



---

مؤسسه آموزش عالی غیردولتی غیر انتفاعی انرژی

شبیه سازی عددی دیواره های حاوی PCM در کنترل  
دمای ساختمان

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی معماری گرایش انرژی

نام دانشجو

علی مصلی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی ابدی

مهر ۱۳۹۹



# مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیرانتفاعی انرژی

## شبیه سازی عددی دیواره های حاوی PCM در کنترل دمای ساختمان

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی معماری گرایش انرژی

نام دانشجو

علی مصلی

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی ابدی

اساتید مشاور: دکتر حیدر مداح و دکتر مجتبی میرزایی

مهر ۱۳۹۹

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

### باسمه تعالی

اینجانب علی مصلی به شماره دانشجویی ..... دانشجوی رشته ..... مقطع ..... تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/ر ساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی:

امضا و تاریخ:

## مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

---

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.
- ☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ..... ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تمام روزهای سخت و آسانی که در این سالها تجربه کردم را مدیون زحمات فرشته ای هستم که در زمین است

او هیچگاه از سختی هایی که بر من تحمیل شد گلایه ای نکرد  
او کسی است که حاضر است تمام عمرش را فدای یک لحظه خنده ی من بکند  
او همان است که من

تو

ما

و همه به او مدیونیم .

مادر

تمامی حقوق مادی و معنوی این کار علمی را تقدیم فرشته ی آسمان و زمین خود میکنم  
مادر مهربانم از تمام سالهایی که خالصانه برایم زحمت کشیدی از تو ممنونم عزیزم و دست بوس تو  
همیشه و همه جا خواهم بود

و در آخر از زحمات اساتید عزیزم دکتر محمد مهدی ابدی -دکتر ارینب نظریان-مهندس زهرا گودرز  
فلاحی-دکتر سمیه بیطرف که بیشترین تاثیر را در سالهای تحصیل بر من داشتند تشکر و سپاس گزاری  
لازم را دارم .

علی مصلی

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه .....	۱
فصل دوم: مروری بر ادبیات تحقیق .....	۷
۱-۲ - مقدمه .....	۸
فصل سوم: شبیه سازی مدل .....	۲۶
۱-۳ - مقدمه .....	۲۷
۲-۳ - هندسه مسئله .....	۲۷
۳-۳ - معادلات حاکم بر انتقال حرارت دیوارها .....	۲۷
۲-۳-۳ - شرط مرزی بیرونی .....	۳۱
فصل چهارم: روش عددی .....	۳۴
۱-۴ - مقدمه .....	۳۵
۲-۴ - روش عددی .....	۳۵
۳-۴ - روش های انفصال معادلات .....	۳۷
۴-۳-۱ - روش تفاضلات محدود .....	۳۸
۴-۳-۲ - روش اجزا محدود .....	۳۹
۴-۳-۳ - روش حجم محدود .....	۳۹
۴-۴ - بدست آوردن معادلات انفصال در روش تفاضلات محدود .....	۴۰
۴-۴-۱ - معادلات حاکم بر دیواره در حالت تک فاز .....	۴۰
۴-۴-۲ - معادلات حاکم بر دیواره برای وضعیت دوفازی لایه میانی .....	۴۳
۴-۵ - مدل سازی خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده .....	۴۵
۴-۶ - روند حل عددی مسئله .....	۴۷
فصل پنجم: نتایج .....	۴۹
۱-۵ - مقدمه .....	۵۰
۳-۵ - معتبر سازی برنامه کامپیوتری .....	۵۲
۵-۵ - بررسی اثر تغییر دمای متوسط محیط بیرون بر عملکرد گرمایی دیواره کامپوزیت .....	۶۲
۵-۵-۱ - اثر تغییر دمای متوسط محیط بر طول بدون بعد لایه داخلی .....	۶۳
۵-۵-۲ - اثر تغییر دمای متوسط محیط بر میزان ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده .....	۶۴
فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات .....	۶۶
مراجع .....	۶۹

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۱۳.....	جدول ۱: خواص حرارتی کامپوزیت های تغییر فاز که با استفاده از روش اشباع تعیین می شوند.
۱۴.....	جدول ۲: خواص حرارتی و تکنیک های سنتز MICROPCM ها.
۲۳.....	جدول ۳: خواص هدایت حرارتی کامپوزیت های تغییر فاز که اخیراً گزارش شده است.
۵۵.....	جدول ۵: خواص ترموفیزیکی مواد تشکیل دهنده دیواره.



شکل ۱. طرح مدیریت انرژی گرمایی پارامترهای حرارتی کامپوزیت های تغییر فازدهنده آتینافو و دیگران (۲۰۲۰).....	۱۰
شکل ۳. مکانیسم بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت های تغییر فازدهنده.....	۲۲
شکل ۳-۱- طرح شماتیک دیواره.....	۲۷
شکل ۳-۲- فصل مشترک لایه های تشکیل دهنده ی دیواره کامپوزیت.....	۲۹
شکل ۳-۳- شرایط در مرز بیرونی دیواره.....	۳۲
شکل ۴-۱- المان میانی لایه ها.....	۴۱
شکل ۴-۲- المان قرار گرفته در فصل مشترک داخلی.....	۴۲
شکل ۴-۳- المان قرار گرفته در فصل مشترک خارجی.....	۴۲
شکل ۴-۴- الگوریتم حل مساله.....	۴۸
شکل ۵-۱- تغییرات شار حرارتی خروجی از مرز داخلی دیواره برای تعداد نقاط شبکه مختلف.....	۵۱
شکل ۵-۲- میزان انرژی خروجی از دیواره بر واحد سطح در یک روز بر حسب تعداد نقاط شبکه.....	۵۱
شکل ۵-۳- ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده در بازه زمانی ۲۴ ساعته.....	۵۲
(ب) شکل ۵-۴- میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده (الف) کار حاضر (ب) مرجع.....	۵۳
شکل ۵-۵- شار حرارتی خروجی از دیواره (الف) کار حاضر (ب) مرجع [۹].....	۵۴
شکل ۵-۶- تغییرات دمای محیط بیرون نسبت به زمان به عنوان شرط مرزی بیرونی اول.....	۵۶
شکل ۷-۵- تغییرات تشعشع خورشیدی برخوردی به دیواره نسبت به زمان.....	۵۶
شکل ۵-۸- تغییرات دمای سطح دیواره نسبت به زمان به عنوان شرط مرزی بیرونی دوم.....	۵۷
شکل ۵-۹- انرژی خروجی از دیواره بر واحد سطح در یک روز برای انواع مدل سازی خواص.....	۵۸
شکل ۵-۱۰- تغییرات شار حرارتی خروجی نسبت به زمان در.....	۵۹
شکل ۵-۱۱- تغییرات ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان.....	۶۰
شکل ۵-۱۲- تغییرات چگالی ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان.....	۶۰
شکل ۵-۱۳- تغییرات گرمای ویژه ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان.....	۶۱

شکل ۵-۱۴ توزیع ذوبشدگی در لایه ی حاوی ماده تغییر فاز دهنده در ساعات مختلف ..... ۶۲

شکل ۵-۱۵- تغییرات طول بدون بعد لایه داخلی بر حسب دمای متوسط محیط بیرون ..... ۶۴

شکل ۵-۱۶ تغییرات بیشترین مقدار ذوب شدگی ماده بر حسب دمای متوسط محیط بیرون ..... ۶۵

# فصل اول: مقدمه

توضیح مختصر مساله و سابقه تحقیق:

رشد روز افزون آلاینده‌های محیط زیست در کنار افزایش قیمت سوخت، به عنوان دو عامل اصلی در جهت افزایش توجه به انرژی‌های تجدیدپذیر مطرح می‌باشند. محققان بسیاری در سراسر جهان در حال مطالعه و بررسی منابع انرژی تجدیدپذیر و راه‌های جدید استفاده از آنها می‌باشند. از جمله مواردی که اهمیت آن به اندازه‌ی توسعه‌ی منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، توسعه و گسترش وسایل ذخیره‌ی انرژی می‌باشد. در حال حاضر، ذخیره‌ی انرژی به شکل مناسب که قادر به تبدیل و آزاد شدن به حالت دلخواه باشد، از چالش‌های پیش روی تکنولوژی‌های نوین محسوب می‌گردد.

ذخیره‌ی انرژی نه تنها عدم تطابق بین عرضه و تقاضا را کاهش می‌دهد، بلکه بر کارایی و اطمینان سیستم‌های انرژی افزوده و نقش بسیار مهمی در کاهش اتلاف انرژی بازی می‌کند. یکی از روش‌های مؤثر در ذخیره‌ی انرژی گرمایی، استفاده از مواد تغییر فاز (PCM) می‌باشد، که به دلیل دانسیته‌ی بالای ذخیره‌ی انرژی آن و قابلیت ذخیره‌ی حرارت در دمای ثابت متناسب با دمای تغییر فاز PCM، مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

در سرمایه‌ی رایگان، یک سامانه ذخیره سازی، برای جذب و دفع انرژی استفاده می‌شود. سامانه ذخیره سازی در سرمایه‌ی رایگان معمولاً از نوع گرمای محسوس و یا نهان است. تفاوت اصلی میان سرمایه‌ی رایگان و سرمایه‌ی شبانه تهویه‌ای این است که در سرمایه‌ی شبانه تهویه‌ای بدنه ساختمان (مانند دیوارها) به عنوان سامانه ذخیره سازی عمل می‌کند، در حالیکه در سرمایه‌ی رایگان، سامانه ذخیره سازی جداگانه‌ای برای ذخیره‌سازی انرژی به کار می‌رود و یک وسیله مکانیکی همچون فن به هنگام جذب و دفع انرژی به کار می‌رود. برتری سرمایه‌ی رایگان نسبت به سرمایه‌ی شبانه تهویه‌ای در این است که سرمای ذخیره شده را میتوان در هر زمان دلخواه با چرخاندن و عبور دادن هوای محیط یا هوای اتاق از میان سامانه ذخیره کننده، در هر لحظه آزاد کرد. ذخیره سازی انرژی گرمایی مهمترین

قسمت سیستم های خنک سازی خود به خودی می باشد که برای ذخیره کردن سرمای محیط برای استفاده در ساعت های گرم روز استفاده می گردد. عموماً انرژی گرمایی، برای خنک سازی آزاد، توسط تغییر انرژی درونی مواد ذخیره کننده، و یا تغییر فاز مواد ذخیره کننده ( ذخیره گرمای نهان )، و یا ترکیبی از هر دو ذخیره می شود. ذخیره سازی انرژی حرارتی به وسیله گرمای نهان مواد تغییر فازی عموماً نسبت به تکنیک های دیگر ذخیره سازی به دلیل بالا بودن تراکم ذخیره سازی انرژی و نیز هم دما بودن ارجحیت دارد. از دیگر مزیت های مهم خنک سازی آزاد، کاهش گاز های گل خانه ای و بالا نگه داشتن کیفیت هوای داخل ساختمان می باشد.

در این تحقیق با استفاده از شبیه ساز CAMSOL به بررسی فرایند خنک سازی آزاد ساختمان به کمک مواد تغییر فازی خواهیم پرداخت. تا کنون سیستم خنک سازی خود بخودی و آزاد ساختمان با استفاده از مواد تغییر فازی برای سیستم آب و هوایی ایران مطالعه نشده است. سوالاتی که در این تحقیق ما بدنبال یافتن جواب برای آنها می باشیم به صورت زیر می باشند:

- ۱- دمای ذوب مناسب PCM برای شرایط محیطی مختلف چیست؟
- ۲- نحوه تأثیرگذاری درصد مواد بکار رفته در سامانه سرمایش بر خواص آن، چگونه می باشد؟
- ۳- آیا تفاوت قابل توجهی بین روش های مختلف خنک سازی وجود دارد؟
- ۴- سیستم ساخته شده تا چه میزانی می تواند در بهبود شرایط آسایش دمایی درون ساختمان مؤثر باشد؟

پیشینه مطالعاتی تحقیق:

اولین تحقیق انجام گرفته در زمینه خنک سازی خود به خودی ساختمان توسط Turnpenney و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۰ میلادی صورت گرفت. آنها در تحقیق خود لوله حرارتی را با سامانه ذخیره کننده انرژی که حاوی ماده تغییر فاز بود، ادغام کردند. نمک آبدار سولفات سدیم به همراه

۱/۵٪ عامل هسته زای برآکس به عنوان PCM استفاده شد. دمای ذوب این ماده تغییر فاز  $21^{\circ}\text{C}$  است. پس از آنکه به مدت ۹ ساعت در فرآیند جذب انرژی در معرض هوای  $16^{\circ}\text{C}$  قرار گرفت، کاملاً ذوب گردید. برای مطالعه کارکرد PCM در سامانه‌های سرمایش رایگان سامانه ای در مقیاس آزمایشگاهی توسط Zelba و همکارانش [۲] طراحی و ساخته شد. Marin و همکارانش [۳] دستگاه استفاده شده توسط Zelba و همکارانش را با قرار دادن مواد گرافیتی به همراه PCM پارافینی برای افزایش انتقال حرارت، بهبود بخشیدند. به دلیل افزودن گرافیت، رسانش افزایش یافته بدون آنکه کاهش زیادی در سیستم ذخیره انرژی رخ دهد. Takeda و همکارانش [۴] یک سامانه ذخیره سازی انرژی گرمایی بستر ثابت را که با ماده تغییر فاز پر شده بود، برای کاهش انرژی مورد نیاز تهویه در شرایط آب و هوایی ۸ شهر ژاپن مورد مطالعه قرار دادند تا اثر تغییرات آب و هوایی بر میزان ذخیره سازی انرژی را مشخص کنند. Nagano و همکارانش [۵] PCM های پارافینی را به صورت گرانول در اندازه های میلی لیتر و به طور مستقیم در کف ساختمان قرار دادند. این بستر PCM دارای تخلخل بوده و بنابراین برای استفاده در سیستم های تهویه کف ساختمان مناسب می باشند. Arkar و Medved [۶-۸] تاثیر خواص حرارتی PCM بر روی نتایج مدل عددی توسعه داده شده برای یک بستر ذخیره انرژی سرمایش خودبخودی را مورد مطالعه قرار دادند. مدل عددی بستر طوری طراحی شده بود که غیر یکنواختی تخلخل PCM و سرعت سیال را که ناشی از نسبت کم قطر لوله به کره های PCM بود شامل شود. بر اساس یافته های Marin و همکارانش [۹] مبنی بر اینکه پوششهای مکعب مستطیلی نازکتر در سرمایش رایگان عملکرد بهتری دارند، دو مبدل انتقال حرارت میان PCM و هوا در مقیاس واقعی توسط Lazaro و همکارانش [۱۰] ساخته شد و مورد آزمایش قرار گرفت.

مطالعه پارامتری برای خنک سازی فضا با استفاده از دمای شب سرد توسط Tzivanidis و همکارانش [۱۱] صورت گرفت. بر طبق نتایج آنها، مهمترین پارامترهای که باید در نظر گرفته شوند عبارتند از

ضخامت لایه PCM، دمای آب ورودی، مدت زمان خنک سازی و ویژگیهای PCM (رسانش، گرمای تغییر فاز، آخرین حد دمای تغییر فاز). مصفا و همکارانش با استفاده از آنالیز اکسرژی به بررسی سامانه خنک سازی آزاد پرداختند [۱۲].

الیاس یزدان شناس و همکارانش در تحقیق خود آزمایشگاهی مطالعاتی در مورد مبدل حرارتی برای ذخیره انرژی خورشیدی انجام دادند توزیع دما در راستای طول و شعاع در نقاطی برابر در داخل کپسول و آب داخل مخزن PCM دمای ورودی و خروجی مخزن PCM تغییرات دمایی آب مصرفی دمای ورودی و خروجی کلکتور و میزان انرژی تابشی خورشیدی اندازه گیری شده تا بازده کلکتور خورشیدی و مبدل حرارتی PCM را از این طریق محاسبه نمایند [۱۳].

ه-۲- فرضیات:

- دمای محیط تاثیر بسزایی در انتخاب مواد تغییر فازی دارد.
- افزایش دبی هوا عبوری از سامانه سبب افزایش مدت زمان آسایش در ساختمان می گردد.

ه-۳- اهداف:

- ۱- هدف علمی: بهبود کارایی سیستم های تهویه با استفاده از مواد تغییر فاز
- ۲- هدف کاربردی: کاهش مصرف انرژی در منازل مسکونی
- ۳- ضرورت خاص تحقیق: از انجایی که کاهش یارانه انرژی در الویت کشور قرار دارد ارائه سیستم های که بتواند مصرف انرژی را با هزینه پایین در منازل کاهش دهد ضروری می باشد.

و- روش پژوهش و مراحل انجام پایان نامه:

برای انجام تحقیق پس از مرور بر مطالعات پیشین ماده تغییر فاز مناسب برای شرایط آب و هوایی مورد مطالعه انتخاب خواهد شد. پس از انتخاب ماده و محاسبه خواص آن نظیر گرمای ویژه، آنتالپی

و .. فرایند مورد استفاده با استفاده از نرم افزار COMSOL شبیه سازی خواهد شد. به منظور افزایش میزان انتقال حرارت از پره های مارپیچی در داخل سیستم بهره گرفته خواهد شد. پس از بدست آوردن مدل مورد نظر برای صحت سنجی نتایج از داده های موجود در منابع استفاده خواهد شد.



# فصل دوم:

## مروری بر ادبیات تحقیق

## ۲-۱- مقدمه

فن آوری های ذخیره انرژی مکانیکی ، الکتریکی ، شیمیایی و حرارتی برای کاربردهای مقیاس بزرگ معرفی شده اند [۱]. در این میان ، مواد ذخیره انرژی گرمایی که از مواد تغییر فاز دهنده دهنده معرفی شده اند (PCM) استفاده می کنند، به دلیل آنتالپی تغییر فاز دهنده دهنده بزرگ و قابلیت ذخیره آنتالپی گرمایش در دمای ثابت ، چشم انداز کاربرد گسترده ای دارند [۲]. PCM ها را می توان در مناطق مختلف مورد بررسی قرار داد ، مانند پانسمان برای درمان زخم های سوخته [۳] ، الکترونیک [۴،۵] ، سیستم گرمایش آب خورشیدی در مناطق مختلف آب و هوایی [۶] ، مهندسی ذخیره انرژی ساختمان [۷،۸] ، منسوجات تنظیم کننده دما [۹] ، مدیریت حرارتی باتری [۱۰] ، مهار واکنش برای فرار گرمازان از راکتورهای دسته ای [۱۱] و سیستم بازیابی حرارت متراکم برای تهویه مطبوع [۱۲]. به عنوان مثال ، ادغام تخته های گچ آغشته به PCM با تهویه شبانه ۷۳٪ در انرژی صرفه جویی می کند [۱۳]. در میان PCM های توسعه یافته ، PCM های آلی (به عنوان مثال ، واکس های پارافین ، گلیکول ها و الکل های چرب) بیشتر از ترکیبات غیر آلی (به عنوان مثال ، آلیاژهای فلز ، و هیدرات های نمک به دلیل فوق خنک کننده پایین تر ، عدم جداسازی فاز ، دامنه وسیعی از دمای انتقال فاز برای تمرین مناسب ، عاری از خوردگی ، برگشت پذیری مطلوب ، خواص پایداری شیمیایی و در دسترس بودن تجاری ) بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند [۱۴-۱۶]. بنابراین ، PCM های آلی به طور گسترده ای برای بهبود کارایی استفاده از انرژی مورد بررسی قرار گرفته اند. با این حال ، استفاده مستقیم از PCM های آلی برای کاربردهای عملی توسط چندین چالش مانند سرعت انتقال حرارت کم ، نشت بالاتر از نقطه ذوب و مشکل کنترل مواد در فرآیند انتقال فاز محدود می شود. برای غلبه بر این چالش ها ، چندین استراتژی برای توسعه PCM های فرم یا شکل پایدار (که به آنها کامپوزیت های تغییر فاز دهنده دهنده نیز گفته می شود) طراحی شده است.

