



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

تحلیل و بررسی عملکرد حرارتی مواد تغییر فاز دهنده به عنوان عایق در

جداره‌های خارجی ساختمان‌های مسکونی

“Thermal performance analysis of phasing materials as insulation in the external walls of residential buildings”

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی معماری و انرژی گرایش معماری و انرژی

استاد راهنما:

دکتر حیدر مداح

استاد مشاور:

دکتر سید ایمان واصفی

دانشجو:

حمید نیکنام

تیر ۱۴۰۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

## باسمه تعالی

اینجانب حمید نیکنام به شماره دانشجویی ۹۷۱۳۵۸۸۰۰۱۲ دانشجوی رشته معماری و انرژی مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه/رساله حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده 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:

## چکیده

در این تحقیق به تحلیل عملکرد مواد تغییرفازدهنده در جدار خارجی ساختمان پرداخته شد. برای این منظور، یک معادله حاکم جدید برای بررسی عملکرد حرارتی مواد تغییرفازدهنده ارائه گردید. سپس، به کمک شبیه‌سازی عددی با رویکرد تفاضل محدود، رفتار حرارتی یک دیوار چند لایه حاوی ماده تغییرفازدهنده مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین، تأثیر استفاده از مواد تغییرفازدهنده بر کاهش شار گرمایی عبوری از سطح داخلی جدار در چهار اقلیم مختلف سرد، معتدل، کویری و گرم و مرطوب بررسی شد. در ادامه، آثار تغییر دمای ذوب ماده تغییر فازدهنده بر میزان کاهش بار حرارتی اتلافی از جدار در طول سال تحت شرایط اقلیمی مذکور بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری یک لایه ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب مناسب در دیوار خارجی، می‌تواند مصرف انرژی سالانه را بین ۶/۴٪ (در بندرعباس به عنوان نماینده اقلیم گرم و مرطوب) و ۸/۳٪ (در تبریز به عنوان نماینده اقلیم سرد) کاهش دهد. همچنین، نتایج حاکی از آن است که در اقلیم کویری به دلیل اختلاف زیاد دمای فصول گرم و سرد، استفاده از یک لایه ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب متناسب با ماه‌های گرم، منجر به عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی ضعیف برای جدار در ماه‌های سرد می‌شود و به طور مشابه، استفاده از ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب متناسب با ماه‌های سرد، موجب عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی ضعیف برای جدار در ماه‌های گرم خواهد شد. بنابراین در این تحقیق، ایده استفاده از دو لایه مجزا از ماده تغییرفازدهنده با دماهای ذوب متناسب با فصول گرم و سرد برای اقلیم کویری مطرح شد. بر این اساس، با اعمال این پیشنهاد می‌توان بار حرارتی سالانه را تا ۸/۸٪ کاهش داد. همچنین، در تحقیق حاضر، پیشنهاد اصلاح تعریف اینرسی حرارتی دیوار در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان مطرح شد و ضرایبی برای تصحیح میزان اینرسی حرارتی دیوارهای خارجی دارای مواد تغییرفازدهنده ارائه گردید.

**واژه‌های کلیدی:** مواد تغییرفازدهنده، جدار ساختمان، مصرف انرژی

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه .....	۲
۱- ۱ - سابقه تحقیق .....	۳
۱- ۲ - کاستی های تحقیقات پیشین .....	۵
۱- ۳ - عدم بررسی همه جانبه عملکرد مواد تغییرفازدهنده در اقلیم های ایران .....	۵
۱- ۴ - فرضیات: .....	۷
۱- ۵ - اهداف: .....	۷
۱- ۶ - روش پژوهش، مراحل انجام پایان نامه و جدول زمانبندی: .....	۷
۱- ۷. ضرورت و اهداف این تحقیق .....	۸
فصل دوم: مروری بر منابع .....	۹
۱-۲- مقدمه .....	۱۰
۲-۲. روش های کاهش اتلاف انرژی .....	۱۱
۲-۲-۱. انواع عایق .....	۱۱
۲-۲-۱-۱. عایق های سنتی .....	۱۲
۲-۲-۱-۲. عایق های نوین .....	۱۲
۲-۳. مواد تغییرفازدهنده .....	۱۳
۲-۳-۱. دسته بندی مواد تغییرفازدهنده .....	۱۴
۲-۳-۲. بررسی خواص مواد تغییرفازدهنده .....	۱۵
۲-۳-۳. محفظه های مواد تغییرفازدهنده .....	۱۶
۲-۴. کاربردهای مواد تغییرفازدهنده .....	۱۸
۲-۴-۱. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در حوزه پزشکی .....	۱۸
۲-۴-۳. کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در آبرگمکن خورشیدی .....	۱۹

۲۰	۴-۴-۲. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در سیستم گرمایش هوای خورشیدی.....
۲۰	۴-۴-۵. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در پوششهای خاص.....
۲۱	۴-۴-۶. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان.....
۲۱	۴-۴-۶-۱. نحوه ی عملکرد مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان.....
۲۲	۴-۴-۶-۲. معرفی کاربردهای مواد تغییرفازدهنده در ساختمان.....
۲۵	۲-۵. مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان.....
۲۸	۲-۶. کاستی های تحقیقات پیشین.....
۲۸	۴-۶-۱. عدم بررسی همه جانبه عملکرد مواد تغییرفازدهنده در اقلیم های ایران.....
۳۰	۴-۶-۲. نقص مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان در تعریف اینرسی حرارتی.....
۳۱	۴-۶-۲. عدم وجود جداول طراحی مهندسی برای انتخاب مواد تغییرفازدهنده.....
۳۲	فصل ۳: روش تحقیق و معادلات.....
۳۳	۳-۱. مقدمه.....
۳۳	۳-۲. شرح مسئله.....
۳۴	۳-۳. معادلات حاکم برای تحلیل رفتار مواد تغییرفازدهنده.....
۳۵	۳-۳-۱. استخراج یک معادله حاکم جدید برای مواد تغییرفازدهنده.....
۳۸	۳-۳-۱-۱. تابع توزیع گوس.....
۴۱	۳-۳-۱-۳. مزیت معادله حاکم جدید.....
۴۲	۳-۴. شرایط حاکم.....
۴۳	۳-۴-۱. جدار نمونه.....
۴۳	۳-۴-۲. تابع تغییرات دما.....
۴۴	۳-۴-۳. تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی.....
۴۷	۳-۵. حل تحلیلی.....

۴۸	۳-۵-۱. معرفی روش پراشیدگی هموتویی
۴۹	۳-۵-۲. حل معادله حاکم از روش پراشیدگی هموتویی
۵۴	۳-۶. حل عددی
۵۴	۳-۶-۱. گسسته سازی
۵۶	۳-۶-۲. اعتبارسنجی
۵۸	فصل ۴: یافته های پژوهش
۵۹	۴-۱. مقدمه
۵۹	۴-۲. تحلیل و بررسی خواص مواد تغییر فاز دهنده
۶۰	۴-۲-۱. گرمای نهان
۶۱	۴-۲-۲. بازه دمایی ناحیه خمیری
۶۲	۴-۲-۳. دمای ذوب
۶۲	۴-۳. کاهش بار حرارتی اتلافی از جدار خارجی در اقلیم های مختلف ایران
۶۳	۴-۳-۱. شار گرمایی سطح داخلی جدار
۶۸	۴-۳-۲. بار حرارتی اتلافی از جدار
۶۹	۴-۳-۲-۱. بار سرمایشی اتلافی از جدار
۷۰	۴-۳-۲-۲. بار گرمایشی اتلافی از جدار
۷۱	۴-۳-۲-۳. بار حرارتی اتلافی سالانه از جدار
۷۳	۴-۳-۲-۴. اثر عایق تغییر فاز دهنده دولایه
۷۶	فصل ۵: نتیجه گیری
۷۷	۵-۱. جمع بندی و نتیجه گیری
۷۸	۵-۲. پیشنهاد تحقیقات آینده



۸۰ ..... منابع و مأخذ

۸۹ ..... پیوست

۱۰۳ ..... ABSTRACT

## فهرست اشکال

- شکل ( ۲ - ۱ ) نمودار تأخیر زمانی  $\phi$  و ضریب  $f_d = \frac{A_1}{A_2}$  ..... ۱۴
- شکل ( ۲ - ۲ ) نمونه ای از محفظه های مستطیلی [۷] ..... ۱۷
- شکل ( ۲ - ۳ ) انواع محفظه نگهدارنده مواد تغییر فاز دهنده [۸] ..... ۱۷
- شکل ( ۲ - ۴ ) طرحواره ای از یک مبدل حرارتی ..... ۱۹
- شکل ( ۲ - ۵ ) آجر حاوی مواد تغییر فاز دهنده [۱۴] ..... ۲۳
- شکل ( ۲ - ۶ ) طرح کلی سیستم سرمایش شبانه به کمک مواد تشرافاز دهنده [۴] ..... ۲۴
- شکل ( ۲ - ۷ ) پنجره حاوی مواد تغییر فاز دهنده [۱۶] ..... ۲۵
- شکل ( ۲ - ۸ ) کرکره حاوی مواد تغییر فاز دهنده [۱۷] ..... ۲۵
- شکل ( ۳ - ۱ ) طرحواره ای از مسئله با مرز متحرک ..... ۳۴
- شکل ( ۳ - ۲ ) تغییرات ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده با دما [۴۳] ..... ۳۸
- شکل ( ۳ - ۳ ) تابع توزیع نرمال گوس ..... ۴۰
- شکل ( ۳ - ۴ ) طرحواره ای از ظرفیت گرمایی اصلاح شده ..... ۴۰
- شکل ( ۳ - ۵ ) طرحواره مسئله هدایت یک بعدی ..... ۴۲
- شکل ( ۳ - ۶ ) الف: نبع تغییرات دمای هوای بیرون در تحقیق ژو و همکاران [۶۳] ..... ۵۷
- شکل ( ۴ - ۱ ) اثر گرمای نهان در تغییرات شار گرمایی سطح داخلی جدار ..... ۶۰
- (شکل ( ۴ - ۲ ) الف. اثر بازه دمایی ناحیه خمیری ب. اثر دمای ذوب در تغییرات شار گرمایی سطح داخلی جدار ..... ۶۱

- شکل ( ۴ - ۳ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم تهران..... ۶۴
- شکل ( ۴ - ۴ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم یزد..... ۶۵
- شکل ( ۴ - ۵ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم تبریز..... ۶۶
- شکل ( ۴ - ۶ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم بندر عباس..... ۶۷
- شکل ( ۴ - ۷ ) اثر دمای ذوب در کاهش بار سرمایشی اتلافی..... ۷۰
- شکل ( ۴ - ۸ ) اثر دمای ذوب در کاهش بار گرمایشی اتلافی..... ۷۱
- شکل ( ۴ - ۹ ) اثر دمای ذوب در کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه..... ۷۲
- شکل ( ۴ - ۱۰ ) اثر عایق تغییر فاز دهنده دولابه در کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه..... ۷۴

## فهرست جداول

- جدول ( ۱- ۱ ) گروه اینرسی حرارتی ساختمان بر حسب جرم سطحی مفید ساختمان [۳۴]..... ۳۱
- جدول ( ۱- ۳ ) معادلات حاکم بر مواد تغییرفازدهنده [۶]..... ۳۶
- جدول ۲-۳. جنس و ضخامت مواد به کار رفته در جدار نمونه..... ۴۳
- جدول ۳-۳. خواص ترموفیزیکی مواد به کار رفته در جدار نمونه..... ۴۳
- جدول ۴-۳. ضریب صافی ماهیانه [۴۸]..... ۴۵
- جدول ۵-۳. ضریب بازتاب پوششهای به کار رفته در محوطه ساختمان [۴۶]..... ۴۷
- جدول ۶-۳. پارامتر تعیین کننده جهت سطح [۴۹]..... ۴۷
- جدول ۷-۳. ضخامت و خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده در تحقیق ژو و همکاران [۶۳]..... ۵۶
- جدول ۱-۴. ارتباط بازه دمایی ناحیه خمیری با پارامتر  $\beta$  ..... ۶۱
- جدول ۲-۴، جنس و ضخامت مواد به کار رفته در جدار با عایق دولایه..... ۷۴
- جدول ( پ ۱- ) تابع تغییرات دمای هوای تهران ..... ۹۰
- جدول ( پ ۲- ) تابع تغییرات دمای هوای یزد..... ۹۱
- جدول ( پ ۳- ) تابع تغییرات دمای هوای تبریز..... ۹۲
- جدول ( پ ۴- ) تابع تغییرات دمای هوای بندر عباس..... ۹۳
- جدول ( پ ۵- ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم تهران..... ۹۴
- جدول ( پ ۶- ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم یزد..... ۹۷
- جدول ( پ ۷- ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم تبریز..... ۹۹

جدول ( پ ۸ ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم بندر عباس ..... ۱۰۱

# فصل اول:

## مقدمه

## ۱-۱ - سابقه تحقیق

در سال ۱۹۳۱ پایپو "تقریبی ساده از دمای بهینه ذوب و ضخامت لایه ماده تغییرافازدهنده به کار رفته در جدار ساختمان ارائه کرد. ولی خطای این رابطه به قدری زیاد بود که عملاً برای کاربردهای ساختمانی قابل استفاده نبود. اما به هر حال، وی رابطه‌ای تحلیلی ارائه کرد تا سرشاخه‌ای برای تحقیقات در این زمینه گشوده باشد. در سال ۱۹۸۰ بورديو در آزمایش‌های خود به مقایسه ضخامت دیوار معمولی و دیوار حاوی ماده تغییرافازدهنده هگزاکلرید کلسیم پرداخت و عملکرد انتقال حرارتی آن را مورد بررسی قرار داد.

در آزمایش وی، دیوار هگزاکلرید کلسیم با ضخامت  $1/8$  سانتی متر، عملکردی بهتر از یک دیوار معمولی با ضخامت ۴۰ سانتی متری داشت. شایان ذکر است که این آزمایش اگرچه به خوبی، میزان اثربخشی استفاده از مواد تغییرافازدهنده را نشان می‌دهد، ولی کاربرد چنین دیواری در ساختمان با ضخامت‌های مذکور غیر عملی به نظر می‌رسد. استوال و تاملینسون در سال ۱۹۸۹ آزمایش‌هایی درباره جابه‌جا کردن بار سرمایش و گرمایش از زمان اوج به زمان غیراوج انجام دادند. اما به یک نتیجه کلی در ارتباط با خصوصیات یک ماده تغییرافازدهنده مناسب و ایدئال نرسیدند. استوال بار دیگر به کمک کدل تحقیقی در ارتباط با دیوارپوش‌های تلفیق شده با اوکتادکان خمیری برای کاربردهای خورشیدی غیرفعال داشتند که پیشرفت مطلوبی در زمینه ذخیره انرژی گرمایی داشت.

آنها نشان دادند که در فرآیند غوطه‌وری دیوارپوش‌ها با اوکتادکان خمیری، ظرفیت ذخیره انرژی دیوارپوش‌ها، نسبت به حالتی که اوکتادکان خمیری را با میکروکپسولی کردن به دیوارپوش اضافه کنند، بیشتر می‌شود. به فرآیندی که در آن، ماده تغییرافازدهنده مایع در منافذ دیوارپوش نفوذ می‌کند و در نتیجه لایه‌ای پلاستری برای دیوارپوش ایجاد می‌کند، غوطه‌وری گویند. سانکاتر و اسان در سال ۱۹۹۶ اثر مواد تغییرافازدهنده به کار رفته در دیوارهای مشبک را بر میزان جابه‌جا کردن ساعت اوج مصرف بررسی کردند. آنها نشان دادند که تغییر دادن گرمای نهان ماده تغییرافازدهنده استفاده شده در جدار، تأثیر چندانی در جابه‌جا کردن ساعت اوج مصرف

ندارد. آتینیتیس و همکارانش در سال ۱۹۹۷ آزمایش‌های بسیار گسترده‌ای همراه با شبیه‌سازی عددی بر روی یک اتاق نمونه، که از بیرون با دیوارپوش گچی حاوی مواد تغییرفازدهنده پوشیده شده بود، انجام دادند.

در تحقیق ایشان از مدل صریح تفاضل محدود برای شبیه‌سازی انتقال حرارت در دیوارها استفاده شد. نتایج نشان داد که دیوارپوش گچی حاوی مواد تغییرفازدهنده می‌تواند تا ۴ درجهٔ سلسیوس بیشینهٔ دمایی داخل را کاهش دهد و به دنبال آن سطح مصرف انرژی را پایین آورد. کیسوک و همکارانش در سال ۱۹۹۸ نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی را روی دیوارپوش حاوی ۳۰٪ پارافین، بیان کردند. در این تحقیق، تابش خورشیدی، دمای محیط و دمای داخل برای حجم مورد آزمایش در طول ۱۴ روز تعیین شد. نتایج نشان داد که مواد تغییرفازدهنده می‌تواند بیشینهٔ دمایی را تا بیش از ۱۰ درجهٔ سلسیوس در یک روز آفتابی کاهش دهد. آتینیتیس و همکارانش در سال ۲۰۰۰ بهینه‌سازی عددی مواد تغییرفازدهنده به کار رفته در سطح داخلی سقف جهت ذخیرهٔ انرژی را مورد بررسی قرار دادند. فرانهافر در سال ۲۰۰۲ به بررسی رفتار گرمایی دیوارهایی که مواد تغییرفازدهنده در آنها جاسازی شده بود پرداخت. او برای این کار از یک مدل آزمایشگاهی استفاده کرد. وی در این تحقیق به بررسی چهار دیوار نمونه، که با مقادیر متفاوتی از مواد تغییرفازدهنده پر شده بودند، پرداخت.

هر یک از دیوارها در کوره حرارت داده و سپس سرد شدند. فرانهافر با مقایسه نمودار زمانی تغییرات دمای دیوارها، میزان اثربخشی مواد تغییرفازدهنده در افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی دیوار را نشان داد. کوزنی در سال ۲۰۰۷ در یک تحقیق آزمایشگاهی به بهینه‌سازی دیوارپوش‌های مواد تغییرفازدهنده برای کاربردهای ساختمانی پرداخت. کالاسلیوام و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی نانوذرات جاسازی‌شده در مواد تغییرفازدهنده به کار رفته در ساختمان برای کاربردهای سرمایشی پرداختند. موراتوره و همکارانش در ادامه تحقیقاتشان در سال ۲۰۱۲، میکروکپسول‌های حاوی مواد تغییرفازدهنده برای کنترل گرمایی سطوح را بررسی کردند.



## ۱-۲ - کاستی‌های تحقیقات پیشین

همان طور که گفته شد، تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان صورت گرفته است. اما با وجود این، تحقیقات پیشین کاستی‌ها و نقایصی دارند که می‌تواند مبنای تحقیقات آتی به حساب آید. در ادامه به تشریح بخشی از این کاستی‌ها می‌پردازیم.

## ۱-۳ - عدم بررسی همه‌جانبه عملکرد مواد تغییرفازدهنده در اقلیم‌های

### ایران

همان طور که در بخش‌های ابتدایی این فصل ذکر شد، سال‌هاست که تحقیقات زیادی روی مواد تغییرفازدهنده در ساختمان صورت می‌گیرد. در ایران نیز تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است که در سال‌های اخیر با پیشرفت خوبی همراه بوده است. یکی از مهمترین پارامترهایی که در بررسی مواد تغییرفازدهنده در ساختمان نیاز است، اطلاعات آب و هوایی اقلیم مورد بررسی است. در ایران نیز، محققان کم و بیش شرایط آب و هوایی اقلیم را مورد توجه قرار داده‌اند. اما کمتر به مقایسه شرایط آب و هوایی و بررسی تأثیرات آن بر رفتار حرارتی مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده است. در سال ۱۳۸۸، حق‌شناس کاشانی به بررسی کارایی حرارتی آجرهای مجهز به مواد تغییرفازدهنده پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده میزان شار حرارتی ورودی به ساختمان را تا ۳۸ درصد کاهش می‌دهد. همچنین افزایش تعداد حفره‌های مواد تغییرفازدهنده در آجر، موجب کاهش ۱۱ درصدی شار حرارتی و بار سرمایشی می‌شود. وی علاوه بر اینکه هیچ گونه اعتبارسنجی از روش حل خود ارائه نکرد، در مقایسه میزان شار عبوری از دیوارهای حاوی مقادیر متفاوتی از مواد تغییرفازدهنده، اثر یکسان بودن مقاومت حرارتی را نیز در نظر نگرفت؛ یعنی در تحقیق ایشان، شار حرارتی عبوری از دیوارهایی با مقاومت حرارتی متفاوت، با یکدیگر مقایسه شدند. این امر موجب می‌شود تا نتوان تفسیر فیزیکی معناداری از نتایج ایشان به دست آورد. اشراقی در سال ۱۳۹۱، با

محاسبه بار گرمایشی سرمایشی یک واحد مسکونی نمونه واقع در اقلیم تهران، مزایای استفاده از این مواد در تأمین بخشی از نیازهای انرژی آن واحد مسکونی را مورد بررسی قرار داد.

نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از این مواد، متناسب با میزان به کارگیری، نیاز به انرژی‌های تجدیدناپذیر را از ۱۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد. متأسفانه این تحقیق نیز اعتبارسنجی نشده است. در همین سال معروفی و آقاجفی، بررسی انتقال حرارت در مواد تغییرفازدهنده و کاربرد آن در تجهیزات سرمایش گرمایش و تهویه مطبوع را به روش شبکه ای بولتزمن انجام دادند. در تحقیق آنها به بررسی انتقال حرارت در مواد تغییرفازدهنده و بهره گیری از آن به عنوان ذخیره کننده های انرژی منابع تجدید پذیر در فرآیندهای گرمایشی سرمایشی پرداخته شد.

در ادامه تحقیقات سال ۱۳۹۱، جاهدی به بررسی تجربی تأثیر افزایش درجه حرارت فرآیند شارژ در یک سیستم ذخیره کننده انرژی حرارتی حاوی یک ماده آلی غیر پارافینی به عنوان ماده تغییرفازدهنده پرداخت. نتایج نشان داد که به کمک این سیستم تا ۷ درصد افزایش در ذخیره انرژی حرارتی امکان پذیر می‌شود. ذوالفقاری و همکارانش نیز، در این سال، به مقایسه عایق‌های تغییرفازدهنده و معمولی پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از عایق‌های تغییرفازدهنده، کاهش ۳ درصدی مصرف سالانه انرژی را در یک فضای نمونه در اقلیم تهران در پی دارد. در سال ۱۳۹۲ صلحی و همکارانش به بررسی اثر به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در پوسته خارجی ساختمان بر ایجاد شرایط آسایش حرارتی ساکنان، بدون نیاز به سیستم گرمایش / سرمایش پرداختند. نتایج حاکی از افزایش ۲ درصدی ساعات آسایش افراد در اقلیم تهران بود. تحقیقات دیگری هم در ایران در زمینه مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان صورت گرفته است.

اما در اکثر آنها به معرفی مواد تغییرفازدهنده و خواص آنها پرداخته شده است. از آنجا که در تحقیقات صورت گرفته در ایران کمتر به مقایسه شرایط آب و هوایی برای استفاده از مواد تغییرفازدهنده به عنوان سیستم ذخیره ساز انرژی پرداخته شده است، شناخت اقلیم‌های مناسب ایران برای به کار بردن مواد تغییرفازدهنده در ساختمان الزامی به نظر می‌رسد.

## ۱-۴ - فرضیات:

۱. آرایش هندسی مواد تغییرفازدهنده باعث کاهش مصرف انرژی می‌گردد.
۲. انتخاب ماده تغییرفازدهنده مناسب باعث تأثیرگذاری بسیار زیاد در اینرسی حرارتی می‌گردد.

## ۱-۵ - اهداف:

- (۱) هدف علمی: کاهش تبادل حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان در ایران
- (۲) هدف کاربردی: کاهش مصرف انرژی، صرفه‌جویی اقتصادی
- (۳) ضرورت خاص تحقیق: کاهش مصرف انرژی اولین هدف کلان هر کشوری است؛ صرفه اقتصادی و سرعت زیاد در اجرا نیز برای هر کارفرمایی در اولویت قرار دارد. این موارد ضرورت این تحقیق را که به دنبال این موارد هستیم نشان می‌دهد.
- (۴) اصلاح مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان در تعریف اینرسی حرارتی

## ۱-۶ - روش پژوهش، مراحل اجرای پایان‌نامه و جدول زمان‌بندی:

روش اجرای این پژوهش بررسی مواد تغییر فازدهنده در مناطق مختلف ایران است که برای انجام دادن تحقیق پس از مرور بر تحقیقات پیشین نمونه‌های مورد مطالعه انتخاب خواهد شد. پس از انتخاب متریکال و نمونه‌ها و محاسبه ضریب‌های انتقال حرارت و نتایج، تجزیه و تحلیل اطلاعات آغاز خواهد شد.

## ۷-۱. ضرورت و اهداف این تحقیق

همان طور که گفته شد، در ایران و در زمینه استفاده از مواد تغییر فازدهنده در ساختمان، تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. با این حال، فقدان بررسی همه جانبه عملکرد مواد تغییر فازدهنده در اقلیم های مختلف ایران یکی از کاستی های تحقیقات گذشته است که انگیزه ای برای انجام دادن این تحقیق شده است. در ادامه، نقص مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان در تعریف اینرسی حرارتی مشاهده می شود. همین امر باعث شده است که اجرای تحقیقات مرتبط در این زمینه ضروری به نظر برسد. برای این منظور، مدل سازی مواد تغییر فازدهنده و بررسی عملکرد حرارتی آنها در جدار ساختمان از جمله اهداف این تحقیق است. بررسی اثر آرایش هندسی مواد تغییر فازدهنده به کار رفته در جدار بر کاهش مصرف انرژی، اثر شرایط اقلیمی بر عملکرد مواد تغییر فازدهنده به کار رفته در جدار، اثر دمای ذوب بر انتخاب ماده تغییر فازدهنده مناسب و اصلاح مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان در تعریف اینرسی حرارتی از اهداف این تحقیق به شمار می آیند.

