

## طراحی یک واحد آب‌گرمکن‌های خورشیدی (مخزن ذخیره ساز انرژی (TES))

### جهت استفاده در سیستم‌های تهویه مطبوع

مهرداد خراسانی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک تبدیل انرژی، شرکت کالای الکتریک  
آدرس پست الکترونیکی: m636khorasani@yahoo.com

### چکیده

مخزن ذخیره‌ساز انرژی<sup>۱</sup> یکی از فناوری‌های کلیدی برای محافظت و صرفه جویی انرژی می‌باشد. از فواید مهم نگهداری انرژی گرمایی می‌توان به مناسب بودن آن برای کاربردهای سرمایش و گرمایش اشاره کرد. می‌توان گفت نیروگاه‌هایی که با سیستم ذخیره‌ای نقلی ساخته شده‌اند، با استفاده از این ایده عمل می‌کنند به طوری که زمانیکه نیروگاه مازاد تولید دارد این انرژی اضافی صرف پمپاژ آب به ارتفاع می‌شود و در مواقع پیک بار شبکه برق این انرژی در نیروگاه برق آبی تخلیه می‌شود.

از فواید مهم مخزن ذخیره ساز انرژی می‌توان به مناسب بودن آن برای کاربردهای سرمایش و گرمایش اشاره کرد.

یک سیستم نگهداری انرژی گرمایی که ابتدا برای ذخیره سازی انرژی خورشیدی طراحی شده است لازم نیست که ضرورتاً برای همین استفاده محدود شود. این سیستم ممکن است برای ذخیره‌سازی انرژی مازاد نیروگاه‌ها، انرژی اضافی سیستم‌های تهویه مطبوع، فرایندهای صنعتی و ... مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین می‌تواند در نیروگاه‌ها و صنایع نفت و پتروشیمی استفاده گردد.

مخزن ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند نقش بسیار مهمی برای پاسخ‌گویی به نیاز جوامع برای انرژی تمیز و سازگار با محیط باشد. نگهداری انرژی گرمایی یک بخش کلیدی بسیاری از سیستم‌های گرمایی موفق می‌باشد. به طور کلی دو نوع سیستم ذخیره انرژی وجود دارد: ۱- محسوس ۲- پنهان

برای هر کدام از این محیط‌های ذخیره، بسته به نوع استفاده و محدوده دمایی، امکان انتخاب‌های متعددی وجود دارد. نگهداری انرژی گرمایی از طریق خنک کردن، گرم کردن، ذوب کردن، انجماد و یا تبخیر یک ماده، با ذخیره سازی انرژی در ارتباط است. انرژی به شکل گرما و یا سرما وقتی که فرایند برعکس می‌شود، قابل استحصال است.

در پروه حاضر آبگرمکن توسط سلول‌های خورشیدی سیال ذخیره ساز درون آبگرمکن را گرم و این گرما در سیال ذخیره می‌گردد تا در زمان‌های دیگر مصرف گردد.

**کلمات کلیدی:** نگهداری انرژی گرمایی، سلول‌های خورشیدی، آبگرمکن خورشیدی، سیال ذخیره ساز انرژی

### مقدمه

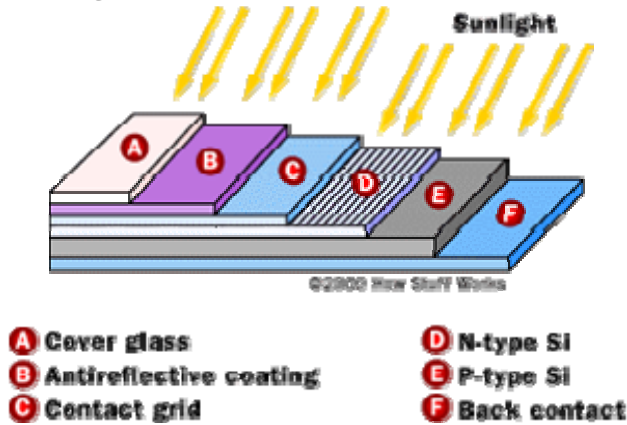
قدمت ذخیره سازی انرژی شاید به قدمت تمدن بشر برمی‌گردد. زمانی که انسان‌های اولیه یخ را برای استفاده های بعدی ذخیره می‌کردند. سیستم‌های بزرگ نگهداری انرژی گرمایی جدید، برای کاربردهای متعددی (در مقیاس وسیع)، از جمله برای نگهداری انرژی گرمایی خورشید جهت سیستم‌های تهویه ساختمانها مورد استفاده قرار گرفته است. فناوری نگهداری انرژی گرمایی اخیراً به اندازه ای پیشرفت کرده است که میتواند تاثیر مهمی بر فناوری مدرن داشته باشد. بیشتر کاربردهای نگهداری انرژی گرمایی شامل سیکل‌های ذخیره روزانه است اگرچه ذخیره سازی فصلی را هم شامل می‌شود. کاربردهای انرژی خورشیدی احتیاج به ذخیره کردن انرژی گرمایی برای دوره های زمانی در محدوده چند ساعت تا چند ماه را دارد. بیشتر سیستم‌های خورشیدی از ذخیره سازی روزانه استفاده می‌کنند.

به منظور ذخیره‌سازی انرژی، انرژی به صورت شیمیایی در محلول‌های الکترولیت‌های مجزایی ذخیره سازی می‌گردد. با برگرداندن جهت کارکرد، محلول‌های الکترولیتی می‌توانند انرژی ذخیره شده شیمیایی را به صورت الکترولیتی پس دهند. با استفاده از راکتورهای شیمیایی به عنوان محور اصلی کارکرد، کل سیستم فوق می‌تواند به صورت پیل سوختی نیز عمل نماید. میزان انرژی قابل ذخیره سازی وابسته به شکل و اندازه الکترودها می‌باشند. سلولی وجود دارد که امکان تبادل یون بین الکترولیت‌ها را فراهم می‌آورد. اما پروژه حاضر در بردارنده تولید انرژی بوسیله سیستم فتوولتائیک و ذخیره در مخزن آب می‌باشد (در پروژه حاضر ذخیره انرژی بجای استفاده در سیستم شیمیایی در یک مخزن آب می‌باشد)

### نوع سیال ذخیره ساز انرژی

در مورد ماده ذخیره ساز، بسته به نوع استفاده و دامنه دمایی، دامنه زیادی از انتخابها وجود دارد. برای ذخیره سازی گرمای محسوس، آب یک انتخاب عمومی است. زیرا در میان خصوصیات مثبت آن، این سیال در دمای محیط یکی از بالاترین ظرفیتهای حرارتی را دارا میباشد. اگرچه گرمای ویژه آب به بزرگی بسیاری از جامدات نیست اما آب از خاصیت سیال بودن برخوردار است بنابراین

با اتصال سلول‌ها (معمولا ۳۶ سلول) به صورت سری و موازی برای تولید ولتاژ و آمپراژ مطلوب، ساخته می‌شوند. پس از قرار دادن یک پوشش شیشه‌ای روی مدول آن را در یک قاب فلزی قرار می‌دهند و خروجیهای مثبت و منفی به پشت آن متصل می‌شود. شکل ۱ و ۲ اجزاء ساختمان مختلف یک سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.