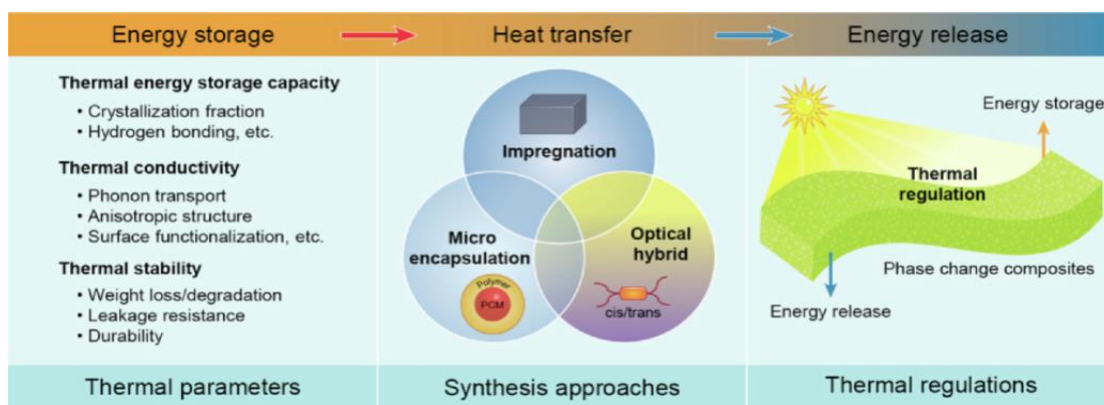
بیشتر مشخصات حرارتی PCM ها (به عنوان مثال آنتالپی گرما ، قابلیت اطمینان ، ظرفیت تبدیل انرژی و هدایت حرارتی) به نوع ، ابعاد و محتوای مواد افزودنی و / یا PCM های بکر بستگی دارد. به عنوان مثال ، افزایش محتوای ۱ اکتادکانول و اسید لوریک در گرافن و گرافن آئروژل (GA) ، به ترتیب ، منجر به افزایش گرمای نهان و بالعکس می شود [۱۷،۱۸]. وو (Wu) و همکاران [۱۹] مواد کامپوزیتی مبتنی بر پلی اتیلن گلیکول چند منظوره (PEG) را گزارش داد. ظرفیت تبدیل نور / الکترو گرمایی کف PEG / ملامین با معرفی ترکیبی از نانو پلاکت نانوالیاف-گرافیم سلولزی (GNP) بهبود یافت. این پیشرفت ها به دلیل ضبط فوتون موثر ، هدایت الکتریکی و قابلیت گرمایش نانو از GNP ها حاصل می شود. اگرچه برخی از مواد پشتیبانی کننده نانو متخلخل (به عنوان مثال ، چوب های کربنیزه متخلخل / اسید لوریک) به PCM ها در هسته ای شدن ناهمگن کمک می کنند [۲۰،۲۱] ، بیشتر کامپوزیت های تغییر فازدهنده‌دهنده‌دهنده یک دمای تبلور ثابت را به نمایش می گذارند. هنگامی که PCM ها تحت انتقال مایع به جامد قرار می گیرند ، اینها به طور کلی با خنک شدن و دمای انجماد پایین تر ، انجماد تاخیری را نشان می دهند و قبل از رسیدن دمای ذوب ، تبلور را آغاز می کنند. از این رو ، سرکوب فوق خنک کننده ناچیزی را نشان می دهد و گرمای نهان را در یک محدوده دمایی گسترده تر تخلیه می کند. این محدوده های دمای بالا برای ذخیره انرژی موثر مطلوب نیستند. به همین ترتیب ، فعل و انفعالات سطحی متنوع در بین اجزای ترکیبی و نتایج بازیافت حرارتی ناهموار در عملکردهای مختلف حرارتی مانند ظرفیت ذخیره انرژی ، تبلور و قابلیت اطمینان PCM ها وجود دارد.

برای رفع این چالش ها ، محققان در تلاشند تا سیستم های تنظیم حرارتی جدیدی را برای PCM های ترکیبی ایجاد کنند. به تازگی ، ترکیبات آلی پاسخگو که تحت ایزومریزاسیون عکس برگشت پذیر هستند ، به PCM ها معرفی شدند. این ترکیبات از بین رفتن خود به خودی گرما در طی فرآیند شارژ / تخلیه را کنترل می کنند. خواص ذوب ، انجماد و فوق خنک سازی با نوع جدیدی از دکمه

کنترل می شود و پس از تاریک شدن برای پختن یا گرم شدن اعمال می شود [۲۲]. مهندسی خصوصیات حرارتی PCM کامپوزیت (به عنوان مثال ، آنتالپی گرما ، هدایت حرارتی و پایداری حرارتی) برای کاربردهای مختلف از میکروالکترونیک گرفته تا دستگاه های ذخیره و تبدیل انرژی بسیار مهم است. طبق اطلاعات ما ، بیشتر بررسی های موجود بر روی تبدیل انرژی و عملکرد ذخیره سازی PCM ها [۲۳] ، خصوصیات و تجاری سازی PCM ها [۲۴،۲۵] ، PCM های کامپوزیت مبتنی بر کربن [۲۶-۲۸] ، ساخت PCM های ترکیبی [۲۹] ، PCM ها برای کاربردهای ساختمانی [۳۰-۳۳] ، PCM های سه بعدی (D۳) ماکروسکوپی [۱۶] ، رسانایی گرمایی PCM ها [۳۴-۳۶] و PCM های محدود و نانو و / یا متخلخل [۱] ، [۳۷-۳۹].

ز این رو ، ما خلاصه ای گسترده از چالش ها و راه حل ها با توجه به فرصت های فراوان برای بهبود عملکرد و تنظیم خصوصیات حرارتی کلیدی PCM های کامپوزیت ارائه می دهیم. علاوه بر این ، بررسی شامل استراتژی های اصلی ترکیب ، برنامه های پیشرفته اخیر و چشم انداز تحقیقات آینده است. بنابراین ، زمینه ای برای طراحی مواد کامپوزیتی چند منظوره فراهم می کند (شکل ۱).

شکل ۱. طرح مدیریت انرژی گرمایی پارامترهای حرارتی کامپوزیت های تغییر فازدهنده آتینافو و دیگران (۲۰۲۰)



تکنیک های ترکیب کامپوزیت های تغییر فاز دهنده دهنده

طراحی PCM های ترکیبی به شکل پایدار به دلیل بهبود ویژگی های ذخیره سازی و تبدیل فیزیکی ، حرارتی ، شیمیایی و انرژی (از قبیل نور ، مغناطیسی و الکتریکی - حرارتی) ، در برنامه های فعلی ذخیره انرژی گرمایی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. مهندسی شیمی درگیر در طراحی کامپوزیت PCM نقشی اساسی در تولید در مقیاس وسیع مواد مورد نظر داشت. از این رو ، تکنیک هایی مانند اشباع ، میکروکپسولاسیون ، نانو کپسول سازی و سایر فن آوری های حبس سازی برای توسعه PCM های ترکیبی مورد نظر معرفی شده اند [۳۸].

### روش اشباع

کپسوله سازی و/یا اشباع در طراحی PCM های پایدار با استفاده از PCM های بکر در مواد پشتیبانی استفاده می شود [۴۰]. این ابزار PCM های کامپوزیتی را به طور کارآمد (۳۲,۵ برابر کارآمدتر) از روش معمول اشباع خلا تولید می کند. PCM های کامپوزیتی که فقط با یک ماده پشتیبانی تهیه می شوند در مقایسه با آن هایی که با دو و یا چند افزودنی چند پشتیبانی تهیه می شوند، برای ترکیب کامپوزیت راحت ترند. این PCM ها ظرفیت ذخیره سازی گرمای نهان بالاتری را نشان می دهند (برخلاف هدایت حرارتی آن). معکوس این برای چند PCM کامپوزیت دیگر که در آن ها PCM کامپوزیت چند پشتیبانی دارای ظرفیت ذخیره سازی انرژی بیشتری است، صادق است. جدول ۱ خصوصیات حرارتی PCM های شکل پایدار را که با استفاده از روش اشباع طراحی شده اند ، ارائه می دهد.

پارامترهای حرارتی شامل  $R$ ،  $F_c$  و  $\zeta$  با استفاده از معادلات ۱ تا ۳ محاسبه شده است:

$$R = \left( \frac{\Delta H_{m, composite}}{\Delta H_{m, PCM}} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$F_c = \left( \frac{\Delta H_{m, composite}}{\beta \Delta H_{m, PCM}} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$\zeta = \left( \frac{\Delta T_{composite} - \Delta T_{PCM}}{\Delta T_{PCM}} \right) \times 100 \quad (3)$$

در فرمول‌ها  $\Delta T_{PCM}$ ،  $\Delta T_{m, PCM}$ ،  $\Delta T_{m, composite}$  و  $\Delta T_{PCM}$  به ترتیب انتالپی تغییر فازدهنده PCM های کامپوزیت، انتالپی تغییر فازدهنده PCM های بکر، نسبت وزن PCM ها در کامپوزیت ها، تغییر در دمای کامپوزیت ها و تغییر در دمای PCM های بکر هستند.  $F_c$  تأثیر فعل و انفعال بر روی گرمای نهان را نشان می‌دهد و از محدودیت مولکول های PCM در مواد پشتیبانی تعیین می‌شود [۴۱]. همان طور که در جدول آورده شده، مقادیر  $F_c$  تعدادی از PCM ها در مواد کامپوزیت بزرگتر بودند ( $< 10$ ) و سایر کامپوزیت ها کمتر از یک بودند. این موارد را می‌توان با استفاده از دو عامل اصلی توصیف کرد: (۱) رابط داخلی که تبلور PCM ها را کاهش می‌دهد و (۲) پیوندهای هیدروژنی ضعیفی که بین ترکیبات مرکب ایجاد می‌شود. اولی تبلور را کاهش می‌دهد، در حالی که دومی ظرفیت ذخیره سازی را افزایش می‌دهد. PCM هایی که توسط ذرات نانو (NP) پشتیبانی می‌شوند، درجه بالایی از ابرخنک شدن و تبلور کم را به نمایش می‌گذارند. دلیل این امر آنست که الکترون های  $\pi$  و گروه های عملکردی سطح، پیوند هیدروژنی برگشت ناپذیری را بین مواد پشتیبانی کننده و گروه عملکردی واکنش دهنده PCM ها تشکیل می‌دهند [۴۲، ۴۳]. این باعث دافعه فضایی بین ماتریس های پشتیبانی کننده و PCM ها می‌شود و تبلور زنجیره های PCM را آشفته می‌کند که بیشتر منجر به کاهش ظرفیت ذخیره سازی می‌شود. مشاهدات مشابه همچنین برای سایر پارامترها از جمله پارامترهای حرارتی به دست آمده است. بنابراین باید استراتژی های مناسبی برای کنترل پارامترهای ترمودینامیکی در نظر گرفته شود.

جدول ۱: خواص حرارتی کامپوزیت های تغییر فاز که با استفاده از روش اشباع تعیین می شوند.

PCMs	Supporting materials	R (%)	$\Delta H$ (kJ/kg)	$T_m$ (°C)	$T_f$ (°C)	$\Delta T^*$ (°C)	$\zeta$ (%)	Fc (%)	Ref.
Polyethylene glycol	SiO <sub>2</sub>	92.3	164.9	60.4	37.9	22.5	–	95.2	[44]
Polyethylene glycol	3D Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> Tx	90.2	167.7	–	–	–	–	94.9	[45]
Polyethylene glycol	Carbon fiber/SiO <sub>2</sub>	67.3	142.6	57.5	34.8	22.7	3.8	79.1	[46]
Polyethylene glycol	(3,6)-connected Zn-MOF	92.2	159.8	50.4	23.8	26.6	–	108.4	[47]
Polyethylene glycol	Melamine foam/rGO/BN	90.8	160.7	63.5	34.7	28.8	15.2	100.0	[5]
Polyethylene glycol	GO/carbon nanotubes (CNTs)	66.3	120.7	33.8	10.1	23.7	–	78.0	[48]
Polyethylene glycol	3D cellulose/BN nanosheet	67.0	136.8	60.2	41.6	18.6	–	95.7	[49]
Dodecanoic acid	Graphene	81.1	157.6	45.1	36.7	8.4	–	101.4	[50]
Stearic acid	Ultrathin graphite sheets	59.3	113.7	53.1	53.5	–	–	94.0	[51]
Stearic acid	3D graphitic porous carbon	83.5	171.5	71.2	65.3	5.9	–	98.5	[52]
Stearic acid	Porous hollow Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /expanded graphite	85.7	192.5	69.4	68.2	1.2	50	95.2	[53]
Paraffin	Expanded graphite/CNTs	57.1	157.4	36.4	35.5	0.9	–	95.1	[54]
Paraffin	Honeycomb carbon fiber	88.3	192.2	60.0	50.0	10.0	37	101.2	[55]
Paraffin	MMC-14	56.5	95.0	25.5	22.0	3.5	13.5	94.2	[56]
Paraffin	Melamine foam	88.3	139.8	56.8	45.1	11.7	4.5	91.2	[57]
Lauric-stearic acid	Diatomite/expanded graphite	70.2	117.3	31.2	30.0	1.2	–	97.3	[58]
1-tetradecanol	Delignified wood/modified SiO <sub>2</sub>	59.9	125.4	35.7	36.5	–	–	100.0	[59]
1-tetradecanol	Graphene oxide aerogel	99.9	230.3	46.7	25.6	21.1	6.8	105.2	[60]
Tetradecylamine	Graphene sponge	101.2	293.1	39.0	32.0	7.0	–	> 100.0	[61]
1-hexadecanol	Porous carbon	98.5	219.4	50.8	40.4	10.4	5.5	109.4	[20]
n-dodecane	Biochar	60.2	90.5	–4.1	–	–	–	> 71.6	[62]
n-octadecane	3D-graphene aerogel	95.3	195.7	35.0	13.8	21.2	–	100.3	[63]
n-octadecane	Porous TiO <sub>2</sub>	44.8	119.8	29.2	27.3	1.9	–	74.7	[42]
Octadecane	Expanded graphite	91.7	235.2	30.9	28.0	2.9	–	> 90	[64]
n-eicosane	nan-SiO <sub>2</sub> /expanded graphite	55.8	135.8	37.7	34.3	3.4	–	79.7	[43]
n-eicosane	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /polydopamine@carbon foam	84.5	200.1	36.4	33.7	2.7	35	100.6	[65]

\* $\Delta T = T_m - T_f$ , where  $T_m$  and  $T_f$  are the melting and freezing temperatures, respectively, of the composite PCMs.

## میکروکپسولاسیون

میکروکپسولاسیون روشی است که برای معرفی PCM به عنوان هسته (ذخیره انرژی) و پلیمرهای غیر آلی و یا آلی به عنوان پوسته (مواد پشتیبانی کننده) استفاده می شود [۶۶،۶۷]. از نشت PCM جلوگیری می کند، عملکرد حرارتی مکانیکی را بهبود می بخشد و از محیط خارجی محافظت بیشتری می کند [۶۸]. PCM های میکرو کپسوله شده (microPCM) می توانند برای کاربردهای خاص مانند منسوجات، ساختمان، درمان های پزشکی از جمله درمان حرارتی و بازدارنده شعله از طریق مهندسی پوسته استفاده شوند [۶۹،۷۰] اخیراً برای دستیابی به فعالیت ضد میکروبی با رسوب NPS مانند NP نقره (AgNPs) در سطح microPCM [71] و برای کاربردهای تبدیل انرژی چند منظوره مانند تبدیل الکتریکی-حرارتی، الکترومغناطیسی-حرارتی و عکس-حرارتی استفاده شده اند. این ها بیشتر از طریق رویه آماده سازی فیزیکی (مانند خشک شدن با اسپری، طراحی بسته بندی، ترکیب مخلوط یوتکتیک، یا خود مونتاژ)، رویکرد فیزیکی-شیمیایی (از جمله انسداد پیچیده و فرآیند سلگل) یا رویه آماده سازی شیمیایی (پلیمریزاسیون PCM ها با سخت بخش) [۷۲،۷۳]. جدول ۲

microPCM های اخیراً مستند را نشان می دهد. بسیاری از PCM های کامپوزیت با توجه به معادله

(۴) کاهش قابل توجهی در  $\gamma$  نشان می دهند:

$$\gamma = \left( \frac{\Delta H_{m,PCM} - \Delta H_{m,microPCM}}{\Delta H_{m,PCM}} \right) \times 100 \quad (4)$$

جدول ۲: خواص حرارتی و تکنیک های سنتز microPCM ها.

PCM core	Shell materials	Synthesis approaches	$\Delta H_m$ (kJ/kg)	$\gamma$ (%)	Ref.
n-eicosane	TiO <sub>2</sub>	Emulsion-templated polycondensation	187.0	24.1	[74]
n-eicosane	SiO <sub>2</sub> /CdS	Interfacial polycondensation	~70	71.4	[75]
n-eicosane	Sporopollenin exine capsules	Hydrothermal	158	37.3	[3]
n-eicosane	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /SiO <sub>2</sub>	Sol-gel	170.9	7.6	[76]
n-octadecane	Poly(methyl methacrylate)/TiO <sub>2</sub>	Photocurable pickering emulsion	179.9	32.7	[77]
n-octadecane	Melamine-formaldehyde (MF)	In situ polycondensation	141.3	41.4	[78]
n-octadecane	TiO <sub>2</sub> -polyurea	Interfacial polymerization	181.1	23.0	[79]
n-octadecane	SiO <sub>2</sub> /graphene	Polycondensation and miniemulsion	108.2	46.4	[80]
1-Tetradecanol/ pigment	Poly methylated melamine-formaldehyde	In situ polymerization	165.9	27.4	[70]
Stearic acid	2D-montmorillonite/AgNPs	Hydrothermal	188.3	9.5	[81]
Paraffin	Cu-Cu <sub>2</sub> O	Hydrothermal	126.8	36.5	[82]
Paraffin	Chitosan/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Multi-emulsification polymerization and cross-linking	80	62.1	[83]
Paraffin	SiO <sub>2</sub> /Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Sol-gel method	122.4	27.8	[84]
Paraffin	SiO <sub>2</sub> -TiO <sub>2</sub>	Sol-gel method	93.7	60.2	[85]
Paraffin	GO platelet-patched shell structure	Emulsion polymerization	158.4	10.8	[86]
Paraffin	Mixed cellulose/GO	Self-assembly approach	152.2	13.2	[87]
Paraffin	TiO <sub>2</sub> /GO	In situ hydrolysis and polycondensation	75	61.9	[88]
Paraffin	Graphene/MF	In situ polymerization	204.0	19.7	[89]
Paraffin	Hydrated salt	Emulsification	227.3	13.0	[90]
Paraffin	Polystyrene/cellulose nanocrystal	Pickering emulsion polymerization	160.3	17.2	[91]
Palmitic acid	CuCO <sub>3</sub>	Self-assembly method	48.8	56.1	[92]

با افزایش درصد اتلاف حرارت نهفته ، کارایی ذخیره انرژی گرمایی کاهش می یابد. بنابراین ، با وجود دستاوردهای قابل توجه گزارش شده ، هنوز نیاز به تلاش گسترده برای غلبه بر چالش ها در تحقق تکنیک های عملی میکروکپسولاسیون ، مانند جمع شدن کپسول ها در هنگام ایجاد دیوار ، دشواری کنترل اندازه آنها و طراحی microPCM با ظرفیت ذخیره انرژی بالا وجود دارد.

## کپسول سازی نانو

کپسوله سازی نانو PCM ها به دلیل فرآیند سنتز مناسب و بهبود خصوصیات حرارتی ، توجه فوق العاده ای را به خود جلب می کند. پوسته کامپوزیت PEG-distearate/silica به طور موثر از طریق نانوکپسولاسیون با استفاده از روش سل-ژل به کمک مینی امولسیون تهیه شد [۹۳].



نانوکپسول ها راندمان کپسول زدایی بالا (۴۸٪) ، قابلیت ذخیره گرمای زیاد (۱۰۰٪) و دوام بالا را پس از ۵۰ چرخه حرارتی به نمایش گذاشتند. تان (Tan) و همکاران [۹۴] نانوکپسول مخلوط ایکوزان و هگزادکان را با استفاده از یک کوپلیمر آمفوتریک و حساس به دما (کیتوزان-کو-پلی (اسید متاکریلیک)) به عنوان ماده پوسته استفاده کردند. این نانوکپسول نسبت بارگذاری PCM بالا (۶۶٪) ، گرمای نهان زیاد (۱۶۹ J / g) و عملکرد پایدار پس از ۱۰۰ چرخه گرمایش و خنک سازی را نشان داد. برای افزایش هدایت حرارتی ، تلاش های زیادی برای کپسوله سازی PCM های آلی در پوسته های غیر آلی (به عنوان مثال ،  $\text{SiO}_2 \text{ Al}_2\text{O}_3$ ) انجام شده است. یک اکتادکان محصور پوسته سیلیس که از طریق فرایند سل-ژل تولید شده است ، رسانایی گرمایی بیشتری (۰٫۶۲۱ W / m نسبت به ماده بکر نشان داد [۹۵]).

مواد پوستی معدنی نیز برای برنامه های ایمنی در برابر آتش مانند PCM های آلی محصور شده ضروری هستند. ژائو (Zhao) و دیگران [۹۶] ظرفیت ذخیره انرژی و خواص ایمنی در برابر آتش PEG را که در نانو تکه های ساخته شده از مجموعه الکترواستاتیکی ساخته شده از پلی (اتیلن آمونیوم فنیل فسفامید) و سدیم دودسیل سولفات بررسی شده است نانوکپسول هنگام قرار گرفتن در معرض منبع آتش ، گرمای نهان زیادی (116.7 J/g) و خاصیت بازدارنده شعله را به نمایش می گذارد (آزمایش شمع).

