 501-511,5//, 2015.
  - [31] S. Singh, P. Dhiman, Exergoeconomic analysis of recyclic packed bed solar air heater- sustained air heating system for buildings, *Journal of Energy Storage*, Vol. 5, pp.33-47, 2/1, 2016.
  - [32] R. Vaziri, M. İlkan, F. Egelioglu, Experimental performance of perforated glazed solar air heaters and unglazed transpired solar air heater, *Solar Energy*, Vol. 119, pp. 251-260, 2015.

- [33] C.-D. Ho, H. Chang, C.-S. Lin, C.-C. Chao, Y.-E. Tien, Analytical and experimental studies of wire mesh packed double-pass solar air heaters under recycling operation, *Energy Procedia*, Vol. 75, pp.403-409, 2015.
- [34] N. Rahbar, M. Javadi Nyazzy, c. Zohoorian divine, to evaluate the thermal performance of an air-water heaters in different conditions, Eighteenth Annual Conference of Mechanical Engineering, 1389.
- [35] h. Taheriyani, A Mohseni Langerodiy, Experimental Evaluation of warm air heaters in residential space heating, energy conservation Conference, 1386.
- [36] M. Ahmadvand, h. A. Safarzadeh to investigate the impact of nano-coated barriers on the thermal performance of solar Hvagrmkn, the second national conference on applied research in electrical, mechanical and mechatronics, 1393.
- [37] Kurtbas, I., and Durmuş, A., Efficiency and Exergy Analysis of a New Solar Air Heater, *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1489-1501, (2004).
- [38] Naphon, P., On the Performance and Entropy Generation of the Double-Pass Solar Air Heater with Longitudinal Fins, *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1345-1357, (2005).
- [39] Karsli, S., Performance Analysis of New-design Solar Air Collectors for Drying Applications, *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1645-1660, (2007).
- [40] Esen, H., Experimental Energy and Exergy Analysis of a Double-flow Solar Air Heater Having Different Obstacles on Absorber Plates, *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1046-1054, (2008).
- [41] Oztop, H.F., Bayrak, F., and Hepbasli, A., Energetic and Exergetic Aspects of Solar Air Heating (Solar Collector) Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 59-83, (2013).
- [42] Alim, M.A., Abidin, Z., Saidur, R., Hepbasli, A., Khairul, M.A., and Rahim, N.A., Analyses of Entropy Generation and Pressure Drop for a Conventional Flat Plate Solar Collector using Different Types of Metal Oxide Nanofluids, *Energy and Buildings*, Vol. 66, pp. 289-296, (2013).
- [43] Karim, M.A., Perez, E., and Amin, Z.M., Mathematical Modelling of Counter Flow V-Groove Solar Air Collector, *Renewable Energy*, Vol. 67, pp. 192-201, (2014).
- [44] Bahrehmand, D., Ameri, M., and Gholampour, M., Energy and Exergy Analysis of Different Solar Air Collector Systems with Forced Convection, *Renewable Energy*, Vol. 83, pp. 1119-1130, (2015).
- [45] Abuşka, M., and Şevik, S., Energy, Exergy, Economic and Environmental (4E) Analyses of Flat-plate and V-groove Solar Air Collectors Based on Aluminium and Copper, *Solar Energy*, Vol. 158, pp. 259-277, (2017).
- [46] Ansari, M., and Bazargan, M., Optimization of Heat Transfer and Pressure Drop in a Solar Air Heater with Ribbed Surface, *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, pp. 137-146, (2017).
- [47] Abuşka, M., Energy and Exergy Analysis of Solar Air Heater Having New Design Absorber Plate with Conical Surface, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 131, pp. 115-124, (2018).
- [48] Ural, T., Experimental Performance Assessment of a New Flat-plate Solar Air Collector Having Textile Fabric as Absorber using Energy and Exergy Analyses, *Energy*, Vol. 188, pp. 116-116, (2019).
- [49] Reddy, J., Debnath, S., and Das, B., Energy and Exergy Analysis of Wavy Plate Solar Air Collector using a Novel Hybrid Expert System, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 41, pp. 397, (2019).