میتواند به آسانی پمپ شود و انرژی را منتقل کند. علاوه بر آن آب امکان انتقال حرارت با سرعت مناسب را فراهم میکند.

یک فرایند کامل ذخیره سازی حداقل شامل سه مرحله است:

۱- شارژ کردن

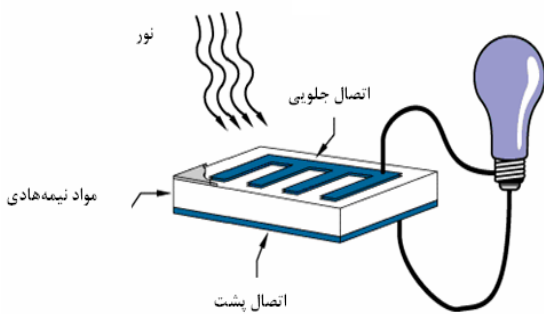
۲- ذخیره سازی

۳- تخلیه کردن

ذخیره انرژی گرمایی استفاده های زیادی دارد که عمده آن در ارتباط با استفاده های سرمایشی یا گرمایشی است. نگهداری انرژی گرمایی یک ارتباط و میانجی بین منبع گرمایی و استفاده کننده آن ایجاد میکند. یک مثال عمومی از این نمونه سیستمهای ذخیره سازی، آبگرمکن خورشیدی میباشد که منبع انرژی آن خورشید است و استفاده کننده آن نیز بشر میباشد. در این میانه، ذخیره سازی مورد نیاز است زیرا روند ذخیره سازی و تولید در مقایسه با تقاضاهای لحظه ای و زیاد، کند است. به علاوه، انرژی تابشی خورشید همیشه در دسترس نیست.

### روش کار سلول‌های خورشیدی

سلول‌های خورشیدی که در ماشین‌حساب‌ها و ماهواره‌ها دیده می‌شوند، سلول‌های فتوولتائیک یا مدول هستند. گروهی از سلول‌های خورشیدی که به صورت الکتریکی به یکدیگر متصل شده‌اند و در یک قاب به یکدیگر متصل شده‌اند، مدول نامیده می‌شود. فتوولتائیک همان‌طور که خود کلمه نشان می‌دهد (فتو=نور و ولتائیک=الکتریسیته) نور خورشید را مستقیما به الکتریسیته تبدیل می‌کنند. فتوولتائیک از نیمه‌هادیهایی مانند سیلیکون که هم‌اکنون رایج‌ترین ماده مورد استفاده است، ساخته می‌شوند. هنگامیکه نور به سلول برخورد می‌کند مقدار مشخصی از آن جذب می‌شود. انرژی جذب شده باعث می‌شود الکترون‌ها آزادانه حرکت کنند. سلول‌های فتوولتائیک یک یا تعداد بیشتری میدان الکتریکی دارند که الکترون‌های آزاد شده در این میدان‌ها حرکت می‌کنند. حرکت این الکترون‌ها جریان الکتریکی را به وجود می‌آورد و با قرار دادن اتصال فلزی در بالا و پایین سلول فتوولتائیک می‌توان این جریان را برای استفاده خارجی از پانل‌ها استخراج کرد مثلا این جریان می‌تواند مورد نیاز یک ماشین حساب را تامین کند. این جریان به اضافه ولتاژ سلول (که در نتیجه وجود میدان‌های الکتریکی به وجود می‌آید) توان تولیدی فتوولتائیک را تشکیل می‌دهند. [1]



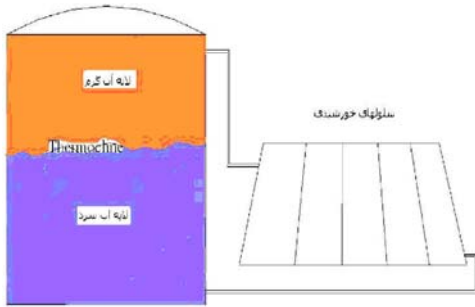
حالت مدار باز ۰/۵ تا ۰/۶ ولت است. مقدار آمپراژ خروجی به اندازه و بازده سلول، همچنین شدت نوری که به سطح سلول برخورد می‌کند وابسته است. در حالت معمولی، توان تولیدی سطحی با اندازه  $cm^2$  ۳۶۰۰، ۴۵ وات است.

### نمودار عملکرد پانل‌های فتوولتائیک

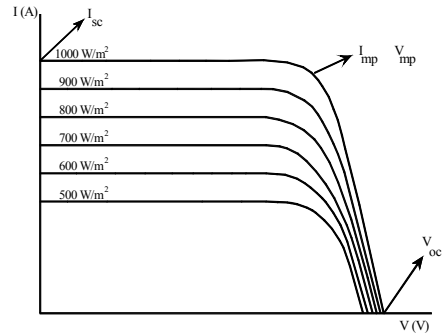
شکل معمول نمودار عملکرد پانل‌های فتوولتائیک در شکل ۳ آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود ولتاژ و آمپراژ تولیدی وابستگی شدیدی به مقدار تابش دریافتی روی سطح پانل‌ها دارد. در این شکل  $V_{mp}$  و  $I_{mp}$  به ترتیب آمپراژ و ولتاژ تولیدی هنگامیکه توان تولیدی ماکزیمم است، می‌باشند.  $I_{sc}$  آمپراژ تولیدی پانل در حالت اتصال کوتاه است.  $V_{oc}$  نیز ولتاژ مدار در حالت بدون بار است.