## فصل دوم:

### مروری بر منابع

## ۲-۱- مقدمه

منابع انرژی کاربردهای فراوانی در حوزه های مختلف از جمله حمل و نقل، صنعت، کشاورزی، ساختمان و... دارد. در سال های اخیر، با افزایش روزافزون نیاز به انرژی و نیز محدودیت منابع سوخت های فسیلی و آلاینده های آنها، توجه به منابع انرژی تجدیدپذیر روز به روز بیشتر شده است. یکی از مهمترین کاربردهای منابع انرژی حوزه ساختمان است. بنابراین، در سال های اخیر با شروع بحران نفت، به یک باره نگاه چشمگیری به ایجاد تحول در تأمین انرژی ساختمان صورت گرفت. در این سال ها بحث استفاده از انرژی های نو به جای سوخت های فسیلی مطرح شد و طبیعتاً یکی از شاخه های این بحث به کاربرد انرژی های نو در ساختمان اختصاص یافت [۱]. باد، آب جاری، موج، انرژی هسته ای، خورشید و... از جمله منابع انرژی های نو یا به عبارتی منابع انرژی های تجدیدپذیر هستند. در شرایطی که قابلیت ذخیره سازی انرژی خورشیدی وجود داشته باشد، این منبع انرژی بسیار مورد توجه قرار می گیرد. پس یکی از شاخه های پژوهشی در حوزه انرژی در ساختمان ذخیره سازی انرژی خورشیدی جهت کاربردهای ساختمانی از جمله گرمایش و سرمایش است. با نگاهی اجمالی بر سیر تحولی ساخت و سازهای ساختمان، مشاهده می شود که از گذشته نگاهی ویژه درباره ذخیره سازی انرژی در ساختمان وجود داشته است. چیزی حدود نیم قرن پیش، ساختمان ها به گونه ای ساخته می شدند که دارای جدارهای خارجی از جنس خشت بودند و ضخامت آنها حدود یک متر و بعضاً بیش از این بود. این گونه ساخت و ساز باعث می شد هوای داخل ساختمان در روزهای گرم تابستان خنک بماند و در روزهای سرد زمستان، گرمای داخل ساختمان حفظ شود. با گذشت زمان، به مرور از ضخامت دیوارها کاسته شد و از آجرهای سبک در دیوار استفاده گردید. به همین دلیل، قابلیت ذخیره سازی انرژی در دیوارها به میزان قابل توجهی کاهش یافت. این امر باعث افزایش اتلاف حرارتی از جدارهای خارجی ساختمان گردید. با ادامه پژوهشها در حوزه ذخیره سازی انرژی، محققان به فکر افتادند که از موادی در جدار ساختمان استفاده کنند تا در عین حال که حجم کمی از جدار را اشغال می کند، بتواند مقدار قابل توجهی انرژی حرارتی را ذخیره نماید تا از این طریق، میزان مصرف انرژی را در ساعت اوج مصرف به حداقل برسانند. [۲]

## ۲-۲. روش‌های کاهش اتلاف انرژی

یکی از مهمترین راه‌های کاهش اتلاف انرژی، عایق‌کاری جدارهای خارجی ساختمان است. در مدت قابل توجهی از سال، فضای داخل و خارج ساختمان دارای اختلاف دمایی هستند که نیاز است با گرم کردن یا خنک کردن هوای داخل ساختمان، شرایط آسایش حرارتی<sup>۱</sup> ساکنان تأمین گردد. این در حالی است که متأسفانه در بسیاری از مناطق ایران، کنترل دمای داخل در شرایط آسایش حرارتی، با صرف انرژی زیادی صورت می‌گیرد. دلیل آن هم به طور عمده، عدم رعایت نکاتی است که در ساخت‌وساز باید صورت بگیرد تا اتلافات حرارتی ساختمان به حداقل مقدار ممکن برسد. از آنجا که بخش عظیمی از این اتلافات حرارتی از طریق جدارهای خارجی صورت می‌گیرد، ارائه راهکارهایی برای کاهش اتلاف حرارتی جدارها، نقش بسزایی در کاهش اتلافات حرارتی در ساختمان دارد. با توجه به این نکته که مقاومت حرارتی کل هر جدار، برابر با حاصل جمع مقاومت لایه‌های تشکیل‌دهنده آن است، برای اینکه مقاومت حرارتی دیوار به مقداری که در اغلب موارد با ضوابط مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان مشخص می‌شود برسد، دو راهکار وجود دارد. راهکار اول، افزایش ضخامت جدار تا رسیدن به مقاومت حرارتی استاندارد است و راهکار دیگر، اضافه کردن یک لایه عایق به لایه‌های جدار است.

## ۲-۲-۱. انواع عایق

برای انتخاب عایق مناسب باید به مواردی توجه داشت. واضح است که عایق حرارتی بایستی به منظور کاهش تبادل حرارت، رسانش گرمایی کمی داشته باشد. ضمن این که در مقابل آب و بخار آب نفوذپذیری کمی داشته باشد و همچنین مقاومت نیرویی زیادی داشته باشد. عمر طولانی، اشتعال‌ناپذیری و ویژگیهای هندسی مناسب با جدار از دیگر ملاکهای انتخاب عایق‌های حرارتی است. در یک دسته‌بندی می‌توان عایق‌های حرارتی را به دو دسته سنتی و نوین تقسیم کرد. در ادامه به معرفی هر دسته پرداخته شده است.

---

<sup>۱</sup> Thermal Comfort

## ۲-۱-۲-۱. عایق‌های سنتی

عایق‌های سنتی به سه دسته ی عایق‌هایی با منشأ حیوانی و گیاهی، الیاف پشم معدنی و فومهای پلیمری تقسیم می‌شوند. ترکیب کاه و گل به کار رفته در جدار ساختمان های قدیمی نمونه‌ای از عایق‌های با منشأ گیاهی است. از انواع عایق‌های الیاف پشم معدنی می‌توان به آزبست<sup>۲</sup> یا پنبه کوهی، پشم شیشه<sup>۳</sup>، پشم سرباره، پشم سنگ<sup>۴</sup>، سیلیکات کلسیوم و سیلیکات آلومینیوم اشاره کرد و در دسته فومهای پلیمری می‌توان انواع فوم های پلی استایرن، پلی یورتان، پلی اتیلن و پلی وینیل کلراید را نام برد [۳].

## ۲-۱-۲-۲. عایق‌های نوین

از مهمترین انواع عایق‌های نوین می‌توان به عایق‌های پلیمری الاستومریک، عایق شیشه<sup>۵</sup>، نانو عایق‌ها<sup>۶</sup> و عایق‌های تغییر فاز دهنده<sup>۷</sup> اشاره کرد. یکی از مهمترین انواع عایق‌های نوین عایق‌هایی هستند که از مواد تغییر فاز دهنده ساخته میشوند. مواد تغییر فاز دهنده یکی از ابزارهای کارآمد در ذخیره انرژی حرارتی هستند. عملکرد آنها به این صورت است که با افزایش دما، تغییر فاز داده و انرژی حرارتی را به صورت گرمای نهان در خود ذخیره می‌کنند و با کاهش دما این انرژی را آزاد می‌سازند.

---

<sup>۲</sup> Asbestos

<sup>۳</sup> Glass wool

<sup>۴</sup> Windows Film

<sup>۵</sup> Rock wool

<sup>۶</sup> Nansulate

<sup>۷</sup> Phase Change Material (PCM)



## ۲-۳. مواد تغییر فاز دهنده

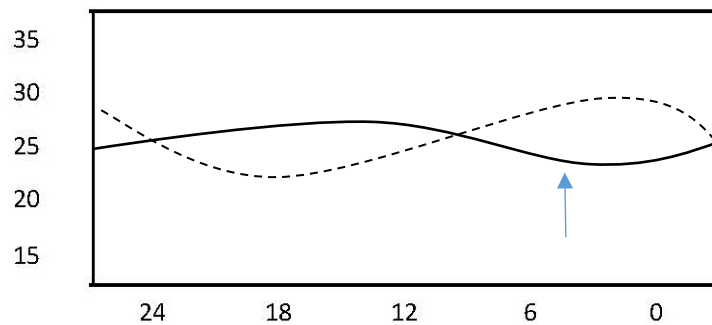
انرژی گرمایی را می‌توان به صورت گرمای محسوس، گرمای نهان و یا انرژی شیمیایی ذخیره کرد. ذخیره انرژی شیمیایی به صورت عملی، هنوز کاربردی ندارد و امکان‌سنجی استفاده از آن، از لحاظ فنی و اقتصادی در حال بررسی است. اما انرژی ذخیره شده از طریق گرمای نهان، که با تغییر فاز ماده همراه است، به دلیل چگالی بالای ذخیره انرژی گرمایی از اهمیت زیادی برخوردار است. مواد تغییر فاز دهنده یکی از ابزارهای ذخیره انرژی گرمایی به صورت گرمای نهان هستند.

مواد تغییر فاز دهنده می‌توانند به عنوان عایق حرارتی در جدار ساختمان مورد استفاده قرار گیرند. مواد تغییر فاز دهنده این قابلیت را دارند که انرژی حاصل از تغییر فاز را در خود ذخیره سازند. بنابراین می‌توان از آنها به عنوان ابزاری مناسب جهت جابه‌جا کردن<sup>۸</sup> زمان اوج مصرف استفاده کرد. از مزیت بارز این نوع عایق‌ها کاهش نوسانات دمای هوای داخل و باقی ماندن آن برای مدت زمان طولانی‌تر نزدیک به دمای مطلوب است. در شکل (۱-۲) طرح‌واره‌ای از نحوه تأثیر به‌کارگیری مواد تغییر فاز دهنده در جدار خارجی بر دمای داخل ساختمان نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه تغییرات هوای بیرون پس از عبور از جدار با ضریب کاهش fa کاهش یافته و همچنین دمای اوج نیز به مقدار زمانی و جابه‌جا می‌شود که این امر باعث می‌شود در زمان اوج مصرف نیاز به استفاده از سیستم سرمایشی گرمایشی کمتر شود [۴].

شایان ذکر است که اگرچه همه مواد قابلیت تغییر فاز دارند، اما ماده‌ای به عنوان ماده تغییر فاز دهنده شناخته می‌شود که بتواند در بازه عملکرد سیستم، تغییر فاز داده و ذخیره‌سازی انرژی را به صورت محسوس و نهان انجام دهد. مثلاً در تغییر فاز جامد به مایع، ماده تغییر فاز دهنده با افزایش دما ذوب می‌شود و انرژی حرارتی

---

<sup>۸</sup> Shifting



شکل ( ۲- ۱ ) نمودار تأخیر زمانی  $\phi$  و ضریب  $f_d = \frac{A_1}{A_2}$

را در خود ذخیره می‌کند و با کاهش دما منجمد شده و این انرژی را آزاد می‌سازد. مدت زمانی که طول می‌کشد تا ماده تغییر فاز دهد، بستگی به خواص آن دارد و می‌تواند سریع یا با تأخیر زمانی صورت گیرد. در کاربردهای ساختمانی از مواد تغییر فاز دهنده‌ای استفاده می‌شود که فرآیند تغییر فاز در آنها با تأخیر زمانی انجام شود. این تأخیر زمانی در حین تغییر فاز می‌تواند باعث جابه‌جا کردن زمان اوج مصرف به زمان غیر اوج مصرف شود.

### ۲-۳-۱. دسته‌بندی مواد تغییر فاز دهنده

مواد تغییر فاز دهنده را به شکل‌های مختلفی دسته‌بندی می‌کنند. در یک دسته‌بندی، مواد تغییر فاز دهنده بر اساس نوع تغییر فاز به انواع جامد - مایع، جامد - گاز و مایع گاز تقسیم می‌شوند. گاهی مواد تغییر فاز دهنده جامد - جامد هم به این دسته‌بندی اضافه می‌شود که در حقیقت بیانگر تغییر حالت ماده تغییر فاز دهنده از حالت خمیری به حالت شکل یافته و برعکس است.

در یک دسته‌بندی دیگر، مواد تغییر فاز دهنده را از نظر ترکیب شیمیایی به انواع آلی، غیر آلی و کامپوزیت تقسیم می‌کنند. در نوع کامپوزیت از مواد آلی و غیر آلی استفاده می‌شود و با ترکیب آنها ماده‌ای جدید می‌سازند که بهبود بخش خواص هر یک از انواع آلی و غیر آلی خواهد بود. مواد تغییر فاز دهنده آلی به دو دسته پارافین‌ها و غیر پارافین‌ها تقسیم می‌شوند. دسته غیر پارافین‌ها معمولاً با عنوان اسیدهای چرب شناخته می‌شوند. مواد تغییر فاز دهنده غیر آلی نیز در دو دسته نمک‌های آبدار و فلزات جای می‌گیرند.

گاهی دسته‌بندی های دیگری نیز از مواد تغییرفازدهنده ارائه می‌گردد. نمونه‌ای از این دسته‌بندی‌ها تفکیک مواد تغییرفازدهنده بر اساس میزان ذخیره انرژی و یا دامنه دمایی ذوب آنها است [۱].

## ۲-۳-۲. بررسی خواص مواد تغییرفازدهنده

یکی از ویژگی هایی که تقریباً همه ی مواد تغییرفازدهنده دارند، در دسترس بودن آنها است. این در حالی است که اکثر مواد تغییرفازدهنده دارای دو مشکل تغییر حجم زیاد در حین تغییر فاز و پدیده فوق سرمایش<sup>۹</sup> هستند [۵].

یکی از مهمترین چالش‌هایی که تغییر حجم زیاد در حین تغییر فاز ایجاد می‌کند، مشکلات طراحی محفظه‌های نگهدارنده مواد تغییرفازدهنده است. طراحی محفظه باید به گونه‌ای باشد که محفظه در مقابل این تغییر حجم‌ها مقاوم باشد. پدیده فوق سرمایش نیز به تغییر فاز دادن ماده در دمایی کمتر از دمای تغییر فاز آن ماده گفته می‌شود. به این صورت که با پایین آمدن دمای ماده تغییرفازدهنده و رسیدن به دمای تغییر فاز، بدون اینکه تغییر فاز اتفاق بیفتد دمای ماده کاهش می‌یابد و در دمایی کمتر، تغییر فاز رخ می‌دهد. زمانی که یک ماده تغییرفازدهنده برای کاربردی خاص انتخاب می‌شود، یکی از پارامترهایی که مورد توجه طراحان قرار می‌گیرد دمای تغییر فاز است. بنابراین اگر به هر دلیلی پدیده فوق سرمایش برای آن ماده رخ دهد، باعث از دست رفتن و یا کاهش میزان اثردهی ماده تغییرفازدهنده در ذخیره انرژی حرارتی خواهد شد. شایان ذکر است که این پدیده بیشتر در مورد تغییر حالت جامد به مایع تعریف می‌شود.

در صورتی که به بررسی خواص مواد تغییرفازدهنده آلی و غیر آلی پرداخته شود، مشاهده می‌شود مواد تغییر فازدهنده آلی دارای رسانش گرمایی کمی هستند، بنابراین برای کاربردهای ساختمانی مناسب هستند. زیرا در کاربرد ساختمانی احتیاج به ماده‌ای در جدار ساختمان است که دارای رسانش گرمایی کمی باشد تا هم عایق خوبی باشد و هم باعث شود تغییر فاز با تأخیر زمانی صورت گیرد. این در حالی است که مواد

---

<sup>۹</sup> Supercooling, undercooling or subcooling

تغییرفازدهنده غیر آلی رسانش گرمایی بیشتری دارند که به صورت ماده غیرآلی خالص در کاربردهایی مثل مبدل گرمایی به کار می‌روند؛ اما برای استفاده در کاربردهای ساختمانی معمولاً باید از آنها به صورت کامپوزیت استفاده کرد. در مقابل این مزیت، مواد تغییرفازدهنده آلی نسبت به مواد تغییرفازدهنده غیرآلی معایبی دارند که مهم‌ترین آنها گنجایش ذخیره انرژی گرمایی کمتر آنها است. گاهی همین ویژگی باعث انتخاب مواد غیرآلی به عنوان ماده تغییرفازدهنده مطلوب در کاربردهای ساختمانی می‌شود.

مواد تغییرفازدهنده مناسب برای کاربردهای ساختمانی باید علاوه بر داشتن رسانش گرمایی کم و ظرفیت گرمای نهان زیاد، از ظرفیت گرمای ویژه بسیاری نیز برخوردار باشند تا آثار ذخیره گرمای محسوس نیز در آنها چشمگیر شود. همچنین، برای انتخاب یک ماده تغییرفازدهنده یکی از اصولی‌ترین نکات، قرار داشتن دمای تغییر فاز در محدوده دمای عملیاتی است. علاوه بر همه این موارد، مقاومت در برابر خوردگی، پایداری شیمیایی، اشتعال‌ناپذیری، غیرقابل انفجار بودن و سمی نبودن نیز باید مورد توجه قرار گیرد.

## ۲-۳-۳. محفظه های مواد تغییرفازدهنده

برای انتخاب ماده تغییرفازدهنده مناسب، مهمترین پارامتر پس از دمای تغییر فاز، هندسه محفظه دربرگیرنده ماده تغییرفازدهنده است [۶].

گاهی مواد تغییرفازدهنده را داخل محفظه پرس شده مستطیلی قرار می‌دهند و از آن برای انتقال و ذخیره حرارت استفاده می‌کنند. در شکل ( ۲- ۱ ) نمونه ای از محفظه‌های مستطیلی مشاهده می‌شود [۷]. یکی دیگر از روش‌های قرار دادن مواد تغییرفازدهنده در محفظه، کپسولی کردن آنهاست. همچنین، فرآیندی که در آن ذرات ریز مایع یا جامد یک ماده به وسیله یک لایه از پلیمر پوشیده می‌شود تا کپسولی در مقیاس میکرومتر تا میلی‌متر ایجاد شود، میکروکپسولی کردن نامیده می‌شود. میکروکپسول‌ها<sup>۱۰</sup> در شکل‌های مختلفی تولید می‌شوند. به طوری که سه فاز جامد، مایع و گاز ماده می‌تواند در قالب شکل‌های مختلف، میکروکپسولی شود.

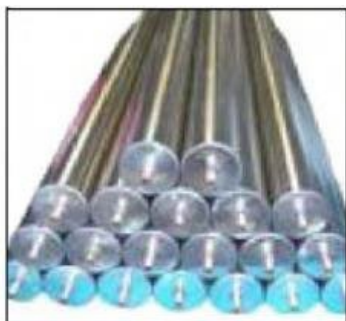


نمای برش خورده از بغل



نمای بغل

شکل ( ۲- ۲ ) نمونه ای از محفظه های مستطیلی [۷]



محفظة استوانه ای



محفظة کروی



محفظة نیم کروی



پاکت نایلونی



پنل های PVC



پنل آلومینیومی



پاکت آلومینیومی

شکل ( ۳- ۲ ) انواع محفظه نگهدارنده مواد تغییر فاز دهنده [۸]

## ۲-۴. کاربردهای مواد تغییرفازدهنده

مواد تغییرفازدهنده با توجه به دمای تغییر فازی که دارند، کاربردهای متنوعی پیدا کرده‌اند. معمولاً موادی که زیر ۱۵ درجهٔ سلسیوس تغییر فاز می‌دهند، برای خنک کردن و تهویهٔ اتاق قابلیت استفاده دارند؛ موادی که در دمایی بیشتر از ۹۰ درجهٔ سلسیوس تغییر فاز می‌دهند، برای کاهش دما در جاهایی که دما ممکن است به طور ناگهانی افزایش یابد -مانند آتش‌سوزی- کاربرد دارند و سایر مواد تغییرفازدهنده که دمای ذوبشان بین این دو مقدار است، برای ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی کاربرد دارند [۹]

یکی از مهمترین کاربردهای مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان به عنوان عایق و عاملی مناسب برای جابه‌جا کردن زمان اوج مصرف به زمان غیراوج است. مواد تغییرفازدهنده علاوه بر کاربردهای ساختمانی در حوزه‌های پزشکی، حفاظت گرمایی مواد غذایی و دارویی، گرمایش و سرمایش، و پوشش‌های خاص نیز کاربرد فراوان دارد [۱۰].

## ۲-۴-۱. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در حوزه پزشکی

در حوزهٔ پزشکی، از مواد تغییرفازدهنده استفاده می‌شود. سرمادرمانی یکی از زیرشاخه‌های پزشکی است که مواد تغییرفازدهنده نقش فراوانی در آن دارد. در انتقال خون نیز از مواد تغییرفازدهنده برای حمل کیسه‌های خون استفاده می‌شود. مواد تغییرفازدهنده در ساخت تجهیزات پزشکی از جمله تخت‌های جراحی برای بیماران خاص نیز کاربرد دارد. در نگهداری و انتقال مواد غذایی و دارویی باید محفظه‌های مناسبی انتخاب شود. در ساخت و طراحی این محفظه‌ها گاهی مواد تغییرفازدهنده می‌توانند به‌خوبی از بروز مشکلاتی از جمله فاسد شدن مواد غذایی و دارویی جلوگیری کند [۱۱].

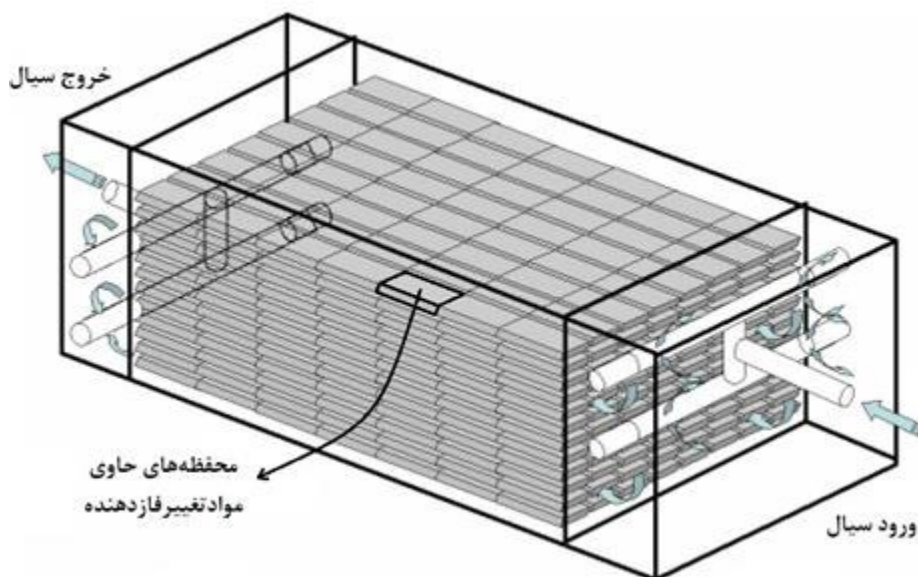
### ۱-۲-۴. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در مبدل‌های حرارتی

مواد تغییرفازداده شده در صنعت کاربردهای زیادی دارد. نمونه‌ای از آن، استفاده از مواد تغییرفازداده شده در مبدل‌های حرارتی است. مواد تغییرفازداده شده‌ای که در مبدل‌های حرارتی به کار می‌رود باید رسانش گرمایی

بالایی داشته باشد تا بتواند در مدت زمان کوتاهی به ذخیره کردن و آزاد کردن انرژی بپردازد. در شکل ( ۲ ) -  
 ( ۴ ) طرح‌واره‌ای از مدل حرارتی حاوی محفظه‌های مواد تغییر فاز دهنده نشان داده شده است.

## ۲-۴-۳. کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در آبگرمکن خورشیدی

آبگرمکن‌های خورشیدی به منظور تهیه آب گرم مصرفی و همچنین آب گرم مورد نیاز برای گرمایش، به کار برده می‌شوند. این کار معمولاً با افزایش دمای سیال ذخیره کننده - که عمدتاً آب مصرفی است- در داخل محفظه ذخیره آبگرمکن صورت می‌گیرد. اشکال عمده در به‌کارگیری این روش برای ذخیره حرارت این است که با افزایش تعداد مصرف‌کنندگان باید سطح کلکتور<sup>۱۱</sup> و حجم مخزن افزایش یابد تا پاسخگوی نیاز مصرف‌کنندگان باشد. این امر، علاوه بر افزایش هزینه اولیه آبگرمکن تولیدی، حجم و وزن تجهیزات را افزایش



شکل ( ۲ - ۴ ) طرح‌واره‌ای از یک مبدل حرارتی

می‌دهد که مطلوب نیست. مشکل دیگری که معمولاً در استفاده از این نوع آبگرمکن وجود دارد، افزایش دمای بی‌رویه آب در ساعات دارای بیشینه بار تابشی و یا هنگام کاهش نرخ مصرف است؛ به حدی که ممکن است به نزدیک دمای جوش آب برسد. افزایش دمای آب ذخیره‌شده باعث افزایش دمای آب در هر گردش می‌شود.

<sup>۱۱</sup> Collector Faces

این افزایش دما، علاوه بر اینکه در محدوده تغییرات دمای تعریف شده برای سیستم نیست، بازده حرارتی کلکتور را - که به صورت یک مبدل حرارتی عمل می کند - کاهش می دهد. در ادامه میزان ذخیره انرژی تابشی به تدریج کند و سپس متوقف می شود [۱۲]

## ۲-۴-۴. کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایش هوای خورشیدی

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده در سیستم گرمایش هوای خورشیدی مشابه آبگرمکن خورشیدی موجب افزایش قابلیت سیستم در ساعات نبود تابش خورشید می شود. ماده تغییر فاز دهنده مناسب برای به کارگیری در این سیستم ها باید براساس محدوده دمای ذوب آن ماده انتخاب گردد و انتخاب آن، فقط بر اساس میزان گرمای نهان ذوب، امری اشتباه است [۱۳].

## ۲-۴-۵. کاربرد مواد تغییر فاز دهنده در پوشش های خاص

فناوری ترکیب میکروکپسول های حاوی مواد تغییر فاز دهنده در ساختار منسوجات، به منظور بهبود کارایی حرارتی، در اوایل سال ۱۹۸۰ به عنوان یکی از برنامه های تحقیقاتی ناسا<sup>۱۲</sup> انجام شد. هدف اصلی این سازمان استفاده از این منسوجات در لباس فضانوردان برای بهبود حفاظت حرارتی در برابر نوسان شدید دما در خارج از جو زمین بود. به دنبال آن، ترکیب مواد تغییر فاز دهنده با منسوجات، بازار خوبی برای تولید لباس های مختلف به وجود آورد. لباس آتش نشانان و ورزشکاران نیز در بعضی از شرایط خاص، نیازمند مواد تغییر فاز دهنده در بافت خود هستند تا شرایط آسایش حرارتی را فراهم آورد. از مواد تغییر فاز دهنده در کفش، پتو و رختخواب نیز به منظور فراهم کردن شرایط آسایش حرارتی استفاده می شود [۱۰].

---

<sup>۱۲</sup> National Aeronautics and Space Administration (NASA)



## ۲-۴-۶. کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان

در سال ۱۹۴۰ ریموند<sup>۱۳</sup> و تلکس<sup>۱۴</sup> اولین پژوهشگران در حوزه مواد تغییرفازدهنده در کاربردهای ساختمانی بودند. اما با پیشرفت تکنیک‌های ذخیره‌سازی انرژی در سال ۱۹۷۰ و داغ شدن بحث بحران انرژی و سوخت، کار جدی بر روی مواد تغییرفازدهنده در ساختمان شروع شد و نحوه اثرگذاری مواد تغییرفازدهنده در ایجاد ساختمان‌هایی با کارایی انرژی زیاد مورد بررسی قرار گرفت [۶].

ساختمان با کارایی انرژی زیاد باید هدر رفت انرژی کمی داشته باشد و برای تأمین انرژی مورد نیاز آن بتوان تا حد ممکن از انرژی‌های تجدیدپذیر استفاده کرد. در صورت استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان، علاوه بر کاهش دادن اتلافات حرارتی ساختمان، امکان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر نیز فراهم می‌شود. بنابراین استفاده از مواد تغییرفازدهنده می‌تواند به ایجاد ساختمان‌هایی با کارایی انرژی زیاد کمک کند.