- [50] Fudholi, A., and Sopian, K., A Review of Solar Air Flat Plate Collector for Drying Application, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 102, pp. 333-345, (2019).
- [51] Raam Dheep, G., and Sreekumar, A., Experimental Studies on Energy and Exergy Analysis of a Single-Pass Parallel Flow Solar Air Heater, *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 142, (2020).
- [52] Hatami, S., Payganeh, G., and Mehrpanahi, A., Energy and Exergy Analysis of an Indirect Solar Dryer Based on a Dynamic Model, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 244, pp. 118809, (2020).
- [53] Ma, Z., Ren, H., and Sun, Z., Energy and Exergy Analysis of a Desiccant Cooling System Integrated with Thermal Energy Storage and Photovoltaic/Thermal-Solar Air Collectors, *Science and Technology for the Built Environment*, Vol. 26, pp. 12-27, (2020).
- [54] 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) 285e294 (In Persian).
- [55] Kim Yong Sin, Balkoski Kevin, Jiang Lun, Winston Roland. Efficient stationary solar thermal collector systems operating at a medium-temperature range. *Appl Energy*, 2013;111:1071–9.
- [56] Weiss W, Mauthner M. A solar heat worldwide. A markets contribution energy supply; 2010.
- [57] W. Weiss, M. Spörck-Dür, *Solar Heat Worldwide Global Market Development and Trends in 2017/Detailed Market Figures 2016*, IEA-SHCP, May 2018. Accessed on May, 2018
- [58] Demirbaş A. Global Renewable Energy Resources. *Energy Sources, Part A*, 2006;28(8):779-92.
- [59] Arata, A., Sharma, V.K., Spagna, G., "Performance evaluation of solar assisted dryers for low temperature drying application-II: experimental results", *Energy Conversion and Management*, vol. 34, no. 5, pp. 417–426, 1993.
- [60] International Energy Agency, *world energy outlook-october 2020*.
- [61] Galloway, T., 2004, *Solar House: A Guide for the Solar Designer*.
- [62] Ali Jaber Abdulhamed Review of solar parabolic-trough collector geometrical and thermal analyses, performance, and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 91, August 2018, Pages 822-831.
- [63] Soteris A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 30, Issue 3, 2004, Pages 231-295, 2004.
- [64] F.J. Diez et al, Modelling of a flat-plate solar collector using artificial neural networks for different working fluid (water) flow rates, *Solar Energy* Volume 188, August 2019, Pages, 1320-1331, 2019.
- [65] K. Chopra, V.V. Tyagi, A.K. Pandey, Ahmet Sari, Global advancement on experimental and thermal analysis of evacuated tube collector with and without heat pipe systems and possible applications, *Applied Energy*, Volume 228, 15 October 2018, Pages 351-389.
- [66] M. Shadabfar, A numerical study of the effect of vacuum tube length and angle on thermal performance of solar collectors, *25th Annual Conference of Mechanical Engineering*. (2017).
- [67] MR. Moltames, Determination of fixed and adjustable stepless angle of flat plate collectors for different cities of Iran endnote, *1st International Engineering Congress*, Shiraz, (2017).

- [68] VI. Budihardjo, G. Morrison, Performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters, *Solar Energy*, 83(1) (2009) 49-56.
- [69] R. Tang, W. Gao, Y. Yu, H. Chen, Optimal tiltangles of all-glass evacuated tube solar collectors, *Energy*, 34(9) (2009) 1387-1395.
- [70] R. Tang, Y. Yang, W. Gao, Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tiltangles, *Solar Energy*, 85(7) (2011) 1381-1389. Chow, Z. Dong, L.-S. Chan, K.-F. Fong, Y. Bai, Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Hong Kong, *Energy and Buildings*, 2011, 43(12) (2. TEVE-TEV (1).
- [71] Shah L.J., Furbo S., 2004, Vertical Evacuated Tubular-Collectors Utilizing Solae Radiation from All Direction, Denmark, *Applied Energy*, 78, pp371-395.
- [72] Faca o J., Oliveira C.A., 2005, Modeling Laminar Heat Transfer in a Curved Rectangular Duct with a Computational Fluid Dynamics Code, *Numerical Heat Transfer. Part A.*, 48: pp 165-177.
- [73] Budiharjo I., Morison G.L., 2008, Performance of Water-In-Glass Evacuated Tube Solar Water Heaters, Australia, *Solar Energy*.
- [74] Senthilkumar R., Vaidyanathan S., Sivaraman B., 2011, Performance Investigation of Heat Pipe Using Aqueous Solution of n-Pentanol with Different Inclinations, *Journal of Mechanical Science and Technology*, pp. 923-929.
- [75] Azad E., 2011, Theoretical Analysis to Investigate Thermal Performance of Co-Axial Heat pipe Solar Collector, *Heat Mass Transfer*, Springer-Verlag.
- [76] Azad E., Moztarzadeh F., Zargham N., 1986, An Experimental Study of a Co-Axial Heat Pipe Solar Collector, *Heat Recovery System Vol.6. No.3*, PP.255-258.
- [77] Bae C.H., Kang C.H., Chung K.T., Suh J.S., Prediction of Thermal Performance of Hot Water System with a Concentric Evacuated Tube Solar Collector using Axially Grooved Heat Pipe, *Proceedings of the 2006 WSEAS/IASME International Conference on Heat and Mass Transfer*, Miami, Florida, USA, January 18-20, 20 (pp50-55),2006.
- [78] Bae C.H., Kang C.H., Chung K.T., Suh J.S., Prediction of Thermal Performance of Hot Water System with a Concentric Evacuated Tube Solar Collector using Axially Grooved Heat Pipe, *Proceedings of the 2006 WSEAS/IASME International Conference on Heat and Mass Transfer*, Miami, Florida, USA, January 18-20, 20 (pp50-55),2006.
- [79] Kim Y., Seo T., 2007, Thermal Performance Comparisons of the Glass Evacuated Tube Solar Collectors with Shape of Absorber Tube, Korea, *Renewable Energy* 32, pp 772-795.
- [80] V.K. Jebasingh G.M. JoselinHerbert, A review of solar parabolic trough collector Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 54, February 2016, Pages 1085-1091
- [81] S. A. R. Shojaee, Use of active and passive solar systems in residential buildings, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 113, © 2008 WIT Press.
- [82] Goswami, D.Y. Kreith, F. Kreider, J.F. Principles of Solar Engineering, London: Taylor & Francis,2000.
- [83] A. Bijan, Convection heat transfer, Wiley, New York, 1984.
- [84] ANSYS, 2019, "ANSYS FLUENT Thepry Guide, ANSYS FLUENT Users Guide", ANSYS Inc., Cononsburg, PA.
- [85] Frank P. Incopera, et al, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley Sons, 2007.