### ساختار سلول خورشیدی

اولین اجزای سلول خورشیدی نیمه‌هادی‌های نوع p و n است که در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند. قسمت دیگر شبکه ارتباط سلولی است. سیلیکون ماده‌ای درخشان است بنابراین ضریب بازتابش بزرگی دارد. فوتون‌هایی که بازتاب می‌شوند نمی‌توانند به وسیله سلول مورد استفاده قرار گیرند. به همین دلیل برای جلوگیری از بازتابش نور یک لایه ضد بازتابش روی سلول اضافه می‌شود که مقدار بازتابش را به کمتر از ۵ درصد می‌رساند. مدول‌های فتوولتائیک



شکل ۴: نمایی از مخازن لایه لایه شده گرمایی (Thermally stratified) نگهداری انرژی گرمایی



### نگهداری انرژی گرمایی

برای اینکه شرایط بالا ارضا شود، انواع متفاوتی از مخازن نگهداری انرژی گرمایی که بطور طبیعی لایه بندی می شوند، یکی از این موارد هستند که بدون هیچ گونه مانع داخلی با استفاده از این پدیده که سیال گرم به علت چگالی کم در بالای مخزن و سیال سرد به علت چگالی بیشتر نسبت به سیال گرم در پایین قرار میگیرد، کار میکنند. به همین جهت حجم این مخازن در مقایسه با انواع دیگر کاهش یافته و حجم سیال مرده نیز در آنها کم و بازده آنها زیاد است. [2]

چون این مخازن انرژی گرمایی را برای دوره های متناوب ذخیره می کنند، اتلاف حرارتی در این مخازن بسیار حایز اهمیت است، زیرا چگونگی عملکرد این مخازن در نگهداری انرژی گرمایی یکی از عوامل مهم در طراحی آنها است. سیستم های معمول نگهداری انرژی گرمایی امروزی، معمولاً از نوع محسوس (Sensible) هستند، و آب را به عنوان ذخیره کننده مورد استفاده قرار می دهند.

یک مخزن نگهداری انرژی گرمایی مناسب باید نیازهای زیر را برآورده کند:

- ✓ مخزن باید لایه بندی شده باشد، یعنی دو سیال با دمای متفاوت را جدا از هم نگاه داشته و اختلاط دو سیال حتی در زمان شارژ و تخلیه، مینیمم باشد.
- ✓ ظرفیت موثر نگهداری باید به گونه ای باشد که حجم سیال مرده در مخزن را مینیمم کند.

انتقال حرارت از مخزن باید مینیمم باشد. برای اینکه شرایط بالا ارضا شود، انواع متفاوتی از مخازن نگهداری انرژی گرمایی ساخته شده اند. مخازن نگهداری انرژی گرمایی که بطور طبیعی لایه بندی می شوند، یکی از این موارد هستند که بدون هیچ گونه مانع داخلی با استفاده از این پدیده که سیال گرم به علت چگالی کم در بالای مخزن و سیال سرد به علت چگالی بیشتر نسبت به سیال گرم در پایین قرار می گیرد، کار می کنند. به همین جهت حجم این مخازن

با توجه به مطالب گفته شده بعد از تولید انرژی آنچه اهمیت دارد نگهداری انرژی تولیدی است، بنابر بعد از استفاده از سلول های خورشیدی به عنوان تولید کننده انرژی جهت تولید این انرژی در زمان های دیگر نیازمند استفاده از مخازن گرمایی هستیم. [1]

### مخازن لایه لایه شده گرمایی (Thermally stratified) نگهداری

#### انرژی گرمایی

یکی از کاربرد های استفاده از سلول های خورشیدی استفاده در مخازن گرمایی است. بعد از تولید انرژی آنچه اهمیت دارد نگهداری انرژی تولیدی است.

چون این مخازن انرژی گرمایی را برای دوره های متناوب ذخیره می کنند، اتلاف حرارتی در این مخازن بسیار حایز اهمیت است، زیرا چگونگی عملکرد این مخازن در نگهداری انرژی گرمایی یکی از عوامل مهم در طراحی آنها است. سیستم های معمول نگهداری انرژی گرمایی امروزی، معمولاً از نوع محسوس (Sensible) هستند، و آب را به عنوان ذخیره کننده مورد استفاده قرار می دهند.

یک مخزن نگهداری انرژی گرمایی مناسب باید نیازهای زیر را برآورده کند:

- ✓ مخزن باید لایه بندی شده باشد، یعنی دو سیال با دمای متفاوت را جدا از هم نگاه داشته و اختلاط دو سیال حتی در زمان شارژ و تخلیه، مینیمم باشد.
  - ✓ ظرفیت موثر نگهداری باید به گونه ای باشد که حجم سیال مرده در مخزن را مینیمم کند.
- انتقال حرارت از مخزن باید مینیمم باشد. نمونه ای از این نوع مخازن در شکل ۴ نشان داده شده است.

در مقایسه با انواع دیگر کاهش یافته و حجم سیال مرده نیز در آنها کم و بازده آنها زیاد است. [2]

### پیشینه تحقیق

مخازن نگهداری انرژی گرمایی منفرد که در آن سیال از نظر دمایی به صورت لایه های مجزا وجود دارد، موضوع مطالعات تجربی و تئوری زیادی بوده است، که از اوایل سال ۱۹۷۰ میلادی در جهت ذخیره سازی انرژی خورشیدی آغاز شده است. براملیو (Brumleve) [۳] در سال ۱۹۷۴ عملی بودن موضوع استفاده از پدیده جدا شدن طبیعی آب گرم و سرد در مخازن نگهداری انرژی گرمایی (Natural thermocline) جهت جداسازی آب گرم و سرد در داخل یک مخزن منفرد را به اثبات رسانید. فعالیت های تئوری و تجربی زیادی از آن زمان به بعد پدیدار شد.

لاوان و تامپسون (Ivan and Thompson) [۴] در سال ۱۹۷۷ بصورت تجربی اثرات چندین پارامتر هندسی و دینامیکی از قبیل: محل درگاه ورودی و هندسه آن، میزان دبی جرمی، نسبت ارتفاع مخزن به قطر آن، و تفاوت دمای ورودی و دمای اولیه سیال درون مخزن را مطالعه کردند. مطالعات آنها نشان داد که توزیع دمای درون مخزن با افزایش نسبت ارتفاع به قطر مخزن، تفاوت دمای ورودی و دمای اولیه سیال درون مخزن، و افزایش قطر درگاه ورودی، بهبود پیدا می کند.

### پیشینه حل مدل های یک بعدی

مدلهای یک بعدی مخازن ذخیره انرژی گرمایی بسته به شرایط دمایی ورودی به دو دسته تقسیم میشود:

الف- مدل مخازن لایه بندی شده (stratified TES) که در آن دمای ورودی می تواند متغیر باشد. این مدل نیز خود به دو نوع مدل تقسیم می شود: مدل کاملاً مخلوط شده (fully-mixed) که در آن دمای کل مخزن یکنواخت فرض می شود و با زمان تغییر می کند، و مدل کاملاً لایه بندی شده (fully stratified) که در آن مخزن به لایه های مختلفی تقسیم میشود. این لایه ها هرکدام جداگانه دارای دمای یکنواخت می باشند و بدون تبادل گرما با لایه های کناری، تنها با محیط اطراف تبادل حرارت میکنند.

ب- مدل مخزن سیال گرم و سرد جدا شده (Thermocline TES) که در آن دمای ورودی ثابت فرض می شود.