### سایر رویکردهای سنتز

علاوه بر تکنیک های مکرر استفاده شده در بالا ، استراتژی های بیشماری دیگر برای توسعه کامپوزیت های تغییر فازدهنده از جمله کلان کپسول سازی، فرموله شده است. ماتریس PCM های ترکیبی نوری پاسخ دهنده به نور که به عنوان PCM های ترکیبی نوری نامیده می شوند یک استراتژی اخیراً توسعه یافته است که برای افزایش ذخیره سازی انرژی و آزادسازی خاصیت PCM ها استفاده شده

است. این کامپوزیت ترکیبی بر اساس PCM ها و ترکیبات آلی سوئیچینگ عکس (مانند آزوبنزن و فلووالن درونیوم) طراحی شده است که تحت عکسبرداری ایزوگرافی برگشت پذیر قرار می گیرند. مولکول های فتوکرومیک با تغییر پویایی بین مولکولی خواص حرارتی را تنظیم می کنند [۹۷]. کامپوزیت های به دست آمده پتانسیلی برای کاربردهای چند منظوره مانند برداشت انرژی گرمایی با عکس ، تبدیل و ذخیره انرژی الکتریکی / مغناطیسی و ذخیره سازی انرژی و قابلیت حمل و نقل گرمایی پیشرفته دارند. چالش ها / عوامل تأثیرگذار مانند پیوند هیدروژنی ، برهم کنش ون در والس ، برهم کنش دو قطبی ، دمای تغییر فازدهنده و ذخیره گرمای نهان به طور موثر تنظیم می شوند. دوپانت ها در هنگام تابش اشعه ماورا بنفش ، توانایی های متمایز پاسخ دهنده به نور و تغییر شکل را نشان می دهند. به همین ترتیب ، از پلیمرهای کونژوگه مانند فیلم های مشتق پلی (دی فنیل استیلن) (PDPA) (اصطلاحاً ماتریس های آلی هوشمند) برای استخراج ترکیبی تغییر فازدهنده (به عنوان مثال ، PDPA / موم پارافین) برای کنترل آنتالپی در زمان استفاده از اهداف ، از جمله پاسخ های نوری و ترمومکانیکی استفاده می شود [۹۸].

سینها ری (Sinha-Ray) و همکاران [۹۹] انواع مختلفی از پارافین و مخلوط آنها با تری گلیسیرید را در منافذ نانولوله های کربنی (CNT) معرفی کردند که از طریق انتشار خود پایدار و به دنبال روش شستشو به دست آمد. تکنیک سنتز امکان تولید کامپوزیت بالاتر در سیستم های ذخیره انرژی گرمایی ، الکتریکی و گرمایی را فراهم می کند. در مطالعه نیه (Nie) و همکاران [۱۰۰] ، پارافین با موفقیت در CNT ها از طریق کپسول گذاری و روش خود پخش که در آن هوا توسط پمپ خلا خارج می شد محدود شد.

یک شبیه سازی دینامیک مولکولی نشان داد که پارافین کپسوله شده به جای آنکه در قسمت مرکزی کانال CNT ها باشد ، در یک توزیع ساختاری منظم در امتداد دیواره داخلی مواد پشتیبانی قرار دارد. مواد به دست آمده در سیستم های خنک کننده میکروالکترونیک استفاده می شود.

### چالش ها و فرصت ها

PCM های ترکیبی از مواد در حال ظهور در کاربردهای ذخیره انرژی گرمایی هستند. شناسایی پتانسیل آن ها در مکانیسم های تنظیم کننده خصوصیات حرارتی ضروری است. مکانیسم های کنترل و چالش های مرتبط با به کارگیری کامپوزیت های تغییر فازدهنده برای ذخیره انرژی حرارتی، انتقال حرارت و پایداری و پدیده خنک سازی PCM های کامپوزیت آلی در بخش های زیر شرح داده شده است. پس از آن ، پتانسیل کاربردهای منحصر به فرد PCM های ترکیبی مورد بحث قرار گرفته است.

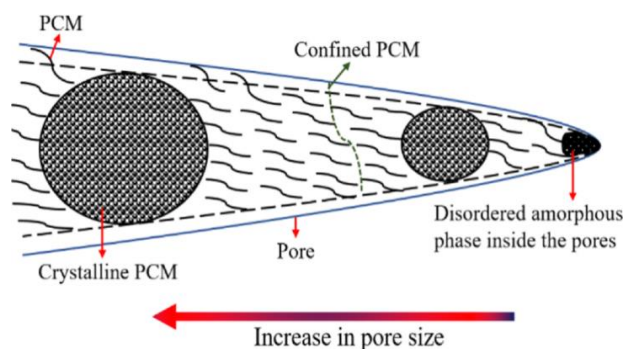
### ذخیره انرژی گرمایی

ظرفیت ذخیره انرژی گرمایی یک پارامتر ضروری PCM های ترکیبی است. با استفاده از گرمای نهان درگیر در انتقال فاز PCM ها ، مانند انتقال جامد-مایع ، می توان آن را درک کرد. عملکرد ذخیره سازی / انتشار انرژی کامپوزیت تغییر فازدهنده به بارگذاری اجزای کامپوزیت و فعل و انفعالات بین مولکولی بستگی دارد. سان و همکاران [۱۰۲] کربن متخلخل سلسله مراتبی (HPC) با سطح ویژه بالا برای نفوذ موم پارافین طراحی کرده اند. گرمای نهان کامپوزیت موم HPC-پارافین با افزایش محتوای پارافین افزایش می یابد. هنگامی که درصد وزنی موم پارافین به ۷۷٪ (حداکثر نسبت بارگذاری) افزایش یافت، گرمای نهان PCM کامپوزیت به ۱۵۲,۲ kJ/kg افزایش می یابد. با این حال، مقادیر عملکرد ذخیره سازی انرژی گرمایی به دلیل اثرات حبس و تبلور PCM کمتر از مقدار پیش بینی شده است. در مطالعه دیگری چن و همکاران [۱۵] اسفنج CNT متخلخل و تغییر شکل پذیر (CNTS) را برای بارگذاری PCM ها تهیه کردند. پارافین / CNTS طراحی شده مقادیر حرارتی

نهان مطلق را از ۱۴۸ تا ۱۵۲ کیلوژول بر کیلوگرم نشان می دهد (۱۰ درصد بالاتر از PCM های بکر (۱۳۶,۰ کیلوژول بر کیلوگرم)). این آنتالپی اضافی مستقل از بارگذاری درصد وزنی PCM ها نیست و نتیجه تعامل بین مولکولی بین CNTS و موم پارافین بر اساس پتانسیل لنارد-جونز است که در عملکرد توزیع جفت شناسایی می شود. تعاملات گسترده میزبان-مهمان  $\pi \bullet \bullet \bullet C-H$  ، محلی سازی  $\pi$  الکترون و استرس فشاری هنگام انتقال فاز ، آنتالپی گرما را تنظیم میکند. برای بیشتر PCM های کامپوزیت گزارش شده ، عواملی مانند منافذ اندازه مواد پشتیبانی کننده ، عملکرد سطح ، معرفی عکس سوئیچینگ آلی و دما و زمان اشباع PCM به طور کلی برای تنظیم عملکردهای شارژ و تخلیه انرژی گرمایی تنظیم می شوند.

### خواص بافتی

تأثیر خصوصیات بافتی (مانند اندازه منافذ ، سطح خاص و ویژگی های تخلخل) مواد میزبان و مهمان نقش مهمی در تولید گرمای زیاد و حالت های خنک کننده همرفت کم دارد [۱۰۳]. اندازه منافذ مواد پشتیبانی کننده ، طول زنجیره و گروههای عملکردی PCM از عوامل مکمل موثر بر خصوصیات حرارتی یک کامپوزیت هستند. دینش و بهاتاچاریا [104] تأثیر توزیع اندازه منافذ (بین ۰,۵ تا ۲,۰ سانتی متر با تخلخل یکسان) را در خصوصیات ذوب و ذخیره انرژی کامپوزیت های کف PCM-فلز تجزیه و تحلیل کردند. نتیجه شبیه سازی نشان داد که تأثیر توزیع اندازه منافذ بر میزان همجوشی با منافذ کوچکتر از منافذ بزرگتر قابل توجه است. این کامپوزیت ها متعاقباً خاصیت ذوب سریع و انتقال حرارت زیاد را به نمایش گذاشتند. مشاهدات مشابهی از نفوذ موم پارافین به کفهای فلزی ریز سلول (اندازه منافذ کمتر از ۱۰۰ میکرومتر) ثبت شده است [۱۰۵].



به علاوه ، وقتی سطح خاص یک کربن متخلخل از  $9/487$  متر مربع در گرم به  $876/6$  مترمربع در گرم افزایش یافت ، گرمای نهان مربوطه هگزادکانول در کامپوزیت از  $204,4$  به  $215,5$  کیلوژول بر کیلوگرم افزایش یافت [۲۰]. قابل توجه بود که منافذ کوچکتر و مساحت سطح حرکت حرارتی طبیعی PCM ها را بطور قابل توجهی محدود می کند. بدین ترتیب آن ها تأثیر بارزی بر روی بارگذاری PCM و ظرفیت ذخیره سازی حرارت پنهان کامپوزیت ها داشتند.

نومرا و همکاران [۱۰۶] تأثیر اندازه منافذ را بر خصوصیات ذخیره / آزادسازی انرژی گرمایی کامپوزیت های  $\text{SiO}_2\text{-octadecane}$  مزوپور ، از جمله تبلور PCM ها در کامپوزیت ها بررسی کرد. همان طور که بعد منافذ از  $11,6$  به  $50$  نانومتر افزایش یافت ،  $\text{Fc}$  از  $51,6$  به  $83,6$  و آنتالپی از  $98,5$  به  $101$  کیلوژول در گرم افزایش یافت. این امر به دلیل تشکیل یک لایه بین فاز غیر ذوب کننده / لایه منجمد کننده در منافذ دقیقه بود که باعث کاهش شعاع PCM های آغشته در ماتریس ها در طی تعامل بین سطحی شد [۵۶]. شکل ۲ به طور کلی تأثیر اندازه منافذ بر میزان تبلور و ظرفیت ذخیره انرژی PCM ها را در چارچوب پشتیبانی توصیف می کند. از این رو، در مقایسه با PCM های بکر ، دمای انتقال فاز / نقطه ذوب و بازده ذخیره انرژی بیشتر به دلیل تأثیرات ترمودینامیکی و هندسی لایه رابط غیر ذوب یک مولکول آلی کاهش می یابد [۱۰۷]. لازم به ذکر است که وقتی طول مولکولی و محتوای بارگذاری PCM در نظر گرفته می شود ممکن است توضیحات چند استثنا از نظر تبلور و ظرفیت ذخیره انرژی داشته باشد.

شکل ۲. شرح شماتیک PCM و اثر متقابل منافذ و افزایش قابلیت تبلور و ذخیره انرژی کامپوزیت های تغییر فازدهنده. تبلور از راست (PCM آمورف) به چپ (PCM های متبلور) افزایش یافت.

مهندسی سطح اجزای کامپوزیت عملکرد سطح اجزای کامپوزیت نقشی ضروری در تنظیم و توصیف مشخصات حرارتی کامپوزیت های طراحی شده دارد. اگرچه این مکانیزم هنوز مورد بحث است کامپوزیتهای مبتنی بر نانو متخلخل که برهم کنشهای بین مولکولی مانند پیوند هیدروژن برگشت پذیر را نشان می دهند باعث ایجاد آنتالپی گرمایش PCM های کامپوزیت می شوند [۱۵،۱۰۸،۱۰۹] PCM های آلی مانند واکس های پارافین، اسیدهای کربوکسیلیک (اسیدهای چرب)، PEG و الکلهای قندی به طور معمول آنتالپی با حرارت بالا و انتقال مایع جامد با طیف وسیعی از نقاط انجماد و ذوب را نشان می دهند. چندین PCM کامپوزیت، به ویژه کامپوزیت های مبتنی بر گروه عملکردی واکنشی، به دلیل دشواری توزیع یکنواخت مواد افزودنی، توسط عملکردسازی سطح ساخته شده اند. مواد حمایتی قطبی سطحی شامل پشتیبانی دوپ شده با هترواتوم و گروههای واکنشی مانند کربوکسیل، هیدروکسیل و آمین در آن گنجانیده شده است. این موفقیت عملکرد تبلور PCM را تحت تأثیر قرار می دهد. این مجموعه های واکنشی حداقل انرژی فعال سازی دارند و بر روند تبلور PCM ها تأثیر می گذارند. گروه های فعال به اندازه کافی حساس هستند تا از طریق سنتز ماده پیوند محکمی ایجاد کرده و بدین ترتیب آنتالپی گرمایی و تبلور کاهش یافته را نشان دهند [۱۱۰].

### شرایط سنتز و خصوصیات دینامیکی مواد

زمان و دما غوطه وری نقش اساسی در جذب PCM دارند و در نتیجه ذخیره گرمای نهان مواد کامپوزیتی را تحت تأثیر قرار می دهند. افزایش دما و زمان کپسوله سازی بیشتر منجر به افزایش بارگذاری PCM تا نسبت بارگذاری مطلوب می شود. کیان و همکاران [۱۱۱] PCM های کامپوزیتی را از PEG و دیاتومیت تولید کرد. ظرفیت جذب PEG در مرحله اولیه به سرعت افزایش یافت. با این حال، پس از ۱ ساعت، کپسوله سازی تقریباً ثابت ماند. به طور مشابه، ظرفیت اشباع با افزایش دما

تا حد مطلوب به طور قابل توجهی افزایش می یابد. پس از جذب به مدت ۱ ساعت ، دمای اشباع تقریباً ثابت مانده است ، که نشان می دهد شرایط بهینه سنتز برای PEG - دیاتومیت ۱ ساعت و ۹۰ درجه سانتی گراد است. علاوه بر این ، روش سنتز خلا uum ظرفیت جذب PEG بالاتری نسبت به غوطه وری طبیعی به نمایش گذاشته است. این امر احتمالاً به دلیل نیروی مویرگی و میل زیاد سطح ماده پشتیبانی کننده برای به دام انداختن PEG است.

تکنیکی مانند اشباع خلا برای اشباع PCM ها به مواد حمایتی متخلخل با اندازه منافذ کوچکتر و ظریف تر، از جمله SiO<sub>2</sub> مزوپور [۱۱۲، ۱۱۳] مطلوب است.

علاوه بر پیشرفت روش های فعال انرژی که با فرآیند مصرف انرژی سروکار دارند ، بکارگیری PCM ها به عنوان رویکردهای غیرفعال ذخیره انرژی، تأثیر قابل توجهی در کاربردهای عملی PCM ها (به عنوان مثال ساختمان) دارد. خصوصیات دینامیکی موادی مانند ضخامت PCM ها ، نقطه ذوب ، آنتالپی گرمایش و موقعیت / موقعیت مکانی با پوشش ساختمان تأثیر مستقیمی بر عملکرد ذخیره انرژی و آسایش حرارتی داخلی دارد. بنابراین ، مدل های انرژی پویا (به عنوان مثال ، مدل کل انرژی شبیه سازی ساختمان و رویکرد شبیه سازی) به عنوان یک روش ضروری در پیش بینی دقیق و توصیف عملکرد PCM ها در نظر گرفته شد [۱۱۴]. هاگناو و جرادی [۱۱۵] با استفاده از EnergyPlus به عنوان یک موتور شبیه سازی ، مدل سازی و شبیه سازی پویای ساختمان با PCM را ارائه دادند. گزارش شد که PCM ها با یک لایه ۴۰۰ میلی متر در ضلع داخلی ساختمان عملکرد ذخیره انرژی بالایی را به نمایش می گذارند. علاوه بر این ، عواملی مانند تنظیمات گرمایش ، سطح عایق ، وضعیت آب و هوا و دمای اتاق تأثیر قابل توجهی در انتخاب مواد مناسب ذخیره انرژی دارند. شارما و رای [۱۱۶] نشان دادند که اجرای لایه PCM در سقف ۱۲،۶-۳۶،۲٪ کاهش گرما در تابستان را نشان می دهد. در حالی که کاهش بهره حرارتی (۱۰،۴-۲۶،۶٪) در اجرای دیوار کاهش یافت.

ویک و همکاران [۱۱۷] عملکرد حرارتی یک اتاقک اداری یکپارچه شده با PCM های زیستی را بررسی کرد. آن ها سناریوهای مختلفی مانند PCM را به عنوان یک سقف معلق با و بدون حمایت از صفحات سقف آلومینیومی در یک روز گرم تابستان در آب و هوای اسلو در نظر گرفتند. PCM بدون پوشش با ۱۷ متر مربع به یک اثر خنک کننده بالا دست یافت. در حالی که PCM پوشیده شده از صفحه و صفحه های گچی افت دمایی متوسطی را نشان می دهد. اینها نشان می دهد که PCM می تواند خنک کننده مکانیکی را کاهش داده و در هزینه نصب و مصرف انرژی و صرفه جویی صرفه جویی کند. الارگا و همکاران [۱۱۸] عملکرد حرارتی PCM ها را با یک فضای سقف تقسیم شده به سه مورد یعنی یک مورد ، بدون PCM و دو سناریو دارای PCM در انواع مختلف و دامنه دمایی انتقال فاز ، ارزیابی کرد. بسته به توپولوژی PCM ، مواد ۱۳-۵۹٪ کاهش بار اوج گرما را نشان دادند. این موضوع اهمیت انتخاب PCM های مناسب را در کاربردهای عملی بیشتر تأیید کرد.

### انتقال گرما / انتقال حرارت

با توجه به سیستم های مدیریت حرارتی مبتنی بر PCM ، تحقیقات زیادی برای بهبود پدیده انتقال حرارتی PCM های ترکیبی برای تبدیل و ذخیره انرژی کارآمد انجام شده است. در حال حاضر، استراتژی ها و رویکردهای مختلف برای پیشبرد و تنظیم جریان گرما در مواد کامپوزیت در حال اتخاذ است (شکل ۳). متداول ترین روش ها برای افزایش عملکرد انتقال حرارت ، ترکیب مواد افزودنی با هدایت حرارتی بالا در PCM ها و محصور کردن PCM ها با یک محیط رسانا است. قابل ذکر است ، بسته به بخش کاربرد (به عنوان مثال ، پوسته ساختمان) ممکن است به PCM های کامپوزیتی با هدایت حرارتی پایین نیز نیاز باشد. در یک منطقه کاربرد مشابه ، ورود PCM به مواد با هدایت حرارتی پایین قابل اجرا است.

شکل ۳. مکانیسم بهبود هدایت حرارتی کامپوزیت های تغییر فازدهنده.



در اینجا ما فقط بر روی مکانیسم های افزایش رسانایی گرمایی PCM ها تمرکز می کنیم. مواد رسانای حرارتی مختلف مانند مواد کربنی (به عنوان مثال CNTs، GA، گرافن، گرافیت، اکسید گرافن (GO، CNTS) و پلیمرهای ریز متخلخل)، NP های فلزی و مواد پشتیبانی غیر فلزی غیر آلی (به عنوان مثال، کف ملامین، نیتريد سيليكون و BN) برای افزایش سرعت انتقال حرارت استفاده می شود. به همین ترتیب، عملکرد انتقال حرارت PCM های کامپوزیت از طریق اثر هم افزایی دو یا چند ماده افزودنی غنی می شود. آتینافو و همکاران [۱۱۹] کربن متخلخل تهیه شده از ژل فلزی - آلی - BN و با موم پارافین نفوذ کرده است. کامپوزیت سه تایی به دست آمده رسانایی گرمایی بسیار پیشرفته ای را نشان می دهد که تقریباً ۲,۳۲ برابر بیشتر از PCM های بکر و ۸۲,۳ درصد بیشتر از کامپوزیت های موم BN-پارافین مربوطه در حالت جامد است. وی و همکاران [۱۲۰] همچنین پانل های گچ توخالی ترکیبی بر اساس نانو پلاکت های گرافیت لایه بردار و اکتادکان برای کاربردهای ساختمانی توسعه داد. عملکرد انتقال حرارت کامپوزیت تغییر فاز با حداکثر ۳۶,۶ J / g ذخیره انرژی ۲۲۵٪ بهبود یافته است. جدول ۳ عملکرد هدایت حرارتی مختلف PCM های ترکیبی را نشان می دهد. سایر ویژگی های تأثیرگذار (به عنوان مثال، اندازه / جرم اتمی، دما و انرژی اتصال) نیز می توانند به مکانیسم های بهبود کمک کنند.

جدول ۳: خواص هدایت حرارتی کامپوزیت های تغییر فاز که اخیراً گزارش شده است.