- [86] ASHRAE, 2009, ASHRAE Handbook: Fundamentals, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA.
- [87] Hay, J.E., Davies, J.A., 1980. Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. In: Hay, J.E., Won, T.K. (Eds.), Proc. of First Canadian Solar Radiation Data Workshop, 59. Ministry of Supply and Services, Canada.
- [88] Cooper, P. I. and R. V. Dunkle, Solar Energy, 26, 133 (1981). "A Non-Linear Flat-Plate Collector Model.
- [89] Duffie, A.J and Beckman A.W 2013 Solar Engineering of Thermal Processes Fourth Edition US.
- [90] Dickinson, William C.; Cheremisinoff, Paul N. (1980), Solar Energy Technology Handbook- Part A Engineering fundamentals. Marcel Dekker: USA.
- [91] Soteris A. Kalogirou, Solar energy engineering: processes and systems, 2nd Edition - October 25, 2013
- [92] Avadhesh Yadav, Anunaya Saraswat, An Experimental Study on Evacuated Solar Collector for Steam Geaneration in India, International Journal of Energy and Power Engineering, Vol:10, No:5, 2016.
- [93] Shoaib Saleem, Aun Haider, Naeem Abas, Review of Solar Thermal Water Heater simulations using TRNSYS, 2nd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET-2015).
- [94] Kim JT, Ahn HT, Han H, Kim HT, Chun W. The performance simulation of all glass vacuum tubes with coaxial fluid conduit. International Communication in Heat and Mass Transfer 2007; 34:587e97.
- [95] Sato, André Issao. "Análise numérica de um coletor solar de tubo evacuado." (2012): 76- f.
- [96] Imran Nazir Unar et al, Performance evaluation of solar flat plate collector using different working fluids through computational fluid dynamics, SN Applied Sciences, 2:209, 2020.
- [97] I. Budihardjo, G.L. Morrison, M. Behnia. Water-in-glass evacuated tube solar water heaters. Solar Energy 76 ,135.140,2003.

[۹۸] نقی ٹی، محمد، بررسی تجربی خشک کن خورشیدی با استفاده از لوله خلاء، دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، سال ۱۳۹۹.

# Abstract

In general, solar collectors are divided into two general categories in terms of application: air heaters and solar water heaters. Due to the lack of energy resources as well as environmental approaches, these devices have found an important role in many engineering applications such as building heating systems, solar dryers and so on. In addition to the simple structure, low cost of construction and maintenance are among the other advantages of such solar devices. In this research, we will investigate the numerical modeling of heat transfer in air solar heater with vacuum tube collector by Ansys Fluent software using numerical solution method. In this way, we first design the desired model and then network. After that, we apply the desired boundary conditions and perform its thermal analysis, and we obtain and evaluate the results of the values of temperature changes and heat transfer and heat flux. The higher the solar flux and the larger the collector surface area, the better the thermal performance of the system. The increase in heat transfer coefficient with the change of solar flux is well visible in the text diagrams. Also, the results of numerical solution have been validated with laboratory results, which show that the answers to the problem on the graph are in good agreement with each other. As a result, it can be said that the method of performing the numerical simulation process of the solar vacuum tube collector and the results have a good validity and the system can also be used for drying purposes in the drying mode.

**Keywords:** air heater, solar collector, numerical, modeling, evacuated tube, fluent



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Energy Conversion Engineering**

# **Numerical modeling of evacuated tube air heater solar collector**

By:

**Mahyar Alipour**

Supervisor:

**Dr. Ali Sareshtehdari**

Advisor:

**Dr. Mohammad Zamen**

February 2021