### پیشینه حل مدل های دو بعدی

در این مدل معادلات حاکم عبارتند از: بقای جرم، بقای ممنتوم و بقای انرژی. حل این معادلات در دستگاههای مختلف (راست محور، استوانه ای و...) و به صورتهای مختلف آرام و مغشوش موضوع بسیاری از تحقیقات بوده است. این مطالعات بسته به فرضیات و روشهای عددی استفاده شده، متفاوت میباشد. بعضی از ابتدایی ترین

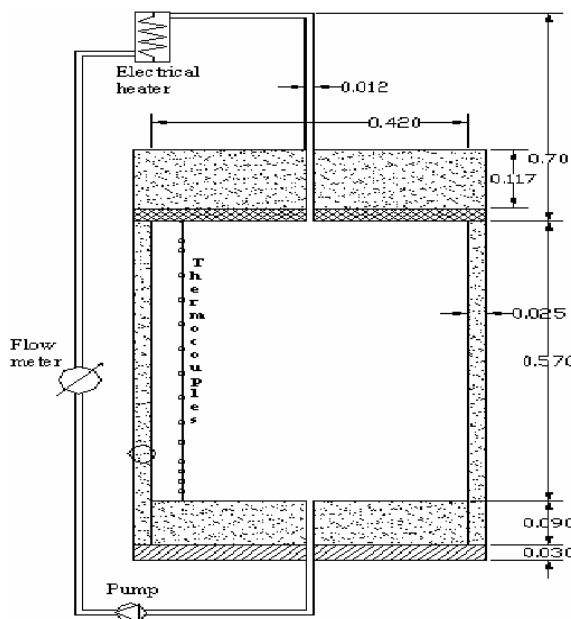
مطالعات عددی که در رابطه با مخازن ذخیره انرژی گرمایی در حالت مد دینامیکی صورت گرفته مربوط به کابلی (Cabelli 1977) میباشد. او معادلات بقا را در دستگاه راست محور به صورت ورتیسیتی-تابع جریان، و به صورت تفاضل محدود غیر صریح حل کرد. ترمهای مشتقات جابجایی با استفاده از روشهای تفاضل مرکزی مجزا سازی شده و در این صورت این معادلات در رینولدزهای بالا دچار ناپایداری میشوند. چن (Chan) و همکارانش در سال ۱۹۸۳ همین معادلات را با روش تفاضل محدود صریح حل کردند. آنها جریانهای ورودی و خروجی زیادی را از نظر شکل مورد بررسی قرار دادند و شبیه سازی کردند و برخلاف مشاهدات تجربی، نتایج آنها بیانگر این موضوع بود که جهت جریان در ورودی و خروجی، تاثیر زیادی بر بازده مخازن ندارد.

### نحوه طراحی مخازن نگهداری انرژی گرمایی

مخزن در ابتدا حاوی آبی هم دما با دمای محیط، می باشد. این حالت نمادی از مخزن تخلیه (دشارژ) شده است. سپس با استفاده از یک گرمکن (خورشیدی) دمای آب را به اندازه مطلوب بالا می برد. این آب توسط یک پمپ در سیستم به گردش در می آید و مخزن را پر می کند. دما در طول مخزن با استفاده از یک سری ترموکوپل که در فاصله ۱۷ سانتیمتری از مرکز مخزن قرار داده شده است، اندازه گیری میشود. طول لوله ورودی به مخزن ۰.۷ m، که ۰.۷۰ برابر قطر هیدرولیکی لوله ورودی است می باشد، به این منظور که جریان در هنگام ورود به مخزن کاملاً توسعه یافته بوده و اثرات کمتری روی جریان سیال درون مخزن و در نتیجه توزیع دمای درون آن داشته باشد. دبی سیال ورودی با یک فلومتر که در مسیر گردش آب قرار داده شده است اندازه گیری میشود. ترموکوپلی هم که در ورودی مخزن نصب شده دمای سیال ورودی را اندازه گیری می کند. مخزن با مواد عایق پشم شیشه و پلی استیرن منبسط شده عایق بندی شده است. میزان عایق بندی در بالا و پایین مخزن به گونه ای است که می توان میزان انتقال حرارت را با توجه به زمان و طول دوره اندازه گیری صفر فرض کرد، ولی در دیواره کناری مخزن میزان انتقال حرارت قابل توجه بوده که باید در مدل فیزیکی منظور شود. [7]

### مشخصات دستگاه

مدل آزمایشی مورد استفاده در حقیقت مدل کوچکی از مخازن نگهداری انرژی گرمایی می باشد، که عملکردی مشابه مخازن بزرگ دارد. نمای کلی از ابعاد و هندسه سیستم در شکل ۲ آمده است. چنانکه مشاهده می شود، مخزن در ابتدا حاوی آبی هم دما با دمای محیط، میباشد. این حالت نمادی از مخزن تخلیه (دشارژ) شده است. سپس یک گرمکن برقی که نمادی از کلکتورهای خورشیدی یا مازاد آب سیستم های گرمایش و... میباشد، دمای آب را به اندازه مطلوب بالا می برد. این آب توسط یک پمپ در سیستم به گردش در می آید



و مخزن را پر می کند. دما در طول مخزن با استفاده از یک سری ترموکوپل که در فاصله ۱۷ سانتیمتری از مرکز مخزن قرار داده شده است، اندازه گیری میشود. طول لوله ورودی به مخزن ۰.۷ m، که برابر قطر هیدرولیکی لوله ورودی است میباشد، به این منظور که جریان در هنگام ورود به مخزن کاملاً توسعه یافته بوده و اثرات کمتری روی جریان سیال درون مخزن و در نتیجه توزیع دمای درون آن داشته باشد. دبی سیال ورودی با یک فلومتر که در مسیر گردش آب قرار داده شده است اندازه گیری میشود. ترموکوپلی هم که در ورودی مخزن نصب شده دمای سیال ورودی را اندازه گیری میکند. مخزن با مواد عایق پشم شیشه و پلی استیرن منبسط شده عایق بندی شده است. میزان عایق بندی در بالا و پایین مخزن به گونه ای است که میتوان میزان انتقال حرارت را با توجه به زمان و طول دوره اندازه گیری صفر فرض کرد، ولی در دیواره کناری مخزن میزان انتقال حرارت قابل توجه بوده که باید در مدل فیزیکی منظور شود. [7]

### مدل فیزیکی

برای بررسی مساله و سیستم بیان شده، از دیدگاه دانش سیالات و انتقال حرارت باید مدلی از سیستم که خصوصیات تا حد امکان شبیه به خصوصیات سیستم تجربی دارد ایجاد شود. میزان شباهت مدل فیزیکی با مدل تجربی، دقت نتایج بدست آمده را مشخص می کند. در یک شبه سازی عددی، با توجه به هندسه متقارن مخزن، که موضوع اصلی این تحقیق می باشد، و محل ورودی و خروجی، از یک مدل تقارن محوری در دستگاه مختصات استوانه ای استفاده شده است. این ساده سازی که چندان هم دور از واقعیت نیست، زمان و هزینه محاسباتی را به مقدار زیادی کاهش داده و اجازه تحلیل و تمرکز بیشتری را روی قسمت اصلی مساله به ما می دهد. روی دیوار استوانه ای شکل مخزن که میزان انتقال حرارت قابل توجه است، برای جلوگیری از پیچیده شدن مساله، و با توجه به اینکه مدل زمانمند بوده و اگر عایق بندی ها نیز مدل شوند، افزایش قابل ملاحظه زمان و هزینه های محاسباتی را در پی دارد، از یک معادل سازی برای عایق ها به صورتی که در شکل ۵ آمده استفاده شده است. [7]