Organic PCMs	Supportive materials	Synthesis methods	$k$ (W/(m·K))*	Improvement (%)	Ref.
Polyethylene glycol	Expanded graphite	Vacuum impregnation	0.2315	43.2	[121]
Polyethylene glycol	Anisotropic cellulose/BN nanosheet	Vacuum impregnation	4.764	1400	[49]
Polyethylene glycol	Melamine foam /rGO/BN	Impregnation	0.79	146.7	[5]
Polyethylene glycol	CNTS (axial)	One-step polymerization and solution assisted infiltration	2.4	~900	[122]
Stearic acid	Ultrathin graphite sheets	Impregnation	2.691	907.9	[51]
Stearic acid	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> /EG	Solution impregnation	2.53	666.67	[53]
n-octadecane	3D-GA	Solution and vacuum impregnation	1.636	987.0	[63]
n-octadecane	Porous TiO <sub>2</sub>	Vacuum impregnation	0.45	138	[42]
Octadecanol	Expanded perlite/EG	Vacuum impregnation	6.623	-	[123]
Paraffin	SiO <sub>2</sub> /Ti <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Sol-gel method	1.322	334.9	[84]
Paraffin	3D-EG block	Self-assembly and casting way	15.66	7730	[124]
Paraffin	Expanded natural graphite	Compression and impregnation	20.2	6633.3	[125]
Paraffin	Melamine foam/cellulose nanofiber/GNPs	Vacuum-assisted encapsulation	1.42	407	[126]
HDA	CNTs	Diels-Alder reaction	0.877	338.5	[110]

## کاربردی / اصلاح کننده مواد پشتیبانی کننده

در بیشتر موارد، اصلاح مواد پشتیبانی کننده از طریق یک روش شیمیایی (عملکرد شیمیایی از طریق دوپینگ و یا گروه های عملکردی پیوند) می تواند ساختارهای ذاتی آنها را تحت تأثیر قرار دهد و به نوبه خود، بر عملکرد انتقال حرارت ماتریس PCM تأثیر بگذارد. پیوند گروه های واکنشی در سطح کانال پشتیبانی یک مرکز فعال جدید ایجاد می کند و حجم منافذ را بدون تغییر ساختار مزوپور کاهش می دهد. به عنوان مثال، CNT های چند جداره ساخته شده با هگزادسیل آکریلات (HDA) رسانایی حرارتی بالایی را نشان می دهند (۳/۳۹ برابر بیشتر از بستر تغییر فاز) و کارایی های تبدیل انرژی را بهبود می بخشد. دلیل این امر این است که PCM های آلی به صورت کووالانسی بر روی سطح CNT ها پیوند می خورند، که مسیری را برای انتقال حرارت مداوم و مسیرهای بهتر فونون فراهم می کند. در نتیجه، PCM های کامپوزیت باعث پراکندگی مرز فونون و جریان سریع گرما شده اند. این مواد پشتیبانی کننده یک ساختار شبکه ای رابط و نفوذپذیر متقابل D<sub>3</sub> ایجاد می کنند که برای انتقال حرارت مداوم مناسب است و مقاومت حرارتی بین PCM و پشتیبانی را کاهش می دهد. گروه عملکردی آلی جذب PEG را از طریق نیروی مویرگی و نیروهای بین مولکولی بهبود بخشید. این به نوبه خود، باعث بهبود پایداری شکل PCM های ترکیبی ترکیبی می شود.

## معرفی ماتریس هایی با هدایت حرارتی بالا

موادی با رسانایی حرارتی بالا، مانند فیلم های گرافن [۱۲۷]، مواد گرافیکی سه بعدی شامل کربن های شبیه گرافیت [۱۲۴، ۱۲۸]، کف مس [۱۲۹]، [TiO<sub>2</sub> 130]، پودر گرافیت [۱۳۱] و Ti<sub>4</sub>O<sub>7</sub> [84]، بیشتر با PCM اعمال می شود. مواد کامپوزیت ناهمسانگرد همچنین می توانند نرخ شارژ / تخلیه را افزایش دهند [۱۳۲]. فعالیت های جذب و ذخیره سازی کامپوزیت ها را پیشرفت می دهد [۱۳۳]. لی و همکاران [۱۳۴] GA ناهمسانگرد (AN-GA) برای محصور کردن موم پارافین ساختند.

نمونه حاصل خواص حرارتی الکتریکی بالایی را نشان داد (هشت برابر در جهت محوری در مقایسه با آن در جهت شعاعی). این به دلیل ورقه های گرافن است که با منافذ محدود AN-GA هماهنگ شده اند که منجر به یک جهت مطلوب برای PCM های آلی می شود. علاوه بر این ، PCM های کامپوزیت ناهمسانگرد یک بازده تبدیل الکترو به حرارتی بالا با ولتاژ حاشیه ای را نشان می دهند. الیاف کربن خاص تولید شده اقتصادی نیز دارای ترازهای ساختاری بوده و رسانایی گرمایی را بهبود می بخشند. در مطالعه دیگری ، خاصیت انتقال حرارتی کامپوزیت انعطاف پذیر ناهمسانگرد پلی اورتان- CNTS ۱۰ برابر بیشتر از جهت پلی اورتان بکر در جهت محوری بود ، در حالی که ۲,۵ برابر جهت شعاعی بود [۱۲۲].

# فصل سوم:

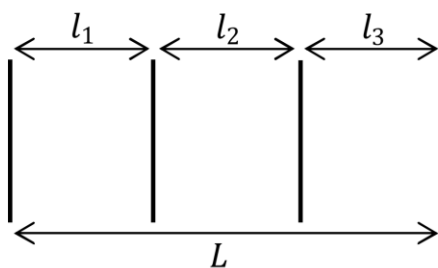
## شبیه سازی مدل

### ۳-۱- مقدمه

هدف از این فصل ارائه معادلات حاکم بر انتقال حرارت دیواره مرکب با توجه به جای گذاری ماده تغییر فاز دهنده می باشد. کلیه معادلات حاکم و روابط مورد استفاده برای مطالعه و بررسی انتقال حرارت، در این فصل ارائه می شود. در ابتدا به طور مختصر توضیحاتی در مورد قانون بقای انرژی بیان می شود. در نهایت شکل نهایی معادلات با توجه به معادله موازنه انرژی برای حالت تک فاز و دوفاز ماده تغییر فاز دهنده استخراج شده و شرایط مرزی برای مسئله مورد نظر بیان می شود.

### ۳-۲- هندسه مسئله

همانطور که در فصل اول بیان شد، دیواره مرکب از سه لایه تشکیل شده است. ضخامت لایه ی داخلی دیواره با  $l_1$ ، ضخامت لایه ی میانی دیواره با  $l_2$  و ضخامت لایه بیرونی دیواره با  $l_3$  نشان داده شده اند.  $L$  نیز معرف ضخامت کلی دیواره میباشد. لایه های بیرونی و داخلی از جنس فایبر گلاس و لایه میانی از جنس ماده تغییر فاز دهنده می باشد. در شکل (۳-۱) طرح شماتیک دیواره نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- طرح شماتیک دیواره

### ۳-۳- معادلات حاکم بر انتقال حرارت دیوارها

قانون اول ترمودینامیک (قانون بقای انرژی)، حاکم بر انتقال حرارت دیواره مرکب است. قانون اول ترمودینامیک را به صورتی که برای انتقال گرما مناسب باشد می توان اینگونه بیان نمود: حاصل جمع نرخ ورود انرژی گرمایی و مکانیکی ورودی به یک حجم کنترل و نرخ انرژی گرمایی تولید

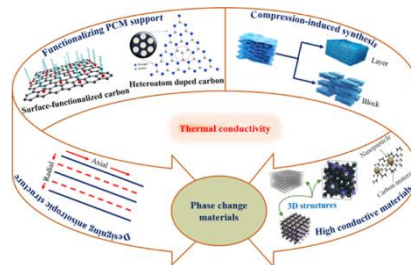
شده در آن می بایست با حاصل جمع نرخ خروج انرژی گرمایی و مکانیکی از حجم کنترل و نرخ افزایش انرژی ذخیره شده در آن برابر باشد.

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{out} + \dot{E}_s \quad (1-3)$$

در نتیجه می توان گفت اگر مجموع انرژی ورودی و تولید شده بیش از انرژی خروجی باشد، مقدار انرژی ذخیره شده در حجم کنترل افزایش خواهد یافت. اگر برعکس آن باشد مقدار انرژی ذخیره شده کاهش خواهد یافت. در صورتی که مجموع انرژی ورودی و تولید شده با انرژی خروجی برابر باشد شرایط دائم برقرار می شود، که در این صورت مقدار انرژی ذخیره شده در حجم کنترل تغییری نخواهد کرد.

عبارت های انرژی ورودی و خروجی پدیده های سطحی اند، یعنی فقط به فرآیندهایی که در سطح کنترل رخ میدهد مربوط اند و با مساحت سطح متناسب اند. ورود و خروج انرژی در اثر انتقال گرمای رسانایی، جابجایی و تابشی نمونه هایی از این پدیده اند. عبارت تولید انرژی در برگیرنده تبدیل سایر انواع انرژی مانند انرژی شیمیایی، الکتریکی، الکترومغناطیسی و یا هسته ای به انرژی گرمایی است. این یک پدیده حجمی است، یعنی در داخل حجم کنترل رخ میدهد و با اندازه حجم متناسب است. ذخیره انرژی نیز یک پدیده حجمی است. تغییرات در حجم کنترل می تواند ناشی از تغییرات انرژی داخلی، جنبشی و یا پتانسیل محتویات آن باشد. تغییر در انرژی داخلی شامل چند جزء است. انرژی محسوس یا گرمایی که حرکت های انتقالی، چرخشی و یا ارتعاش اتمها و یا مولکول های ماده را در بر می گیرد، انرژی نهان که به نیروهای بین مولکولی که باعث تغییر حالت بین جامد، مایع و گاز می شود بستگی دارد، انرژی شیمیایی که انرژی ذخیره شده در پیوندهای شیمیایی بین اتمها را در بر می گیرد و بالاخره انرژی هسته ای که نیروهای همگیری در هسته را به شمار می آورد.

معادلات حاکم بر دیواره مرکب در حالت تک فاز و دوفاز با استفاده معادله بقای انرژی تعیین می شوند. انتقال حرارت در دیواره به صورت یک بعدی فرض شده است.

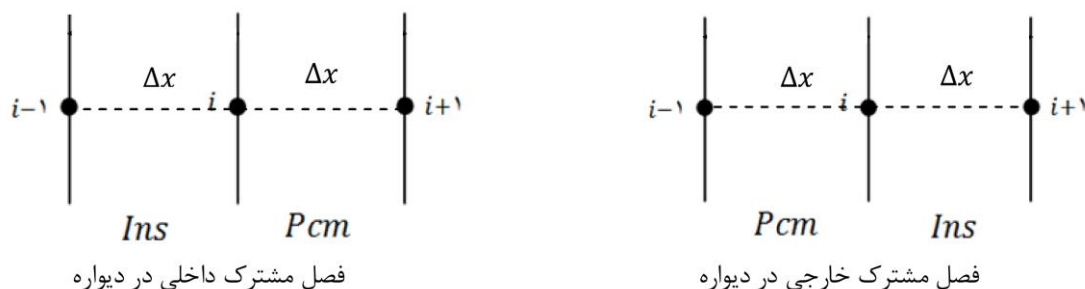


### ۳-۲-۱ - معادله حاکم بر انتقال حرارت دیواره در حالت تک فاز

معادله پخش گرما حاکم بر انتقال حرارت دیواره مرکب در حالت تک فاز می باشد، این معادله که معادله گرما نیز نامیده می شود، ابزار اصلی برای تجزیه و تحلیل رسانایی گرما می باشد که با حل آن می توان توزیع دما را به صورت تابعی از زمان به دست آورد.

$$k_n \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho_n c_n \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-3)$$

$n$  بیانگر شماره لایه می باشد. برای فصل مشترک داخلی و خارجی دیواره که در شکل (۲۳) نشان داده شده اند، معادله پخش گرما به ترتیب به صورت زیر بازنویسی می شوند:



شکل ۳-۲- فصل مشترک لایه های تشکیل دهنده ی دیواره کامپوزیت

$$(k_{pcm} - k_{ins}) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Delta x}{2} [(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-3)$$

$$(k_{ins} - k_{pcm}) \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\Delta x}{2} [(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}] \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4-3)$$

### ۳-۲-۲- معادلات حاکم بر انتقال حرارت دیواره برای وضعیت دوفازی لایه میانی

در حالت دوفازی در حین فرآیند تغییر فاز، دمای نقاط قرار گرفته در لایه میانی از معادله (۵ - ۳) بدست می آید.

$$T = T_m \quad (5-3)$$

در این وضعیت عدد بدون بعد ما به صورت زیر تعریف می شود که بیانگر میزان ذوب شدگی نقاط در ماده تغییر فاز دهنده است.

$$\lambda = \frac{m_{l pcm}}{m_{t pcm}} \quad (6-3)$$

مقدار ۸ برای فاز جامد برابر صفر و برای فاز مایع برابر یک می باشد. در وضعیت دوفازی نیز ۸ بین مقادیر صفر و یک تغییر می کند. تغییرات ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده با استفاده از قانون بقای انرژی و با حل معادله زیر قابل محاسبه می باشد.

$$k_{pcm} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho_{pcm} \Delta x h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (7-3)$$

$h_{if}$  بیانگر گرمای نهان حاصل از ذوب یا انجماد ماده می باشد. برای فصل مشترک داخلی و خارجی، معادله فوق به ترتیب به صورت زیر بازنویسی می شود:



$$(k_{pcm} - k_{ins}) \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_{pcm} \frac{\Delta x}{2} h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (۸-۳)$$

$$(k_{ins} - k_{pcm}) \frac{\partial T}{\partial x} = \rho_{pcm} \frac{\Delta x}{2} h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} \quad (۹-۳)$$

### ۳-۲-۳ - میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده

میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده در هر مرحله زمانی نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\gamma^j = \sum_{i=1}^N \frac{\Delta x}{L_2} \lambda_i^j \quad (۱۰-۳)$$

که مقدار آن بین صفر برای فاز جامد و یک برای فاز مایع قابل تغییر است.

۴-۳ - شرایط مرزی و عملکرد گرمایی دیواره کامپوزیت برای دو شرایط مرزی بیرونی مورد بررسی قرار گرفته است. در قسمتهای بعد این شرایط توضیح داده میشوند.

### ۱-۳-۳ - شرط مرزی داخلی

شرط دما ثابت به عنوان شرط مرزی داخلی در نظر گرفته شده است.

$$T(0, t) = T_0 = 299 \text{ K} \quad (۱۱-۳)$$

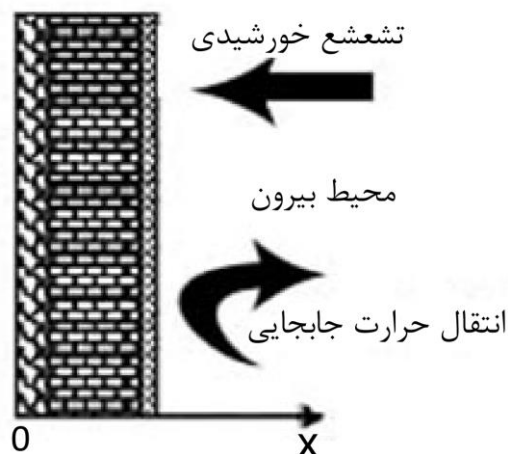
### ۲-۳-۳ - شرط مرزی بیرونی

همانطور که بیان شد برای دیواره مرکب دو شرط مرزی بیرونی در نظر گرفته شده است. |.. شرط مرزی بیرونی اول بر اساس تغییرات دمای محیط بیرون در نظر گرفته شده است که با یک تابع سینوسی با دمای متوسط ۳۱۴K، دامنه ۷K و تاخیر زمانی ۵/۲ نسبت به زمان مدل سازی می شود.

$$T_a = 314 + 7 \sin \left( \left( \frac{2\pi t}{86400} \right) - 2.5 \right) \quad (12-3)$$

۲. با توجه به شکل (۳-۳)، در شرط مرزی بیرونی دوم، دمای سطح خارجی دیواره با استفاده

از معادله توازن انرژی و با در نظر گرفتن میزان تشعشع خورشیدی دریافتی توسط دیواره و انتقال حرارت جابجایی ناشی از تغییرات دمای محیط اطراف تعیین می شود.



شکل ۳-۳- شرایط در مرز بیرونی دیواره

$$\alpha q''_{rad} + h_{out}(T_{out} - T_{x=l}) = -k_{ins} \frac{\partial T}{\partial x}_{x=l} \quad (13-3)$$

در معادله فوق  $q_{rad,a}$  و  $h$  بترتیب معرف ضریب جذب سطح، تشعشع خورشیدی برخوردی به دیواره و ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط بیرون می باشد. تشعشع خورشیدی برخوردی به دیواره با استفاده از معادلات ارائه شده توسط دافی و بیکن محاسبه شده است که نتایج آن بوسیله معادله زیر نسبت به زمان (بر حسب ساعت) مدل سازی شده است.

$$q''_{rad} = 0.3141 t^4 - 15.078 t^3 + 251.04 t^2 - 1682.5 t + 3904.4 \quad (14-3)$$

ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط بیرون با استفاده از مرجع ASHRE [۴۷] برابر با  $17W$  و ضریب جذب سطح نیز برابر  $0.8$  در نظر گرفته شده اند. تغییرات دمای محیط نیز مطابق معادله (۳-۱۲) مدل سازی شده است.

### ۵ - ۳ - محاسبه شار خروجی از دیواره

شار حرارتی خروجی از مرز داخلی دیواره با استفاده از رابطه (۳-۱۵) محاسبه می شود.

$$q_w'' = k_{ins} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad (۳-۱۵)$$

### ۶ - ۳ - طول بدون بعد لایه ی داخلی

طول بدون بعد لایه داخلی در دیواره مرکب که بیانگر موقعیت قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده در دیواره است، به صورت زیر تعریف می شود:

$$L = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \quad (۳-۱۶)$$

که با ضخامت لایه داخلی فایبر گلاس و ضخامت لایه ی حاوی ماده تغییر فاز دهنده می باشد.

# فصل چهارم:

## روش عددی

#### ۴-۱ - مقدمه

آنالیز عددی از مهمترین مباحث در ریاضیات کاربردی است. این مبحث قرن‌ها پیش از اختراع کامپیوتر ابداع شده است. بسیاری از ریاضیدانان بزرگ با آنالیز عددی آشنا بوده‌اند و این امر از الگوریتم‌های مهمی چون روش نیوتن، چند جمله‌ای درونیایی لاگرانژ، حذف گاوسی و روش اویلر پیداست. روش‌های مورد استفاده همواره از نظر اعمال دقت مورد بررسی و تغییر بوده‌اند. به خصوص روش‌های محاسباتی در چند دهه اخیر به علت پیشرفت ماشین‌های کامپیوتر مورد تجدیدنظر واقع شده‌اند تا به صورت روش‌هایی در آیند که دقیقتر و سریعتر بوده و برآورد خطاهای محاسباتی در باره آن انجام پذیر باشد. امروزه آنالیز عددی به برکت وجود کامپیوتر گسترش حیرت‌آوری یافته است و با شتاب اعجاب‌آوری به پیش می‌رود. به طوری که امروزه از آنالیز عددی به عنوان بسط و مطالعه روش‌های حل مسئله با کامپیوتر یاد می‌شود. بی‌شک همه کسانی که در زمینه‌های مختلف علوم مهندسی مطالعه می‌کنند باید با آنالیز عددی آشنایی داشته باشند تا بتوانند از توانایی کامپیوتر جهت حل عددی مسائل بهره‌کافی ببرند. در این فصل بعد از بیان کلیاتی درباره روش عددی، درباره نحوه حل معادلات دیفرانسیل و استفاده از برنامه کامپیوتری در کار مطالعاتی پیش رو بحث خواهد شد.

#### ۴-۲ - روش عددی

واژه الگوریتم یا روش عددی به یک روند اصولی حل مسئله اطلاق می‌شود. هدف از استفاده از روش‌های عددی، فرمول‌بندی مسائل به نحوی است که توسط عملیات محاسبه‌ای قابل حل باشند. در نتیجه می‌توان گفت اعمال روش عددی قسمت مهمی از موضوع پردازش اطلاعات محسوب می‌شود. در موارد بسیاری برای حل یک مسئله بیش از یک الگوریتم وجود دارد که انتخاب الگوریتم مناسب با توجه به شرایط مسئله، از مهمترین دغدغه‌های یک متخصص آنالیز عددی محسوب می‌شود. کارایی یک الگوریتم با دو عامل سرعت و دقت آن مشخص می‌شود. دقت مفهومی است

که نیروی زیادی به خود اختصاص می دهد و این مفهوم جنبه مهم دیگری از حل عددی مسئله را مطرح می کند و آن مفهوم خطاست. اطلاعات ورودی اغلب تقریبی اند و الگوریتم مورد استفاده نیز معمولاً باعث خطاهای دیگری می شود. به این ترتیب اطلاعات خروجی شامل خطای حاصل از هر دو منبع مذکور خواهد بود. الگوریتمی که رشد خطا را به حداقل کاهش دهد، الگوریتم مطلوب خواهد بود. بنابراین باید به دنبال حداقل خطای ممکن و در واقع جواب دقیقتر بود. | و برای پیشگویی تئوری پدیده های فیزیکی که فواید بسیار مهم و کاربردی برای انسان دارند، نیاز به روش های ریاضی است. حل عددی انتقال حرارت، جریان سیال و سایر فرآیندهای مربوط به آنها وقتی می تواند انجام شود که قوانین حاکم بر آنها به زبان ریاضی و بر حسب معادلات دیفرانسیل بیان شده باشند. این معادلات بیانگر یک اصل بقای خاص هستند و هر معادله یک کمیت فیزیکی معین را به عنوان متغیر وابسته خود به کار برده و یک موازنه بین عوامل مختلف اثر کننده بر متغیر مذکور را بیان می کنند.