## ۲-۴-۶-۱. نحوه عملکرد مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان

عملکرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان به این صورت است که روزها به عنوان یک عایق در جدار مانع از گرم شدن محیط داخل می‌گردد. به این ترتیب که با جذب انرژی، ذوب می‌شود و شب‌ها که هوا رو به سردی می‌رود، شروع به انجماد می‌کند و گرمای ذخیره شده را به محیط داخل یا بیرون پس می‌دهد. نتایج تحقیقات پیشین نشان داده است که ماده تغییرفازدهنده‌ای که برای استفاده در جدار ساختمان به کار می‌رود، باید دارای دمای تغییر فازی در محدوده تغییرات دمای هوای بیرون باشد [۱۳].

---

<sup>۱۳</sup> Reymond

<sup>۱۴</sup> Telkes

## ۲-۴-۶-۲. معرفی کاربردهای مواد تغییرفازدهنده در ساختمان

با مطالعه تحقیقات صورت گرفته در زمینه مواد تغییرفازدهنده، کاربردهای متفاوتی از مواد تغییرفازدهنده در ساختمان مشاهده شده است و نقش آنها در تمام قسمت‌هایی که به نظر می‌رسد مؤثر واقع شوند، مورد بررسی قرار گرفته است. هرکدام از کاربردهای مواد تغییرفازدهنده در ساختمان، می‌تواند سهمی در کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در ادامه، مهمترین کاربردهای مواد تغییرفازدهنده در ساختمان معرفی خواهد شد.

دیوارهای حاوی مواد تغییرفازدهنده: روش‌های مختلفی برای به کار بردن مواد تغییرفازدهنده در دیوار ساختمان‌ها وجود دارد. جا دادن مواد تغییرفازدهنده در داخل بتون یا داخل المانی‌هایی از سیمان و یا حتی در آجرهای به کار رفته در دیوار نمونه‌هایی هستند که همگی منجر به ایجاد یک دیوار سبک ولی با قابلیت زیاد ذخیره انرژی می‌شود. همچنین، می‌توان از مواد تغییرفازدهنده در ساختار سقف و کف ساختمان نیز استفاده کرد. در شکل ( ۲ - ۵ ) نمونه‌ای از آجرهای حاوی مواد تغییرفازدهنده دیده می‌شود [۱۴]

تخته‌های دیواری حاوی مواد تغییرفازدهنده: یکی دیگر از راه‌های به کار بردن مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان استفاده از تخته‌های دیواری است. تخته‌های دیواری حاوی مواد تغییرفازدهنده به گونه‌ای طراحی می‌شوند که دارای محفظه‌های کوچکی باشند تا بتوان مواد تغییرفازدهنده را در طی فرآیند ساخت در آنها جای داد. تخته‌های دیواری<sup>۱۵</sup> حاوی مواد تغییرفازدهنده به صورت پنل‌هایی پیش‌ساخته روی جدار ساختمان نصب می‌شوند [۱۴].

نمونه ای از این تخته‌های دیواری در شکل ( ۲ - ۳ ) مشاهده می‌شود.

تخته‌های سقفی حاوی مواد تغییرفازدهنده: از مواد تغییرفازدهنده در سقف نیز استفاده می‌شود. تخته‌های سقفی حاوی مواد تغییرفازدهنده نقش مؤثری در سیستم تهویه مطبوع با کنترل دما ایفا می‌کنند.

---

<sup>۱۵</sup> Wall board

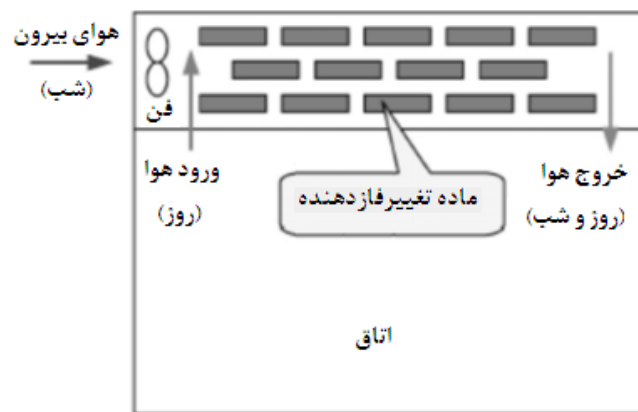


شکل ( ۲- ۵ ) آجر حاوی مواد تغییر فاز دهنده [۱۴]

تیمی تحقیقاتی، یک بام تکمیل شده با سیستم ذخیره کننده انرژی حرارتی خورشید را در سال ۱۹۹۷ بررسی کردند. در این سیستم از لایه‌های ورق آهن چین دار به عنوان کلکتور خورشیدی برای گرمایش هوا در سقف استفاده شده است. زمانی که تابش خورشید صورت می گیرد و ساختمان احتیاج به گرمایش دارد، هوا از داخل کلکتور عبور کرده و به داخل ساختمان منتقل می شود. زمانی که احتیاج به گرمایش نباشد، هوا به داخل سیستم ذخیره کننده منتقل شده و ماده تغییر فاز دهنده را مایع می کند تا برای مصرف در زمان مورد نیاز، شارژ شود. زمانی که تابش خورشید وجود ندارد، هوای داخل از سیستم ذخیره هوا عبور کرده و بعد از گرم شدن، هوای داخل را نیز گرم می کند [۴].

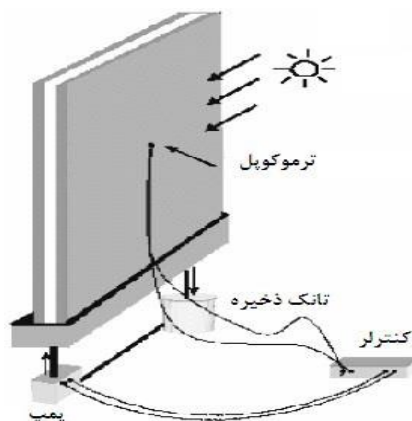
سرمایش از سقف به کمک مواد تغییر فاز دهنده: در این روش به کمک سیستم تهویه مطبوع، از سرمای هوای محیط اطراف در طول شب استفاده می کنند؛ یعنی آن را ذخیره کرده و در ساعات گرم روز به داخل اتاق منتقل می نمایند. کنگ<sup>۱۶</sup> یک نوع سیستم سرمایش شبانه به کمک مواد تغییر فاز دهنده پیشنهاد داد که در شکل ( ۲- ۶ ) نشان داده شده است. عملکرد این سیستم به این صورت است که در شب، هوای بیرون به سیستم ذخیره میشود و مواد تغییر فاز دهنده گرمای خود را به هوا داده و منجمد می شوند. در طول روز با گرم شدن هوا، مواد تغییر فاز دهنده با ذوب شدن، گرمای هوای داخل اتاق را می گیرند و باعث خنک شدن هوای اتاق می شوند [۴].

<sup>۱۶</sup> Kang



شکل ( ۲- ۶ ) طرح کلی سیستم سرمایش شبانه به کمک مواد تغییر فاز دهنده [۴]

پنجره‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده: در سال ۱۹۹۷، اسماعیل<sup>۱۷</sup> و هنریکوئیز<sup>۱۸</sup> [۱۵] طرحی متفاوت برای پنجره‌های حاوی مواد تغییر فاز دهنده ارائه کردند. شکل ( ۲- ۷ ) پنجره دوجداره‌ای را نشان می‌دهد که لایه‌ای هوا در میان آن وجود دارد. همچنین، مجرای برای تهویه در گوشه بالای آن قرار دارد. طرفین و پایین پنجره کاملاً درزبندی شده‌اند. پمپ به محفظه حاوی مواد تغییر فاز دهنده متصل است و مواد تغییر فاز دهنده در وضعیت مایع قرار دارد. عملکرد مواد تغییر فاز دهنده به وسیله حسگرهای حرارتی کنترل می‌شود. زمانی که اختلاف درجه حرارت به مقدار مشخصی می‌رسد، مواد تغییر فاز دهنده از داخل محفظه به پنجره پمپ می‌شود تا فاصله بین دو صفحه شیشه‌ای را پر کند. به علت درجه حرارت کمتر در لایه بیرونی، مواد تغییر فاز دهنده شروع به انجماد می‌کند و یک لایه جامد ایجاد می‌شود و از کم شدن درجه حرارت داخل جلوگیری می‌کند.



<sup>۱۷</sup> Ismail

<sup>۱۸</sup> Henriquez

شکل ( ۲- ۷ ) پنجره حاوی مواد تغییرفازدهنده [۱۶]



شکل ( ۲- ۸ ) کرکره حاوی مواد تغییرفازدهنده [۱۷]

کرکره‌های حاوی مواد تغییرفازدهنده: گاهی برای کاربردهای خاص از مواد تغییرفازدهنده در پرده‌های کرکره‌ای نیز استفاده می‌کنند. مهلینگ " از پیش‌تازان تحقیق در این زمینه است [۴]. در شکل ( ۲- ۸ ) نمونه‌ای از کرکره‌های حاوی مواد تغییرفازدهنده نشان داده شده است [۱۷].

## ۲-۵. مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه کاربرد مواد تغییرفازدهنده در

### ساختمان

در سال ۱۹۳۱ پایپو<sup>۱۹</sup> تقریبی ساده از دمای بهینه ذوب و ضخامت لایه ماده تغییرفازدهنده به کار رفته در جدار ساختمان ارائه کرد. ولی خطای این رابطه به قدری زیاد بود که عملاً برای کاربردهای ساختمانی قابل استفاده نبود. اما به هر حال، وی رابطه‌ای تحلیلی ارائه کرد تا سرشاخه‌ای برای تحقیقات در این زمینه گشوده باشد [۱۸]. در سال ۱۹۸۰ بوردیو<sup>۲۰</sup> [۱۹] در آزمایش‌های خود به مقایسه ضخامت دیوار معمولی و دیوار حاوی ماده تغییرفازدهنده هگزاکلرید کلسیم پرداخت و عملکرد انتقال حرارتی آن را مورد بررسی قرار داد. در آزمایش وی، دیوار هگزاکلرید کلسیم با ضخامت ۸/۱ سانتی‌متر عملکردی بهتر از یک دیوار معمولی با ضخامت ۴۰ سانتی‌متری داشت. شایان ذکر است که این آزمایش اگرچه به‌خوبی، میزان اثربخشی استفاده از مواد

<sup>۱۹</sup> Mehling

<sup>۲۰</sup> Peippo

تغییرفازدهنده را نشان می‌دهد، ولی کاربرد چنین دیواری در ساختمان با ضخامت های مذکور غیرعملی به نظر می‌رسد [۲۰].

استوال<sup>۲۱</sup> و تاملینسون<sup>۲۲</sup> [۲۱] در سال ۱۹۸۹ آزمایش‌هایی درباره جابه‌جا کردن بار سرمایش و گرمایش از زمان اوج به زمان غیراوج انجام دادند. اما به یک نتیجه کلی در ارتباط با خصوصیات یک ماده تغییرفازدهنده مناسب و ایدئال نرسیدند. استوال بار دیگر به کمک کدل<sup>۲۳</sup> [۲۲] تحقیقی در ارتباط با دیوارپوش‌های تلفیق‌شده با اوکتادکان<sup>۲۴</sup> خمیری برای کاربردهای خورشیدی غیر فعال<sup>۲۵</sup> داشت که پیشرفت مطلوبی در زمینه ذخیره انرژی گرمایی داشت. آنها نشان دادند که در فرآیند غوطه‌وری<sup>۲۶</sup> دیوارپوش‌ها با اوکتادکان خمیری، ظرفیت ذخیره انرژی دیوارپوش‌ها، نسبت به حالتی که اوکتادکان خمیری را با میکروکپسولی کردن به دیوارپوش اضافه کنند، بیشتر می‌شود. به فرآیندی که در آن، ماده تغییرفازدهنده مایع در منافذ دیوارپوش نفوذ می‌کند و در نتیجه لایه‌ای پلاستری برای دیوارپوش ایجاد می‌کند، غوطه‌وری گویند. ساناکتار<sup>۲۷</sup> و اسان<sup>۲۸</sup> [۲۳] در سال ۱۹۹۶ اثر مواد تغییرفازدهنده به کار رفته در دیوارهای مشبک را بر میزان جابه‌جا کردن ساعت اوج مصرف بررسی کردند. آنها نشان دادند که تغییر دادن گرمای نهان ماده تغییرفازدهنده استفاده شده در جدار، تأثیر چندانی در جابه‌جا کردن ساعت اوج مصرف ندارد.

آتینیتیس<sup>۲۹</sup> و همکارانش [۲۴] در سال ۱۹۹۷ آزمایش‌های بسیار گسترده‌ای همراه با شبیه‌سازی عددی بر روی یک اتاق نمونه، که از بیرون با دیوارپوش گچی حاوی مواد تغییرفازدهنده پوشیده شده بود، انجام دادند. در تحقیق ایشان از مدل صریح تفاضل محدود برای شبیه‌سازی انتقال حرارت در دیوارها استفاده شد. نتایج

---

<sup>۲۱</sup> Bourdeau

<sup>۲۲</sup> Stoval

<sup>۲۳</sup> Tomlinson

<sup>۲۴</sup> Kedl

<sup>۲۵</sup> Octadecane

<sup>۲۶</sup> passiv

<sup>۲۷</sup> Sancaktar

<sup>۲۸</sup> Asan

<sup>۲۹</sup> Athienitis

نشان داد که دیوارپوش گچی حاوی مواد تغییرفازدهنده می‌تواند تا ۴ درجهٔ سلسیوس بیشینهٔ دمایی داخل و به دنبال آن مصرف انرژی را کاهش دهد.

کیسوک و همکارانش<sup>۳۰</sup> [۲۵] در سال ۱۹۹۸ نتایج یک تحقیق آزمایشگاهی را روی دیوارپوش حاوی ۳۰٪ پارافین بیان کردند. در این تحقیق، تابش خورشیدی، دمای محیط و دمای داخل برای حجم مورد آزمایش در طول ۱۴ روز تعیین شد. نتایج نشان داد که مواد تغییرفازدهنده می‌تواند بیشینهٔ دمایی را تا بیش از ۱۰ درجهٔ سلسیوس در یک روز آفتابی کاهش دهد [۲].

آتینیتیس و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۰۰ بهینه‌سازی عددی مواد تغییرفازدهنده به کار رفته در سطح داخلی سقف جهت ذخیرهٔ انرژی را بررسی کردند [۲۷]. فرانهافر<sup>۳۱</sup> در سال ۲۰۰۲ به بررسی رفتار گرمایی دیوارهایی که مواد تغییرفازدهنده در آنها جاسازی شده بود پرداخت. او برای این کار از یک مدل آزمایشگاهی استفاده کرد. وی در این تحقیق به بررسی چهار دیوار نمونه که با مقادیر متفاوتی از مواد تغییرفازدهنده پر شده بودند پرداخت. هر یک از دیوارها در کوره حرارت داده و سپس سرد شدند. فرانهافر، با مقایسهٔ نمودار زمانی تغییرات دمای دیوارها، میزان اثربخشی مواد تغییرفازدهنده در افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی دیوار را نشان داد [۲]. کوزنی<sup>۳۲</sup> [۲۸] در سال ۲۰۰۷ در یک تحقیق آزمایشگاهی به بهینه‌سازی دیوارپوش‌های مواد تغییرفازدهنده برای کاربردهای ساختمانی پرداخت. کالاسلیوام<sup>۳۳</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به ارزیابی تحلیلی و آزمایشگاهی نانوذرات جاسازی شده در مواد تغییر فازدهنده به کار رفته در ساختمان جهت کاربردهای سرمایشی پرداختند [۱۴].

در ادامهٔ تحقیقات سال ۲۰۱۲، موراتوره<sup>۳۴</sup> و همکارانش میکروکپسول‌های حاوی مواد تغییرفازدهنده برای کنترل گرمایی سطوح را بررسی کردند [۱۴].

---

<sup>۳۰</sup> Kiskey

<sup>۳۱</sup> Fraunhofer

<sup>۳۲</sup> Kuznik

<sup>۳۳</sup> Kalasliuam

<sup>۳۴</sup> Moratore

## ۲-۶. کاستی‌های تحقیقات پیشین

همان طور که گفته شد، تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه کاربرد مواد تغییرفازدهنده در ساختمان صورت گرفته است. اما تحقیقات پیشین کاستی‌ها و نقایصی دارند که می‌تواند مبنای تحقیقات آتی به حساب آید. در ادامه به تشریح بخشی از این کاستی‌ها پرداخته می‌شود.

### ۲-۶-۱. عدم بررسی همه‌جانبه عملکرد مواد تغییرفازدهنده در اقلیم‌های ایران

همان طور که در بخش‌های ابتدایی این فصل ذکر شد، سال‌هاست که تحقیقات زیادی روی مواد تغییرفازدهنده در ساختمان صورت می‌گیرد. در ایران نیز تحقیقاتی در این زمینه صورت گرفته است که در سال‌های اخیر با پیشرفت خوبی همراه بوده است. یکی از مهمترین پارامترهایی که در بررسی مواد تغییرفازدهنده در ساختمان نیاز است اطلاعات آب و هوایی اقلیم مورد پژوهش است. در ایران نیز، محققان کم و بیش شرایط آب و هوایی اقلیم را مورد توجه قرار داده‌اند. اما کمتر به مقایسه شرایط آب و هوایی و بررسی تأثیرات آن بر رفتار حرارتی مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده است. در سال ۱۳۸۸، حق شناس کاشانی [۱۳] به بررسی کارایی حرارتی آجرهای مجهز به مواد تغییرفازدهنده پرداخت. نتایج نشان داد که استفاده از مواد تغییرفازدهنده میزان شار حرارتی ورودی به ساختمان را تا ۳۸ درصد کاهش می‌دهد. همچنین افزایش تعداد حفره‌های مواد تغییرفازدهنده در آجر موجب کاهش ۱۱ درصدی شار حرارتی و بار سرمایشی می‌شود. وی، علاوه بر اینکه هیچ اعتبارسنجی‌ای از روش حل خود ارائه نکرد، در مقایسه میزان شار عبوری از دیوارهای حاوی مقادیر متفاوتی از مواد تغییرفازدهنده، اثر یکسان بودن مقاومت حرارتی را نیز در نظر نگرفت؛ یعنی در تحقیق ایشان، شار حرارتی عبوری از دیوارهایی با مقاومت حرارتی متفاوت، با یکدیگر مقایسه شدند. این امر موجب می‌شود که نتوان تفسیر فیزیکی معناداری از نتایج ایشان به دست آورد. اشراقی [۲۹] در سال ۱۳۹۱، با محاسبه بار گرمایشی سرمایشی یک واحد مسکونی نمونه واقع در اقلیم تهران، مزایای استفاده از این مواد در تأمین بخشی از نیازهای انرژی آن واحد مسکونی را مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی نشان داد که استفاده از این



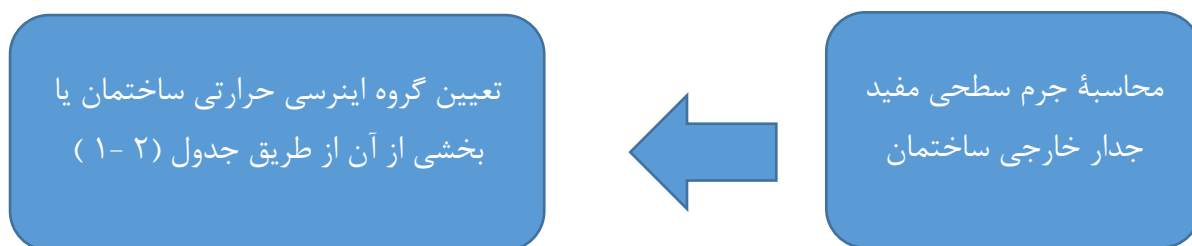
مواد، متناسب با میزان به کارگیری، نیاز به انرژی‌های تجدیدناپذیر را از ۱۰ تا ۷۰ درصد کاهش می‌دهد. متأسفانه این تحقیق نیز اعتبارسنجی نشده است.

در همین سال، معروفی و آقاجفی [۳۰]، بررسی انتقال حرارت در مواد تغییرفازدهنده و کاربرد آن در تجهیزات سرمایش/گرمایش و تهویه مطبوع را به روش شبکه‌ای بولتزمن انجام دادند. در تحقیق آنها به بررسی انتقال حرارت در مواد تغییرفازدهنده و بهره‌گیری از آن به عنوان ذخیره‌کننده‌های انرژی منابع تجدیدپذیر در فرآیندهای گرمایشی سرمایشی پرداخته شد.

در ادامه تحقیقات سال ۱۳۹۱، جاهدی [۳۱] به بررسی تأثیر افزایش درجه حرارت فرآیند شارژ در یک سیستم ذخیره‌کننده انرژی حرارتی حاوی یک ماده آلی غیر پارافینی به عنوان ماده تغییرفازدهنده، به صورت تجربی پرداخت. نتایج نشان داد که تا ۷ درصد افزایش در ذخیره انرژی حرارتی به کمک این سیستم امکان‌پذیر می‌شود. ذوالفقاری و همکارانش [۳۲] نیز در این سال، به مقایسه عایق‌های تغییرفازدهنده و معمولی پرداختند. نتایج نشان داد استفاده از عایق‌های تغییرفازدهنده کاهش ۳ درصدی مصرف سالانه انرژی را در یک فضای نمونه در اقلیم تهران در پی دارد. در سال ۱۳۹۲ صلحی و همکارانش [۳۳]، به بررسی اثر به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در پوسته خارجی ساختمان بر ایجاد شرایط آسایش حرارتی ساکنان -بدون نیاز به سیستم گرمایش / سرمایش- پرداختند. نتایج حاکی از افزایش ۲ درصدی ساعات آسایش افراد در اقلیم تهران بود. تحقیقات دیگری هم در ایران در زمینه مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان صورت گرفته است. اما در اکثر آنها به معرفی مواد تغییرفازدهنده و خواص آنها پرداخته شده است. از آنجا که در تحقیقات صورت گرفته در ایران کمتر به مقایسه شرایط آب و هوایی برای استفاده از مواد تغییرفازدهنده به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی پرداخته شده است، شناخت اقلیم‌های مناسب ایران برای به کار بردن مواد تغییرفازدهنده در ساختمان الزامی به نظر می‌رسد.

## ۲-۶-۲. نقص مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان در تعریف اینرسی حرارتی

در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان، اینرسی حرارتی ساختمان به صورت قابلیت کلی پوسته خارجی و دیوارهای داخلی در ذخیره کردن انرژی و بازپس دادن آن، برای به حداقل رساندن نوسان‌های دما و بار گرمایشی سرمایشی در فضاهای کنترل‌شده ساختمان تعریف شده است [۳۴]. نقص این مبحث، در نظر نگرفتن اثر گرمای نهان و تغییر فاز مواد به کار رفته در جدار است؛ چرا که گروه‌بندی اینرسی حرارتی فقط بر اساس جرم سطحی دیوار تعریف شده است. بنابراین، فقط ظرفیت گرمایی محسوس مواد به کار رفته در جدار در نظر گرفته شده است. مراحل محاسبه اینرسی حرارتی ساختمان و تعیین گروه اینرسی طبق مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان از این قرار است.



لازم به توضیح است موارد ذکر شده فقط در حالتی که مواد تغییر فاز ندهند صادق است؛ چرا که به علت نزدیک بودن برای مصالح ساختمانی مختلف، قابلیت ذخیره‌سازی انرژی در مصالح، تنها به جرم جدار وابسته خواهد بود. اما در صورت استفاده از مواد تغییرفازدهنده، ظرفیت حرارتی جدار علاوه بر  $mC_p$  به  $mL_f$  نیز وابسته خواهد بود. در نتیجه تعیین اینرسی حرارتی برای این مواد متفاوت خواهد بود. بنابراین با عملی شدن استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان، مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان نیازمند انجام اصلاحاتی در زمینه محاسبه اینرسی حرارتی دیوارهای دارای مواد تغییرفازدهنده خواهد بود.

جدول ( ۱ - ۱ ) گروه اینرسی حرارتی ساختمان بر حسب جرم سطحی مفید ساختمان [۳۴]

جرم سطحی مفید به ازای هر مترمربع جدار خارجی ساختمان	گروه اینرسی
کمتر از ۱۵۰ کیلوگرم بر مترمربع	کم
مساوی یا بیش از ۱۵۰ و کمتر از ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمربع	متوسط
مساوی یا بیش از ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمربع	زیاد

## ۲-۶-۲. فقدان جداول طراحی مهندسی برای انتخاب مواد تغییرفازدهنده

یکی از مشکلات فراروی طراحان ساختمان و پژوهشگران در زمینه مواد تغییرفازدهنده در حوزه ساختمان، این است که روشی استاندارد و یا جداول طراحی مناسب برای تصمیم‌گیری آنان به منظور انتخاب مواد تغییرفازدهنده وجود ندارد. بنابراین انتخاب ماده تغییرفازدهنده مناسب، مشکل می‌شود. پس برای توسعه مواد تغییرفازدهنده و گسترش کاربرد آنها، باید یک خط‌مشی واحد مانند استانداردها و یا جداول موجود در هندبوک‌های مهندسی و یا چیزی شبیه منحنی عملکرد وجود داشته باشد [۶].

برای مثال، در صورتی که پژوهشگری قصد بررسی آثار استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان در شهر تهران را داشته باشد، باید از ابتدا کلیه پارامترهای مرتبط با مواد تغییرفازدهنده را تحلیل و بررسی نماید تا بتواند ماده تغییرفازدهنده با خواص مناسب را انتخاب نماید. در صورتی که، اگر جدولی یا نموداری برای انتخاب ماده تغییرفازدهنده برای کاربرد در جدار ساختمان در تهران از قبل تدوین شده بود، طراحان و مهندسان می‌توانستند با استناد به آن، به‌سادگی ماده تغییرفازدهنده مناسب را انتخاب کنند.

## فصل ۳:

# روش تحقیق و معادلات

### ۳-۱. مقدمه

همان طور که گفته شد، در این تحقیق سعی شده است به مدل سازی مواد تغییر فاز دهنده و بررسی عملکرد حرارتی آنها در جدار ساختمان، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی مختلف، پرداخته شود. برای این منظور به مدل سازی عددی دیوار خارجی یک فضای نمونه پرداخته شده است. دیوار مذکور شامل چند لایه متفاوت از مصالح است که یک یا چند لایه آن می تواند حاوی مواد تغییر فاز دهنده باشد. شرایط مرزی سمت خارج دیوار بر اساس شرایط آب و هوایی اقلیم مورد مطالعه و با در نظر گرفتن سازوکارهای تابش و جابه جایی روی مرز تعیین شده است؛ ضمن اینکه شرایط مرزی در سمت داخل دیوار، بر مبنای جابه جایی با محیطی در شرایط استاندارد و مطلوب برای ساکنان به دست می آید. بنابراین شرایط آب و هوایی چهار اقلیم مختلف ایران بررسی شد و اطلاعات دمایی و تابش خورشیدی ساعت به ساعت این اقلیم ها برای استفاده به عنوان شرایط مرزی جابه جایی و تابش، استخراج شد. در این فصل به تشریح معادلات و شرایط حاکم بر مسئله مطرح شده و روش های حل تحلیلی و عددی حل آن پرداخته شده است.