در نرم افزار مدلساز (فلوئنت) برای دیوار کناری مخزن شرط انتقال حرارت جابجایی منظور شده است. این شرط تنها به مقادیر  $h_{conv}$  و  $T_{\infty}$  نیاز دارد تا میزان انتقال حرارت و دمای دیواره را محاسبه کند. مقدار انتقال حرارت از مخزن در این نوع شرط مرزی از رابطه (۱) محاسبه می شود.

$$q = h(T_{\infty} - T_w) \quad (1)$$

در این جا با استفاده از روش مقاومت ها در انتقال حرارت، یک  $h_{equivalent}$  (ضریب انتقال حرارت معادل) به جای عایق دیوار و ضریب انتقال حرارت جابجایی واقعی مساله در نظر گرفته می شود. لذا در مدل فیزیکی دیگر عایق دیواره منظور نشده است. محاسبات این قسمت به صورت زیر می باشد:

$$q = U(T_{\infty} - T_w) \quad (2)$$

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3)$$

$$R_1 = \frac{L_1}{K_1}, R_2 = \frac{L_2}{K_2}, R_3 = \frac{1}{h} \quad (4)$$

$$h = 10 \text{ (w / m}^2 \text{ - k)}$$

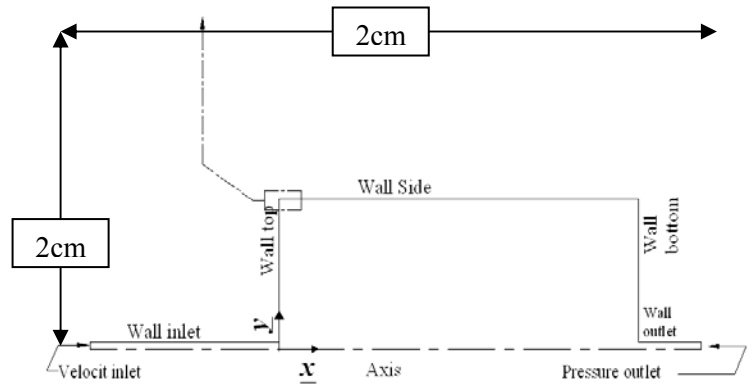
$$L_1 = .001 \text{ m } K_1 = 15 \text{ .1 (w / m - k)}$$

$$L_2 = .025 \text{ m } K_2 = .039 \text{ (w / m - k)}$$

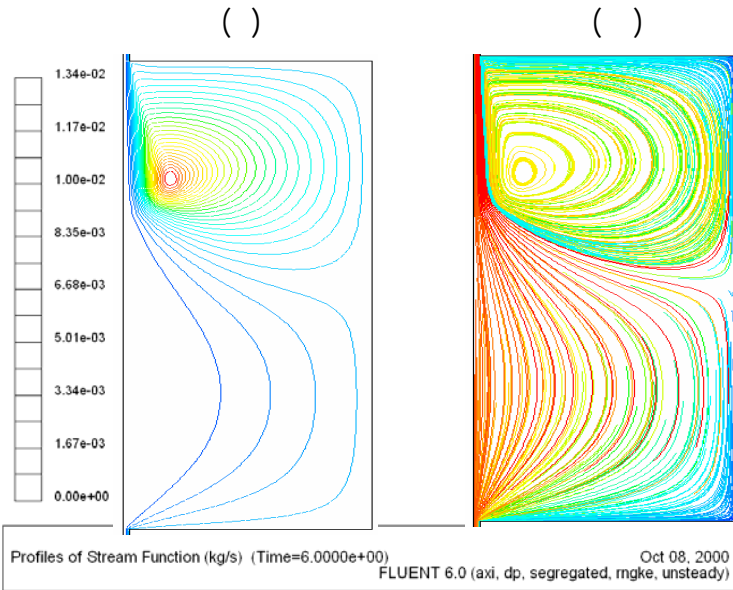
$$\Rightarrow h_{equivalent} = U = 1.35$$

## میدان سرعت و توزیع دما

هنگامی که سیال با دمایی بالا، به مخزنی حاوی همان سیال با دمایی پایین تر وارد می شود، بر اثر اختلاف چگالی دو سیال، سیال گرم تحت تاثیر نیروی شناوری در سطحی بالاتر نسبت به سیال سرد قرار می گیرد. این پدیده یک جریان ثانویه علاوه بر جریان ایجاد شده در اثر ورود سیال به مخزن ایجاد می کند. جریان ایجاد شده ناشی از ورود سیال رامیتوان در زمان اولیه پر شدن مخزن، که سیال گرم وارد مخزن میشود، در اشکال ۸ مشاهده کرد. [7]



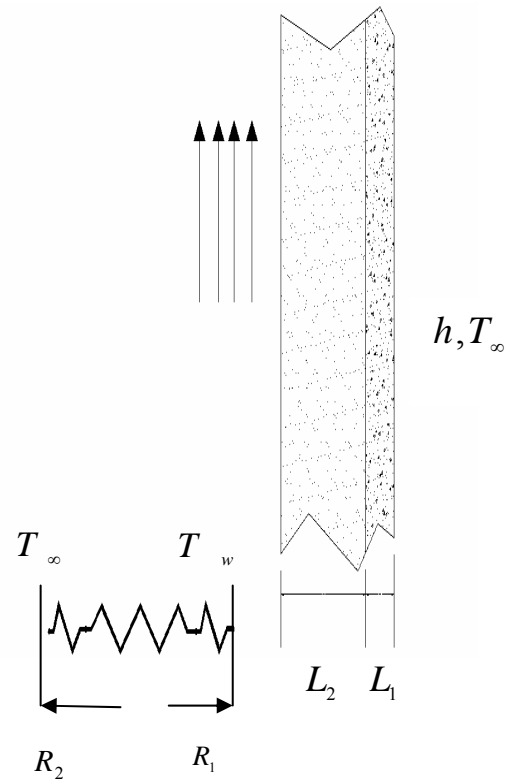
شکل ۶: مدل فیزیکی به همراه شرایط مرزی



( ) ( ) :

پس از ورود سیال گرم به مخزن، در روی جداره داخلی دیواره استوانه ای شکل که با محیط بیرون درارتباط است، در اثر انتقال حرارت جدار مخزن با محیط، انرژی گرمایی سیال از طریق هدایت از دیواره به بیرون منتقل شده و دمای سیال نزدیک دیواره کاهش می یابد. کاهش دمای سیال افزایش چگالی آن را به دنبال دارد. این فرایند باعث به وجود آمدن نیرویی در جهت جاذبه شده و یک حرکت رو به پایین را در کناره های مخزن ایجاد می کند. این حرکت با افزایش حجم سیال گرم ورودی، رفته رفته حرکت گردشی بزرگتری را در طول مخزن ایجاد می کند.