معادلات دیفرانسیل بر بسیاری از پدیده های پیرامون ما حاکم هستند که شکل عمومی و کلی آنها برای متغیر و به فرم زیر است.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) + S \quad (1-4)$$

حال کار اصلی یافتن وسیله لازم برای حل این معادله است. جواب عددی یک معادله دیفرانسیل یک سری از اعداد میباشد که از آنها توزیع متغیر وابسته و به دست می آید. یک روش عددی مقادیر متغیر وابسته را در تعدادی محدود از مکانها (به نام گره ها) که در حوزه محاسباتی قرار دارند، به عنوان مجهولات اصلی خود محاسبه می کند. در این راستا، روش فوق وظیفه تهیه یک سری معادلات جبری برای این مجهولات و مقرر داشتن یک روش ریاضی برای حل معادلات را به عهده دارد. با تمرکز روی مقادیر موجود در گر هها، اطلاعات پیوسته ای که در حل دقیق معادله دیفرانسیل

وجود دارد را با مقادیر جدا از هم تعویض کرده و بنابراین توزیع متغیر ناپیوسته شده است. به این دسته از روش های عددی، روشهای انفصال می گویند. برای تعیین این معادلات انفصال، بعضی فرض ها در مورد اینکه متغیر چگونه بین گره ها تغییر می کند لازم است. اگر چه این پروفیل می تواند طوری انتخاب شود که برای همه حوزه محاسباتی تنها یک عبارت جبری کافی باشد، اغلب عملی تر است از پروفیل های قطعه به قطعه استفاده شود، به طوری که هر قطعه، تغییر متغیر را فقط روی منطقه کوچکی بر حسب مقادیر متغیر وابسته در گره های بین و اطراف آن منطقه تشریح کند. بنابراین بهتر است ناحیه محاسباتی را به تعدادی نواحی کوچکتر تقسیم کرد تا به این ترتیب با تطبیق هر تکه، در حالت کلی معادلات دقیق تری به دست آید. با این کار دو هدف عمده امکان پذیر خواهد شد. او همانطور که گفته شد، با یافتن معادله برای هر تکه، یک پروفیل کلی منطبق تر بر محدوده حل حاصل میشود و ثانیاً امکان جانشین نمودن معادلات دیفرانسیل با معادلات ساده جبری که تقریباً راحت تر از معادلات دیفرانسیل حل می شوند، فراهم می شود. از آنجایی که معادله انفصال به دست آمده از معادله دیفرانسیل حاکم به دست می آید

بنابراین همان اطلاعات فیزیکی را ارائه می کند که معادله دیفرانسیل نیز ارائه می کرد. نتیجه دیگری که در اینجا می توان برداشت کرد اینست که هر چه تعداد گره ها (همان نقاطی که قرار است معادله گذرنده از آنها را نوشت)، بیشتر شود، انتظار می رود که جواب معادله انفصال به جواب معادله دیفرانسیل نزدیکتر گردد.

#### ۴ - ۳ - روش های انفصال معادلات

روشهای مختلفی برای به دست آوردن معادلات انفصال گوناگون وجود دارد و معادلات انفصالی که از هر روش به دست می آید، با دیگری تفاوت دارد. البته با افزایش تعداد گره ها، تمام معادلات در

حد، به جواب یکسانی همگرا می شوند. سه روش اصلی برای تعیین معادلات انفصال وجود دارد که از نظر ساختار کلی، شبیه به هم هستند. این سه روش اصلی، تفاضل یا اختلاف محدود، اجزا یا المان محدود و روش حجم محدود می باشند. اساس همه این روش ها حذف معادلات دیفرانسیل یا ساده سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی است که با روش های عددی قابل حل باشند.

#### ۴-۳-۱ روش تفاضلات محدود

در روش تفاضلات محدود تعدادی نقطه روی دامنه حل در نظر گرفته میشود و با استفاده از نقاطی که دارای شرایط معلوم هستند، شرایط نقاط مجهول مجاور به دست می آید. با نوشتن معادله برای هر گره مجهول و در نهایت رسیدن به دسته ای از معادلات و حل دستگاه، می توان شرایط نقاط مجهول را به دست آورد. در تمام روش های عددی برای داشتن حل می بایست به تعداد مجهولات، معادله وجود داشته باشد. در این روش هم این مسئله صادق است. پس ابتدا میدان مورد نظر در مسئله شبکه بندی می شود و سپس با جایگذاری تفاضلات محدود به جای مشتقات جزئی در معادله، معادله دیفرانسیل به یک معادله جبری برای هر نقطه تبدیل می شود. تفاضلات محدود با استفاده از سری تیلور و یا چند جمله ای نیوتنی بدست می آید. اگر به نحوی از تفاضلات استفاده شود که در معادله جبری حاصل، تنها یک مجهول وجود داشته باشد، روش عددی به کار رفته را صریح و چنانچه تفاضلاتی به کار رود که در نتیجه دو یا چند مجهول در معادله جبری حاصل موجود باشد، آن روش را روش ضمنیه می گویند. در روشهای صریح مقدار مجهول در هر معادله که برای یک نقطه نوشته می شود، مستقیماً بدست می آید در حالیکه در روشهای ضمنی، معادلات برای نقاط مختلف موجود در میدان، به یک دستگاه معادلات جبری تبدیل می شود که با حل دستگاه معادلات جبری بدست آمده، مقدار تابع در کلیه نقاط مشخص شده در شبکه بدست می آید.



#### ۴-۳-۲ - روش اجزا محدود

یکی دیگر از روش های بسیار مهم و اساسی در زمینه حل عددی، روش اجزا یا المان محدود می باشد. روش المان محدود خود دارای زیر شاخه های گوناگونی است، اما همه آنها در اصول حاکم با هم مشترک هستند. در این روش، محدوده حل به تعدادی المان کوچک تقسیم می شود و مسئله برای هر جز بطور مجزا حل می شود و در نهایت با ارتباط معادلات به هم، یک دستگاه معادلات حاصل می گردد که کل میدان حل را شامل می شود. در حالت کلی می توان مسائل را با فرمول-بندیهای ریاضی یا همان معادلات دیفرانسیل بیان کرد. گاهی اوقات این معادلات دیفرانسیلی را میتوان بصورت انتگرالی نیز بیان کرد که اتفاقا برای حل مناسب تر می شوند. این در حالی است که جواب هایی که از هر دو معادله بدست می آید همسان خواهند بود. این فرمول بندی انتگرالی را شکل ضعیف معادله می گوئیم. در واقع برای حل این شکل معادله از روش عددی اجزاء محدود می توان استفاده کرد. روش اجزا محدود یک تکنیک عمومی برای ساختن حل های تقریبی مسایل مقدار مرزی است. در اینجا نیز جواب های تقریبی به صورت چند جمله ای انتخاب می شوند. این چند جمله ایها، خود بصورت حاصلضرب تعدادی تابع معلوم که توابع شکل نام دارند در مقادیر مجهول متغیر وابسته نوشته میشوند. با جایگزینی جواب های تقریبی در معادله های دیفرانسیلی حاکم، باقی مانده ای بدست می آید که انتگرال حاصلضرب این باقی مانده در تابع های وزنی مربوط، برابر صفر قرار داده میشود. تعداد توابع وزنی برابر با تعداد مقادیر مجهول متغیر وابسته شده و به این ترتیب به تعداد مجهولات، معادله وجود خواهد داشت.

#### ۴-۳-۳ - روش حجم محدود

روش دیگری که برای تعیین معادله انفصال استفاده می شود روش حجم محدود است که در آن نوشتن معادلات انفصال با استفاده از حجم کنترل انجام می گیرد. در روش حجم محدود میدان محاسباتی به تعدادی حجم کنترلی به گونه ای تقسیم می شود که هر گره داخل یک حجم کنترل

قرار گیرد و حجم های کنترلی دارای حجم های مشترک با یکدیگر نباشند. از معادله دیفرانسیل روی هر یک از این حجم های کنترلی انتگرال گیری می شود. برای تعیین تغییرات کمیت  $\Phi$  و بین نقاط شبکه، از پروفیل های تقریبی استفاده می شود و معادله انفصال بر حسب کمیت و در نقطه مورد نظر

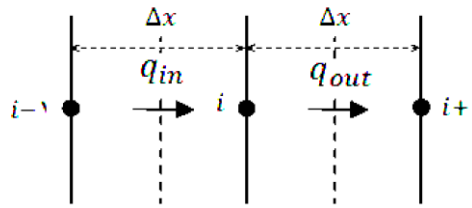
و نقاط همسایه اش بدست می آید. لازم به ذکر است که در این روش بقای کمیت هایی مانند جرم، مقدار حرکت و انرژی برای هر گروهی از حجم های کنترل و البته برای کل میدان حل، حتی برای شبکه با تعداد نقاط کم نیز برقرار میباشد.

#### ۴-۴- بدست آوردن معادلات انفصال در روش تفاضلات محدود

در این بخش تمام اجزای لازم برای نوشتن معادله انفصال مربوط به معادله انتقال حرارت حاکم بر دیواره بیان می شود. برای انفصال معادلات از روش صریح استفاده شده است. همانطور که بیان شد معادله حاکم بر دیواره با استفاده از معادله بقای انرژی در شرایط مختلف تعیین می شود.

#### ۴-۴-۱- معادلات حاکم بر دیواره در حالت تک فاز

برای تعیین معادلات حاکم بر دیواره مرکب در این وضعیت می بایست معادله بقای انرژی را با توجه به شرایط دیواره بازنویسی کرد. به همین منظور انرژی ورودی و خروجی از المان بر اساس هدایت حرارتی و تغییر انرژی داخلی بر مبنای گرمای محسوس ذخیره شده در المان تعیین میشوند. لازم به ذکر است از انتقال حرارت جابجایی برای وضعیتی که ماده تغییر فاز دهنده در فاز مایع قرار دارد صرف نظر شده است. دلیل این امر ضخامت کم ماده تغییر فاز دهنده و عدم جریان یافتن ماده به دلیل محصور بودن آن بین لایه های کناری است. شکل (۴-۱) طرح یک بعدی شماتیک از المان های میانی دیواره را نشان میدهد.



شکل ۱-۴ المان میانی لایه ها

برای نقاط درونی لایهها، عبارتهای معادله (۱-۳) با توجه به شکل (۱-۴) به صورت زیر بازنویسی می شوند:

$$\dot{E}_{in} = q''_{in} = -k_n \frac{\partial T}{\partial x} = -k_n \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

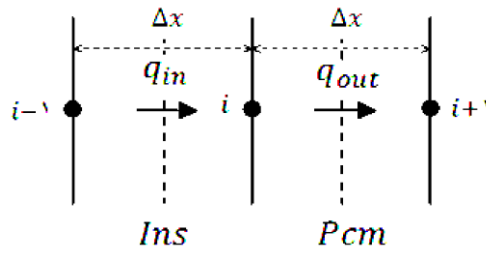
$$\dot{E}_{out} = q''_{out} = -k_n \frac{\partial T}{\partial x} = -k_n \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_s = (\rho c)_n \Delta x \frac{\partial T}{\partial t} = (\rho c)_n \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}$$

n بیانگر شماره لایه می باشد. از بسط پیشروی مکانی حول گره i و بسط پیشروی زمانی در زمان z برای انفصال عبارتها به روش تفاضلات محدود استفاده شده است. با جای گذاری مقادیر فوق در معادله بقای انرژی و ساده سازی آن، دمای نقاط میانی لایه ها در حالت تک فاز از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{k_n \Delta t}{\rho_n c_n \Delta x^2} (T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j) \quad (۲-۴)$$

برای فصل مشترک داخلی دیواره، با توجه به شکل (۲۴)، بسط پیشروی مکانی حول گره i و بسط پیشروی زمانی در زمان z، عبارت های معادله انرژی به صورت زیر بیان می شوند:



شکل ۲-۴ - المان قرار گرفته در فصل مشترک داخلی

$$\dot{E}_{in} = q''_{in} = -k_{ins} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{ins} \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

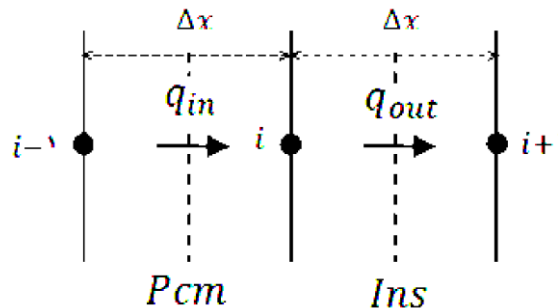
$$\dot{E}_{out} = q''_{out} = -k_{pcm} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{pcm} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_s = (\rho c)_{ins} \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_{pcm} \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta x}{2} [(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}] \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}$$

با جایگذاری مقادیر فوق در معادله بقای انرژی و ساده سازی آن، معادله (۳۴) برای محاسبه دمای گره قرار گرفته در فصل مشترک داخلی حاصل می شود.

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{2\Delta t}{[(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}]\Delta x^2} [k_{ins}(T_{i-1}^j - T_i^j) + k_{pcm}(T_{i+1}^j - T_i^j)] \quad (۳-۴)$$

برای فصل مشترک خارجی نیز با توجه به شکل (۳-۴) می توان نوشت:



شکل ۳-۴ - المان قرار گرفته در فصل مشترک خارجی

$$\dot{E}_{in} = q''_{in} = -k_{pcm} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{pcm} \frac{T_i^j - T_{i-1}^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

$$\dot{E}_{out} = q''_{out} = -k_{ins} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{ins} \frac{T_{i+1}^j - T_i^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_s = (\rho c)_{ins} \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_{pcm} \frac{\Delta x}{2} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\Delta x}{2} [(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}] \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t}$$

با مرتب سازی و ساده سازی عبارت های معادله انرژی، دمای گره قرار گرفته در فصل مشترک خارجی دیواره با استفاده از معادله (۴-۴) تعیین می شود.

$$T_i^{j+1} = T_i^j + \frac{2\Delta t}{[(\rho c)_{ins} + (\rho c)_{pcm}]\Delta x^2} [k_{pcm}(T_{i-1}^j - T_i^j) + k_{ins}(T_{i+1}^j - T_i^j)] \quad (۴-۴)$$

#### ۴-۴-۲ - معادلات حاکم بر دیواره برای وضعیت دوفازی لایه میانی

دمای ماده تغییر فاز دهنده در حین فرآیند تغییر فاز، دارای مقداری ثابت و برابر دمای ذوب (انجماد) ماده می باشد. از این رو می توان نوشت:

$$T_i^j = T_i^{j+1} = T_m \quad (۵-۴)$$

در وضعیت دوفازی، هدف محاسبه میزان ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده است. در ادامه معادلات لازم جهت محاسبه تغییرات عدد بدون بعد ۸ که بیانگر میزان ذوب شدگی نقاط در لایه میانی است، ارائه می شود. به همین منظور معادله بقای انرژی با توجه به شرایط دیواره بازنویسی میشود. انرژی ورودی و خروجی از المان بر اساس هدایت حرارتی و تغییر انرژی داخلی بر مبنای گرمای نهان ذخیره شده در المان تعیین می شوند.

برای نقاط درونی لایه میانی، عبارتهای معادله بقای انرژی را با توجه به شکل (۴-۱) میتوان به صورت زیر نوشت.

$$\begin{aligned}\dot{E}_{in} &= q''_{in} = -k_{pcm} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{pcm} \frac{T_m - T'_{i-1}}{\Delta x} \\ \dot{E}_g &= 0 \\ \dot{E}_{out} &= q''_{out} = -k_{pcm} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{pcm} \frac{T_{i+1}^j - T_m}{\Delta x} \\ \dot{E}_s &= \rho_{pcm} \Delta x h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} = \rho_{pcm} \Delta x h_{fg} \frac{\lambda_i^{j+1} - \lambda_i^j}{\Delta t}\end{aligned}$$

و از بسط پیشروی مکانی حول گره او بسط پیشروی زمانی در زمان ز برای انفصال عبارت‌ها به روش تفاضلات محدود استفاده شده است. با جای گذاری مقادیر فوق در معادله بقای انرژی و ساده سازی آن، میزان ذوب شدگی نقاط داخلی لایه حاوی میانی از رابطه (۴-۶) قابل محاسبه است.

$$\lambda_i^{j+1} = \lambda_i^j + \frac{\Delta t}{\rho_{pcm} h_{if} \Delta x^2} (T_{i+1}^j - 2T_m + T_{i-1}^j) \quad (۴-۶)$$

برای گره قرار گرفته در فصل مشترک داخلی با توجه به شکل (۴-۲) و استفاده از بسط پیشروی مکانی حول گره او بسط پیشروی زمانی در زمان ز می توان نوشت:

$$\begin{aligned}E_{in} &= q''_{in} = -k_{ins} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{ins} \frac{T_m - T_{i-1}^j}{\Delta x} \\ E_g &= 0 \\ E_{out} &= q''_{out} = -k_{pcm} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{pcm} \frac{T_{i+1}^j - T_m}{\Delta x} \\ \Delta E_s'' &= \rho_{pcm} \Delta x h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} = \rho_{pcm} \frac{\Delta x}{2} h_{if} \frac{\lambda_i^{j+1} - \lambda_i^j}{\Delta t}\end{aligned}$$

با مرتب سازی و ساده سازی جملات، معادله (۴-۷) برای محاسبه میزان ذوب شدگی گره قرار گرفته در فصل مشترک داخلی، حاصل می شود.

$$\lambda_i^{j+1} = \lambda_i^j + \frac{2 \Delta t}{\rho_{pcm} h_{if} \Delta x^2} [k_{pcm}(T_{i+1}^j - T_m) - k_{ins}(T_m - T_{i-1}^j)] \quad (۴-۷)$$

برای فصل مشترک خارجی نیز با توجه به شکل (۳-۴)، عبارت های معادله ی بقای انرژی به صورت

زیر باز نویسی می شوند

$$\dot{E}_{in} = q''_{in} = -k_{pcm} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{pcm} \frac{T_m - T_{i-1}^j}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_g = 0$$

$$\dot{E}_{out} = q''_{out} = -k_{ins} \frac{\partial T}{\partial x} = -k_{ins} \frac{T_{i+1}^j - T_m}{\Delta x}$$

$$\dot{E}_s = \rho_{pcm} \Delta x h_{if} \frac{\partial \lambda}{\partial t} = \rho_{pcm} \frac{\Delta x}{2} h_{if} \frac{\lambda_i^{j+1} - \lambda_i^j}{\Delta t}$$

میزان ذوب شدگی گره قرار گرفته در فصل مشترک خارجی نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\lambda_i^{j+1} = \lambda_i^j + \frac{2\Delta t}{\rho_{pcm} h_{fg} \Delta x^2} [k_{ins}(T_{i+1}^j - T_m) - k_{pcm}(T_m - T_{i-1}^j)] \quad (۸-۴)$$

#### ۴-۵- مدل سازی خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده

یکی از مسائلی که در حل عددی تغییر فاز مواد می بایست مورد توجه قرار گیرد، مدل سازی خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده در حین فرآیند تغییر فاز است. . مدل سازی مناسب خواص موجب می شود تا در حل عددی نزدیکترین روند به رفتار واقعی ماده حاصل گردد. در بیشتر مطالعات انجام گرفته خواص ترموفیزیکی در هنگام تغییر فاز ماده، برابر خواص یکی از فازها و یا میانگین خواص در فاز جامد و مایع در نظر گرفته شده اند. در این مطالعه استفاده از روش خواص متغیر برای ماده با در نظر گرفتن میزان ذوب شدگی آن در هر مرحله زمانی پیشنهاد شده است. همچنین به منظور شناخت اثر گذارترین خاصه در مدل خواص متغیر، تاثیر هر یک از خواص نیز به صورت مجزا بررسی می شود. با توجه به مطالب ذکر شده، خواص ترموفیزیکی ماده با چهار روش مدل سازی شده اند.