### ۳-۲. شرح مسئله

مسئله مطرح شده در این تحقیق، یک مسئله هدایت یک بعدی است که متشکل از چند لایه از مواد مختلف است. یک یا چند لایه از این لایه ها می تواند حاوی مواد تغییر فاز دهنده باشد. در این مسئله، شرایط مرزی سمت چپ از نوع جابه جایی و شرایط مرزی سمت راست از نوع جابه جایی و تابش توأمان است. در این تحقیق به بررسی رفتار حرارتی این لایه های استفاده شده پرداخته می شود.

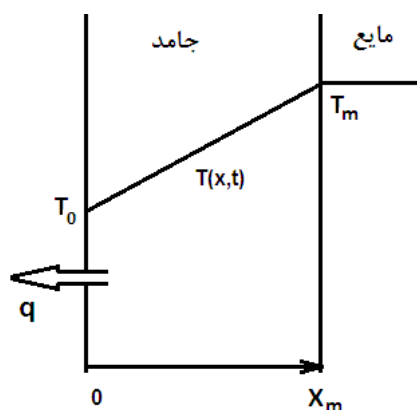
### ۳-۳. معادلات حاکم برای تحلیل رفتار مواد تغییرفازدهنده

مسائل مرتبط با مواد تغییرفازدهنده، با عنوان مسائل با مرز متحرک مطرح می‌شود. برای مدل‌سازی عملکرد مواد تغییرفازدهنده، شکل‌های متنوعی از معادلات حاکم ارائه شده است. این معادلات، بسته به میزان فرضیات ساده‌کننده به کار رفته در آن، منجر به نتایجی با دقت‌های متفاوت می‌شود. اولین بار کلاپیرون<sup>۳۵</sup> معادلات حاکم بر مسائل با مرز متحرک را به شکلی که در روابط (۱-۳) تا (۳-۳) آمده است ارائه کرد. اما بعدها این نوع مسائل با نام مسائل استفان<sup>۳۶</sup> شناخته شد [۳۵]. طرح‌واره‌ای از مسئله با مرز متحرک در شکل ۱-۲ آمده است.

$$\frac{\rho}{C_p k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (۱-۳)$$

$$T(0, t) = T_0 \quad (۲-۳)$$

$$T(x_m, t) = T_m \quad (۳-۳)$$



شکل (۱-۳) طرح‌واره‌ای از مسئله با مرز متحرک

در این روابط  $T_0$  دمای لبه سمت چپ و  $T_m$  دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده است. همچنین دمای اولیه نیز  $T_m$  است. برای حل این معادله نیاز به یک رابطه برای مرز متحرک است که با نوشتن بالانس انرژی بر روی

<sup>۳۵</sup> Clapeyron

<sup>۳۶</sup> Stefan

مرز متحرک به شکل معادله (۳-۴) تعریف می‌شود. با داشتن شار گرمایی عبوری از مرز متحرک، مکان مرز متحرک از رابطه ۲-۴ تعیین می‌شود.

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=x_m} = \rho L_f \frac{dx_m}{dt} \quad (۳-۴)$$

بنابراین به ازای شرایط مرزی و اولیه متفاوت برای مواد تغییر فاز دهنده می‌توان دسته معادلات مذکور را حل کرد [۱۰].

آگینیم<sup>۳۷</sup> و همکارانش [۶] در سال ۲۰۱۰ معادلات حاکم بر مواد تغییر فاز دهنده را جمع‌آوری و نتایج را در مقاله‌ای مروری ارائه کردند. نتیجه تحقیقات ایشان در جدول ۲-۱ ارائه شده است. در ادامه، به معرفی معادله حاکمی جدید برای حل مسائل تغییر فاز می‌پردازیم که در این تحقیق نیز از آن برای حل مسئله استفاده شده است.

### ۳-۳-۱. استخراج یک معادله حاکم جدید برای مواد تغییر فاز دهنده

معادله حاکم یک مسئله هدایت که تغییر فازی در آن صورت نگیرد در رابطه (۳-۵) آمده است.

$$\frac{\rho C_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (۳-۵)$$

که در حالت یک بعدی به شکل رابطه (۳-۱) درمی‌آید. در معادله (۳-۱)،  $T$  دما،  $X, Y, Z$  مختصه‌های مکانی،  $\rho$  چگالی،  $k$  رسانش گرمایی و  $C_p$  بیانگر ظرفیت گرمایی محسوس است مقدار برای هر ماده ثابت فرض می‌شود؛ یعنی با تغییرات دما،  $C$  ماده ثابت می‌ماند. در صورتی که بتوان  $C_p$  را به گونه‌ای اصلاح نمود که با رسیدن به دمای تغییر فاز مقدار آن به میزانی افزایش یابد که اثر گرمای نهان در معادله حاکم اعمال شود، معادله (۳-۵) را -که اصلاح شده است- می‌توان برای حل مسائل تغییر فاز نیز به کار برد. نکته‌ای که در

<sup>۳۷</sup> Agyenim

استخراج معادله حاکم جدید اعمال شده است، در نظر گرفتن تأثیر تغییر فاز در قالب اصلاح ظرفیت گرمایی محسوس است. بر این اساس، معادله حاکم جدید، با در نظر گرفتن محدوده ذوب و تغییر شکل خمیری ماده تغییرفازدهنده، معادله هدایت حرارتی را با اصلاح ظرفیت گرمایی ماده بازنویسی می کند.

جدول ( ۳ - ۱ ) معادلات حاکم بر مواد تغییرفازدهنده [۶]

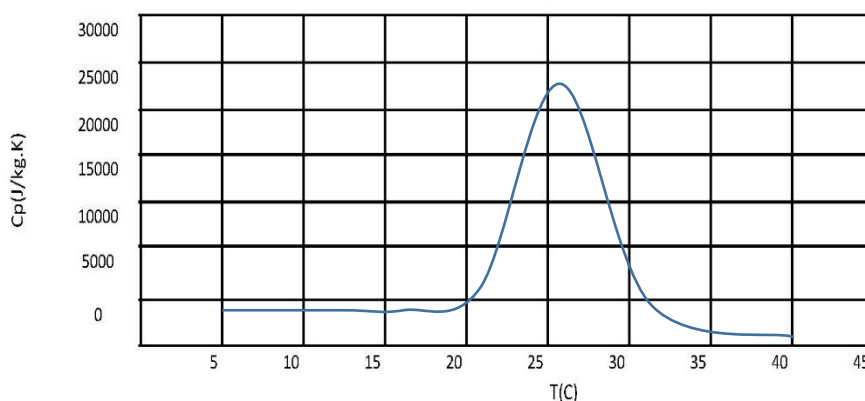
معادله حاکم	توضیحات	مرجع
$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^\omega} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^\omega \frac{\partial T}{\partial r} \right) & R(t) \leq r \leq 1 \\ T = T_\sigma & r \leq R(t) \end{cases}$ $\omega = \begin{cases} 0 \\ 1 \\ 2 \end{cases}$	$R(t)$ بیانگر مکان مرز متحرک است و $T_\sigma$ بیانگر دمای ماده در حالت جامد است	(۳۶)
$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \alpha r \frac{\partial h}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \frac{\partial h}{\partial z} \right) - \rho L_f \frac{\partial f}{\partial t}$	$H$ بیانگر آنالپی است	(۳۷)
$\rho_H C_{PH} \left( \frac{\partial T_H}{\partial t} + v \frac{\partial T_H}{\partial x} \right) = \frac{4h}{d} (T_P - T_H) + K_H \frac{\partial^2 T_H}{\partial x^2}$ $\frac{\partial H_P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_p r \frac{\partial T_P}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_p \frac{\partial T_P}{\partial x} \right)$		(۳۸)
$\frac{\partial T}{\partial t} + U_0 \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ <p>برای فاز جامد</p> $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial u} = 0$ <p>برای فاز مایع</p> $v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + g \beta (T - T_f) = 0$ $\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uT) + \frac{\partial}{\partial y} (vT) = \alpha_f \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$	$T_f$ دمای ذوب و $U_0$ سرعت حرکت مرز است	(۳۹)
$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$ $\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial \sigma_i}{\partial x_i} - \rho g \beta (T - T_{ref}) \frac{\partial x^2}{\partial x_i}$ $\sigma_{ij} = -P_{ij} + u \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)$ $\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right)$		(۴۰) و (۴۱)



$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)$ $\begin{cases} H = C_p T & T \leq T_m - \varepsilon \\ H = C_p T + \left( \frac{\gamma}{2\varepsilon} \right) T - T_m + \varepsilon T_m - \varepsilon \leq T \leq T_m + \varepsilon \\ H = C_p T + \gamma & T \geq T_m + \varepsilon \end{cases}$	$\varepsilon$ نصف بازه دمایی تغییر فاز است و $\gamma$ پارامتری جهت تصحیح آنتالپی در حین تغییر فاز	(۴۲)
---	---	------

همان طور که در فصل اول گفته شد، در تقسیم‌بندی مواد تغییر فاز دهنده، تغییر حالت جامد - جامد را نیز در نظر می‌گیرند که بیانگر تغییر ماده از حالت خمیری به حالت شکل‌یافته و برعکس است. بعضی از مواد تغییر فاز داده شده بلافاصله پس از رسیدن به دمای ذوبشان، تغییر فاز نمی‌دهند؛ بلکه فرآیند ذوب شدن را چند درجه سلسیوس قبل از دمای ذوب شروع می‌کنند، به ناحیه خمیری شکل می‌رسند و پس از گذشتن از دمای ذوب به تدریج مایع می‌شوند. شبیه همین فرآیند را نیز در هنگام انجماد طی می‌کنند. بر این اساس، ظرفیت ذخیره انرژی ماده با افزایش دما، معمولاً به صورت تابع شکل (۲-۳) تغییر می‌کند.

احمد و همکارانش [۴۳] به اندازه‌گیری ظرفیت گرمایی نوعی پارافین پرداختند که دارای دمای ذوب ۲۶ درجه سلسیوس است. شکل (۲-۳) نتیجه این تحقیق را نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشخص است، ظرفیت گرمایی ماده قبل از رسیدن به محدوده دمای ذوب، مقداری ثابت دارد. اما پس از رسیدن دمای ماده به محدوده دمای ذوب - که ماده شروع به خمیری شدن می‌کند - به یک باره ظرفیت گرمایی ماده زیاد می‌شود و پس از اینکه دمای ماده بالاتر از دمای ذوبش رفت، روند کاهش ظرفیت گرمایی اتفاق می‌افتد. به عبارت دیگر، مجموع ظرفیت ذخیره‌سازی محوی و نهان ماده به صورت تابعی تغییر می‌کند که به طور چشمگیری به تابع توزیع گوی شباهت دارد. بنابراین می‌توان برای بیان نحوه تغییرات ظرفیت گرمایی محول و نهان ماده از تابع گوس استفاده کرد.



شکل ( ۳- ۲ ) تغییرات ظرفیت گرمایی ماده تغییر فاز دهنده با دما [۴۳]

### ۳-۱-۱-۳. تابع توزیع گوس

تابع توزیع نرمال را ابتدا آبراهام دموار در سال ۱۷۳۳ در مقاله‌ای معرفی کرد. این مقاله در دومین ویرایش در سال ۱۷۳۸ مجدداً به چاپ رسید. نتایج این مقاله را لاپلاس در کتاب «تئوری تحلیلی احتمالات» در سال ۱۸۱۲ انتشار داد. کاربرد بسیار مفید این توزیع در سال ۱۸۰۹ زمانی آشکار شد که گوس، ریاضیدان مشهور آلمانی، آن را به عنوان بخش سازنده و مکمل روش خود برای پیشگویی مکان موجودات نجومی به کار برد. از آن تاریخ به بعد این توزیع را توزیع گوسی می‌نامند [۴۴].

تابع توزیع گوس دارای دو پارامتر اساسی است؛ که یکی تعیین‌کننده مکان ( $\mu$ ) و دیگری تعیین‌کننده مقیاس ( $\sigma$ ) توزیع است.

$$F(x, \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sqrt{2\sigma}}\right)^2\right], x \in R$$

( ۳- ۶ )

در شکل ( ۳- ۳ ) نمونه‌های از تابع توزیع نرمال گوس مشاهده می‌شود. در این شکل محور قائم بیانگر احتمال و محور افقی مکان است. در صورتی که تابع توزیع گوس به صورتی نوشته شود که محور قائم بیانگر میزان ظرفیت گرمایی و محور افقی بیانگر تغییرات دما باشد، آن گاه تابعی پیدا شده است که به کمک آن می‌توان

ظرفیت گرمایی محسوس را اصلاح کرد و اثر گرمای نهان را در آن اعمال کرد. در صورتی که تنها اثر گرمای محسوس مد نظر باشد ظرفیت گرمایی به شکل رابطه (۷-۳) است.

$$C_{p,eff} = C_{p0} \quad (۷-۳)$$

که در آن  $C_{p0}$  بیانگر ظرفیت گرمایی محسوس است. با اضافه کردن اثر گرمای نهان به کمک تابع توزیع گوس، ظرفیت گرمایی با رابطه (۸-۳) اصلاح می شود. در شکل ۲-۴ طرحواره‌ای از  $C_{p,eff}$  مشاهده می شود.

$$C_{p,eff} = C_{p0} + a \exp \left[ - \left( \frac{T - T_m}{\sqrt{2}\beta} \right)^2 \right] \quad (۸-۳)$$

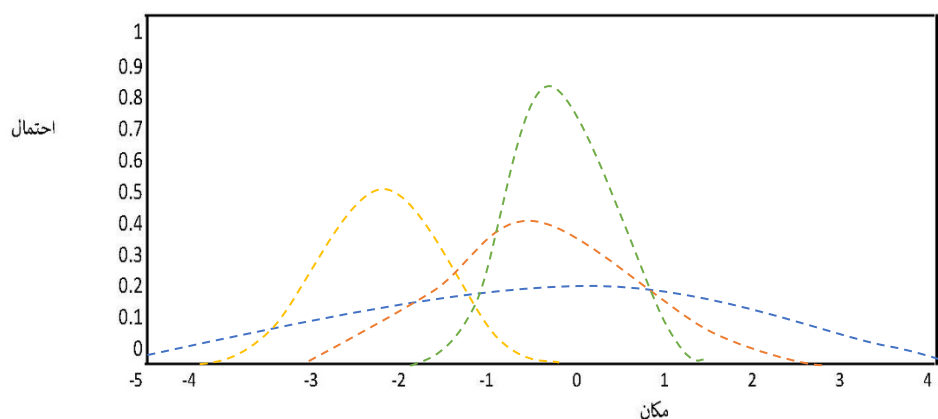
در رابطه (۸-۳)،  $\beta$  پارامتری است که بیانگر بازه دمایی ناحیه خمیری شکل در فرآیند ذوب و انجماد است. به دلیل اینکه تابع تعریف شده برای  $C_{p0}$ ، باید علاوه بر اثر گرمای نهان، اثر پارامتر  $\beta$  را نیز در خود جای دهد، تابع توزیع نرمال گوس به خوبی می تواند این نقش را ایفا کند.

از آنجا که ظرفیت گرمای نهان برابر با سطح زیر نمودار است، مقدار آن از رابطه (۹-۳) به دست می آید.

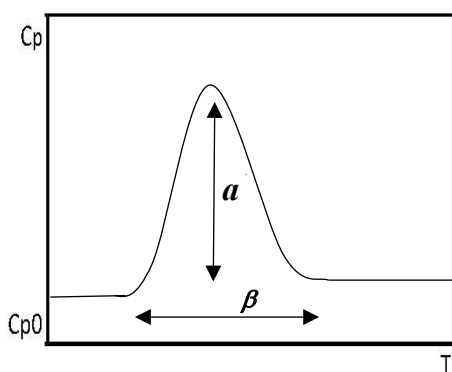
$$L_f = \int_{-\infty}^{+\infty} a \exp \left[ - \left( \frac{T - T_m}{\sqrt{2}\beta} \right)^2 \right] dT \quad (۹-۳)$$

از طرفی مقدار این انتگرال همان طور که رابطه (۱۰-۳) نشان می دهد، محاسبه شده است.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} a \exp \left[ - \left( \frac{T - T_m}{\sqrt{2}\beta} \right)^2 \right] dT = a\beta\sqrt{2\pi} \quad (۱۰-۳)$$



شکل (۳-۳) تابع توزیع نرمال گوس



شکل (۳-۴) طرح‌واره‌ای از ظرفیت گرمایی اصلاح شده

پس از دو رابطه اخیر مقدار  $a$  به دست می‌آید.

$$a = \frac{L_f}{\beta\sqrt{2\pi}} \quad (۳-۱۱)$$

بنابراین تابع ظرفیت گرمایی به شکل رابطه (۳-۱۲) اصلاح می‌شود.

$$C_{p,eff} = C_{p0} + \frac{L_f}{\beta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\left(\frac{T-T_m}{\sqrt{2}\beta}\right)^2\right] \quad (۳-۱۲)$$

۲-۳-۱-۲. استخراج معادله حاکم

از بخش قبل تابع  $C_p$  اصلاح شده به دست آمد. معادله هدایت یک بعدی نیز از رابطه (۲-۱۳) به دست می‌آید.

$$\frac{\rho C_{p,eff}}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3-13)$$

با جایگذاری  $C_{p,eff}$  در معادله بالا، معادله حاکم بر مواد تغییرفازدهنده به صورت رابطه (3-14) می‌شود.

$$\frac{\rho}{k} \frac{\partial \left( \left( C_{p0} + \frac{L_f}{\beta \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \left( \frac{T - T_m}{\sqrt{2}\beta} \right)^2 \right] \right) T \right)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3-14)$$

به شکل ساده‌تر می‌توان معادله حاکم بر مواد تغییرفازدهنده را به صورت رابطه (3-15) نوشت.

$$\frac{1}{\alpha_0} \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho L_f}{k \beta \sqrt{2\pi}} \frac{\partial \left( \exp \left[ \frac{T - T_m}{\sqrt{2}\beta} \right]^2 T \right)}{\partial t} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad (3-15)$$

در معادله (3-15)،  $\alpha$  ضریب نفوذ است و با رابطه (3-16) تعریف می‌شود.

$$\alpha_0 = \frac{k}{\rho C_{p0}} \quad (3-16)$$

### ۳-۱-۳-۳. مزیت معادله حاکم جدید

شاید این سؤال مطرح شود که «مزیت معادله حاکم جدیدی که نگارنده این تحقیق از آن استفاده کرده است،

نسبت به معادلات مرسوم چیست؟» در این بخش، به بیان دلایل استفاده از این معادله حاکم می‌پردازیم.

شکل ساده معادله: معادله حاکم به دست آمده دارای شکل ساده‌ای است. همچنین با اصلاحی که بر روی  $C_p$

صورت گرفت، تابعی یک ضابطه‌ای به دست آمد که دارای ارزش زیادی است. چرا که معادله‌های حاصل شده

برخی از مشکلات گذشته برای حل معادلات، به ویژه معادلات چند ضابطه‌ای را ندارد.

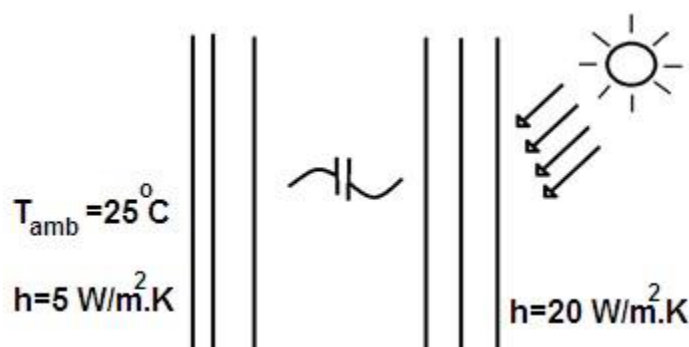
شکل ساده معادله حاکم ارائه شده و یک ضابطه‌ای بودن آن می‌تواند انگیزه‌ای برای فکر کردن به یک حل

تحلیلی ساده برای حل مسائل تغییر فاز باشد.

اعمال اثر ناحیه خمیری: یکی از ویژگی‌های برخی مواد تغییر فاز داده شده داشتن تغییر حالت جامد - جامد یا ناحیه خمیری است. در تحقیقات صورت گرفته در زمینه مواد تغییر فاز داده شده، به دلیل ارتباط با معادلات حاکمی که اکثراً قادر نبودند این اثر را در خود جای دهند، کمتر در مورد ناحیه خمیری بحث شده است. اما در استخراج معادله حاکم جدید، اثر ناحیه خمیری به خوبی اعمال شده است.

### ۳-۴. شرایط حاکم

برای حل مسئله هدایت یک بعدی، نیاز به داشتن دو شرط مرزی است. در این تحقیق شرایط مرزی سمت چپ (هوای اتاق) از نوع انتقال حرارت جابه جایی است. ضریب انتقال حرارت جابه جایی روی سطح داخلی دیوار  $5 \text{ W/m}^2.\text{K}$  و دمای اتاق  $25^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی سمت راست (هوای محیط خارج) از نوع انتقال حرارت جابه جایی و تابش توأمان است. ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای سطح خارجی دیوار نیز  $20 \text{ W/m}^2.\text{K}$  است و دمای هوای خارج بر اساس تابع تغییرات دمایی اقلیم مورد پژوهش تغییر می کند. در شکل ۲-۵ طرحواره ای از هندسه مسئله مورد بحث مشاهده می شود.



شکل (۳-۵) طرحواره مسئله هدایت یک بعدی

به کمک اطلاعات آب و هوایی چهار اقلیم مختلف ایران، برای هر یک از روزهای سال و هر ساعت از شبانه روز به طور جداگانه یک تابع دمایی و یک تابع شار تابشی خورشیدی ارائه شده است. قبل از معرفی توابع دمایی و تابشی استفاده شده در این تحقیق، ابتدا هندسه جدار نمونه مورد بررسی معرفی می شود.

### ۳-۴-۱. جدار نمونه

در این تحقیق برای بررسی اثر عایق تغییرفازدهنده، از جدار استاندارد  $W 441$  استفاده شد [۴۵].

در جدول ۳-۲ جنس و ضخامت و در جدول ۳-۳ خواص مواد به کار رفته در این جدار نشان داده شده است. عایق استفاده شده در لایه بندی این جدار، از نوع عایق‌های تغییرفازدهنده است. در این تحقیق هر جا که ماده تغییر فازدهنده‌ای مورد تحلیل قرار گرفته است، منظور ماده تغییرفازدهنده‌ای با خواص ذکر شده در جداول ۳-۲ و ۳-۳ است و علاوه بر آن گرمای نهانی برابر با  $200 \text{ kJ / kg}$  دارد. همچنین، پارامتر  $\beta$  نیز  $0/1$  در نظر گرفته شده است. البته ذکر این نکته ضروری است که در برخی از بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق خواص ذکر شده تغییر کرده اند که در جای خود به این تغییرات اشاره گردیده است.

جدول ۳-۲. جنس و ضخامت مواد به کار رفته در جدار نمونه

لایه‌بندی جدار از بیرون به داخل					
آجرنما	ملات سیمان	عایق	آجر	گچ	
۳	۲	۱	۲۰	۳	ضخامت (cm)
جدول ۳-۳. خواص ترموفیزیکی مواد به کار رفته در جدار نمونه					
جنس	$k (W / m.k)$	$\rho (kg / m^3)$	$C_p (J / kg.k)$		
آجرنما	۰/۷۲	۱۹۲۰	۸۳۵		
ملات سیمان	۰/۷۲	۱۸۶۰	۷۸۰		
عایق تغییرفازدهنده	۰/۱۹	۱۱۵۰	۱۷۰۰		
آجر	۰/۵۰	۱۸۰۰	۹۵۰		
گچ	۰/۲۲	۱۶۸۰	۱۰۸۵		

### ۳-۴-۲. تابع تغییرات دما

همان طور که گفته شد، در این تحقیق اطلاعات آب و هوایی چهار اقلیم مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفته است. تبریز به عنوان نماینده شرایط آب و هوایی سرد، یزد به عنوان نماینده شرایط آب و هوایی کویری،

بندرعباس به عنوان نماینده شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب و تهران به عنوان نماینده اقلیم معتدل به منظور بررسی اثر به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در دیوار خارجی ساختمان در شرایط آب و هوایی مختلف ایران انتخاب شد. همچنین در این تحقیق، داده‌های آب و هوایی نقطه به نقطه اقلیم‌های مورد بررسی، به تابع‌های چند ضابطه‌ای با حداکثر خطای ۰/۱ درجه سلسیوس برای دما و یک وات بر مترمربع برای شار تابشی خورشیدی، تبدیل شدند که می‌تواند به عنوان ابزاری مناسب برای محققان در زمینه‌های مرتبط مورد استفاده قرار گیرد. توابع دمایی تخمین زده شده برای هر اقلیم در پیوست (الف) آمده است.

### ۳-۴-۳. تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی

برای محاسبه میزان شار تابشی خورشیدی بر جدار نیاز به آشنایی با روابط حاکم بر سازوکار تابش است. شدت تابش خورشید روی یک سطح افقی در خارج از اتمسفر ( $I_{oh}$ ) را می‌توان از رابطه (۳-۱۷) به دست آورد [۴۶] و [۴۷]

$$I_{oh} = I_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] \cos(\theta_z) \quad (3-17)$$

در رابطه (۳-۱۷)،  $I_{sc}$  ثابت خورشیدی و مقدار آن  $1352 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$  است.  $N$  نیز شماره روز برای سال

میلادی است. همچنین  $\theta_z$  زاویه سمت الرأس است و با رابطه (۳-۱۸) تعیین می‌شود [۴۷].

$$\cos(\theta_z) = \cos \delta \cos \varphi \cos w + \sin \delta \sin \varphi \quad (3-18)$$

در رابطه (۳-۱۸)،  $\delta$  زاویه انحراف است که از رابطه (۳-۱۹) محاسبه می‌گردد [۴۷]

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284+N}{365} \right) \quad (3-19)$$

$\varphi$  عرض جغرافیایی و  $w$  زاویه ساعت (درجه) است. زاویه ساعت برای ساعت ۱۲ ظهر، صفر در نظر گرفته می‌شود. به ازای هر ساعت بعد از ظهر ۱۵ درجه به مقدار  $w$  اضافه می‌شود و به ازای هر ساعت قبل از ظهر



۱۵ درجه از آن کم می‌شود. برای مثال، برای ساعت ۱۴ زاویه انحراف ۳۰ درجه و برای ساعت ۸ زاویه انحراف ۶۰- درجه است.  $I_h$  شدت تابش خورشیدی روی صفحه افقی است که با  $k_T$  - که ضریب صافی نام دارد- به  $I_{oh}$ ، شدت تابش خورشید روی یک سطح افقی در خارج از اتمسفر مرتبط می‌شود. رابطه (۲۰۰۲) برای اعمال اثر ضریب صافی تعریف شده است [۴۷].

$$I_h = k_T I_{oh} \quad (۲۰-۳)$$

$$k_T = \left[ a + b \cos \left( \frac{2\pi}{24} (t - 12) \right) \right] \bar{k}_T \quad (۲۱-۳)$$

$$a = 0.409 + 0.5061 \sin(w_s - 60) \quad (۲۲-۳)$$

$$b = 0.6607 - 0.4767 \sin(w_s - 60) \quad (۲۳-۳)$$

در روابط بالا  $t$  ساعت خورشیدی (ظهر خورشیدی برابر با ساعت ۱۲)،  $\bar{k}_T$  ضریب صافی ماهیانه و  $W_s$  زاویه غروب آفتاب است که با رابطه (۲۴-۳) قابل محاسبه است [۴۷].

$$W_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (۲۴-۳)$$

بهادری نژاد و میرحسینی [۴۸] ضریب صافی ماهیانه را برای شهرهای مختلف ایران بدست آوردند. در جدول ۳-۴ ضرایب صافی مربوط به اقلیم‌های مورد بررسی در این تحقیق، آمده است.