این حرکات ثانویه سیال در قسمت سیال گرم مخزن، باعث به وجود آمدن ناحیه ای میشود که دو سیال گرم ورودی و سیال سرد اولیه را از هم جدا می کند. دمای این لایه در قسمت بالا با دمای سیال گرم، و در پایین با دمای سیال سرد برابر بوده و یک توزیع دمایی تقریباً خطی در این ناحیه برقرار است. این لایه ترموکلاین (Thermocline) نام دارد. تحلیل این پدیده مطلوب موضوع تحقیقات بسیاری بوده



شکل ۷: ضریب انتقال حرارت جابجایی معادل

## خواص سیال

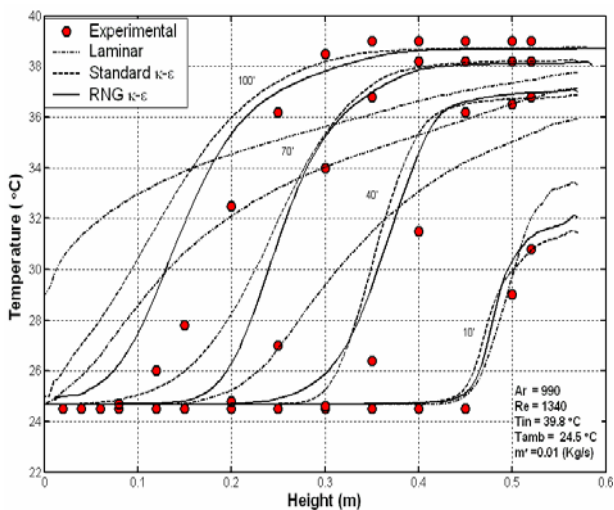
با توجه به وابسته بودن خواص سیال به دما و متغیر بودن دمای سیال در طول فرایند حل باید خواص سیال را به گونه ای مناسب در مساله وارد کرد. در این جا دمای متوسط کاری به عنوان دمای مبنا برای بیان خواص سیال در نظر گرفته شده است. تنها در مورد مقدار ضریب انبساط حرارتی ( $\beta$ ) دمای مبنا، دمای سیال ورودی در نظر گرفته شده، که این تصمیم گیری از بررسی نتایج در حل های مختلف بدست آمده است.

مدل جریان آرام صرفاً جهت نشان دادن مغشوش بودن جریان بوده و لذا تأکید زیادی بر آن شده است، لذا ممکن است نتایج بهتری از آنچه در نمودارهای زیر برای حالت جریان آرام آورده شده نیز بدست آورد. ولی به هر حال میزان خطای آن در مقایسه با مدل‌های مغشوش قابل ملاحظه است. در مرحله بعد با انتخاب یک مدل جریان و یک روش عددی مناسب جهت توصیف میدان دما و سرعت، به بررسی چند پارامتر مختلف بر روی لایه ترموکلاين (Thermocline) و میدان دمای درون مخازن نگهداری انرژی گرمایی (TES) می پردازیم.

توزیع دمای درون مخزن در محل ترموکوپل‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ در زمان‌های مختلف، برای هر سه مدل و برای دو مقدار مختلف  $Ar$  نشان داده شده است. با مقایسه می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌های  $k - \epsilon$  و  $RNGk - \epsilon$  هر دو مطابقت نسبتاً خوبی با نتایج تجربی دارند و برای بررسی پدیده‌های

حرارتی درون مخازن انرژی گرمایی مناسب می‌باشند. دو روش ضخامت لایه ترموکلاين (Thermocline) را کمی بیشتر از حد واقعی نشان می‌دهند، و این به خاطر وجود خاصیت پخششی (diffusive) ذاتی این مدل‌ها می‌باشد [5].

خاصیت پخششی (diffusive) در مدل  $RNGk - \epsilon$  کمتر از مدل  $k - \epsilon$  می‌باشد، لذا چنانکه مشاهده می‌شود این مدل شیب منحنی دما را در ناحیه ترموکلاين (Thermocline) و در نتیجه ضخامت آن را واقعی‌تر نشان می‌دهد. نمودارها همچنین بیان‌کننده این مطلب هستند که، با افزایش عدد  $Ar$  که ناشی از افزایش دمای سیال ورودی می‌باشد، حل عددی مطابقت بهتری با نتایج تجربی نشان می‌دهد. کانتورهای دما ثابت نیز نشان‌دهنده پیشرفت لایه ترموکلاين (Thermocline) در طول مخزن با گذشت زمان و همچنین افزایش ضخامت این لایه در اثر انتقال گرما به لایه‌های پایین مخزن از طریق هدایت در سیال می‌باشد.



شکل ۹: خطوط جریان (الف) و مسیر جریان (ب) در مخزن ناشی از جت سیال

عدد ارشمیدس نیز به صورت زیر بدست می‌آید:

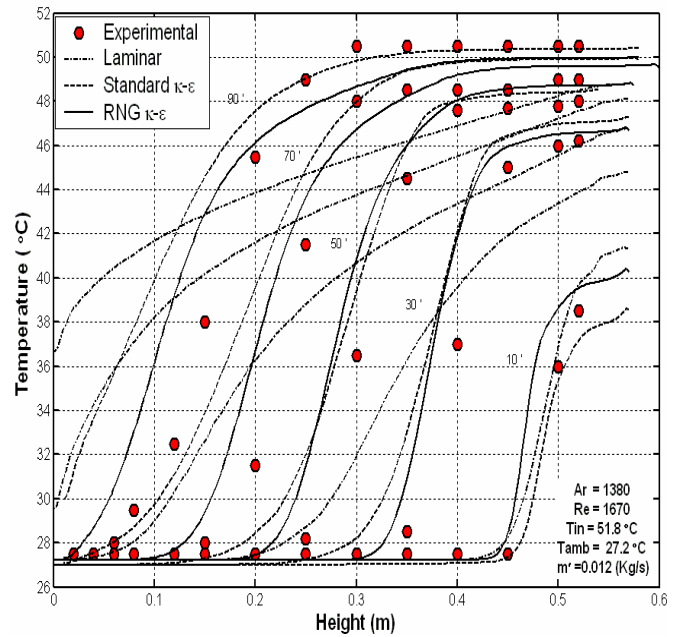
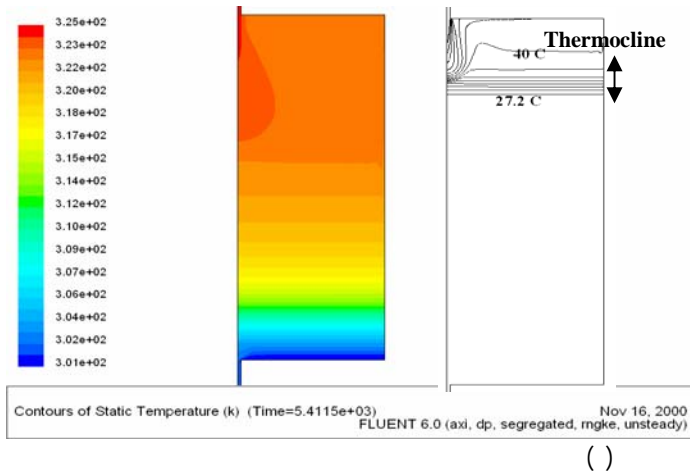
$$Ar = g \Delta \rho D^3 / \rho \bar{u}_{in}^2 D_p^2 \quad (7)$$