۱. در نظر گرفتن خواص میانگین برای ماده تغییر فاز دهنده در کل فرآیند حل

$$K_{pcm} = 0.5 (K_s + K_l) \quad (9-4)$$

$$\rho_{pcm} = 0.5 (\rho_s + \rho_l) \quad (10-4)$$

$$c_{pcm} = 0.5 (c_s + c_l) \quad (11-4)$$

. مدل سازی ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده بر اساس میزان ذوب شدگی آن در هر مرحله زمانی و در نظر گرفتن چگالی و گرمای ویژه ی ماده به صورت میانگین در کل فرآیند حل

$$K_{pcm} = \left( \frac{1 - \lambda_i^j}{K_s} + \frac{\lambda_i^j}{K_l} \right)^{-1} \quad (12-4)$$

$$\rho_{pcm} = 0.5 (\rho_s + \rho_l) \quad (13-4)$$

$$c_{pcm} = 0.5 (c_s + c_l) \quad (14-4)$$

۳. مدل سازی چگالی ماده بر اساس میزان ذوب شدگی آن در هر مرحله زمانی و در نظر

گرفتن ضریب هدایت حرارتی و گرمای ویژه ی به صورت میانگین در کل فرآیند حل

$$K_{pcm} = 0.5 (K_s + K_l) \quad (15-4)$$

$$\rho_{pcm} = \lambda_i^j \rho_l + (1 - \lambda_i^j) \rho_s \quad (16-4)$$

$$c_{pcm} = 0.5 (c_s + c_l) \quad (17-4)$$

۴. مدل سازی خواص ترموفیزیکی ماده بر اساس میزان ذوب شدگی آن در هر مرحله زمانی

$$K_{pcm} = \left( \frac{1 - \lambda_i^j}{K_s} + \frac{\lambda_i^j}{K_l} \right)^{-1} \quad (18-4)$$

$$\rho_{pcm} = \lambda_i^j \rho_l + (1 - \lambda_i^j) \rho_s \quad (19-4)$$

$$c_{pcm} = \lambda_i^j c_l + (1 - \lambda_i^j) c_s \quad (20-4)$$

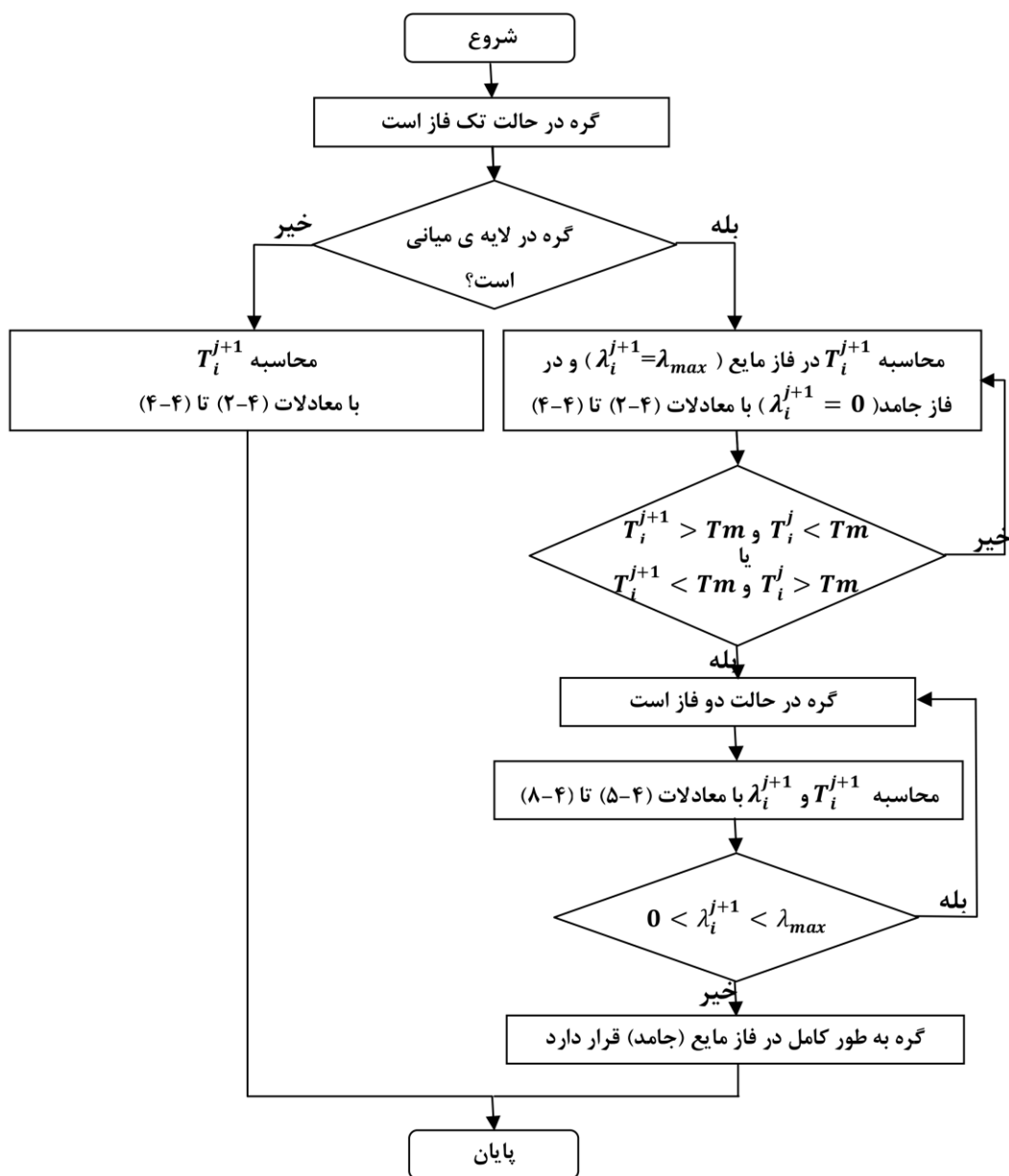


با اعمال هر یک از این مدل ها در حل عددی، نتایج حاصله از آنها مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد.

#### ۴-۶- روند حل عددی مسئله

شکل (۴-۴) الگوریتم حل عددی مسئله را نمایش میدهد. همانطور که بیان شد، دیواره مرکب از سه لایه ی مجزا تشکیل شده است. برای لایه های کناری در تمام مراحل حل، معادلات (۲-۴) تا (۴-۴) همواره به مسئله حاکم می باشند. اما برای لایه ی میانی دو گروه از معادلات

معادلات در حالت تک فاز و معادلات در حالت دوفاز ( قابل استفاده است. هنگامی که نقاط قرار گرفته در لایه ی میانی جامد باشند و یا به صورت کامل ذوب شده باشند، باز هم معادلات (۲-۴) تا (۴-۴) بر مسئله حاکم می باشند. اما وقتی نقاط در لایه ی میانی در وضعیت دوفازی، یعنی در حین فرآیند ذوب (انجماد) باشند، از معادلات (۴-۵) تا (۴-۸) در حل استفاده می شود.



شکل ۴-۴ الگوریتم حل مساله

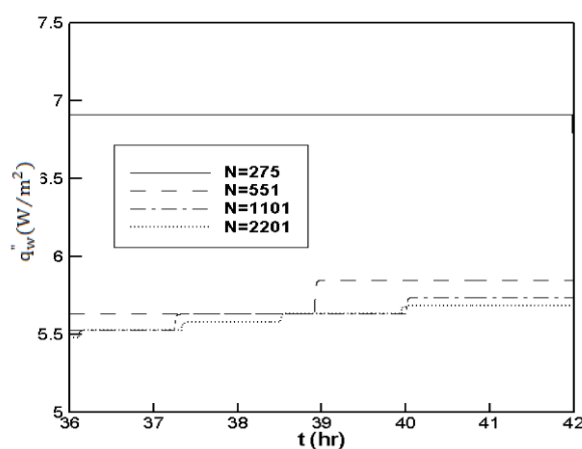
## فصل پنجم: نتایج

## ۵ - ۱ - مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با استفاده از برنامه کامپیوتری، ارائه می شود. در ابتدا شبکه مناسب برای حل مسئله مورد نظر انتخاب می شود. سپس برای حصول اطمینان از درستی برنامه کامپیوتری، نتایج حاصل از آن برای مسئله نمونه با نتایج موجود در مراجع معتبر، مقایسه می گردد. بعد از آن مسئله مورد نظر در مطالعه حاضر با استفاده از برنامه کامپیوتری، برای حالات مختلف حل شده و نتایج آن در قالب نمودارهای مختلف ارائه میشود.

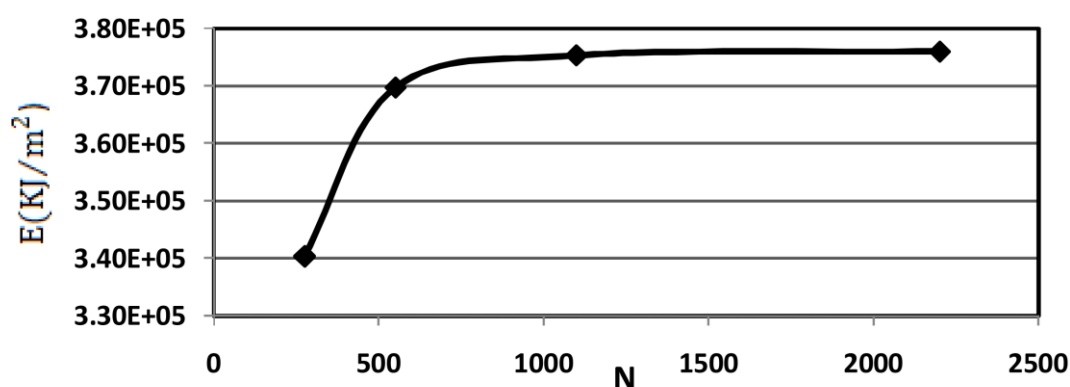
## ۵ - ۲ - انتخاب شبکه مناسب

به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه، نتایج محاسبات برای مقادیر مختلف نقاط به دست آمده و با هم مقایسه شده اند. تعداد نقاط به ترتیب ۲۷۵، ۵۵۱، ۱۱۰۱ و ۲۲۰۱ در نظر گرفته شده اند. کوچکترین فاصله زمانی با توجه به تعداد نقاط شبکه و شرط پایداری روش صریح، برای همه نقاط در نظر گرفته شده است. تغییرات مقدار شار خروجی از مرز داخلی دیواره در  $X = 0$  برای شبکه های مختلف در شکل (۵-۱) برای شرایط مرزی مشخص و در ساعات اوج مصرف (بین ساعت ۱۲ تا ۱۸)، نشان داده شده اند. همانطور که در شکل مشخص است نتایج حل برای تعداد نقاط ۱۱۰۱ و ۲۲۰۱ تفاوت بسیار اندکی دارند و لذا شبکه ۱۱۰۱ بعنوان شبکه مناسب انتخاب شده است



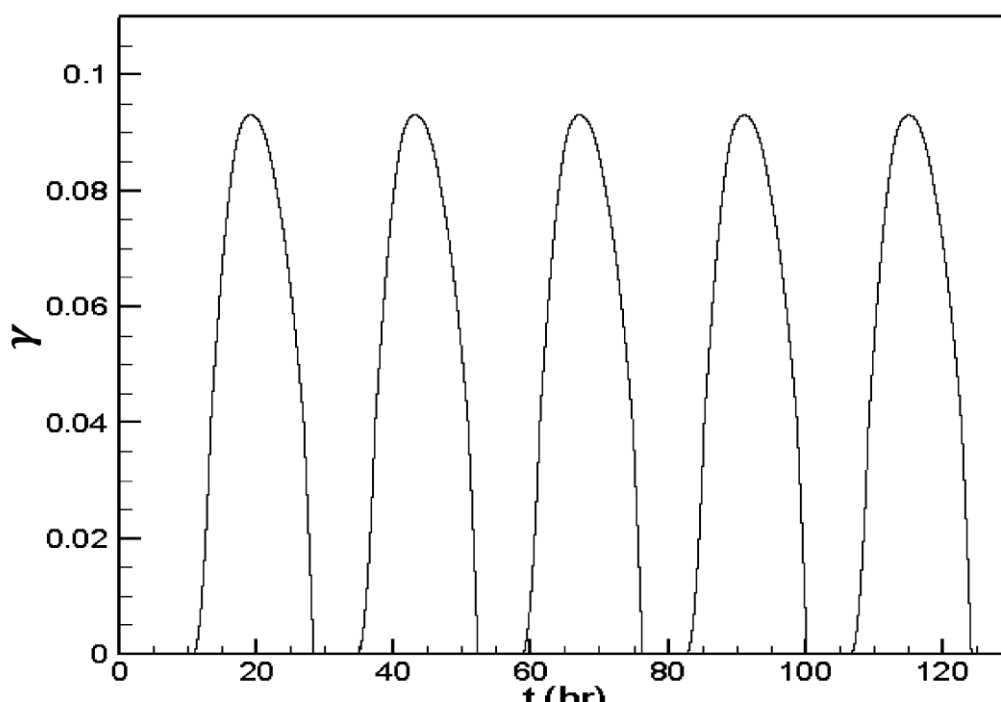
شکل ۵-۱- تغییرات شار حرارتی خروجی از مرز داخلی دیواره برای تعداد نقاط شبکه مختلف

همچنین مقدار انرژی خروجی از دیواره بر واحد سطح در یک روز برای تعداد نقاط مختلف شبکه در نمودار (۵-۲) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود انرژی کلی خروجی برای تعداد نقطه ۱۱۰۱ و ۲۲۰۱ تفاوت چندانی ندارد و در واقع شبکه با ۱۱۰۱ نقطه، نمایانگر شبکه مناسب برای انجام این مطالعه است.



شکل ۵-۲- میزان انرژی خروجی از دیواره بر واحد سطح در یک روز بر حسب تعداد نقاط شبکه

در شکل (۵-۳) میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده برای شبکه انتخابی و در دوره زمانی ۱۲۰ ساعته (۵ روزه) نمایش داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با توجه به شرایط مرزی اعمالی به دیواره، روند یکسانی بر نتایج بدست آمده حاکم است. لذا نتایج حل عددی در بازه زمانی ۴۸ ساعته مورد بررسی قرار می گیرند



شکل ۵-۳- ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده در بازه زمانی ۲۴ ساعته

### ۵ - ۳ - معتبر سازی برنامه کامپیوتری

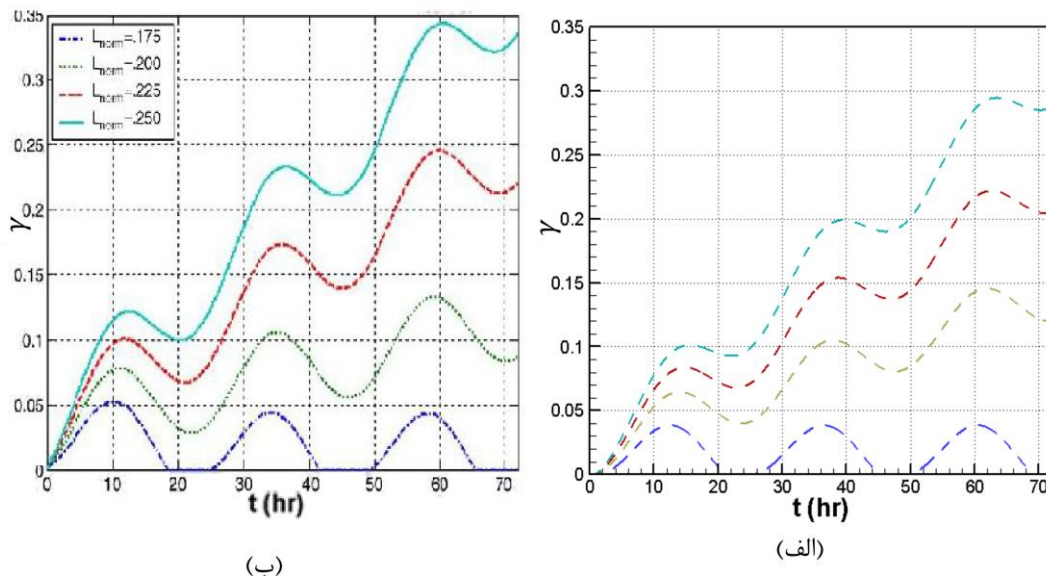
به منظور معتبر سازی برنامه کامپیوتری تهیه شده برای دیواره مرکب حاوی ماده تغییر فاز دهنده، نتایج عددی برای هندسه و شرایط مرزی بررسی شده توسط هالفورد مورد مقایسه قرار گرفته است. دیواره خارجی بررسی شده در این تحقیق از ۳ لایه مجزا تشکیل شده است که لایه های بیرونی و داخلی از جنس فایبر گلاس و لایه میانی حاوی ماده تغییر فاز دهنده است.

ضخامت لایه میانی ۴ میلیمتر و مجموع ضخامت لایه های فایبر گلاس ۱۶۰ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

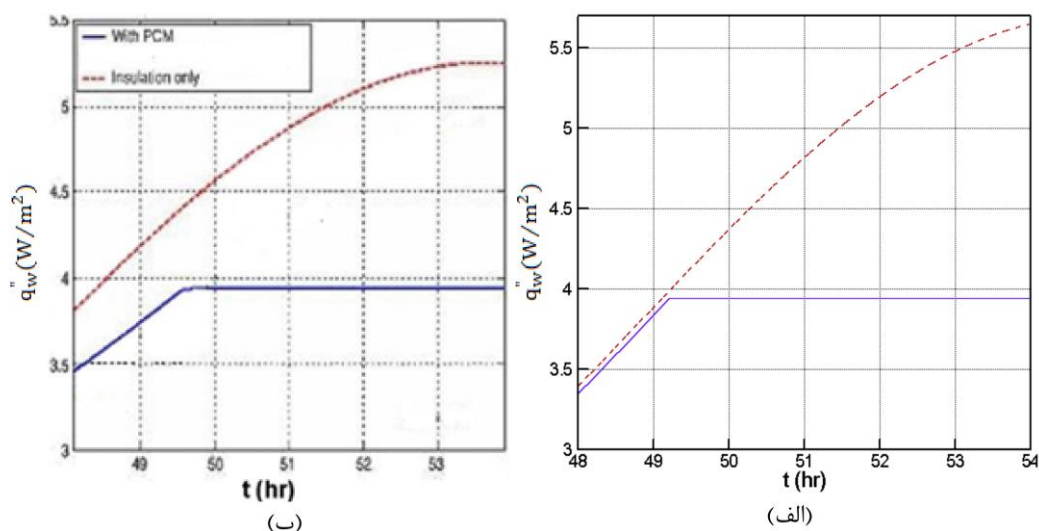
خواص ماده تغییر فاز دهنده در طی فرآیند حل، دارای مقدار ثابت و به صورت میانگین خواص حالت جامد و مایع در نظر گرفته شده اند. دمای محیط بیرون و دمای داخلی اتاق به ترتیب به عنوان شرط مرزی خارجی و شرط مرزی داخلی دیواره در نظر گرفته شده اند. برای مدل سازی دمای محیط از تابع سینوسی با دوره تناوب ۲۴ ساعته و با دمای متوسط ۳۱۴ K و دامنه ۸ K استفاده

شده است. دمای داخلی دیواره نیز در دمای ثابتی نگه داشته شده است. نتایج کار برای دو وضعیت مقایسه شده اند. در حالت اول دیواره به صورت تک لایه از جنس فایبر گلاس و در حالت دوم دیواره به صورت ۳ لایه و حاوی ماده تغییر فاز دهنده در نظر گرفته شده است.

در نتایج حاضر میزان ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده برای طول بدون بعد لایه داخلی ۰/۲۵ و  $L = 0/175, 0/280, 0/225$  با نتایج مرجع [۹] در شکل (۴-۵) مقایسه شده است. در شکل (۵-۵) نیز شار خروجی از مرز داخلی دیواره در  $X = 0$  برای طول بدون بعد لایه داخلی نمایش داده شده است. تغییرات شار حرارتی خروجی برای دیواره تک لایه و دیواره مرکب و در ساعات اوج مصرف ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود روند تغییرات نتایج بدست آمده و نتایج مرجع [۹] مشابه می باشد. لازم به ذکر است که در مرجع [۹]، اطلاعات مختصری از خواص ماده تغییر فاز دهنده موجود می باشد و لذا نتایج بصورت کیفی مورد مقایسه قرار گرفته اند.



شکل ۴-۵- میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده (الف) کار حاضر (ب) مرجع



شکل ۵-۵- شار حرارتی خروجی از دیواره (الف) کار حاضر (ب) مرجع [۹]

### ۵-۳- بررسی عملکرد گرمایی دیواره کامپوزیت

مطالعه حاضر به منظور بررسی عملکرد گرمایی دیواره مرکب حاوی ماده تغییر فاز دهنده و به صورت یک بعدی انجام گرفته است. در این مطالعه برای هندسه در نظر گرفته شده که در شکل (۱-۳) نشان داده شد، رفتار حرارتی دیواره برای دو شرط مرزی بیرونی مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده و شار حرارتی خروجی از دیواره برای شرایط مرزی اعمالی رسم شده اند و به کمک آنها رفتار حرارتی دیواره مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی این مطالعه کاهش شار حرارتی خروجی از دیواره بخصوص در ساعات اوج مصرف می باشد. برای توزیع اولیه دما در دیواره، از حل معادله هدایت پایدار برای دیواره با فرض دمای ۳۱۴K به عنوان شرط مرزی بیرونی استفاده شده است. بررسی عددی در دوره ی زمانی ۴۸ ساعته انجام گرفته است و نتایج برای روز دوم بیان شده اند. ضخامت لایه حاوی ماده تغییر فاز دهنده ۴ میلیمتر و مجموع ضخامت لایه های فایبر گلاس ۱۷۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است.

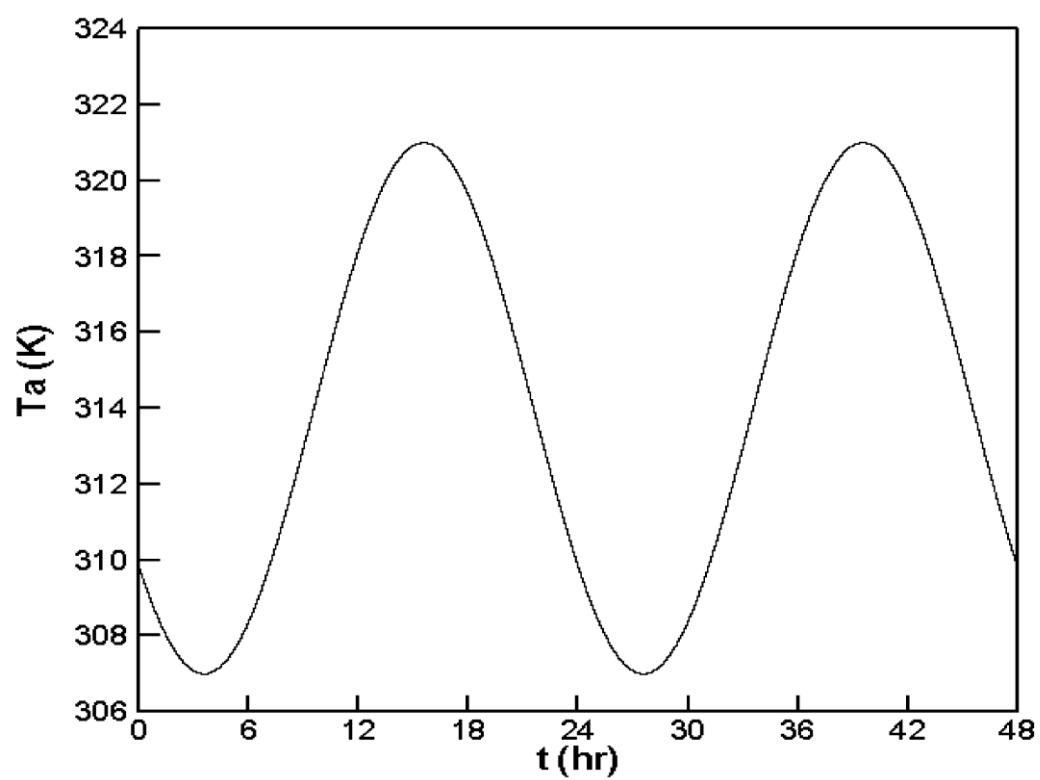
در این بررسی از ماده تغییر فاز دهنده اکتاد کان که از مواد آلی است استفاده شده است. جدول (۱-۵) خواص ترموفیز کی ماده سازنده دیواره را نشان میدهد.