از آنجا که شدت تابش محاسبه شده برای سطح افقی است، احتیاج به رابطه‌ای برای محاسبه شدت تابش بر روی سطح غیر افقی است. در رابطه (۲۵-۳)  $I_j$  کل شدت تابش بر روی سطح غیر افقی است [۴۹].

$$I_j = R_{bj} I_{bh} + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) I_{dh} + \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \rho_{ge} I_h \quad (۲۴-۳)$$

جدول ۳-۴. ضریب صافی ماهیانه [۴۸]

---

#### ضریب صافی ماهیانه

---

اقلیم	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
بندر عباس	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۵
تبریز	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۴	۰/۵۷	۰/۴۷
تهران	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵۸	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۶۵	۰/۶۱	۰/۵۵	۰/۵۰
یزد	۰/۶۰	۰/۶۲	۰/۵۹	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۷۴	۰/۷۳	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۷۴	۰/۶۵	۰/۶۴

در رابطه (۳-۲۵)،  $I_{dh}$  شدت تابش پراکنده روی صفحه افقی است و از رابطه (۳-۲۶) محاسبه می شود [۴۹]

$$\frac{I_{dh}}{I_h} = \begin{cases} 1 - 0.249k_T & k_T < 0.35 \\ 1.557 - 1.84k_T & 0.35 < k_T < 0.75 \\ 0.177 & k_T > 0.75 \end{cases} \quad (3-26)$$

همچنین،  $I_{bh}$  شدت تابش مستقیم روی صفحه افقی از رابطه (۲-۲۷) قابل محاسبه است [۴۹]

$$I_{bh} = I_h - I_{dh} \quad (3-27)$$

$\rho_{bh}$  ضریب بازتاب زمین، از جدول ۳-۵ به دست می آید [۴۶]. نحوه محاسبه ضریب  $R_{bj}$  نیز در رابطه (۳-۲۸) آمده است [۴۹].

$$R_{bj} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3-28)$$

$\cos \theta$  موجود در رابطه (۳-۲۸)، از طریق رابطه (۳-۲۹) محاسبه می شود [۴۹]

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \varphi \sin \beta - \sin \delta \sin \varphi \sin \gamma + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos w + \cos \delta \cos \varphi \cos \gamma \cos w + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin w \quad (3-29)$$

در رابطه (۲-۲۹)،  $\beta$  زاویه سطح است که برای سطح قائمی مانند دیوار، برابر ۹۰ درجه است.  $\gamma$  پارامتر

تعیین کننده جهت سطح نیز از جدول ۳-۶ بر اساس جهت های جغرافیایی به دست می آید [۴۹].

جدول ۳-۵. ضریب بازتاب پوشش‌های به کار رفته در محوطه ساختمان [۴۶]

پوشش محوطه ساختمان	ضریب صدور تابش
آسفالت	۰/۸۹
خاک	۰/۹۵
شن و ماسه	۰/۹۰
چمن	۰/۹۴

جدول ۳-۶. پارامتر تعیین‌کننده جهت سطح [۴۹]

جهت جغرافیایی	شمال	شمال شرقی	شرق	جنوب شرقی	جنوب	جنوب غربی	غرب	شمال غربی
۷	۱۸۰	- ۱۳۵	- ۹۰	- ۴۵	۰	۴۵	۹۰	۱۳۵

از آنجا که نمای جدار نمونه آجر است، برای اعمال اثر شار تابشی وارد شده به دیوار در شرایط مرزی، باید ضریب جذب تابشی آجر نیز در نظر گرفته شود. ضریب جذب آجر از مرجع [۵۰]، ۰/۶ به دست می‌آید. بنابراین، پس از به دست آمدن مقدار کل شار تابشی، ضریب جذب آجر در آن ضرب می‌شود؛ سپس به عنوان یکی از شرایط مرزی سمت خارجی جدار، در کد اعمال می‌شود.

### ۳-۵. حل تحلیلی

ارائه حل تحلیلی برای معادله دیفرانسیل کاربردی -مثل معادله حاکم بر مواد تغییرافازدهنده- بسیار ارزشمند است. یکی از اقدامات صورت‌گرفته در این تحقیق، ارائه یک حل تحلیلی برای معادله حاکم بر مواد تغییرافازدهنده در ناحیه خمیری است. برای این کار از روش تحلیلی-تقریبی پراشیدگی هموتوپی استفاده گردید و به کمک ترفندهای ساده‌سازی، حلی مناسب برای این ناحیه حاصل شد. در ابتدا، روش پراشیدگی هموتوپی به طور مختصر معرفی خواهد شد؛ سپس روند حل صورت گرفته تشریح خواهد شد.

### ۳-۵-۱. معرفی روش پراشیدگی هموتویی

در دهه‌های اخیر روش‌های پراشیدگی بسیاری برای حل معادلات غیرخطی ابداع شده است. اما هر کدام محدودیت‌هایی دارد. در ادامه، روش‌های جدیدی مانند رویکرد پارامتر مصنوعی و رویکرد معکوس را لئو، روش تحلیل هموتویی را لئو، روش تکرار تغییراتی، روش‌های پراشیدگی خطی و پراشیدگی پارامتری و روش بسط سرراست بهبود یافته را هی ارائه کردند. هی به کمک روش‌های لئو و لئو، یک روش پراشیدگی جدید با نام روش پراشیدگی هموتویی را در سال ۱۹۹۸ ارائه کرد. این روش نیازی به وجود پارامتر کوچک در مسئله ندارد و در حالی که مزیت روش‌های پراشیدگی کلاسیک را دارد، فاقد محدودیت‌های این روش‌ها نیز هست [۵۱-۶۲].

در روش پراشیدگی هموتویی ابتدا یک هموتویی برای معادله مربوطه تشکیل می‌شود. برای این کار، ابتدا معادله دیفرانسیل را به سه بخش خطی  $M(u)$ ، غیرخطی  $N(u)$  و غیر همگن  $f(r)$  تقسیم می‌کنند. بنابراین هموتویی به شکل رابطه (۳-۳۰) تعریف می‌شود و  $P$  پارامتر درونی هموتویی است که از صفر تا یک تغییر می‌کند تا معادله از حالت خطی به حالت غیرخطی موجود تغییر نماید.

$$H(v, p) = (1 - P)[M(v) - M(y_0)] + p[M(v) + N(v) - f(r)] \quad (3-30)$$

به دلیل صفر قرار دادن هموتویی و در نظر گرفتن پارامتر درونی هموتویی به عنوان پارامتر کوچک در حل پراشیدگی، این روش پراشیدگی هموتویی نامیده می‌شود.

فرض می‌شود جواب نهایی معادله دیفرانسیل به صورت یک سری توانی بر حسب توان‌های پارامتر درونی معادله هموتویی، مانند رابطه (۳-۳۱) است.

$$V = v_0 + P v_1 + P v_2 + P v_3 + \dots \quad (3-31)$$

با استفاده از تکنیک پراشیدگی، با مساوی قرار دادن ضرایب توان‌های مشابه، تعدادی معادله به دست می‌آید. با در نظر گرفتن دقت مورد نظر برای حل معادلات خطی به دست آمده، جواب تحلیلی نهایی همانند رابطه (۳-۳۲) با میل دادن  $P$  به سمت یک، به دست می‌آید.

$$U = \lim_{P \rightarrow 1} V = v_0 + Pv_1 + Pv_2 + Pv_3 + \dots \quad (۳-۳۲)$$

### ۳-۵-۲. حل معادله حاکم از روش پراشیدگی هموتویی

برای حل معادله حاکم این تحقیق از روش پراشیدگی هموتویی، ابتدا نیاز است به بی‌بعدسازی معادله حاکم پرداخته شود. برای این منظور، پارامترهای بی‌بعد به صورت روابط (۳-۳۳) تا (۳-۳۶) تعریف می‌شود.

دمای بی‌بعد:

$$\theta = \frac{T_m - T}{T_m - T_0} \quad (۳-۳۳)$$

مکان بی‌بعد:

$$X = \frac{x}{L} \quad (۳-۳۴)$$

زمان بی‌بعد:

$$\tau = \frac{kt}{\rho L^2 c_{p_0}} \quad (۳-۳۵)$$

پارامتر کوچک بی‌بعد:

$$\varepsilon = \frac{(T_m - T_0) c_{p_0}}{L_f} \quad (۳-۳۶)$$

به کمک پارامترهای بی بعد تعریف شده، به بی بعدسازی معادله حاکم (۳-۱۵) پرداخته می شود و معادله (۳۷-۳) حاصل می شود.

$$\frac{T_0 - T_m}{L^2} + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{T_m - T_0}{\sqrt{2\pi\epsilon\beta}} \exp \left[ - (T_m - T_0)^2 \left( \frac{\theta}{\beta\sqrt{2}} \right)^2 \right] \quad (۳۷-۳)$$

$$\frac{(T_0 - T_m)}{L^2} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{(T_0 - T_m)}{L^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0$$

بنابراین، شکل بی بعد معادله حاکم در رابطه (۳۸-۳) حاصل می شود.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{T_m - T_0}{\epsilon\beta\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \left( \frac{T_m - T_0}{\beta\sqrt{2}} \theta \right)^2 \right] \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (۳۸-۳)$$

برای حل معادله (۳۸-۳) از روش پراشیدگی هموتوبی باید ابتدا جمله نمایی موجود در معادله، به کمک بسط مکلورن، به شکل یک تابع چند جمله ای درآید. بسط مک لورن در رابطه (۳۹-۳) آمده است.

$$F(x) = f(0) + f'(0)\frac{x}{1} + f''(0)\frac{x^2}{2} + f'''(0)\frac{x^3}{6} + \dots \quad (۳۹-۳)$$

با نوشتن بسط مکلورن تا چهار جمله اول، جمله نمایی موجود در معادله (۳۹-۳) به صورت رابطه (۴۰-۳) تقریب زده می شود.

$$\exp \left[ - \left( \frac{T_m - T_0}{\beta\sqrt{2}} \theta \right)^2 \right] \approx 1 - \left( \frac{T_m - T_0}{\beta\sqrt{2}} \theta \right)^2 \quad (۴۰-۳)$$

تقریب استفاده شده باعث می شود جوابی که در نهایت به دست می آید تنها برای ناحیه خمیری معتبر باشد. چرا که تابع نمایی در دماهای قبل و بعد از ناحیه خمیری به مقداری ثابت میل می کند؛ در حالی که تقریب استفاده شده یک سهمی است و در دماهای قبل و بعد از ناحیه خمیری به منفی بی نهایت میل می کند. در انتها، معادله حاکم به شکل رابطه (۴۱-۳) درمی آید.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \left( \left( 1 - \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2}} \theta \right)^2 \right) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (41-3)$$

$$\left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2}} \theta \right)^2 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0 \quad (42-3)$$

اکنون که معادله حاکم بی‌بعدسازی شد با نوشتن هموتویی و مساوی صفر قرار دادن آن در رابطه (43-3)،

ادامه حل به شکل زیر خواهد بود.

$$H(v, p) = (1 - P) \left[ \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial u_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} \right] + \quad (43-3)$$

$$P \left[ \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \theta \right)^2 \frac{\partial \theta}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \right] = 0$$

$$\theta = \theta_0 + P \theta_1 + P^2 \theta_2$$

$$\left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} + P \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + P^2 \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} - P \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} - P^2 \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial u_0}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} P \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} -$$

$$P^2 \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + P \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + P^2 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + P \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial u_0}{\partial \tau} - P \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \quad (43-3)$$

$$P \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} + P^2 \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - P \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} -$$

$$2P^2 \theta_0 \theta_1 \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} -$$

$$\begin{aligned}
& P^2 \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - P \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} - P^2 \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = 0 \\
& \left[ \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial u_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} \right] + \\
& P \left[ \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} + \right. \\
& \left. \frac{\partial u_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - P \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} \right] + \\
& P^2 \left[ \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \right. \\
& \left. \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - 2\theta_0 \theta_1 \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} \right] = 0
\end{aligned} \tag{۴۵-۳}$$

$$\left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - 2\theta_0 \theta_1 \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = 0
\tag{۴۶-۳}$$

$$\begin{aligned}
& P^0 \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial u_0}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} = 0 \\
& P^2 P^0 \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} + \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial u_0}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} + \\
& \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = 0 \tag{۴۸-۳}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& P^2 : \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_2}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial x^2} - \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} + \left( 1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \\
& 2\theta_0 \theta_1 \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \frac{\partial \theta_0}{\partial \tau} - \left( \frac{T_m - T_0}{\varepsilon \beta \sqrt{2\pi}} \right) \left( \frac{T_m - T_0}{\beta \sqrt{2\pi}} \right)^2 \theta_0^2 \frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} - \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial x^2} = 0
\end{aligned} \tag{۴۹-۳}$$

همان طور که مشخص است باید یک حدس اولیه برای جواب داشت که در اینجا برای سهولت آن را مقداری

ثابت در نظر می‌گیریم. پس  $u_0$  مقداری ثابت است و مشتقات آن برابر صفر می‌شود. بنابراین معادله (۴۷-۳)

به شکل معادله (۵۰-۳) ساده می‌شود.



$$\left(1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon\beta\sqrt{2\pi}}\right) \frac{\partial\theta_0}{\partial\tau} - \frac{\partial^2\theta_0}{\partial x^2} = 0 \quad (50-3)$$

این معادله با روش تفکیک متغیرها با در نظر گرفتن شرایط مرزی دما ثابت و یک شرط اولیه ثابت حل می‌شود و جواب آن با شرایط اعمال شده به شکل رابطه (51-2) به دست می‌آید.

(51-3)

$$\theta_0(X, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{(\theta_R - 1)\cos(n\pi) + \theta_1 - 1}{2n\pi} \right) \exp \left( \frac{-(n\pi)^2}{\left(1 + \frac{T_m - T_0}{\varepsilon\beta\sqrt{2\pi}}\right)} \tau \right) \sin(n\pi X) + (\theta_R - \theta_1)X + \theta_1$$

$$\theta(0, \tau) = \theta_1$$

$$\theta(1, \tau) = \theta_r$$

$$\theta(X, 0) = 1$$

همان طور که پیش‌بینی می‌شد، جواب به صورت سری به دست آمد. برای ادامه حل، باید خطای قطع سری را تا چند جمله پذیرفت. اکنون با به دست آمدن  $\theta_0$  می‌توان معادله (48-3) را حل کرد. به دلیل تعدد جملات غیر همگن این معادله، از ارائه روند حل که طولانی شده است و جواب نهایی  $\theta_1$  خودداری می‌شود. با توجه به اینکه  $\theta_1$  شامل تعداد زیادی جمله است، عملاً حل معادله (49-3) غیر ممکن به نظر می‌رسد. پس با قرار دادن مقدار  $P$  برابر یک، در معادله (44-3) جواب نهایی به شکل رابطه (52-3) به دست می‌آید.

$$\theta = \theta_0 + P\theta_1 \quad (52-3)$$

از آنجا که تقریب استفاده شده در رابطه (40-3)، برای محدوده خارج از ناحیه خمیری، با خطای شایان توجهی همراه است، حل تحلیلی به دست آمده دقت لازم را نخواهد داشت و با تعمیم دادن حل به دست آمده برای یک لایه ماده تغییرافزدهنده، نمی‌توان از آن برای حل مسئله انتقال حرارت یک بعدی جدار چند لایه استفاده کرد. از سوی دیگر، استفاده از تقریب‌های با دقت بیشتر در رابطه (40-3)، به قدری تعداد جملات معادلات بعدی را زیاد می‌کند که عملاً حل تحلیلی را غیرممکن می‌سازد. بنابراین با وجود تلاش‌های

صورت گرفته برای حل تحلیلی معادله حاکم، در ادامه این تحقیق از روش‌های عددی برای حل مسائل مورد نظر استفاده شده است.

### ۳-۶. حل عددی

برای مدل سازی انتقال حرارت یک بعدی از جدار خارجی ساختمان با شرایط ذکر شده در ابتدای فصل، از کد عددی با رویکرد تفاضل محدود ضمنی استفاده شده است. این کد برای حل یک مسئله هدایت یک بعدی نوشته شده است که می تواند یک جدار چند لایه را مورد تحلیل قرار دهد. هر کدام از لایه های این جدار می تواند قابلیت تغییر فاز داشته باشد. رسانش گرمایی، چگالی، ظرفیت گرمایی محسوس و ضخامت لایه از اطلاعات مورد نیاز هر لایه است. گرمای نهان، دمای ذوب و بازه دمایی ناحیه خمیری نیز باید برای لایه های تغییر فاز دهنده تعریف شود. شرایط مرزی طرفین جدار نیز در ابتدای فصل معرفی شدند و شماتیکی از آن در شکل ۲-۵ ارائه شد. همان طور که گفته شد، در سمت راست جدار انتقال حرارت جابه جایی و تابشی اعمال شده است. بنابراین تابع دمای هوای خارج و تابع شار تابشی خورشیدی نیز از ورودی های مورد نیاز این کد است که حاوی اطلاعاتی شامل شماره روز مورد مطالعه، عرض جغرافیایی اقلیم، زاویه سطح، جهت دیوار، ضریب تابش سطح اطراف و... است.

### ۳-۶-۱. گسسته سازی

در این قسمت نحوه گسسته سازی معادله حاکم ارائه شده است. در ادامه، گسسته سازی معادله حاکم تا رسیدن به ضرایب معادله انفصالی به صورت قدم به قدم آورده شده است.

شکل ساده سازی شده معادله حاکم به صورت رابطه (۳-۵۳) است.

$$\left(\frac{1}{\alpha 0} + P\right) \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

$$\left(\frac{1}{\alpha 0} + P\right) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} - \left[ f \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^{n+1} + (1-f) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^n \right] = 0 \quad (\Delta 3-3)$$

$$\left(\frac{1}{\alpha 0} + P\right) \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} - \left[ f \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^{n+1} + (1-f) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_i^n \right] = 0$$

$$\left(\frac{1}{\alpha 0} + P\right) \frac{T_i^{n+1}}{\Delta t} - \left(\frac{1}{\alpha 0} + P\right) T_i^n - \frac{f}{\Delta x^2} T_{i+1}^{n+1} + \frac{f}{\Delta x^2} T_{i-1}^{n+1} - \frac{1-f}{\Delta x^2} T_{i+1}^n + \quad (\Delta 4-3)$$

$$\frac{2(1-f)}{\Delta x^2} T_i^n - \frac{1-f}{\Delta x^2} T_{i+1}^n = 0 \quad (\Delta 5-3)$$

ضرایب نهایی در روابط (3-56) تا (3-59) آمده است.

$$A_p(i) = \left( \frac{\frac{1}{\alpha 0} + P}{\Delta t} + \frac{2f}{\Delta x^2} \right) T_{i+1}^{n+1} \quad (\Delta 6-3)$$

$$a_s(i) = \left( \frac{f}{\Delta x^2} \right) T_{i+1}^{n+1} \quad (\Delta 7-3)$$

$$a_w(i) = \left( \frac{f}{\Delta x^2} \right) T_{i-1}^{n+1} \quad (\Delta 8-3)$$

$$S(i) = \left( \frac{\frac{1}{\alpha 0} + P}{\Delta t} \right) T_i^n + \frac{1-f}{\Delta x^2} T_{i+1}^n - \frac{2(1-f)}{\Delta x^2} T_i^n + \frac{1-f}{\Delta x^2} T_{i-1}^n \quad (\Delta 9-3)$$

در نهایت به کمک الگوریتم توماسه معادله مذکور حل می شود.

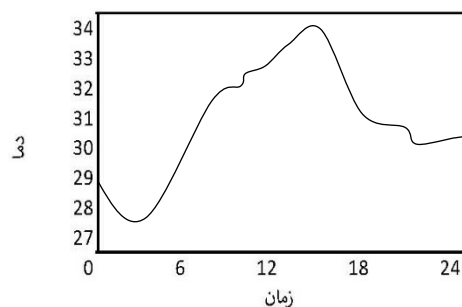
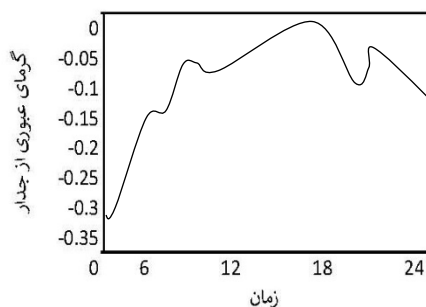
### ۳-۶-۲. اعتبارسنجی

برای بررسی صحت کد عددی نوشته شده، به مقایسه نتایج با تحقیق عددی ژوو و همکارانش [۶۳] پرداخته شده است. ژوو و همکارانش به مدل سازی یک فضای نمونه در شرایط آب و هوایی پکن پرداختند. فضای مدل سازی شده در تحقیق آنها دارای یک جدار دولایه است که لایه درونی آن را ماده تغییر فازدهنده تشکیل می دهد. ضخامت و خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده، در جدول ۲-۷ و تابع تغییرات دمای هوای بیرون،

جدول ۳-۷. ضخامت و خواص ترموفیزیکی مواد استفاده شده در تحقیق ژوو و همکاران [۶۳]

خواص	آجر	PCM
$k (W / m .k)$	۰/۵۸	۰/۲۰
$\rho (kg / m^3)$	۱۴۰۰	۸۵۰
$C_p (J / kg .k)$	۱۰۵۰	۱۰۰۰
$L_f (kJ / kg)$	-	۱۶۰
$T_m (^\circ C)$	-	۲۶
$\beta (^\circ C)$	-	۰/۱۶
ضخامت	۰/۱۱۵	۰/۰۱۰

در شکل ۳-۶ - الف نشان داده شده است. علاقه مندان برای اطلاع از سایر شرایط حاکم بر مدل سازی ژوو و همکارانش می توانند به مرجع [۶۳] مراجعه نمایند. شکل ۲-۶ ب نمودار تغییرات میزان گرمای عبوری از جدار در کل ساعات شبانه روز دهم جولای را در شرایط آب و هوایی پکن نشان می دهد. نتایج حاکی از دقت خوب مدل سازی صورت گرفته در قیاس با مدل سازی ژوو و همکارانش [۶۳] است.



شکل ( ۳- ۶ ) الف: منبع تغییرات دمای هوای بیرون در تحقیق ژوو و همکاران [۶۳]

ب: اعتبارسنجی از طریق مقایسه تغییرات زمانی گرمای عبوری از جدار با نتایج ژوو و همکارانش [۶۳]

## فصل ۴:

### یافته‌های پژوهش

## ۴-۱. مقدمه

چنانکه در فصل قبل گفته شد، در این تحقیق سعی شده است عملکرد مواد تغییرفازدهنده به عنوان ماده ذخیره‌ساز انرژی در جدار خارجی ساختمان مورد بررسی قرار گیرد. شرایط حاکم بر مسئله مورد بررسی در فصل دوم تشریح شد. در این فصل، ابتدا به بررسی نحوه عملکرد مواد تغییرفازدهنده با تغییر در برخی خواص مهم آنها پرداخته شده است؛ سپس اثر این مواد در کاهش اتلافات حرارتی ساختمان مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در نهایت ضرایبی جهت اصلاح تعریف اینرسی حرارتی جدار در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ارائه گردیده است.

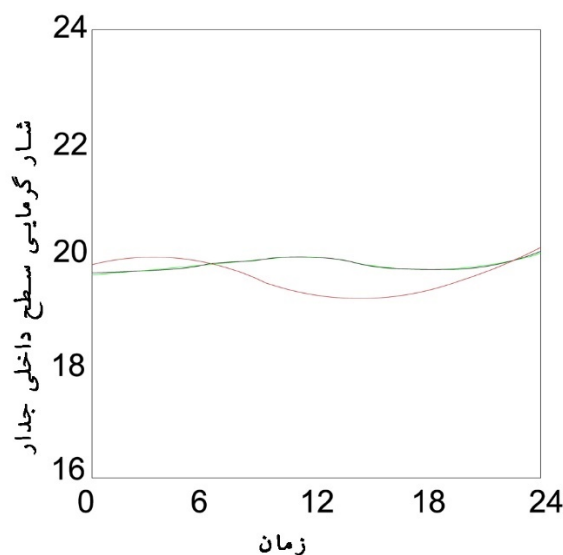
## ۴-۲ تحلیل و بررسی خواص مواد تغییر فاز دهنده

برای تحلیل و بررسی اثر مواد تغییرفازدهنده به عنوان یک لایه ذخیره‌ساز انرژی در جدار خارجی ساختمان، در ابتدا باید آثار تغییر خواص مواد تغییرفازدهنده، در رفتار حرارتی آنها تحت شرایط حاکم بررسی شود. برای این منظور شرایط و حالات مختلفی در نظر گرفته شد. بررسی اثر تغییر در خواص ترموفیزیکی ماده تغییرفازدهنده، از جمله چگالی، رسانش گرمایی، ظرفیت گرمایی محسوس، ظرفیت گرمایی نهان، دمای ذوب و بازه دمایی تغییر فاز بخشی از شرایط مورد بررسی در تحقیق حاضر است. بررسی خواص هندسی از جمله ضخامت و محل قرار گرفتن لایه ماده تغییرفازدهنده از دیگر مواردی است که به آن پرداخته شد.

در این قسمت، برخی از نتایج به دست آمده از بررسی‌های صورت گرفته روی جدار نمونه تحت شرایط ذکر شده در فصل دوم ارائه شده است. علاوه بر شرایط ذکر شده، دمای هوای خارج بین ۲۴ تا ۳۵ درجه سلسیوس و شدت تابش خورشیدی حداکثر تا  $600 \text{ W/m}^2$  تغییر می‌کند. با این شرایط، به بررسی اثر تغییرات گرمای نهان، بازه دمایی تغییر فاز و دمای ذوب، بر رفتار مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده است.