در معادلات بالا  $D_p$  قطر لوله ورودی به مخزن  $D$  قطر مخزن و  $\Delta \rho$  اختلاف بین چگالی آب ورودی به مخزن  $\rho_{in}$  و چگالی متوسط آب درون مخزن  $\rho_m$  می‌باشد.

در این تحقیق، ابتدا یک مقایسه میان سه مدل جریان: آرام، مغشوش  $k - \epsilon$  و مغشوش  $RNGk - \epsilon$  (روش‌های مدل‌سازی جریان مغشوش)، برای دو حالت مختلف  $Ar=990$  و  $Ar=1340$ ، جهت بدست آوردن میدان دما و سرعت، با نتایج تجربی انجام شده است.



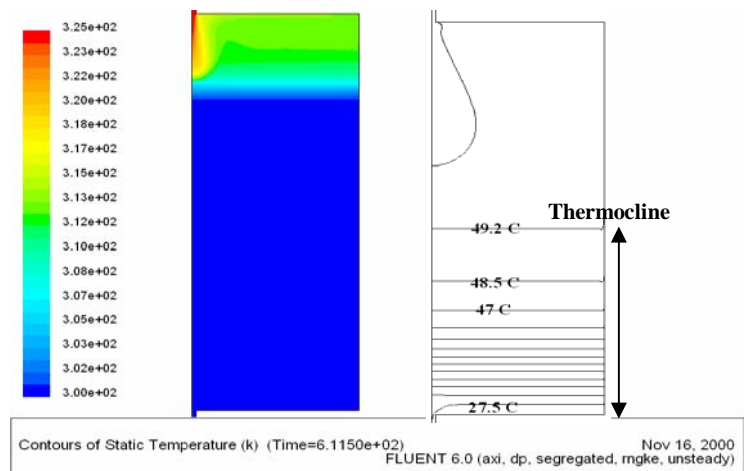
مخازن نگهداری انرژی گرمایی، از موارد بسیار مهم جهت افزایش بازدهی این مخازن می باشد. برای ایجاد حالات مطلوب



بیان شده پارامترهای متعددی قابل بررسی میباشند، که مقادیر دبی و دمای سیال ورودی به مخزن، در حال پر شدن و تخلیه (discharge) از آن جمله هستند. آن چه معمولاً در مورد پر شدن این مخازن شاهد آن هستیم، جریانی از سیال با دما و یا دبی متغیر با زمان می باشد. این پدیده بخصوص در مورد پر شدن این مخازن با کلکتورهای خورشیدی قابل مشاهده است. در این بخش از پژوهش دو حالت: دبی سیال ورودی و دمای سیال ورودی متغیر با زمان (با ثابت بودن دیگر شرایط مرزی) را از طریق مدل عددی بدست آمده در بخش قبل، مورد بررسی قرار داده می شود. در این جا برای ایجاد شرایط تقریباً مساوی برای هر دو حالت، جهت صحیح بودن موارد مقایسه شده موارد زیر برای هر دو مدل مد نظر قرار گرفته است:

- زمان پر شدن برای هر دو حالت برابر در نظر گرفته شده است. این عمل باعث ایجاد شرایط محیطی و فیزیکی تقریباً مساوی میشود. پروفیل های دما و دبی متغیر با زمان به گونه ای بیان شده اند که مقادیر زیر برای هر دو حالت برابر باشند:
- مقدار سیال ورودی به مخزن در پایان زمان پر شدن
- مقدار انرژی گرمایی وارد شده به مخزن از طریق سیال ورودی

در این جا ابتدا به بیان مدل فیزیکی و شرایط مرزی برای حالات بیان شده پرداخته و سپس با استفاده از جواب های بدست آمده و مقایسه آنها، به بحث در مورد نتایج بدست آمده از این مدل سازی پرداخته می شود. [7]



### بررسی تاثیر دو پارامتر بر میدان دما و لایه ترموکلاين (Thermocline)

بررسی چگونگی تغییرات میدان دما و لایه ترموکلاين (Thermocline) از دیدگاه های مختلف موضوع تحقیقات بسیاری بوده است. ایجاد یک میدان دمای مناسب و کاهش ضخامت، و افزایش پایداری لایه ترموکلاين (Thermocline) در

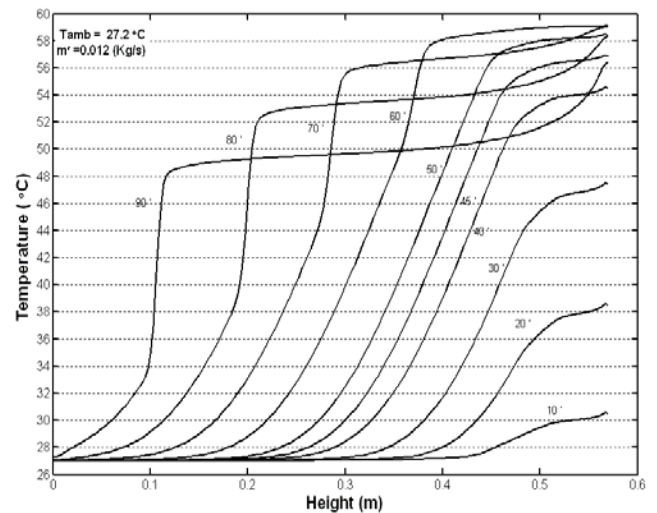


### سیال ورودی با دمای متغیر با زمان :

در این مدل برای حالت دمای متغیر با زمان از یک پروفیل دمایی که تقریباً شبیه به آن چه در خروجی کلکتورهای خورشیدی با دبی ورودی ثابت وجود دارد، استفاده شده است.