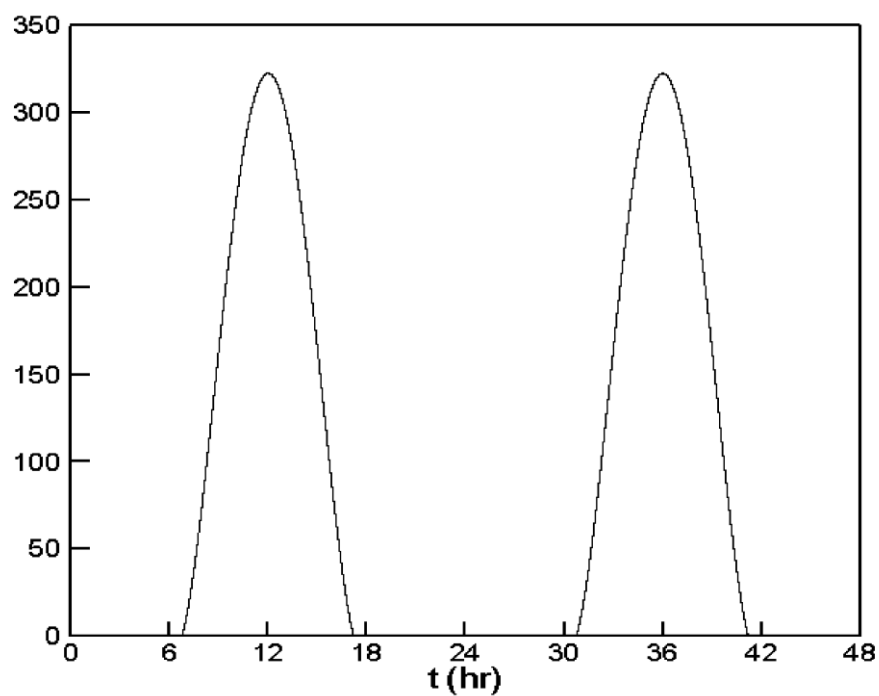
جدول ۵ خواص ترموفیزیکی مواد تشکیل دهنده دیواره

فایبرگلاس		اکتادکان	
خواص	فاز جامد	فاز مایع	
دانسیته $[\text{kg}/\text{m}^3]$	۸۶۵	۷۸۵	۳۲
گرمای ویژه $[\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}]$	۲/۱۴	۲/۶۶	۰/۸۴
ضریب هدایت حرارتی $[\text{W}/\text{K} \cdot \text{m}]$	۰/۱۹	۰/۱۴۸	۰/۰۳۸
دمای تغییر فاز $[\text{°C}]$	۲۶	۲۶	-
گرمای نهان ذوب $[\text{kJ}/\text{kg}]$	۲۴۳/۵		-

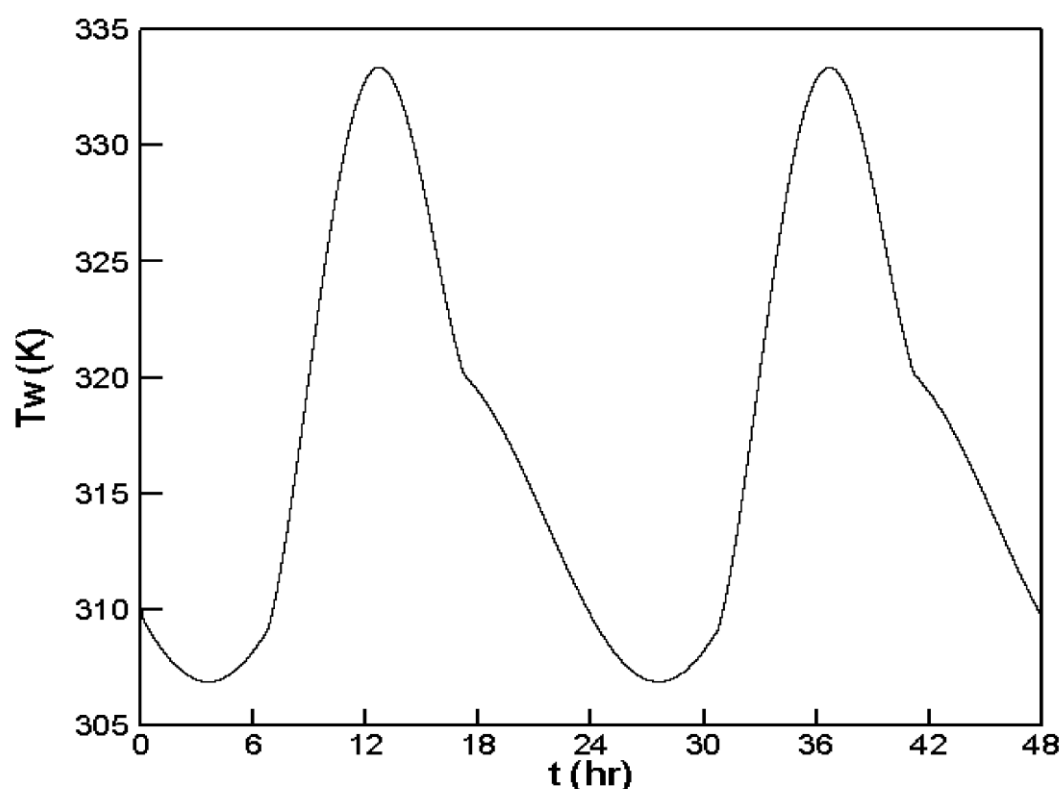
همانطور که بیان شد رفتار حرارتی دیواره برای دو شرط مرزی بیرونی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۵-۶) تغییرات دمای محیط بیرون نسبت به زمان که به عنوان شرط مرزی بیرونی اول در نظر گرفته شده ارائه شده است. شکل های (۵-۷) و (۵-۸) نیز بترتیب تغییرات تشعشع خورشیدی برخوردی به دیواره و تغییرات دمای سطح بیرونی دیواره را برای دوره تناوب ۲۴ ساعته نمایش می دهند. تغییرات دمای سطح بیرونی دیواره (شرط مرزی بیرونی دوم)، تحت اثر تشعشع برخوردی به دیواره و انتقال حرارت جابجایی ناشی از تغییرات محیط بیرون با استفاده از قانون بقای انرژی در مرز بیرونی دیواره محاسبه شده است. با توجه به شرایط مرزی اعمالی به دیواره، توزیع دما در دیواره در ساعات اولیه بررسی به صورتی است که ماده تغییر فاز دهنده در فاز جامد قرار دارد.



شکل ۵-۶ تغییرات دمای محیط بیرون نسبت به زمان به عنوان شرط مرزی بیرونی اول



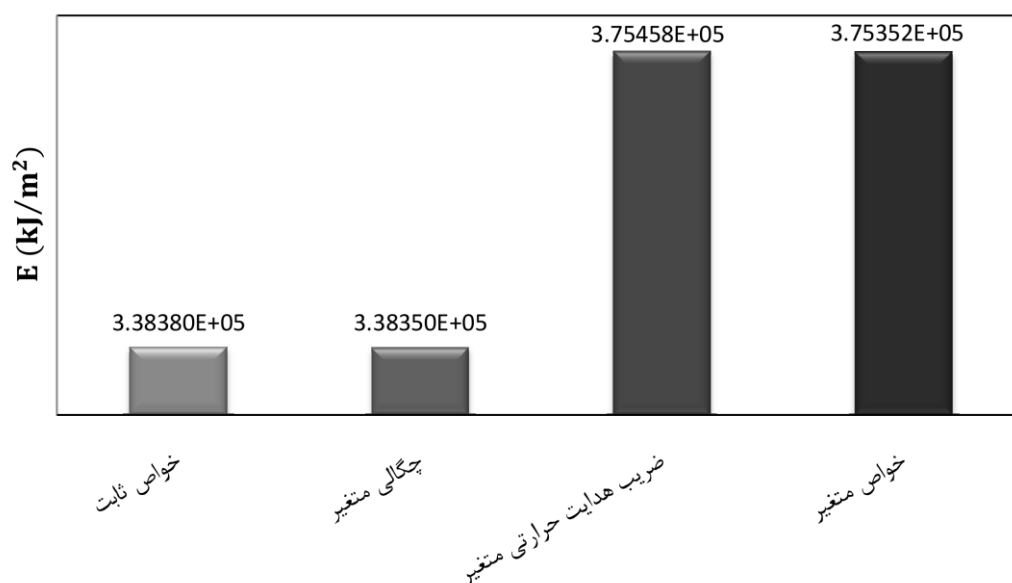
شکل ۵-۷ تغییرات تشعشع خورشیدی بر خوردی به دیواره نسبت به زمان



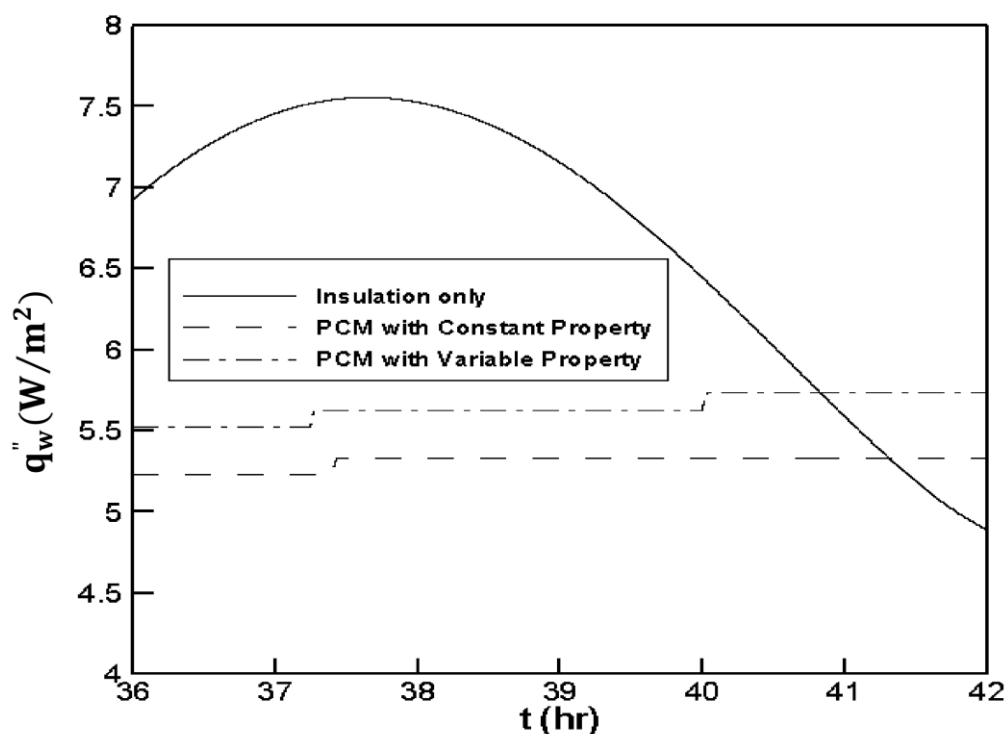
شکل ۵-۸- تغییرات دمای سطح دیواره نسبت به زمان به عنوان شرط مرزی بیرونی دوم یکی از اهداف این تحقیق، بررسی اثر خواص ترموفیزیکی ماده (ضریب هدایت حرارتی، چگالی و گرمای ویژه) در حین فرآیند تغییر فاز، بر نتایج حل عددی است. همانطور که در فصل چهارم بیان شد مدل رایج برای تعیین خواص، استفاده از مقادیر میانگین فاز جامد و مایع می باشد. در این مطالعه مدل خواص متغیر برای ماده پیشنهاد شده که بر اساس تعیین خواص ماده نسبت به میزان ذوب شدگی آن در هر مرحله زمانی می باشد. نمودار (۵-۹) انرژی خروجی از دیواره را در  $X = 0$  در یک روز و برای مدل سازی های مختلف خواص ترموفیزیکی نشان میدهد.

تفاوت انرژی خروجی از دیواره بر اساس مدل خواص ثابت و خواص متغیر، نشان دهنده نقش مهم خواص ترموفیزیکی بر نتایج حل عددی است. بطوری که با استفاده از مدل خواص متغیر، افزایش ۹/۵٪ در انرژی خروجی از دیواره مشاهده می شود. همچنین مقایسه نتایج بدست آمده براساس روش خواص ثابت و روشهای ضریب هدایت حرارتی متغیر (متغیر بودن ضریب هدایت حرارتی و

ثابت بودن سایر خواص) و چگالی متغیر (متغیر بودن چگالی و ثابت بودن سایر خواص) نشان دهنده تاثیر ویژه ی ضریب هدایت حرارتی بر نتایج حل عددی است. این امر موید غالب بودن متغیر در نظر گرفتن ضریب هدایت حرارتی نسبت به سایر خواص در حل عددی است. بصورتی که می توان گفت بکار گیری مدل چگالی متغیر تاثیری بر نتایج ندارد. در شکل (۵-۱۰) تغییرات شار حرارتی خروجی متغیر برای ماده تغییر فاز دهنده در از دیواره مرکب با استفاده از مدل های خواص ثابت و خواص مقایسه با دیواره تک لایه ارائه شده است.

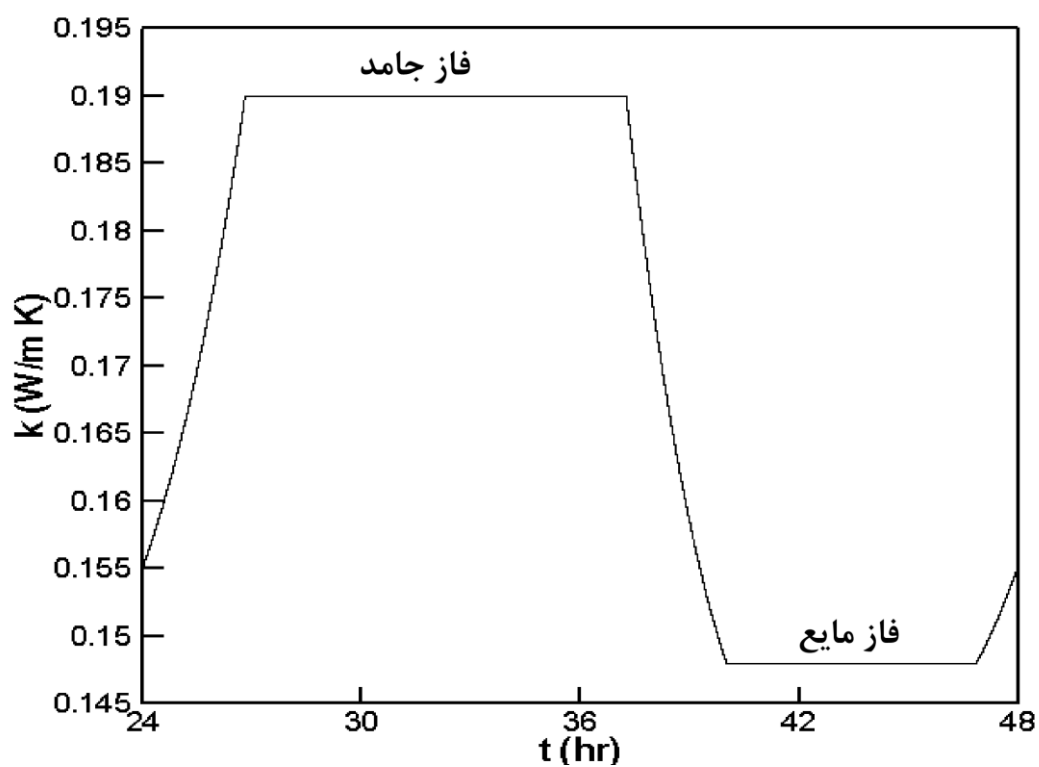


شکل ۵-۹- انرژی خروجی از دیواره بر واحد سطح در یک روز برای انواع مدل سازی خواص

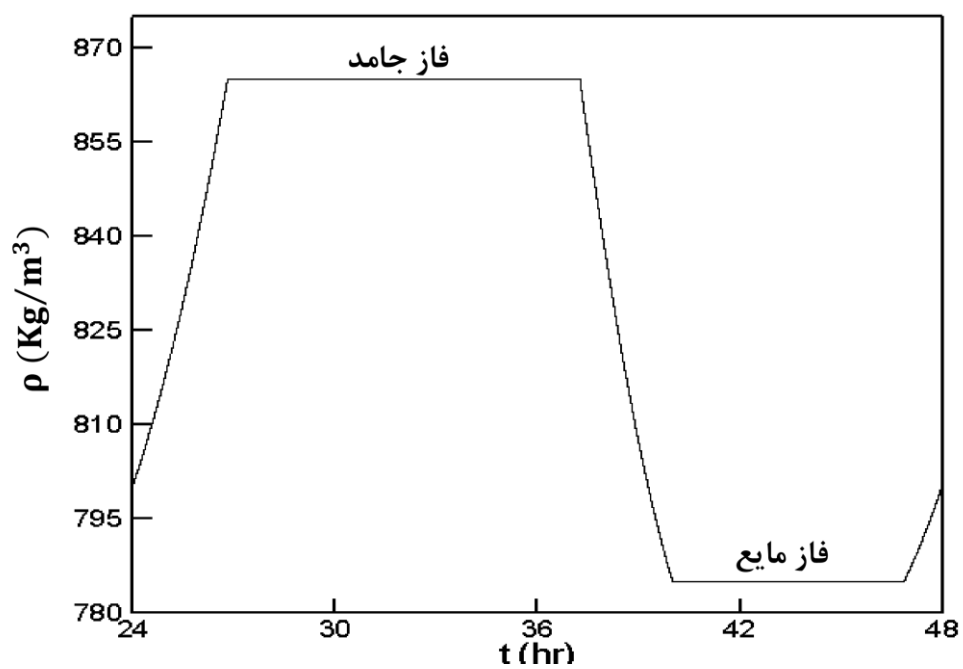


شکل ۵-۱۰- تغییرات شار حرارتی خروجی نسبت به زمان در

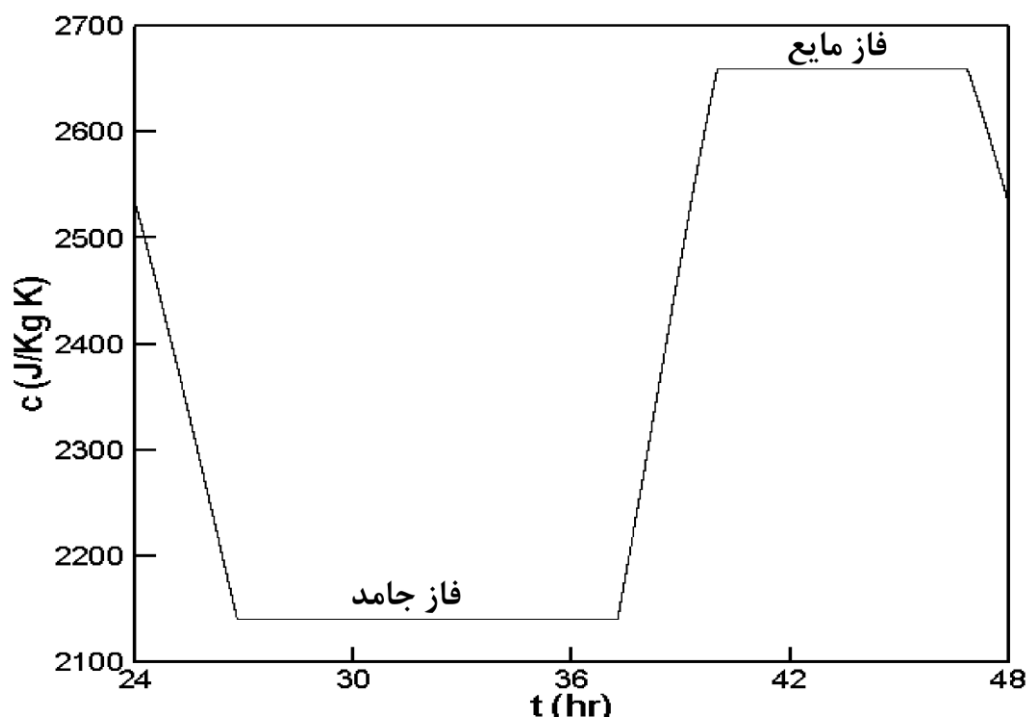
در این بررسی از مدل خواص متغیر برای تعیین خواص ترموفیزیکی مواد در فرآیند تغییر فاز استفاده شده است. شکل های (۵-۱۱) تا (۵-۱۳) تغییرات ضریب هدایت حرارتی، چگالی و گرمای ویژه ی ماده تغییر فاز دهنده را در طول فرآیند حل نشان میدهد. خواص ترموفیزیکی ماده بر اساس میزان ذوب شدگی آن و برای نقاط قرار گرفته در کنار لایه ی خارجی دیواره ترسیم شده اند. همانطور که مشاهده می شود خواص ماده در حین بررسی عددی، با توجه به فازی که ماده در آن قرار دارد تعیین می شوند. از آنجا که این نقاط با توجه به شرایط مرزی اعمالی به دیواره در فرآیند تغییر فاز قرار می گیرند، خواص ترموفیزیکی آن بین خواص در حالت جامد و مایع تغییر می کند.