#### ۴-۲-۱. گرمای نهان

برای بررسی اثر گرمای نهان ماده تغییرفازدهنده، مقدار این پارامتر بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوژول بر کیلوگرم تغییر داده شد. انتخاب این دامنه تغییرات به این دلیل است که گرمای نهان اکثر مواد تغییرفازدهنده در این محدوده قرار دارد [۷]. در شکل ۴-۱ نحوه تغییرات شار گرمایی در حین عبور از سطح داخلی جدار در طول یک شبانه‌روز نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، استفاده از مواد تغییرفازدهنده با گرمای نهان بیشتر باعث کم شدن دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار می‌شود. استفاده از ماده تغییرفازدهنده با گرمای نهان  $100 \text{ kJ/kg}$  باعث می‌شود شار گرمایی عبوری از جدار بین  $18/8$  تا  $19/6$  وات بر متر مربع تغییر کند. در حالی که این تغییرات با گرمای نهان  $400 \text{ kJ/kg}$  بین  $19/3$  تا  $19/4$  وات بر متر مربع است. بنابراین مشاهده می‌شود تغییرات گرمای نهان در کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی سطح داخلی جدار، چندان چشمگیر نیست. پس انتخاب ماده تغییر فازدهنده در جدار ساختمان برای کاهش نوسانات اتلافی حرارتی، وابستگی زیادی به گرمای نهان آن ماده ندارد.



شکل (۴-۱) اثر گرمای نهان در تغییرات شار گرمایی سطح داخلی جدار

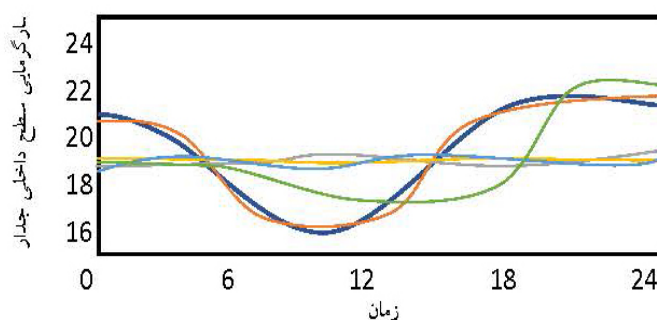


## ۴-۲-۲. بازه دمایی ناحیه خمیری

یکی از پارامترهای مهم در بررسی مواد تغییرفازدهنده بازه دمایی ناحیه خمیری است. در جدول ۴-۱ ارتباط بازه دمایی ناحیه خمیری با پارامتر  $\beta$  نشان داده شده است که در آن،  $\Delta T$  بیانگر بازه دمایی ناحیه خمیری است. همانند گرمای نهان، بازه دمایی تغییر فاز نیز تأثیر چندانی در کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی سطح داخلی جدار ندارد. اما می‌تواند بر کاهش اتلافات حرارتی جدار تأثیرگذار باشد. در شکل (۴-۲ الف) نحوه تغییرات شار گرمایی در حین عبور از سطح داخلی جدار در طول یک شبانه‌روز نشان داده شده است. با زیاد شدن بازه دمایی ناحیه خمیری از ۰/۱ درجه سلسیوس تا ۱۰ درجه سلسیوس دامنه تغییرات شار گرمایی تنها ۰/۵ وات بر مترمربع افزایش می‌یابد. در این شکل نشان داده شده است که نمودار تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار در حالتی که پارامتر ۳ برابر با ۱/۶ باشد حدود ۰/۶ وات بر مترمربع کمتر از حالتی است که پارامتر  $\beta$  برابر با ۰/۱۶ باشد. ممکن است با تغییر در سایر شرایط حاکم بر جدار و تغییرات در خواص مواد تغییرفازدهنده، این میزان کاهش، در سال به عدد شایان توجهی برسد.

جدول ۴-۱. ارتباط بازه دمایی ناحیه خمیری با پارامتر  $\beta$

$\Delta T$	۰/۱	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
$\beta$	۰/۰۱۶	۰/۱۶	۰/۳۲	۰/۴۸	۰/۶۴	۰/۸۰	۰/۹۶	۱/۱۲	۱/۲۸	۱/۴۴	۱/۶۰



(شکل ۴-۲ الف). اثر بازه دمایی ناحیه خمیری ب. اثر دمای ذوب در تغییرات شار گرمایی سطح داخلی جدار

#### ۴-۲-۳. دمای ذوب

در این قسمت به بررسی اهمیت انتخاب ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب مناسب پرداخته شده است.

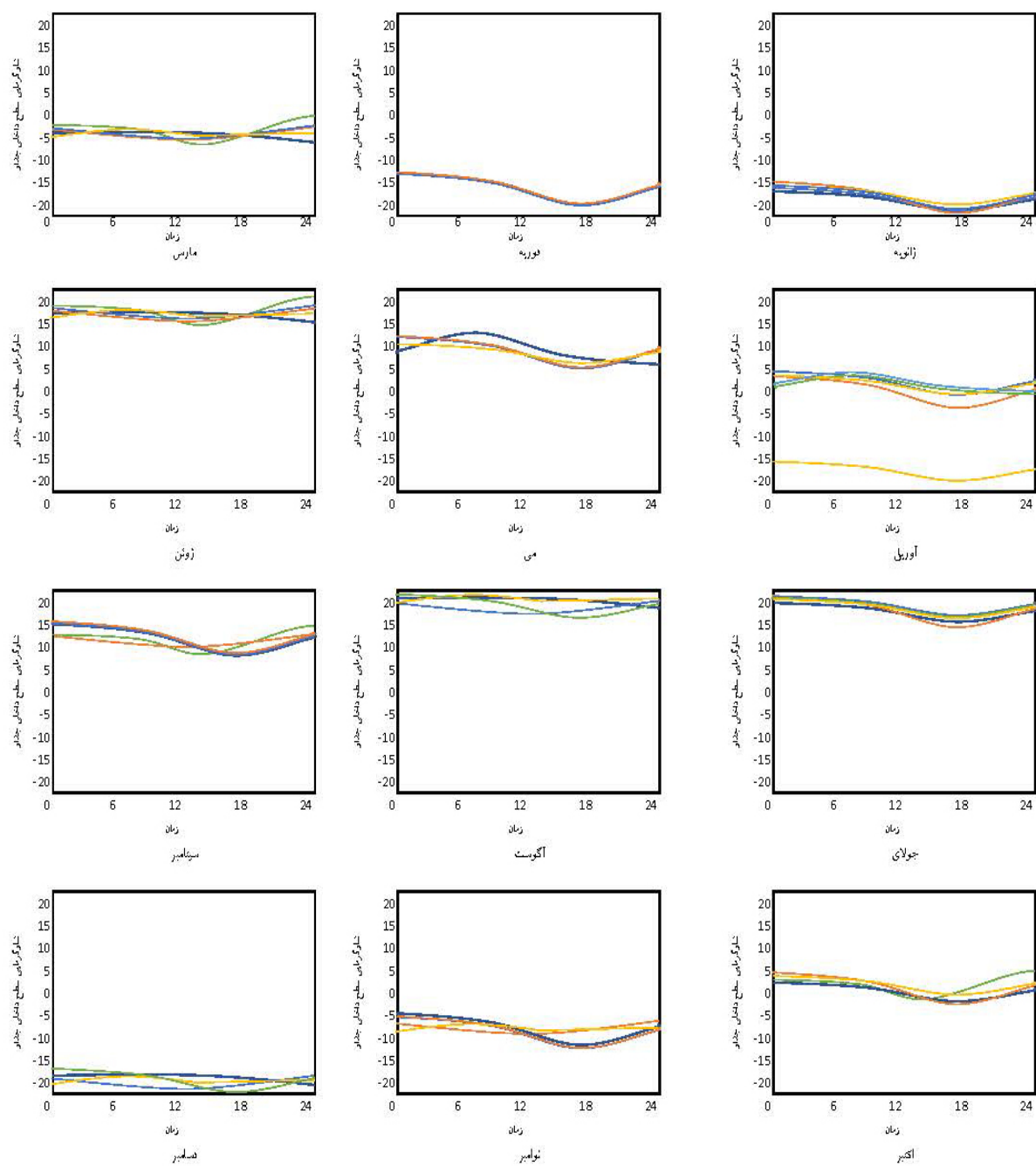
در شکل ۲-۳ نحوه تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخلی جدار در طول یک شبانه روز نشان داده شده است. در این شکل، اثر تغییر دادن دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده بین ۲۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس بر کاهش نوسانات شار گرمایی عبوری از جدار به خوبی مشخص شده است. در صورتی که دمای ذوب ماده تغییرفازدهنده، ۲۰ درجه سلسیوس انتخاب شود، به دلیل شرایط حاکم بر مسئله این ماده تغییر فاز نمی دهد. اما با انتخاب دمای ذوب ۲۵ درجه سلسیوس کم کم آثار تغییر فاز ظاهر می شود و با انتخاب دماهای ذوب ۳۰ و ۳۵ درجه سلسیوس به خوبی تأثیرات تغییر فاز رخ داده در کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار مشخص می شود. بنابراین استفاده از مواد با دمای ذوب مناسب (۳۰ تا ۳۵ درجه سلسیوس) باعث کاهش نوسانات به کمتر از  $0.5 \text{ W / m}^2$  می شود. در ادامه با انتخاب دماهای ذوب بیشتر، تأثیرات تغییر فاز کمتر می شود. با انتخاب دمای ذوب ۴۵ درجه سلسیوس به دلیل عدم تغییر فاز این ماده دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار به  $6 \text{ W / m}^2$  افزایش می یابد.

#### ۴-۳. کاهش بار حرارتی اتلافی از جدار خارجی در اقلیم های مختلف ایران

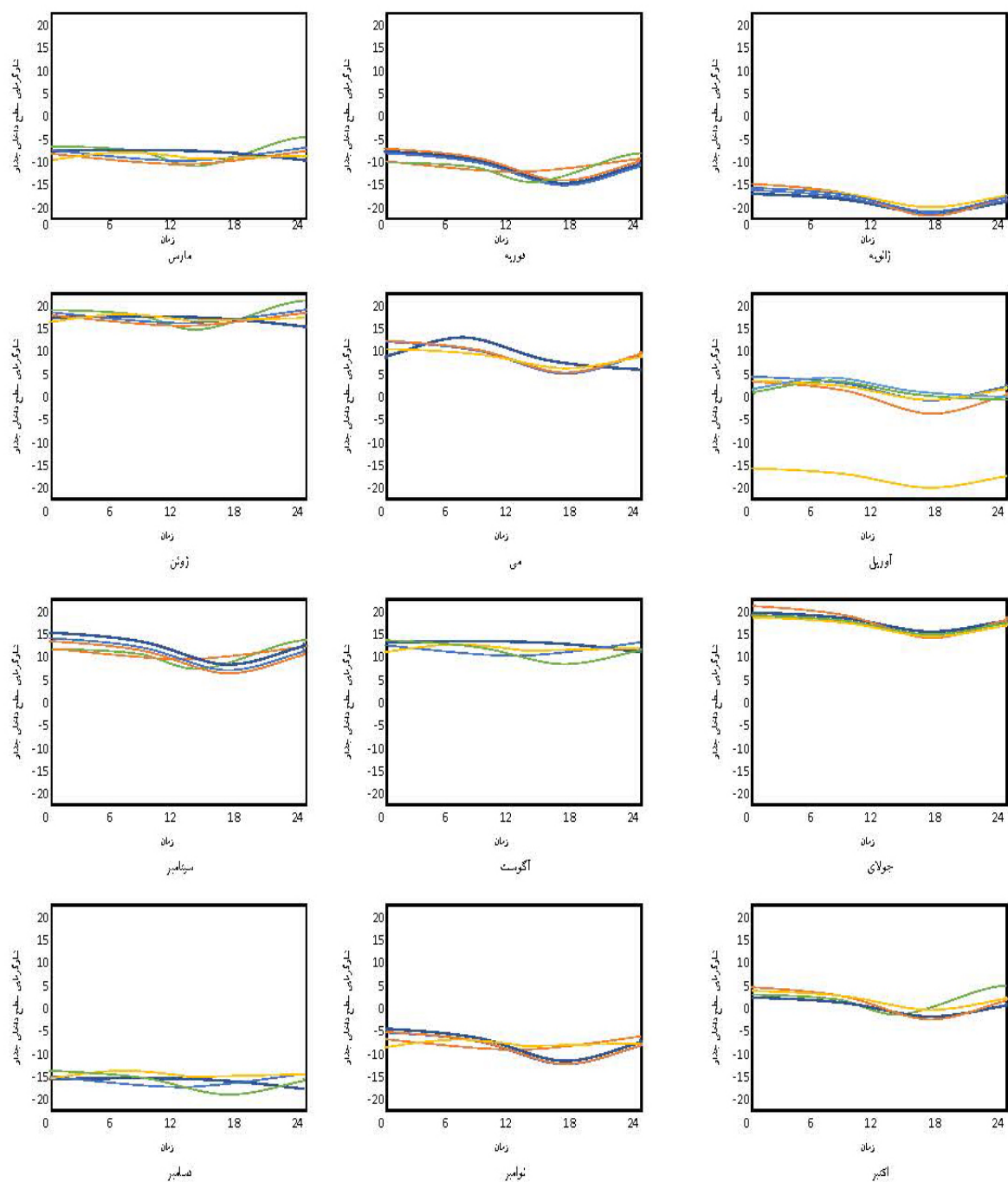
در این قسمت به تحلیل و بررسی اثر مواد تغییرفازدهنده در کاهش اتلاف حرارتی از جدار خارجی ساختمان پرداخته ایم. برای این منظور شرایط حاکم بر چهار اقلیم مختلف از ایران مورد بررسی قرار گرفته است. تبریز به عنوان نماینده اقلیم سرد، بندر عباس به عنوان نماینده اقلیم گرم و مرطوب، یزد به عنوان نماینده اقلیم کویری و تهران به عنوان نماینده اقلیم معتدل انتخاب شد. بنابراین جدار نمونه تحت شرایط آب و هوایی مذکور و سایر شرایط ذکر شده در فصل دوم، مورد بررسی قرار گرفت.

### ۴-۳-۱. شار گرمایی سطح داخلی جدار

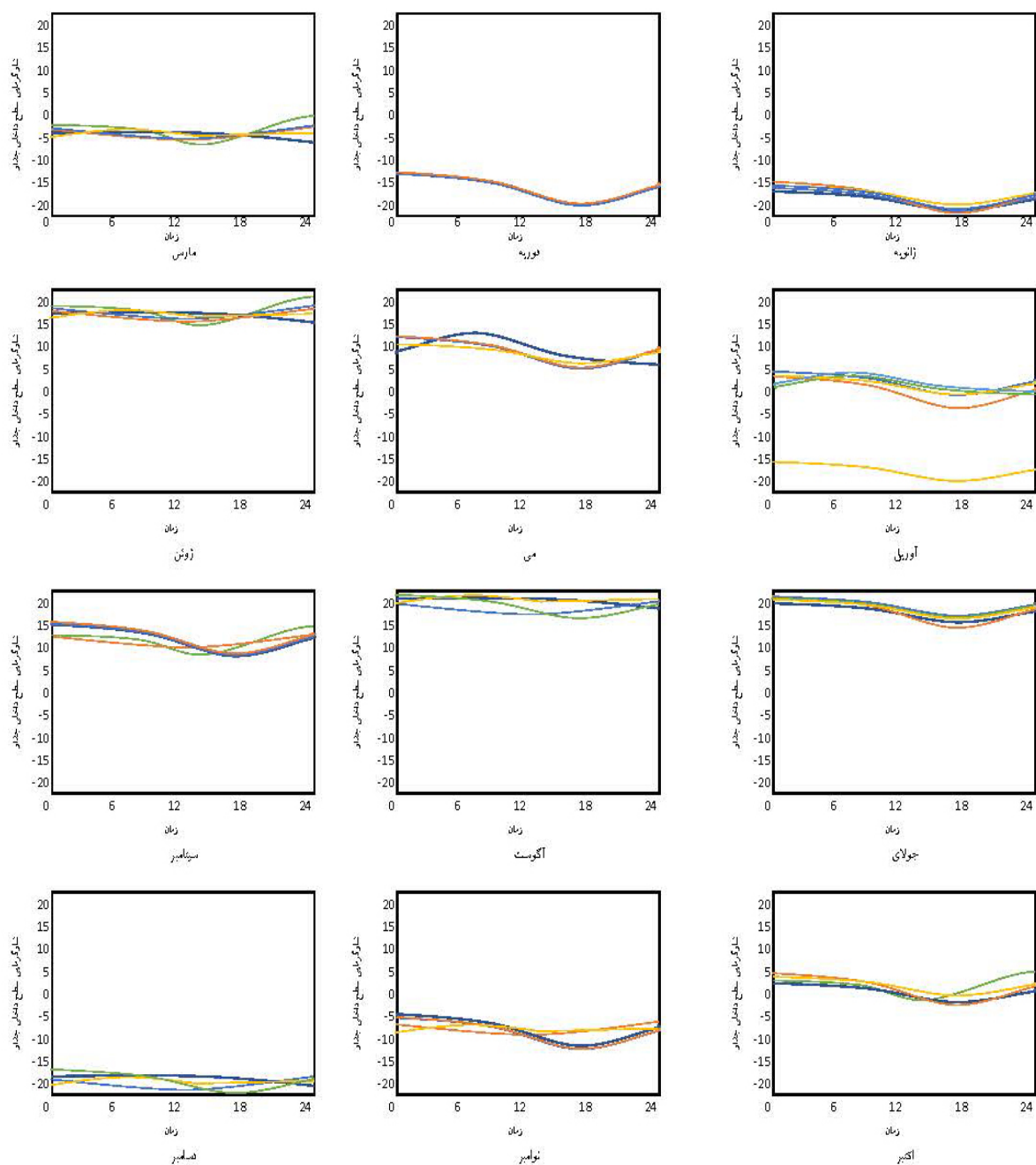
برای بررسی میزان کاهش اتلاف حرارتی از جدار نیاز است تغییرات شار گرمایی ورودی یا خروجی از سطح داخلی جدار بررسی شود. در شکل‌های ۴-۳ تا ۴-۶ تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخلی جدار برای چهار اقلیم مختلف ایران نشان داده شده است. در این شکل‌ها اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده در تمامی ماه‌های سال به طور مجزا آورده شده است. به دلیل اهمیت انتخاب ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب مناسب، به بررسی چندین ماده با دمای ذوب متفاوت در هر چهار اقلیم پرداخته شد. از آنجا که بازه دمایی که ماده تغییرفازدهنده در آن ذوب می‌شود برای هر اقلیم مختلف است، با مقایسه دمای ماده تغییرفازدهنده به کار رفته در جدار در ماه‌های سرد و گرم، دامنه تغییرات آن به دست آمد و سپس به انتخاب دماهای ذوب مناسب در این بازه تغییرات پرداخته شد. برای مثال، در تهران، دمای ماده تغییرفازدهنده به کار رفته در جدار در کل سال بین ۸ تا ۴۲ درجه سلسیوس تغییر می‌کند که در اینجا برای ارائه بهتر نتایج، تنها به نمایش نتایج مربوط به چهار دمای ذوب (۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درجه سلسیوس) برای مواد تغییرفازدهنده پرداخته شده است. ذکر این نکته ضروری است که در تمامی نمودارهای این فصل، ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۵۰ درجه سلسیوس، تحت بررسی‌های صورت گرفته تغییر فاز نداده است؛ بنابراین از نتایج آن برای قیاس ماده تغییر فازدهنده و ماده‌ای که تغییر فاز ندهد استفاده شده است. همان طور که در شکل‌های ۳-۳ تا ۳-۶ مشخص است، در هر اقلیم و در هر ماه سال یک دمای ذوب عملکرد بهتری دارد و بهتر می‌تواند نوسانات شار گرمایی عبوری از جدار را کاهش دهد.



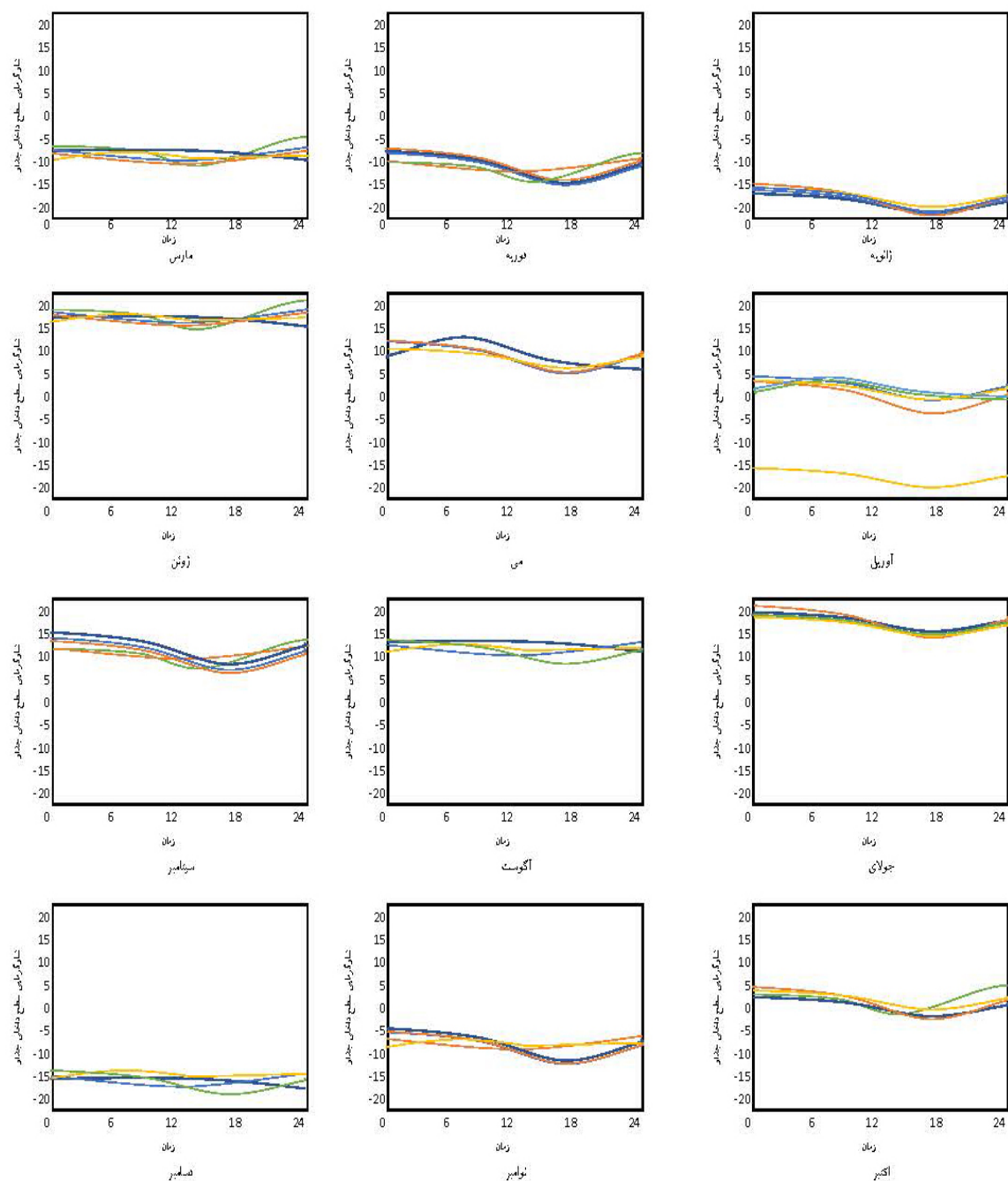
شکل ( ۴ - ۳ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم تهران



شکل ( ۴ - ۴ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم یزد



شکل ( ۴ - ۵ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم تبریز



شکل ( ۴ - ۶ ) تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخل جدار در اقلیم بندر عباس

در ماه ژانویه ماده با دمای ذوب ۱۰ درجهٔ سلسیوس، در ماه مارس ماده با دمای ذوب ۲۰ درجهٔ سلسیوس، در ماه می ماده با دمای ذوب ۳۰ درجهٔ سلسیوس و در ماه آگوست ماده با دمای ذوب ۴۰ درجهٔ سلسیوس بیشترین اثر را در کاهش دامنهٔ تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار دارد. مواد تغییر فازدهنده با دماهای ذوب

مختلف، در برخی از ماه‌های سال مانند فوریه، عملکردی مشابه دارند. در یزد و در ماه‌هایی مثل فوریه و اکتبر، عملکرد تمامی دماهای ذوب انتخاب شده برای مواد تغییرفازدهنده مشابه است. اما ماده با دمای ذوب ۲۰ درجه سلسیوس در ماه مارس و ماده با دمای ذوب ۴۰ درجه سلسیوس در ماه جولای عملکرد چشمگیری در کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار دارند. در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود که در تبریز، ماده با دمای ذوب ۴ درجه سلسیوس در ماه ژانویه و ماده با دمای ذوب ۲۴ درجه سلسیوس در ماه می، عملکرد خوبی در کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار دارند. ولی تقریباً در بقیه ماه‌های سال عملکرد تمامی مواد تغییرفازدهنده با دماهای ذوب مختلف مشابه است. عملکرد مواد تغییرفازدهنده در بندرعباس متنوع‌تر از سایر اقلیم‌هاست و در اکثر ماه‌ها مواد تغییرفازدهنده دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار را کاهش می‌دهند. علت این امر کم بودن دامنه تغییرات هوای بیرون و متعاقباً انتخاب دماهای ذوب نزدیک به هم است. در این اقلیم ماده با دمای ذوب ۲۲ درجه سلسیوس در ماه ژانویه و دسامبر، ماده با دمای ذوب ۲۸ درجه سلسیوس در ماه مارس و نوامبر، ماده با دمای ذوب ۳۴ درجه سلسیوس در ماه آوریل و اکتبر و ماده با دمای ذوب ۴۰ درجه سلسیوس در ماه جولای و آگوست عملکرد بهتری در کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از جدار دارند. بر این اساس، شکل‌های ۴-۳ تا ۴-۶ اهمیت انتخاب ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب متناسب با شرایط آب و هوایی را نشان می‌دهند.