$$T_{in} = 300 + 38.1715 * \sin\left(\frac{\pi}{90 * 60} t\right) \quad (8)$$

دمای محیط ۳۰۰ کلوین، دبی سیال ورودی  $m' = 0.012 \text{ (Kg/s)}$  و زمان پر شدن نیز ۹۰ دقیقه است. ضرایب این معادله به گونه ای در نظر گرفته شده است تا شرایط بیان شده در بالا را ارضا کند. نمودارهای دما در محل ۱۷ سانتیمتری از محور تقارن مخزن برای زمانهای مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

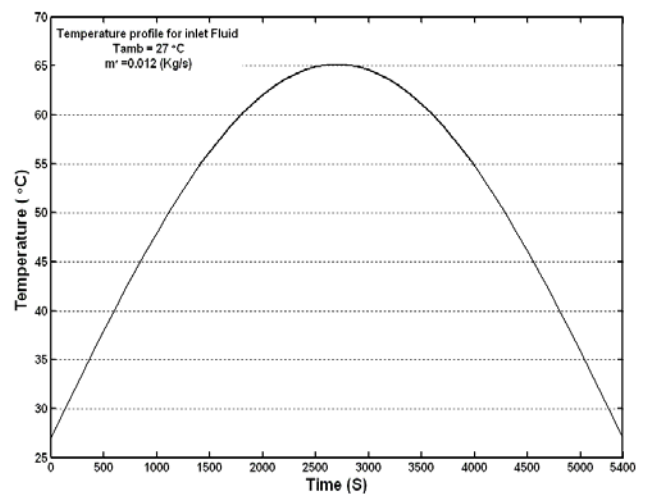
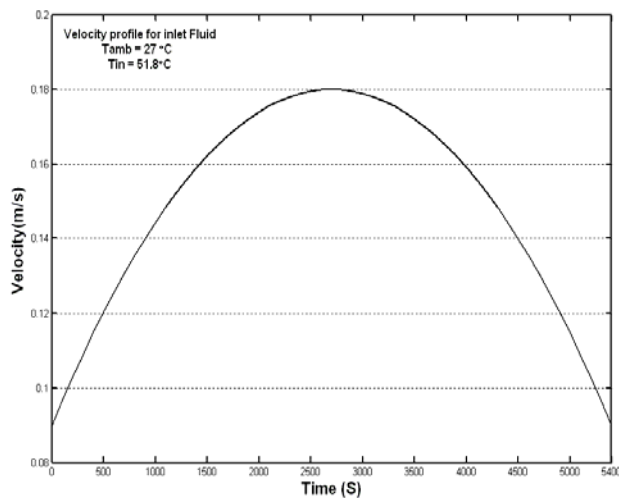
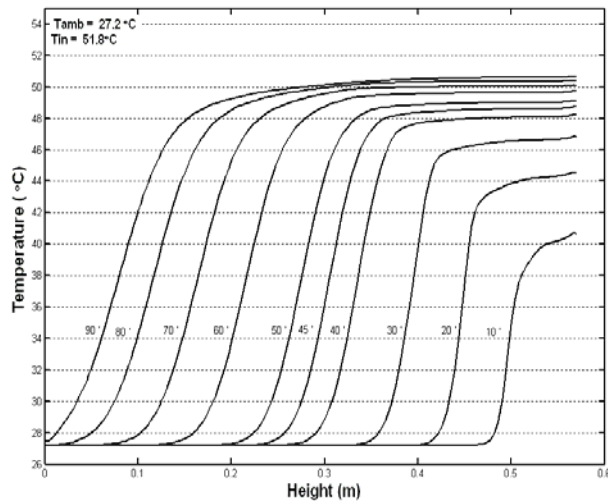


### سیال ورودی با دبی متغیر با زمان :

پروفیل انتخاب شده برای این مدل، شبیه حالتی در نظر گرفته شده است که اگر یک کلکتور خورشیدی، با این دبی کار کند، با توجه به متغیر بودن میزان جذب انرژی خورشیدی در طول یک روز، بتواند دمای سیال خروجی را ثابت نگاه دارد.

$$\frac{4 * (.18 - .09)}{5400^2} * t^2 + \frac{4 * (.18 - .09)}{5400} * t + .09 \quad (9)$$

دمای محیط ۳۰۰ کلوین، دمای سیال ورودی  $T_{in} = 51.8^\circ C$  و زمان پر شدن نیز ۹۰ دقیقه است. ضرایب این معادله نیز به گونه ای در نظر گرفته شده است تا شرایط بیان شده در بالا را ارضا کند. نمودارهای دما در محل ۱۷ سانتیمتری از محور تقارن مخزن برای زمانهای مختلف در شکل ۱۶ نشان داده شده است. [7]



## نتیجه گیری

با مقایسه نتایج تجربی و مقادیر بدست آمده از روشهای عددی برای پیش بینی میدان دما و سرعت در مخازن نگهداری انرژی گرمایی، نتایج زیر در مورد این مخازن حاصل میشود:

۱- مدل  $k - \epsilon$  RNG در فلوننت پیش بینی بهتری از میدان دما، در مخازن نگهداری انرژی گرمایی ارائه کرده و لذا جهت بررسی میدان دما و سرعت در مخازن نگهداری انرژی گرمایی با دقت خوبی قابل استفاده می باشد.

۲- در هنگام پر کردن (Charge) مخازن نگهداری انرژی گرمایی، اگر بتوان با کنترل دبی سیال ورودی به مخزن، دمای آن را ثابت نگاه داشت، به وضعیت مطلوبتری، از دیدگاه یک مخزن نگهداری انرژی گرمایی مناسب، در مقایسه با حالتی که دمای سیال ورودی متغیر است، دست پیدا میکنیم.

۳- با طراحی مناسب درگاه ورودی (به منظور مینیمم کردن جابجایی مخلوط در مخزن) لایه ترموکلاين مناسب تر تشکیل شده و عملکرد مخزن بهبود پیدا می کند.

## مراجع

- [1]- [Http://science.howstuffworks.com/solar-cell.htm](http://science.howstuffworks.com/solar-cell.htm)
- [2]-Dinser, I., Rosen M., 2002, "Thermal Energy Storage System and Application" Wiley & Sons
- [3]-Brumleve, T.D. (1974). "Sensible Heat Storage in Liquids", Sandia Labs Report", SLL-73-0263.
- [4]-Lvan, Z. and Thompson, J.(1977) " Experimental study of thermally stratified hot water storage tanks". Solar Energy ,Vol 19, pp 519-524
- [5]-Cabelli, A. (1977). " Storage tanks-A numerical experiment", Solar Energy Vol19, pp 45-54.
- [6]-Fluent user's guide ver. 6.1", Fluent Inc., Lebanon, Jan. 1995.
- [7]- روحانی، رهنما "طراحی واحد ذخیره ساز انرژی" سال انتشار ۲۰۰۵