شکل ۵-۱۱- تغییرات ضریب هدایت حرارتی ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان

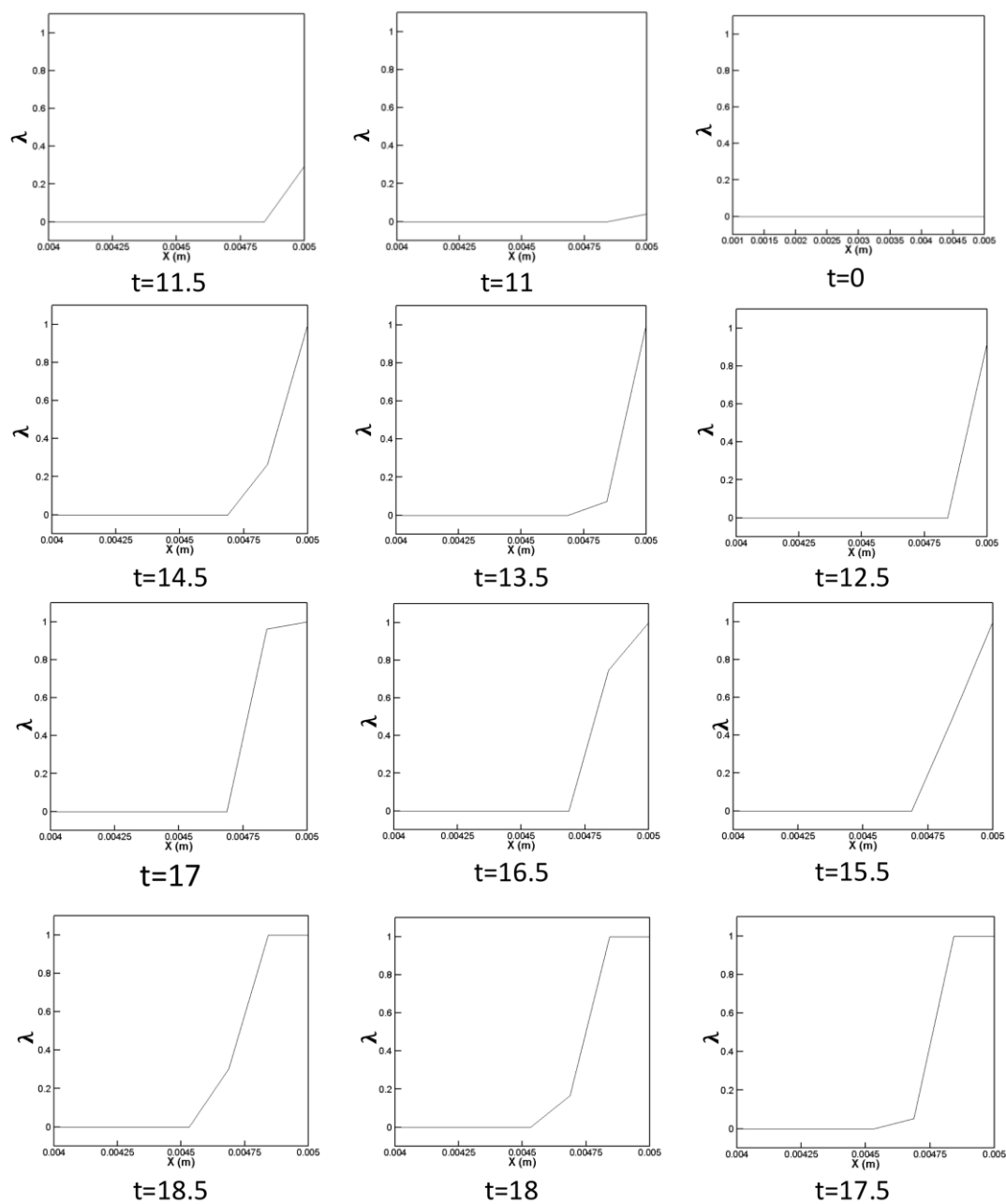


شکل ۵-۱۲- تغییرات چگالی ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان



شکل ۵-۱۳- تغییرات گرمای ویژه ماده تغییر فاز دهنده نسبت به زمان

نتایج حاضر در شکل (۵-۱۴)، نفوذ فرآیند تغییر فاز در لایه میانی و برای مراحل زمانی مختلف را نمایش می دهد. با توجه به شکل در زمان  $t = 0$  ماده تغییر فاز دهنده ابتدا در فاز جامد قرار دارد. با رسیدن دمای مرز بیرونی لایه میانی به دمای تغییر فاز، فرآیند تغییر فاز آغاز شده و در لایه میانی ادامه می یابد. پیشرفت ذوب شدگی در لایه میانی به شرایط مرزی اعمالی به دیواره بستگی دارد. بطوری که تعداد محدودی از نقاط ممکن است به طور کامل ذوب شوند. همانطور که از شکل مشخص است شرایط مرزی اعمالی به دیواره، ضخامت کوچکی از دیواره می مانند را در فرآیند تغییر فاز وارد کرده و بیشتر مواد تغییر فاز دهنده در فاز جامد باقی می مانند.



شکل ۱۴-۵ توزیع ذوبشدگی در لایه ی حاوی ماده تغییر فازدهنده در ساعات مختلف

## ۵ - ۵ - بررسی اثر تغییر دمای متوسط محیط بیرون بر عملکرد گرمایی دیواره کامپوزیت

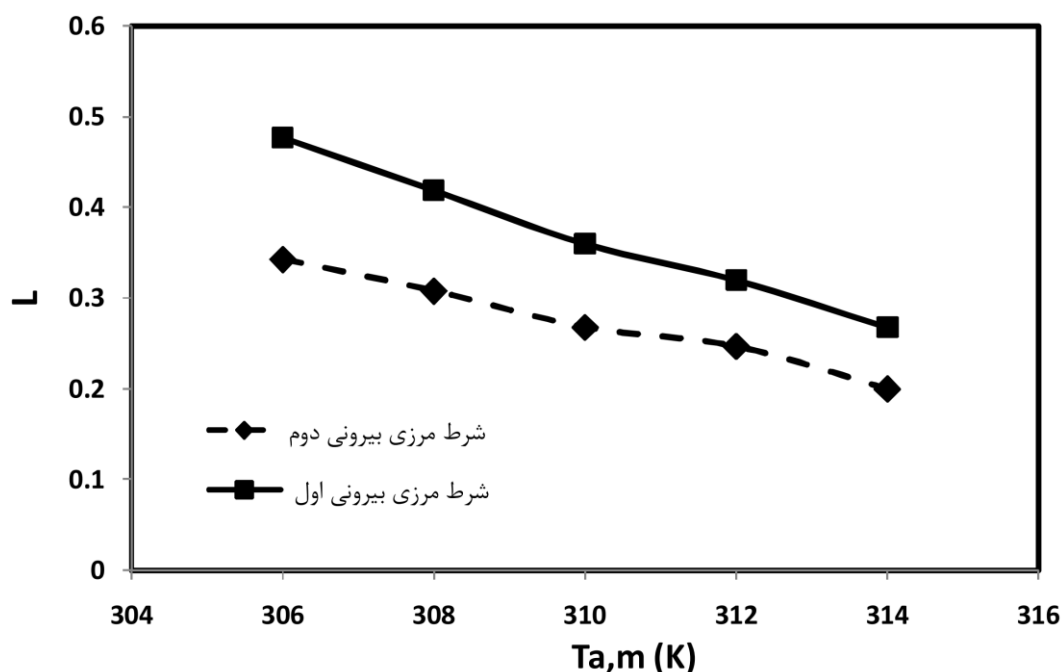
نتایجی که تاکنون ارائه شده است برای دمای محیط اطراف با دمای متوسط  $314\text{ K}$  میباشد. به منظور بررسی تاثیر تغییر دمای متوسط محیط بیرون بر طول بدون بعد لایه داخلی، میزان انرژی



خروجی از دیواره و مقدار ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده نیز مطالعاتی انجام گرفته است. همانطور که بیان شد با توجه به شرایط مرزی اعمالی، هدف داشتن سیکل های متوالی ذوب و انجماد برای ماده، به منظور استفاده حداکثری از این مواد است. به همین منظور طول بدون بعد لایه داخلی برای هر دمای متوسط بصورتی تعیین شده است تا این هدف تامین گردد.

### ۵-۵-۱- اثر تغییر دمای متوسط محیط بر طول بدون بعد لایه داخلی

نتایج حاضر تغییرات طول بدون بعد لایه داخلی بر حسب تغییرات دمای متوسط، برای هر یک از شرایط مرزی اعمالی، را نمایش میدهد. همانطور که از شکل (۵-۱۵) مشخص است، با کاهش دمای متوسط، طول بدون بعد لایه داخلی افزایش یافته و در واقع موقعیت قرارگیری ماده تغییر فاز دهنده به سمت بیرونی دیواره نزدیک تر می شود. این وضعیت برای هر دو شرط مرزی بیرونی صادق است. وجود رابطه معکوس بین دمای متوسط و طول بدون بعد لایه داخلی موید این موضوع می باشد که تاثیر گذاری استفاده از این مواد هنگامی است که موقعیت قرارگیری آن با توجه به شرایط مرزی اعمالی، امکان ایجاد فرآیندهای ذوب و انجماد را برای ماده ایجاد کند. می توان گفت تاثیر گذاری استفاده از این مواد همانطور که به میزان ذوب شدگی ماده بستگی دارد، به مقدار ماده ی تغییر فاز دهنده ای که در طول فرآیند منجمد می شود نیز وابسته است. لذا اگر با کاهش دمای متوسط محیط بیرون، موقعیت قرارگیری لایه حاوی ماده تغییر فاز دهنده ثابت بماند، ماده تغییر فاز دهنده با توجه به توزیع دما در دیواره، در فاز جامد باقی می ماند. همچنین اگر لایه بیش از حد به سمت بیرونی دیواره تمایل پیدا کند، در فاز مایع قرار می گیرد که در هر دو حالت استفاده از این مواد تاثیر چندانی بر عملکرد گرمایی دیواره نخواهد داشت.

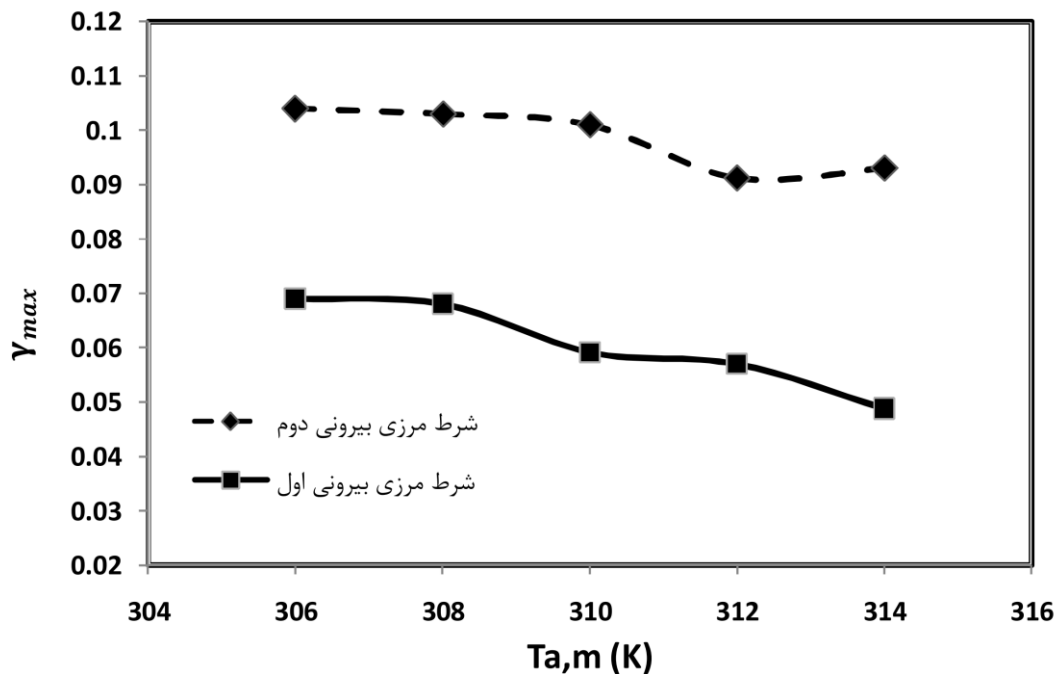


شکل ۵-۱۵- تغییرات طول بدون بعد لایه داخلی بر حسب دمای متوسط محیط بیرون

**۵-۵-۲- اثر تغییر دمای متوسط محیط بر میزان ذوب شدگی ماده تغییر فاز دهنده**

در این بخش تاثیر دمای متوسط محیط بر بیشترین میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات دمای متوسط به سمتی پیش می رود که با توجه به دامنه تغییرات دمای محیط، کمینه دمای محیط بیرون برابر با دمای مرز داخلی دیواره گردد. شکل (۵-۱۶) بیشترین میزان ذوب شدگی کلی ماده تغییر فاز دهنده را برای شرایط مرزی اعمالی به دیواره برای دمای متوسط مختلف نشان می دهد. با توجه به شکل، برای شرط مرزی بیرونی اول با کاهش دمای متوسط از ۳۱۴ به ۳۰۶ ذوب شدگی ماده حدود ۲۰٪ افزایش میابد. این وضعیت برای شرط مرزی بیرونی دوم نیز صادق بوده و موجب افزایش ۱۰٪ ذوب شدگی لایه میانی می شود. لازم به ذکر است این افزایش در میزان ذوب شدگی ماده با افزایش طول بدون بعد لایه داخلی همراه است. افزایش ذوب شدگی لایه میانی، به دلیل توزیع دما با شیب ملایم تر در لایه میانی پس از آغاز فرآیند تغییر فاز و ایجاد شرایط دمایی مناسب تر برای وارد شدن ضخامت بیشتری از ماده در تحول تغییر

فاز ایجاد می شود. البته با توجه به اینکه در مجموع میزان کمی از ماده تغییر فاز دهنده در فرآیند تغییر فاز وارد می شود، می توان ضخامت لایه حاوی ماده تغییر فاز دهنده را کاهش داد.



شکل ۵-۱۶ تغییرات بیشترین مقدار ذوب شدگی ماده بر حسب دمای متوسط محیط بیرون

## ۵ - ۶ - جمع بندی

همانطور که انتظار می رفت استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در دیوارها، نقش موثری در کاهش انرژی ورودی به ساختمان دارد. نتایج حاکی از آن است که عملکرد مناسب مواد تغییر فاز دهنده در دیواره، وابسته به استفاده از ماده تغییر فاز دهنده مناسب و موقعیت مکانی مناسب آن است. آنچه در مدل سازی عددی اهمیت دارد، نزدیکی روند حل به رفتار واقعی ماده است. استفاده از مدل خواص ترموفیزیکی متغیر در همین راستا پیشنهاد شده است.

مدل سازی خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده در حین تغییر فاز نشان داده است که تغییرات ضریب هدایت حرارتی بیشترین تاثیر را بر رفتار حرارتی دیواره دارد و تغییرات سایر خواص اثر چندانی بر انرژی خروجی از دیواره ندارند.

# فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۶- ۱- مقدمه

تحقیقات نشان داده است استفاده از مواد با قابلیت تغییر فاز در محدوده دمای آسایش انسان در ساختمانها، نقش بسزایی در کاهش انرژی ورودی به ساختمان دارد. این روش علاوه بر اینکه از بار حرارتی مورد نیاز تهویه ساختمان می‌کاهد، موجب کاهش ساین تجهیزات مکانیکی و توان مصرفی آنهاست. این امر در انتقال بار الکتریکی در ساعات اوج مصرف به دیگر ساعات، که از اهداف مدیریت انرژی در ساختمان‌ها است نقش ویژه‌ای دارد. در این فصل ابتدا به جمع‌بندی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی پرداخته و سپس برای ادامه کار پیشنهاداتی ارائه شده است.

## ۶- ۲- جمع‌بندی

در این تحقیق عملکرد گرمایی دیواره مرکب حاوی ماده تغییر فاز دهنده مورد مطالعه قرار گرفته است. دیواره مورد بررسی از سه لایه تشکیل شده است که لایه‌های کناری از جنس فایبر گلاس و لایه میانی حاوی ماده تغییر فاز دهنده اکتادکان می‌باشد. تاثیر استفاده از ماده تغییر فاز دهنده، خواص ترموفیزیکی آن، موقعیت قرارگیری لایه حاوی ماده و شرایط مرزی اعمالی بر دیواره در عملکرد گرمایی دیواره توسط نمودارهای توزیع دما و شار حرارتی ارائه شده است.

بر اساس نتایج عددی موارد زیر قابل ذکر است:

- چگونگی مدل‌سازی خواص ترموفیزیکی ماده تغییر فاز دهنده نقش مهمی در نتایج حل عددی بدست آمده ایفا می‌کند. به طوری که انرژی خروجی از دیواره مرکب برای حالت خواص متغیر در حدود ۹/۵٪ بیشتر از انرژی خروجی با در نظر گرفتن خواص ثابت برای ماده تغییر فاز دهنده می‌باشد.
- استفاده از ماده تغییر فاز دهنده در دیواره موجب کاهش ۸ تا ۱۱٪ شار حرارتی خروجی از دیواره در ساعات اوج مصرف با توجه به شرایط مرزی اعمالی می‌شود.

- سودمندی استفاده از این مواد در گرو داشتن سیکل های متوالی ذوب و انجماد برای ماده تغییر فاز دهنده می باشد.
- کاهش دمای متوسط محیط بیرون موجب افزایش طول بدون بعد لایه داخلی می گردد.
- وجود این رابطه معکوس نشان میدهد که موقعیت قرار گیری ماده تغییر فاز دهنده از پارامترهای مهم در استفاده بهینه از این مواد است.

### ۳ - ۶ - پیشنهادات

- با توجه به اثرات مهمی که تغییر فاز مواد بر عملکرد گرمایی محیط مورد استفاده دارد، موارد زیر جهت انجام مطالعات بعدی در این راستا پیشنهاد می گردد:
- انجام تحقیقات آزمایشگاهی به منظور بررسی اعتبار نتایج حل عددی
- بررسی هندسه حاضر به صورت دو بعدی
- بررسی اثر انتقال حرارت جابجایی در فرآیند تغییر فاز مواد
- بررسی اثر شرایط شار حرارتی واقعی بیرونی برای اقلیم های مختلف آب و هوایی

[48- Waqas, A. and S. Kumar, Utilization of latent heat storage unit for comfort ventilation of buildings in hot and dry climates. *International Journal Green Energy*, 2011. 8 (1): p. 1-24. 9- Dovrtel, K. and S. Medved, Weather-predicted control of building free cooling system. *Applied Energy* 2013. 88(9): p. 1-9. 10- Dovrtel, K. and S. Medved, Multi-objective optimization of a building free cooling system based on weather prediction. *Energy Buildings*, 2014. 52: p. 99-106. 11- Mosaffa, A.H., et al., Energy and exergy evaluation of a multiple-PCM thermal storage unit for free cooling applications. *Renewable Energy*, 2014. 68 p. 452e458. 12- Mosaffa, A.H., et al., Thermal performance of a multiple PCM thermal storage unit for free cooling. *Energy Conversion and Management*, 2015. 67: p. 1-7.

Turnpenny, J., D. Etheridge, and D. Reay, Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings. Part I: testing and theoretical modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2000. 20: p. 1019-1037. 2- Turnpenny, J., D. Etheridge, and D. Reay, Novel ventilation system for reducing air conditioning in buildings. Part II: testing of prototype. *Applied Thermal Engineering*, 2001. 21: p. 1203-1217. 3- Zalba, B., et al., Free-cooling of buildings with phase change materials *International Journal of Refrigeration*, 2004. 27: p. 839-849. 4- Mari'n, J.M., et al., Determination of enthalpy - temperature curves of phase change materials with the T-history method-improvement to temperature dependent properties. *Measurement Science and Technology*, 2003. 14(2): p. 184 - 189. 5- Takeda, S., et al., Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material. *Solar Energy*, 2004. 77(3): p. 329-338. 6- Arkar, C. and S.

Medved, Free cooling of a building using PCM heat storage integrated into the ventilation system. *Solar Energy*, 2007. 81(9): p. 1078-1087. 7- Arkar, C., B. Vidrih, and S. Medved, Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building. *International Journal of Refrigeration*, 2007. 30(4): p. 134-143.