#### ۴-۳-۲. بار حرارتی اتلافی از جدار

همان‌طور که در شکل‌های ۳-۳ تا ۳-۶ نشان داده شد، انتخاب دمای ذوب مناسب برای ماده تغییرفازدهنده تأثیر بسزایی در عملکرد آن دارد. در هر یک از ماه‌های سال شرایط آب و هوایی متفاوتی بر جدار ساختمان حاکم است. بنابراین، با توجه به میزان اهمیت گرمایش و یا سرمایش در هر اقلیم، باید ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب مناسب را انتخاب کرد. برای مثال، در اقلیم بندرعباس موضوع سرمایش اهمیت فوق‌العاده بیشتری نسبت به گرمایش دارد؛ چرا که این اقلیم دارای میانگین دمایی بالایی است و ساختمان‌های واقع شده در این اقلیم، در بیشتر ماه‌های سال برای قرار گرفتن دمای داخل آنها در محدوده آسایش حرارتی افراد، نیاز به



سرمایش دارند. عکس این شرایط برای اقلیم‌های سرد مانند تبریز مطرح می‌شود و موضوع گرمایش در اولویت قرار می‌گیرد. در اقلیم‌هایی مانند تهران که دارای وضعیت آب و هوایی معتدلی هستند، سرمایش و گرمایش هردو به نوبه خود دارای اهمیت زیادی هستند؛ بنابراین بار حرارتی اتلافی سالانه در این اقلیم‌ها بیشتر مورد توجه است.

در ادامه اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده با دماهای ذوب متفاوت بر کاهش بار حرارتی اتلافی در ماه‌های گرم و سرد به طور مجزا آورده شده و سپس نتایج برای بار حرارتی اتلافی سالانه ارائه شده است. در انتها، اثر استفاده از دو لایه ماده تغییرفازدهنده با دماهای ذوب مناسب ماه‌های گرم و سرد مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

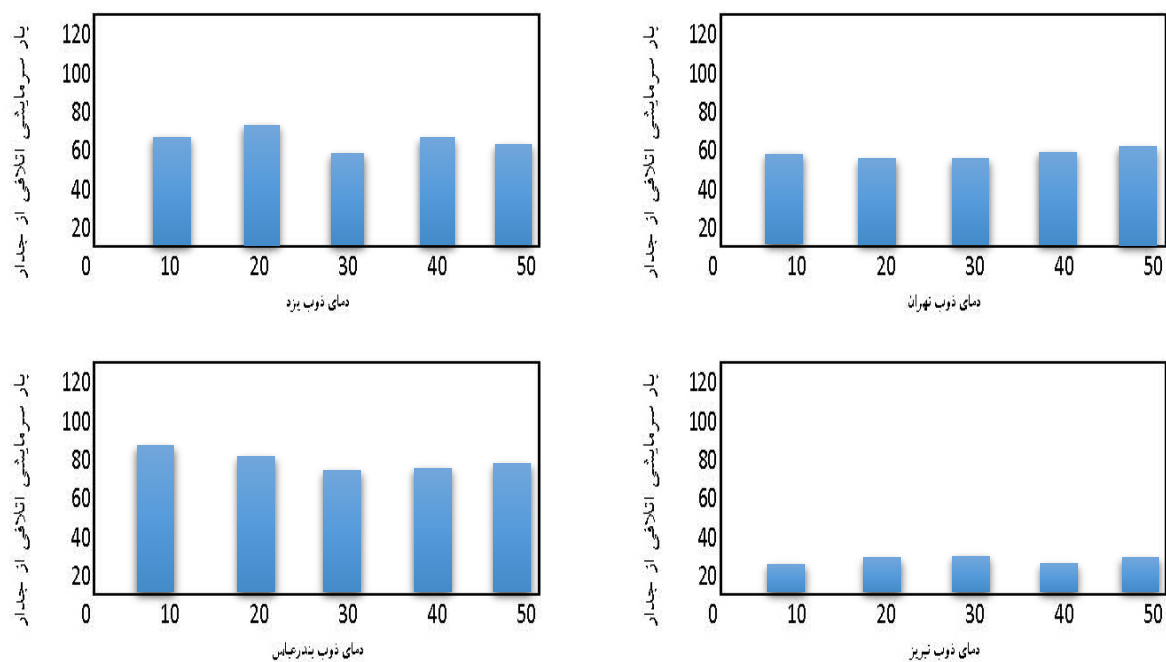
#### ۴-۳-۲-۱. بار سرمایشی اتلافی از جدار

در این قسمت نتایج به دست آمده از بار سرمایشی اتلافی از جدار نمونه در روزهای گرم سال تحلیل و بررسی شده‌اند.

در شکل ۴-۷ الف مشاهده می‌شود که در اقلیم تهران، اتلافات سرمایشی از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۳۰ درجه سلسیوس، به میزان  $50/36 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییرفازدهنده  $55/57 \text{ kW.h / m}^2$  است.

در شکل ۴-۷ ب مشاهده می‌شود که در اقلیم یزد، اتلافات سرمایشی از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۳۰ درجه سلسیوس، به میزان  $53/58 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییرفازدهنده  $61/81 \text{ kW.h / m}^2$  است. بنابراین در اقلیم کویری، به دلیل اختلاف بیشتر دمای شبانه‌روز، اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان بر کاهش اتلاف حرارتی بیش از اقلیم معتدل است. در شکل ۴-۷ مشاهده می‌شود که در اقلیم تبریز، اتلافات سرمایشی از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۴ درجه سلسیوس، به میزان  $15/30 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از

ماده تغییر فازدهنده  $20/83 \text{ kW.h / m}^2$  است. در شکل ۴۷ مشاهده می‌شود که در اقلیم بندرعباس، اتلاف سرمایشی از جدار در صورت استفاده از ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب  $34^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس به میزان  $81/66$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییر فازدهنده  $85/75 \text{ kW.h / m}^2$  است. اقلیم بندرعباس نسبت به سایر اقلیم‌های مورد بررسی اختلاف دمای شبانه‌روز کمتری دارد. بنابراین اثر ماده تغییر فازدهنده بر کاهش بار اتلافی نیز، در این اقلیم کمتر است.



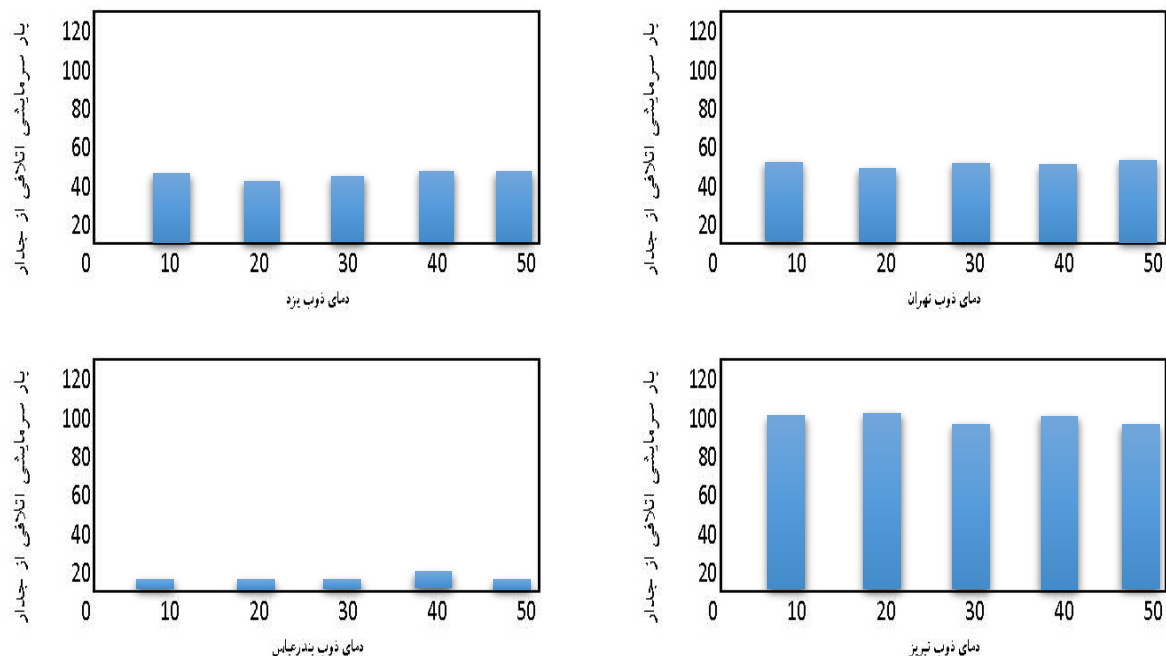
شکل (۴-۷) اثر دمای ذوب در کاهش بار سرمایشی اتلافی

#### ۴-۳-۲. بار گرمایشی اتلافی از جدار

در این قسمت نتایج به دست آمده از بار اتلافی گرمایشی از جدار نمونه در روزهای سرد سال تحلیل و بررسی شده است.

در شکل ۴-۸ الف مشاهده می‌شود که در اقلیم تهران، اتلافات گرمایشی از جدار در صورت استفاده از ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب  $20^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس، به میزان  $44/89 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از

ماده تغییرفازدهنده  $49/26 \text{ kW.h / m}^2$  است. بنابراین در تهران و در ماه‌های سرد، ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب  $20^\circ\text{C}$  سلسیوس و در ماه‌های گرم با دمای ذوب  $30^\circ\text{C}$  سلسیوس عملکرد بهتری دارد.



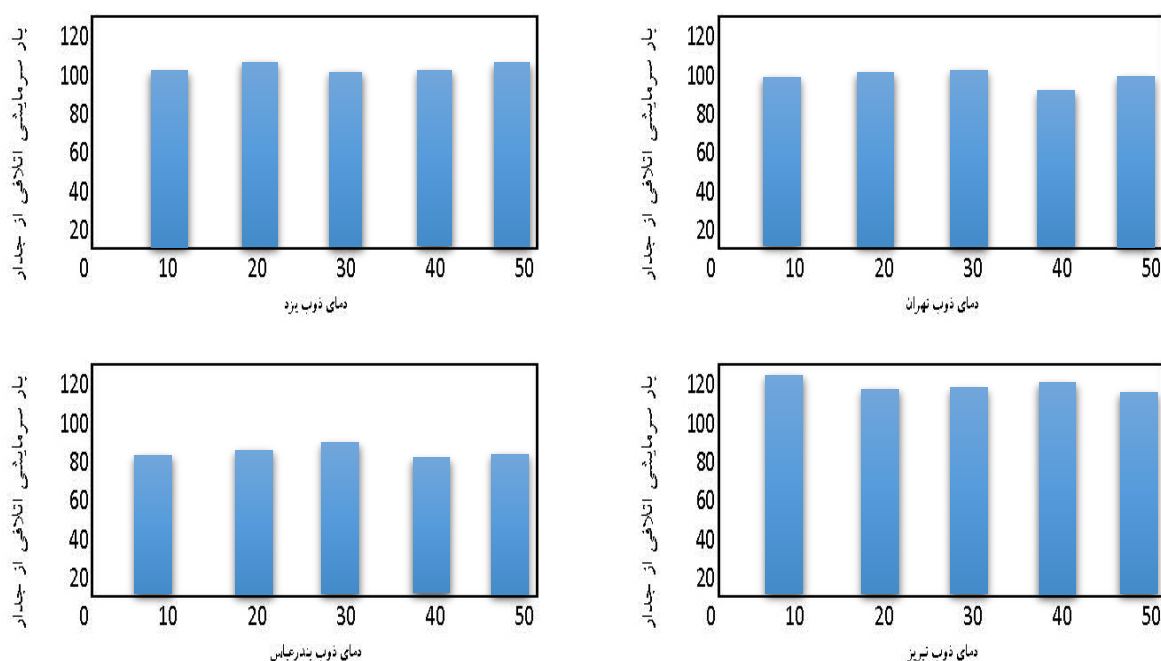
شکل (۴-۸) اثر دمای ذوب در کاهش بار گرمایشی اتلافی

#### ۴-۳-۲-۳ بار حرارتی اتلافی سالانه از جدار

تا اینجا اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار خارجی ساختمان در کاهش بار سرمایشی و گرمایشی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در این قسمت به مقایسه مجموع بار حرارتی اتلافی سالانه از جدار پرداخته می‌شود.

در شکل ۳-۹. الف مشاهده می‌شود که در اقلیم تهران، اتلافات حرارتی سالانه از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب  $30^\circ\text{C}$  سلسیوس، به میزان  $99/60 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییرفازدهنده  $104/83 \text{ kW.h / m}^2$  است. این مقدار برای ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب  $20^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس،  $100/45 \text{ kW.h / m}^2$  است. پس ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب  $30^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس علاوه بر این که در ماه‌های گرم سال عملکرد خوبی دارد در کل سال نیز با ۵ درصد کاهش در بار اتلافی سالانه بهترین عملکرد را دارد.

در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود که در اقلیم یزد، اتلافات حرارتی سالانه از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۰ درجه سلسیوس، به میزان  $98/76 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییرفازدهنده  $106/93 \text{ kW.h / m}^2$  است. بنابراین این ماده با ۷۶ درصد کاهش در بار اتلافی سالانه بهترین عملکرد را در این اقلیم دارد. اتلاف حرارتی سالانه برای ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۰ درجه سلسیوس  $101/04 \text{ kW.h / m}^2$  است. پس در یزد نیز ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۳۰ درجه سلسیوس علاوه بر این که در ماه‌های گرم سال عملکرد خوبی دارد در کل سال نیز بهترین عملکرد را دارد.



شکل ( ۴ - ۹ ) اثر دمای ذوب در کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه

در شکل ۴-۹ ج مشاهده می‌شود که در اقلیم تبریز، اتلافات حرارتی سالانه از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۲۴ درجه سلسیوس، به میزان  $106/85 \text{ kW.h / m}^2$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییرفازدهنده  $116/47 \text{ kW.h / m}^2$  است. این ماده با ۸/۳ درصد کاهش در بار اتلافی سالانه بهترین عملکرد را در این اقلیم دارد. بنابراین در این اقلیم ماده تغییر فازدهنده با دمای ذوب ۲۴ درجه سلسیوس، هم در کاهش بار سرمایشی و هم در کاهش بار گرمایشی بهترین عملکرد را دارد.

بنابراین اثر استفاده از ماده تغییرفازدهنده در کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه در تبریز، حتی نسبت به یزد - که مواد تغییرفازدهنده در این اقلیم بهترین عملکرد را به طور مجزا در کاهش بار سرمایش در ماه‌های گرم و کاهش بار گرمایش در ماه‌های سرد داشتند - نیز بیشتر است.

در شکل ۴-۹ د. مشاهده می‌شود که در اقلیم بندرعباس، اتلافات حرارتی سالانه از جدار در صورت استفاده از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب ۳۴ درجه سلسیوس، به میزان  $85/40 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^2$  و در صورت عدم استفاده از ماده تغییرفازدهنده  $89/49 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^2$  است. این ماده با ۴/۶ درصد کاهش در بار اتلافی سالانه بهترین عملکرد را در این اقلیم دارد. پس در این اقلیم استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار ساختمان کمترین تأثیر را در کاهش بار اتلافی سالانه نسبت به سایر اقلیم‌ها دارد.

#### ۴-۳-۲-۴. اثر عایق تغییرفازدهنده دولایه

با توجه به نتایج به دست آمده تا اینجا، این نکته به ذهن می‌رسد که آیا استفاده ترکیبی از ماده تغییرفازدهنده مناسب برای ماه‌های گرم و ماده تغییرفازدهنده مناسب برای ماه‌های سرد در جدار می‌تواند بار حرارتی اتلافی سالانه را بیش از پیش کاهش دهد؟ چرا که با مشاهده نتایج به دست آمده از اقلیم تبریز مشاهده شد که ماده تغییرفازدهنده‌ای که هم مناسب ماه‌های گرم و هم مناسب ماه‌های سرد سال باشد تا چه حد می‌تواند در کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه مؤثر باشد.

در این قسمت، جدار نمونه استفاده شده در ابتدای فصل را تغییر داده و برای حفظ مقاومت گرمایی کل جدار، به صورتی که در جدول ۴-۲ آمده است، ضخامت‌ها تغییر داده شدند. در این جدار عایق ۱، ماده تغییرفازدهنده مناسب ماه‌های گرم و عایق ۲، ماده تغییرفازدهنده مناسب ماه‌های سرد است. نتایج نشان داد که عوض کردن جای عایق ۱ و ۲ تأثیر چندانی در بار حرارتی اتلافی سالانه ندارد. اما لایه عایقی که در سمت داخل جدار قرار می‌گیرد مؤثرتر واقع می‌شود. به عبارتی دیگر، در صورتی که ماده تغییرفازدهنده مناسب ماه‌های گرم در سمت داخل جدار قرار گیرد، بار سرمایشی اتلافی نسبت به حالت تک لایه کاهش می‌یابد و در صورتی که ماده

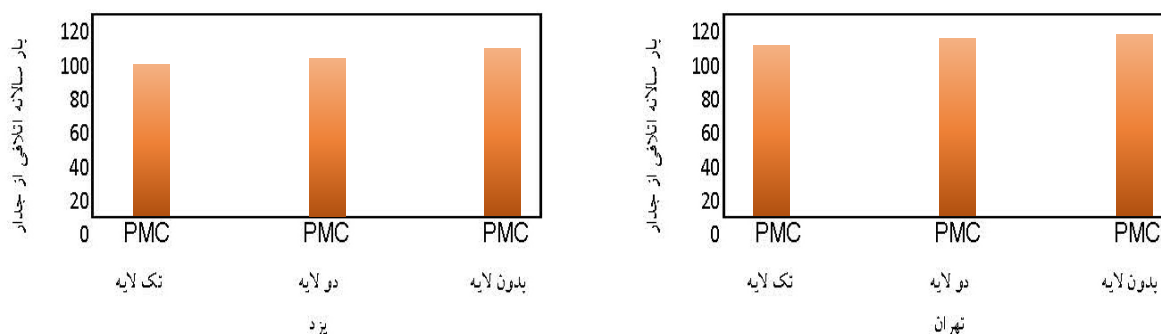
تغییرفازدهنده مناسب ماه‌های سرد در سمت داخل قرار گیرد، بار گرمایشی اتلافی نسبت به حالت تک‌لایه کاهش می‌یابد. اما بار حرارتی اتلافی سالانه در هر دو حالت تقریباً یکسان می‌ماند.

همان طور که در شکل ۴-۱۰ الف مشاهده می‌شود، در تهران استفاده از دولایه ماده تغییرفازدهنده  $2/56 \text{ kW.h/m}^2$  بار حرارتی اتلافی سالانه نسبت به حالتی که از یک لایه ماده تغییرفازدهنده ( با دمای ذوب  $30^\circ\text{C}$  ) استفاده شود، کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر، در این حالت،  $2/6$  درصد کاهش در بار اتلافی سالانه رخ می‌دهد. استفاده دولایه از ماده تغییرفازدهنده،  $7/79 \text{ kW.h/m}^2$  یا  $7/4$  درصد بار حرارتی اتلافی سالانه را نسبت به حالتی که از ماده تغییرفازدهنده استفاده نشود، کاهش می‌دهد.

جدول ( ۳ - ۲ ) جنس و ضخامت مواد به کار رفته در جدار با عایق دولایه

لایه بندی جدار از بیرون به داخل					
آجرنما	ملات سیمان	عایق ۱	عایق ۲	آجر	گچ
۳	۲	۱	۱	۱۷/۴	۳
ضخامت					

جدول ۴-۲، جنس و ضخامت مواد به کار رفته در جدار با عایق دولایه



شکل ( ۴ - ۱۰ ) اثر عایق تغییر فاز دهنده دولایه در کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه

همان طور که در شکل ۴-۱۰ ب مشاهده می‌شود، در یزد استفاده دولایه از ماده تغییر فازدهنده،  $9/39 \text{ kW.h/m}^2$  یا  $1/13$  درصد بار حرارتی اتلافی سالانه را نسبت به یک لایه ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب  $30^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس، کاهش می‌دهد. استفاده دولایه از ماده تغییرفازدهنده،  $8/8$  درصد بار حرارتی

اتلافی سالانه را نسبت به حالتی که از ماده تغییر فازدهنده استفاده نشود کاهش می‌دهد که این عدد بیشتر از میزان کاهش بار حرارتی اتلافی سالانه به دست آمده در تبریز است.

## فصل ۵:

### نتیجه‌گیری



## ۵-۱. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق به تحلیل عملکرد مواد تغییرفازدهنده در جدار خارجی ساختمان پرداخته شد. برای این منظور، رفتار حرارتی یک دیوار چند لایه حاوی ماده تغییرفازدهنده و پارامترهای مؤثر بر عملکرد آن مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین، تأثیر استفاده از مواد تغییرفازدهنده بر کاهش دامنه تغییرات شار گرمایی عبوری از سطح داخلی جدار و میزان کاهش بار حرارتی اتلافی از جدار در ماه‌های مختلف سال، در چهار اقلیم سرد، معتدل، کویری و گرم و مرطوب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که، برای استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار، انتخاب دمای ذوب متناسب با شرایط آب و هوایی اقلیم مورد استفاده از اهمیت زیادی برخوردار است. برای مثال، در تهران (به عنوان نماینده اقلیم معتدل) ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب  $30^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس، با کاهش ۵ درصدی اتلافات حرارتی سالانه از جدار، بهترین عملکرد را دارد. این ماده با اینکه در ماه می تا  $7 \text{ kW.h/m}^2$  دامنه تغییرات شار داخلی را کاهش می‌دهد، در ماه فوریه کاملاً بی‌تأثیر است و تغییر فازی نمی‌دهد. در ادامه، نتایج نشان داد که به‌کارگیری یک لایه ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب مناسب در دیوار خارجی می‌تواند مصرف انرژی سالانه را از ۴/۶ درصد (برای بندرعباس به عنوان نماینده اقلیم گرم و مرطوب) تا ۸/۳ درصد (برای تبریز به عنوان نماینده اقلیم سرد) کاهش دهد. همچنین، نتایج نشان داد که در اقلیم کویری به دلیل اختلاف زیاد دمای فصول گرم و سرد، در صورتی که از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب متناسب با ماه‌های گرم استفاده شود، عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی جدار در ماه‌های سرد چندان مطلوب نخواهد بود و نیز اگر از ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب متناسب با ماه‌های سرد استفاده شود، این ماده برای ماه‌های گرم عملکرد ذخیره‌سازی حرارتی مطلوبی نخواهد داشت. بنابراین در این تحقیق، پیشنهاد استفاده از دو لایه ماده تغییرفازدهنده مجزا با دماهای ذوب متناسب با فصول گرم و سرد برای اقلیم کویری مطرح شد. بر این اساس، می‌توان تا ۸/۸ درصد میزان بار حرارتی سالانه را کاهش داد. همچنین استفاده از دو لایه ماده تغییرفازدهنده مجزا با دماهای ذوب متناسب با فصول گرم و سرد برای اقلیم معتدل نیز به میزان ۷/۴ درصد میزان بار حرارتی سالانه را کاهش می‌دهد. در نهایت، در این تحقیق پیشنهاد اصلاح تعریف اینرسی حرارتی

دیوار در مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان مطرح شد و ضرابی برای تصحیح میزان اینرسی حرارتی دیوارهای دارای مواد تغییرفازدهنده ارائه گردید.

## ۵-۲. پیشنهاد تحقیقات آینده

با توجه به نتایج به دست آمده در این تحقیق پیشنهادهایی برای فعالیت‌های پژوهشی آینده در این زمینه ارائه می‌گردد:

- ✓ تحلیل و بررسی میزان جابه‌جایی زمانی اوج مصرف و ضریب کاهش: پیشنهاد می‌شود با ثابت در نظر نگرفتن دمای هوای داخل، تغییرات آن بررسی شود و اثر استفاده از مواد تغییرفازدهنده در جدار، بر میزان جابجایی ساعات اوج مصرف و ضریب کاهش بررسی شود.
- ✓ اعمال احساس حرارتی افراد در تحلیل نتایج: پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن آثار احساس حرارتی افراد بازه دمایی مناسب هوای داخل انتخاب شود و بر اساس آن ماده تغییرفازدهنده مناسب شرایط کاربری ساختمان و هر اقلیم انتخاب شود.
- ✓ تحلیل و بررسی اثر جهت جغرافیایی جدار: پیشنهاد می‌شود تا با مقایسه جهات جغرافیایی مختلف برای جدار حاوی ماده تغییرفازدهنده، عملکرد آن مورد تحلیل و بررسی قرار گیرد.
- ✓ تحلیل حرارتی سه‌بعدی: پیشنهاد می‌شود با در نظر گرفتن ابعاد دیگر جدار حاوی ماده تغییرفازدهنده، به تحلیل سه‌بعدی حرارتی آن پرداخته شود و به طور همزمان آثار استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سایر ادوات به کار رفته در جدار مانند درب و پنجره بررسی شود.
- ✓ اثر لایه‌های چندگانه: پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج مطلوب به دست آمده از حل جدار حاوی دولایه ماده تغییرفازدهنده با دمای ذوب مناسب ماه‌های گرم و سرد سال، به تحلیل اثر استفاده از چندین لایه ماده تغییرفازدهنده با دماهای ذوب متفاوت پرداخته شود.

- ✓ استفاده از مواد تغییرفازدهنده در محفظه: پیشنهاد می‌شود به تحلیل دو بعدی مواد تغییرفازدهنده قرار گرفته در محفظه‌های جاسازی شده در جدار پرداخته شود.
- ✓ استفاده از مواد تغییرفازدهنده در میکروکپسول‌ها: پیشنهاد می‌شود به تحلیل مواد تغییرفازدهنده قرار گرفته در میکروکپسول‌های جاسازی شده در جدار، با دماهای ذوب متفاوت پرداخته شود.
- ✓ استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سایر کاربردهای ساختمانی: پیشنهاد می‌شود به تحلیل استفاده از مواد تغییرفازدهنده در سیستم‌های گرمایش از سقف و سرمایش از کف در شرایط اقلیمی مختلف پرداخته شود.
- ✓ ارائه استاندارد اینرسی حرارتی جدار حاوی ماده تغییر فازدهنده: پیشنهاد می‌شود با بررسی جامع عوامل مؤثر بر اینرسی حرارتی جدار حاوی ماده تغییر فازدهنده، اصلاحیه‌ای برای مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان جهت استاندارد اینرسی حرارتی جدار ارائه شود.
- ✓ ارائه استاندارد برای انتخاب ماده تغییر فازدهنده به منظور کاربرد در ایران: پیشنهاد می‌شود با بررسی جامع شرایط حاکم بر جدار حاوی ماده تغییر فازدهنده، استاندارد برای انتخاب ماده تغییر فازدهنده مناسب ارائه شود.
- ✓ ارائه حل تحلیلی برای دیوار چند لایه: پیشنهاد می‌شود به کمک روش‌های تحلیلی تقریبی، یک حل تحلیلی برای جدار چند لایه حاوی ماده تغییر فازدهنده ارائه شود.

## منابع و مآخذ

[۱] Li, M., and Wu, Z., "A review of intercalation composite phase change material :Preparation, structure and properties", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol, ۱۶, pp. ۲۱۰۱-۲۰۹۴, ۲۰۱۲.

[۲] Khudhair, M., and Farid, M., "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials", Energy Conversion and Management, Vol. ۴۵, pp. ۲۷۵-۲۶۳. ۲۰۰۴.

[۳] بدرخانی، م.، تفاوت انواع عایق‌های حرارتی و نحوه اجرا به صورت عملی و تجربی، نخستین همایش ملی عایق، تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ۱۳۹۱.

[۴] Zhou, D., Zhao, C., and Tian, Y., "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications", Applied Energy, Vol. ۴۵, pp. ۶۰۵-۵۹۳. ۲۰۱۲.

[۵] Baetensa, R., Jelle, B., and Gustavsend, A., "Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review", Energy and Buildings, Vol. ۴۲, pp. ۱۳۶۱-۱۳۶۸. ۲۰۱۰.

[۶] Agyenim, F., Hewitt, N., Eames, PH., and Smyth, M., "A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۴, pp. ۶۲۸-۶۱۵.

[۷] ۲۰۱۰-Cabezaa, L., Castell, A., Barreneche, C., de Gracia, A., and Fernandez A., "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۵, pp. ۱۶۹۵-۱۶۷۵. ۲۰۱۰.

[۸] Antony Aroul, V., and Velraj, R., "Review on free cooling of buildings using phase change materials", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۴, pp. ۲۸۲۹-۲۸۱۹

[۹] ۲۰۱۰-Farid, M., Khudhair, A., Razack, S., and Al-Hallaj, S., "A review on phase change energy storage: materials and applications", Energy Conversion and Management, Vol. ۴۵, pp.

[۱۰] ۲۰۰۴. ۱۶۱۵-۱۵۹۷Mondal, S., "Phase change materials for smart textiles - An overview", Applied Thermal Engineering, Vol. ۲۸, pp. ۱۵۵۰-۱۵۳۶. ۲۰۰۸.

[۱۱] Oro, E., Gracia, A., Castell, A., Farid, M., and Cabeza, L., "Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications", Applied Energy, Vol. ۴۵, pp. ۷۸۴-۷۶۳. ۲۰۱۲

[۱۲] فضیلتی، م.ع.، و عالم رجبی، ع.، بهسازی آبگرمکن خورشیدی به کمک مواد تغییر فاز دهنده هفدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک، تهران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.

[۱۳] حق شناس کاشانی، س.، کاهش مصرف انرژی در ساختمان با ذخیره سازی انرژی در مواد تغییر فاز

دهنده، اولین کنفرانس گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، ۱۳۸۸.

[۱۴] Soares, N., Costa, J.J., Gaspar, A.R., and Santos, P., "Review of passive PCM latent heat

thermal energy storage systems towards buildings energy efficiency”, Energy and Buildings, Vol. ۵۹, pp. ۱۰۳-۸۹. ۲۰۱۳.

[۱۵] Ismail, K.A.R., and Henriquez, J.R., "PCM glazing systems", International Journal of Energy Research, Vol. ۲۱, pp. ۱۲۵۵-۱۲۴۱. ۱۹۹۷

[۱۶] بختیاری، و، استفاده از مواد تغییر فاز دهنده به منظور ذخیره گرما و سرما در ساختمان، اولین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، ۱۳۸۸.

[۱۷] Hauer, A., Mehling, H., Schossig, P., Yamaha, M., Cabeza, L., Martin, V., and Setterwall, F., "International Energy Agency Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage", Annex ۱۷, ۲۰۰۸.

[۱۸] Peippo, K., Kauranen, P., and Lund, P., "A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating", Energy and Buildings, Vol. ۴, pp. ۲۷۰-۲۵۹. ۱۹۹۱.

[۱۹] Bourdeau, L.E., "Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage", the fifth national passive solar conference, Massachusetts, ۱۹۸۰.

[۲۰] Tyagia, V., Kaushik, S., Tyagib, S., and Akiyama, T., "Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۵, pp. ۱۳۹۱-۱۳۷۳. ۲۰۱۱.

[۲۱] Stoval, TK., and Tomlinson, JJ., "What are the potential benefits of including latent storage in common wallboard?", ASME, pp. ۳۲۵-۳۱۸. ۱۹۹۵.

[٢٢] Kedl, R.J., and Stovall, T.K., "Activities in support of the wax-impregnated wallboard concept", thermal energy storage researches activity review, USA, New Orleans ,Louisiana, ١٩٨٩.

[٢٣] Asan, H., and Sancaktar, Y.S., "Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor", Energy and buildings, Vol. ٢٨, pp. ١٦٦-١٨٩. ١٩٩٨.

[٢٤] Athienitis, A.K., Liu, C., Hawes, D., Banu, D., and Feldman, D., "Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage", Building and Environment, Vol. ٣٢, pp. ٤١٠-٤٠٨. ١٩٩٧.

[٢٥] Kissock, J.K., Hannig, J.M., Whitney, T.I., and Drake, M.L., "Testing and simulation of phase change wallboard for thermal storage in buildings", International Solar Energy Conference, USA, New York, ١٩٩٨.

[٢٦] Athienities, A. and Chen, Y. "The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems", Solar Energy, Vol. ٦٩, pp. -٢٢٩ ٢٣٧. ٢٠٠٠.

[٢٧] Rouse, R., Ben Salah, N., and Lassue, S., "An Overview of Phase Change Materials and their Implication on Power Demand", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol,١٤ .pp. ٩٠٧-٩٠١. ٢٠١٠.

[٢٨] Kuznik, F., David, D., Johannes, K., and Roux, J., "A review on phase change materials integrated in building walls", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ١٥, pp. ٣٩١-٣٧٩. ٢٠١١

[۲۹] اشراقی، ج.، بررسی به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در ساختمان به منظور ذخیره انرژی خورشیدی

جهت سرمایش و گرمایش، دومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران، ۱۳۸۸.

[۳۰] معروفی، آ.، و آقاجفی، س.، بررسی انتقال حرارت در مواد تغییرفازدهنده و کاربرد آن در تجهیزات بین المللی شبکه ای بولتزن، چهارمین کنفرانس سرمایش، گرمایش و تهویه مطبوع به روش گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، ۱۳۹۱

[۳۱] جاهدی، و، "تأثیر افزایش درجه حرارت فرآیند شارژ در یک سیستم ذخیره کننده انرژی حرارتی حاوی یک ماده آلی غیر پارافینی به عنوان ماده تغییرفازدهنده، چهارمین کنفرانس بین المللی گرمایش، سرمایش و تهویه مطبوع، تهران، ۱۳۹۱

[۳۲] ذوالفقاری، س.ع.، صلیحی، م.، فتحیان، م.، مصلحی، ح.، رحیم پور، م.، و سعادت نسبی، م.، تحلیل، تأثیرات استفاده از عایق های تغییرفازدهنده بر میزان مصرف سالانه انرژی ساختمان در اقلیم تهران نخستین همایش ملی عایق، تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ۱۳۹۱

[۳۳] صلیحی، م.، ذوالفقاری، س.ع.، فتحیان، م.، مصلحی، ح.، رحیم پور، م.، و سعادت نسبی، م.، تأثیر حرارتی ساکنان به کارگیری مواد تغییرفازدهنده در پوسته خارجی ساختمان بر ایجاد شرایط آسایش سالانه بین المللی مهندسی، بیست و یکمین همایش سرمایش بدون نیاز به سیستم گرمایش مکانیک ایران، تهران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، ۱۳۹۲

[۳۴] مبحث نوزدهم مقررات ملی ساختمان ایران صرفه جویی در مصرف انرژی، نشر توسعه ایران، ۱۳۸۸.

[۳۵] Dutil, Y., Rousse, D.R., Ben Salah, N., Lassue, S., and Zalewski, L., "A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. ۱۵, pp. ۱۳۰-۱۱۲. ۲۰۱۱.



[٣٦] Solomon, AD., "Melt time and heat flux for a simple PCM body", Solar Energy, Vol. ,٢٢pp. ٢٥٧-٢٥١. ١٩٧٩.

[٣٧] Lacroix, M., "Numerical simulation of a shell and tube latent heat thermal energy storage unit", Solar Energy, Vol. ٥٠, pp. ٣٦٧-٣٥٧. ١٩٩٣.

[٣٨] Gong, Z., and Mujumdar, AS., "Finite-element analysis of cyclic heat transfer in a shell and tube latent heat energy storage exchanger", Applied Thermal Engineering, Vol. ,١٧pp. ٥٩١-٥٨٣. ١٩٩٧.

[٣٩] Zhang, Z., and Bejan, A., "The problem of time-dependent natural convection melting with conduction in the solid", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. ,٣٢pp. ٢٤٥٧-٢٤٤٧. ١٩٨٩.

[٤٠] Inaba, H., Dai, C., and Horibe, A., "Natural convection heat transfer of microemulsion phase-change-material slurry in rectangular cavities heated from below and cooled from above", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. ٤٦, pp. ٤٤٣٨-٤٤٢٧. ٢٠٠٣.

[٤١] Morgan, K., "A numerical analysis of freezing and melting with convection", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. ٢٨, pp. ٢٨٤-٢٧٥. ١٩٨١.

[٤٢] Velraj, R., Seeniraj, R., Hafner, B., Faber, C., and Schwarzer, K., "Experimental analysis and numerical modeling of inward solidification on a finned vertical tube for a latent heat storage unit", Solar Energy, Vol. ٦٠, pp. -٢٨١ ٢٩٠. ١٩٩٧.

[۴۳] Ahmad, M., Bontemps, A., Sallee, H., and Quenard, D., "Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material", Energy and Buildings, Vol. ۳۸, pp. ۳۶۶-۳۵۷. ۲۰۰۶.

[۴۴] وحیدی اصل، م.، آشنایی با تاریخ ریاضیات، مرکز نشر دانشگاهی، تهران، ۱۳۸۴.

[۴۵] کسمائی، م.، مشخصات کاربردی و جزئیات اجرایی عایق کاری حرارتی ساختمان در پهنه های مختلف اقلیمی ایران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۷

[۴۶] بهادری نژاد، م.، و میرحسینی، ع.، ضریب صافی هوا برای شهرهای مختلف ایران، سومین همایش بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۲.

[۴۷] ذوالفقاری، س.ع.، معرفت، م.، و امیدوار، ا.، تأثیر نوع پوشش محوطه اطراف ساختمان بر مصرف سالانه انرژی، شانزدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک، کرمان، دانشگاه شهید باهنر، ۱۳۸۷ طراحی یک ساختمان بی نیاز از انرژی های فسیلی در تهران

[۴۸] بهادری نژاد، م.، و صفر زاده، ح. ساختمان سبز)، اولین همایش بین المللی بهینه سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، سازمان بهینه سازی مصرف سوخت کشور، ۱۳۸۰

[۴۹] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., "Solar Engineering of Thermal Processes", Canada, ۲۰۰۶.

[۵۰] اینکروپرا، ف.پ.، و دویت، د.پ.، مقدمه ای بر انتقال گرما (جلد دوم)، مرکز نشر دانشگاه صنعتی

اصفهان، ویرایش دوم، ۱۳۷۵.

[51] Liu, G.L., "New research directions in singular perturbation theory: artificial parameter approach and inverse-perturbation technique", 7th Modern Mathematics and Mechanics, Shanghai, 1997.

[52] Liao, S.J., "Beyond Perturbation: Introduction to Homotopy Analysis Method", Chapman & Hall/CRC Press, Boca Raton, 2003.

[53] Liao, S.J., "Boundary element method for general nonlinear differential operators", Boundary Element, Vol. 20, pp. 99-111. 1997.

[54] Liao, S.J., "An approximate solution technique not depending on small parameters: a special example", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 30, pp. 380-391.

[55] He, J.H., 1995, "approximate analytical solution for seepage flow with fractional derivatives in porous media", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 167, pp.

[56] He, J.H., 1998, "Approximate solution for nonlinear differential equations with convolution product nonlinearities", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 167, pp. 69-73. 1998.

[57] He, J.H., "Variational iteration method: a kind of nonlinear analytical technique: some Examples", International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 34, pp. 699-708. 1999.

[58] He, J.H., "some new approach to Duffing equation with strongly & high order nonlinearity (I) linearized perturbation technique", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 4, pp. 80-78. 1999.

[59] He, J.H., "some new approaches to Duffing equation with strongly & high order nonlinearity (II) parameterized perturbation technique", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 4, pp. 82-81. 1999.

[60] He, J.H., "Modified straightforward expansion", Meccanica, Vol. 34, pp. 287-289

[61] 1999He, J.H., "an approximate solution technique depending upon an artificial parameter", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 3, pp. 97-92

[62] 1998He, J.H., "Newton-like iteration method for solving algebraic equations", Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, Vol. 3, pp. 109-106

[63] 1998Zhu, N., Wang, Sh., Xu, X., and Ma, Zh., "A simplified dynamic model of building structures integrated with shaped-stabilized phase change materials", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, pp. 1731-1722. 2010.

# پیوست

جدول ( پ - ۱ ) تابع تغییرات دمای هوای تهران

$T = -0.30(t - 0.50) + 2.30$	$۲/۵ - ۰$	ژانویه
$T = 3.65 \sin(\pi(t - 10.50)/9.00) + 4.35$	$۲۰ - ۲/۵$	
$T = -0.40(t - 19.5) + 4.40$	$۲۴ - ۲۰$	
$T = -0.45(t - 0.50) + 3.50$	$۴/۵ - ۰$	فوریه
$T = 3.40 \sin(\pi(t - 10.30)/10.00) + 5.20$	$۱۹/۵ - ۴/۵$	
$T = -0.60(t - 23.50) + 3.90$	$۲۴ - ۱۹/۵$	
$T = 3.75 \sin(\pi(t - 10.20)/10.00) + 10.60$	$۳/۵ - ۰$	مارس
$T = 3.75 \sin(\pi(t - 5.70)/16.50) + 10.60$	$۱۹/۵ - ۴/۵$	
	$۲۴ - ۱۹/۵$	
$T = -0.45(t - 0.50) + 16.60$	$۴ - ۰$	آوریل
$T = 5.90 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 19.50$	$۸/۵ - ۴$	
$T = -5.90 \sin(\pi(t - 9.00) + 19.50$	$۲۴ - ۸$	
$T = -0.50(t - 3.50) + 20.10$	$۳/۵ - ۰$	می
$T = 6.40 \sin(\pi(t - 9.00)/8.00) + 25.50$	$۷/۵ - ۳/۵$	
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 25.50$	$۲۴ - ۷/۵$	
$T = -0.80(t - 2.50) + 26.20$	$۳ - ۰$	ژوئن
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 9.00)/7.50) + 30.60$	$۷/۵ - ۳$	
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 30.60$	$۲۴ - ۲۱/۵$	
$T = -0.80(t - 0.50) + 26.90$	$۲ - ۰$	جولای
$T = 7.05 \sin(\pi(t - 9.00)/10.00) + 31.65$	$۸ - ۲$	
$T = 7.05 \sin(\pi(t - 8.70)/12.50) + 31.65$	$۲۴ - ۸$	
$T = (t - 0.50) + 27.50$	$۳/۵ - ۰$	آگوست
$T = 7.75 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 30.05$	$۹/۵ - ۳/۵$	
$T = 7.75 \sin(\pi(t - 8.70)/13.00) + 30.05$	$۲۱/۵ - ۹/۵$	
$T = -1.10(t - 21.50) + 30.50$	$۲۴ - ۲۱/۵$	
$T = -0.90(t - 0.50) + 21.00$	$۳/۵ - ۰$	سپتامبر
$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$	$۹/۵ - ۳/۵$	
$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$	$۲۱/۵ - ۹/۵$	
$T = -(t - 23.50) + 21.80$	$۲۴ - ۲۱/۵$	
$T = -0.80(t - 0.50) + 16.90$	$۳/۵ - ۰$	اکتبر
$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 19.50$	$۹ - ۳/۵$	
$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.80)/12.00) + 19.50$	$۲۱/۵ - ۹$	
$T = -0.80(t - 21.50) + 18.90$	$۲۴ - ۲۱/۵$	
$T = -0.75(t - 0.50) + 9.30$	$۴/۵ - ۰$	نوامبر
$T = 6.65 \sin(\pi(t - 9.80)/10.00) + 12.45$	$۱۹/۵ - ۴/۵$	
$T = -(t - 19.50) + 13.3$	$۲۴ - ۱۹/۵$	

$T = -0.30(t - 3.50) + 3.10$	۳/۵ - ۰	دسامبر
$T = 6.25 \sin(\pi(t - 9.70)/8.00) + 7.65$	۱۴/۵ - ۳/۵	
$T = -0.70(t - 21.50) + 6.50$	۲۴ - ۱۴/۵	

جدول ( پ - ۲ ) تابع تغییرات دمای هوای یزد

$T = -0.30(t - 0.50) + 2.30$	۲/۵ - ۰	ژانویه
$T = 3.65 \sin(\pi(t - 10.50)/9.00) + 4.35$	۲۰ - ۲/۵	
$T = -0.40(t - 19.5) + 4.40$	۲۴ - ۲۰	
$T = -0.45(t - 0.50) + 3.50$	۴/۵ - ۰	فوریه
$T = 3.40 \sin(\pi(t - 10.30)/10.00) + 5.20$	۱۹/۵ - ۴/۵	
$T = -0.60(t - 23.50) + 3.90$	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = 3.75 \sin(\pi(t - 10.20)/10.00) + 10.60$	۳/۵ - ۰	مارس
$T = 3.75 \sin(\pi(t - 5.70)/16.50) + 10.60$	۱۹/۵ - ۴/۵	
	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = -0.45(t - 0.50) + 16.60$	۴ - ۰	آوریل
$T = 5.90 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 19.50$	۸/۵ - ۴	
$T = -5.90 \sin(t - 9.00) + 19.50$	۲۴ - ۸	
$T = -0.50(t - 3.50) + 20.10$	۳/۵ - ۰	می
$T = 6.40 \sin(\pi(t - 9.00)/8.00) + 25.50$	۷/۵ - ۳/۵	
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 25.50$	۲۴ - ۷/۵	
$T = -0.80(t - 2.50) + 26.20$	۳ - ۰	ژوئن
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 9.00)/7.50) + 30.60$	۷/۵ - ۳	
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 30.60$	۲۴ - ۲۱/۵	
$T = -0.80(t - 0.50) + 26.90$	۲ - ۰	جولای
$T = 7.05 \sin(\pi(t - 9.00)/10.00) + 31.65$	۸ - ۲	
$T = 7.05 \sin(\pi(t - 8.70)/12.50) + 31.65$	۲۴ - ۸	
$T = (t - 0.50) + 27.50$	۳/۵ - ۰	آگوست
$T = 7.75 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 30.05$	۹/۵ - ۳/۵	
$T = 7.75 \sin(\pi(t - 8.70)/13.00) + 30.05$	۲۱/۵ - ۹/۵	
$T = -1.10(t - 21.50) + 30.50$	۲۴ - ۲۱/۵	
$T = -0.90(t - 0.50) + 21.00$	۳/۵ - ۰	سپتامبر
$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$	۹/۵ - ۳/۵	
$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$	۲۱/۵ - ۹/۵	
$T = -(t - 23.50) + 21.80$	۲۴ - ۲۱/۵	

$T = -0.80(t - 0.50) + 16.90$	۳/۵ - ۰	اکتبر
$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 19.50$	۹ - ۳/۵	
$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.80)/12.00) + 19.50$	۲۱/۵ - ۹	
$T = -0.80(t - 21.50) + 18.90$	۲۴ - ۲۱/۵	
$T = -0.75(t - 0.50) + 9.30$	۴/۵ - ۰	نوامبر
$T = 6.65 \sin(\pi(t - 9.80)/10.00) + 12.45$	۱۹/۵ - ۴/۵	
$T = -(t - 19.50) + 13.3$	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = -0.30(t - 3.50) + 3.10$	۳/۵ - ۰	دسامبر
$T = 6.25 \sin(\pi(t - 9.70)/8.00) + 7.65$	۱۴/۵ - ۳/۵	
$T = -0.70(t - 21.50) + 6.50$	۲۴ - ۱۴/۵	

### جدول ( پ - ۳ ) تابع تغییرات دمای هوای تبریز

$T = -0.70(t - 0.50) + 2.20$	۲/۵ - ۰	ژانویه
$T = 6.10 \sin(\pi(t - 10.00)/10.00) + 5.20$	۲۰ - ۲/۵	
$T = -0.70(t - 20.5) + 5.10$	۲۴ - ۲۰	
$T = -0.65(t - 0.50) + 4.10$	۴/۵ - ۰	فوریه
$T = 6.90 \sin(\pi(t - 10.00)/10.00) + 7.90$	۱۹/۵ - ۴/۵	
$T = -1.20(t - 21.50) + 6.70$	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = -0.70(t - 3.50) + 48.50$	۳/۵ - ۰	مارس
$T = 6.65 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 12.25$	۱۹/۵ - ۴/۵	
$T = 6.65 \sin(\pi(t - 9.00)/12.00) + 12.25$	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = -0.10(t - 21.50) + 11.90$		
$T = -0.45(t - 0.50) + 16.60$	۴ - ۰	آوریل
$T = 5.90 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 19.50$	۸/۵ - ۴	
$T = -5.90 \sin(t - 9.00) + 19.50$	۲۴ - ۸	
$T = -0.50(t - 3.50) + 20.10$	۳/۵ - ۰	می
$T = 6.40 \sin(\pi(t - 9.00)/8.00) + 25.50$	۷/۵ - ۳/۵	
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 25.50$	۲۴ - ۷/۵	
$T = -0.80(t - 2.50) + 26.20$	۳ - ۰	ژوئن
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 9.00)/7.50) + 30.60$	۷/۵ - ۳	
$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 30.60$	۲۴ - ۲۱/۵	



$T = -0.80(t - 0.50) + 26.90$	۲ - ۰	جولای
$T = 7.05 \sin(\pi(t - 9.00)/10.00) + 31.65$	۸ - ۲	
$T = 7.05 \sin(\pi(t - 8.70)/12.50) + 31.65$	۲۴ - ۸	
$T = (t - 0.50) + 27.50$	۳/۵ - ۰	آگوست
$T = 7.75 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 30.05$	۹/۵ - ۳/۵	
$T = 7.75 \sin(\pi(t - 8.70)/13.00) + 30.05$	۲۱/۵ - ۹/۵	
$T = -1.10(t - 21.50) + 30.50$	۲۴ - ۲۱/۵	
$T = -0.90(t - 0.50) + 21.00$	۳/۵ - ۰	سپتامبر
$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$	۹/۵ - ۳/۵	
$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$	۲۱/۵ - ۹/۵	
$T = -(t - 23.50) + 21.80$	۲۴ - ۲۱/۵	
$T = -0.80(t - 0.50) + 16.90$	۳/۵ - ۰	اکتبر
$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 19.50$	۹ - ۳/۵	
$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.80)/12.00) + 19.50$	۲۱/۵ - ۹	
$T = -0.80(t - 21.50) + 18.90$	۲۴ - ۲۱/۵	
$T = -0.75(t - 0.50) + 9.30$	۴/۵ - ۰	نوامبر
$T = 6.65 \sin(\pi(t - 9.80)/10.00) + 12.45$	۱۹/۵ - ۴/۵	
$T = -(t - 19.50) + 13.3$	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = -0.30(t - 3.50) + 3.10$	۳/۵ - ۰	دسامبر
$T = 6.25 \sin(\pi(t - 9.70)/8.00) + 7.65$	۱۴/۵ - ۳/۵	
$T = -0.70(t - 21.50) + 6.50$	۲۴ - ۱۴/۵	

### جدول ( پ - ۴ ) تابع تغییرات دمای هوای بندر عباس

$T = -0.30(t - 0.50) + 2.30$	۲/۵ - ۰	ژانویه
$T = 3.65 \sin(\pi(t - 10.50)/9.00) + 4.35$	۲۰ - ۲/۵	
$T = -0.40(t - 19.5) + 4.40$	۲۴ - ۲۰	
$T = -0.45(t - 0.50) + 3.50$	۴/۵ - ۰	فوریه
$T = 3.40 \sin(\pi(t - 10.30)/10.00) + 5.20$	۱۹/۵ - ۴/۵	
$T = -0.60(t - 23.50) + 3.90$	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = 3.75 \sin(\pi(t - 10.20)/10.00) + 10.60$	۳/۵ - ۰	مارس
$T = 3.75 \sin(\pi(t - 5.70)/16.50) + 10.60$	۱۹/۵ - ۴/۵	
	۲۴ - ۱۹/۵	
$T = -0.45(t - 0.50) + 16.60$	۴ - ۰	آوریل
$T = 5.90 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 19.50$	۸/۵ - ۴	
$T = -5.90 \sin(t - 9.00) + 19.50$	۲۴ - ۸	

می	۳/۵ - ۰	$T = -0.50(t - 3.50) + 20.10$
	۷/۵ - ۳/۵	$T = 6.40 \sin(\pi(t - 9.00)/8.00) + 25.50$
	۲۴ - ۷/۵	$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 25.50$
ژوئن	۳ - ۰	$T = -0.80(t - 2.50) + 26.20$
	۷/۵ - ۳	$T = 6.70 \sin(\pi(t - 9.00)/7.50) + 30.60$
	۲۴ - ۲۱/۵	$T = 6.70 \sin(\pi(t - 10.00)/12.00) + 30.60$
جولای	۲ - ۰	$T = -0.80(t - 0.50) + 26.90$
	۸ - ۲	$T = 7.05 \sin(\pi(t - 9.00)/10.00) + 31.65$
	۲۴ - ۸	$T = 7.05 \sin(\pi(t - 8.70)/12.50) + 31.65$
آگوست	۳/۵ - ۰	$T = (t - 0.50) + 27.50$
	۹/۵ - ۳/۵	$T = 7.75 \sin(\pi(t - 9.00)/7.00) + 30.05$
	۲۱/۵ - ۹/۵	$T = 7.75 \sin(\pi(t - 8.70)/13.00) + 30.05$
	۲۴ - ۲۱/۵	$T = -1.10(t - 21.50) + 30.50$
سپتامبر	۳/۵ - ۰	$T = -0.90(t - 0.50) + 21.00$
	۹/۵ - ۳/۵	$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$
	۲۱/۵ - ۹/۵	$T = 8.95 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 24.45$
	۲۴ - ۲۱/۵	$T = -(t - 23.50) + 21.80$
اکتبر	۳/۵ - ۰	$T = -0.80(t - 0.50) + 16.90$
	۹ - ۳/۵	$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.90)/7.00) + 19.50$
	۲۱/۵ - ۹	$T = 7.50 \sin(\pi(t - 8.80)/12.00) + 19.50$
	۲۴ - ۲۱/۵	$T = -0.80(t - 21.50) + 18.90$
نوامبر	۴/۵ - ۰	$T = -0.75(t - 0.50) + 9.30$
	۱۹/۵ - ۴/۵	$T = 6.65 \sin(\pi(t - 9.80)/10.00) + 12.45$
	۲۴ - ۱۹/۵	$T = -(t - 19.50) + 13.3$
دسامبر	۳/۵ - ۰	$T = -0.30(t - 3.50) + 3.10$
	۱۴/۵ - ۳/۵	$T = 6.25 \sin(\pi(t - 9.70)/8.00) + 7.65$
	۲۴ - ۱۴/۵	$T = -0.70(t - 21.50) + 6.50$

جدول ( پ - ۵ ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم تهران

ماه	زمان (ساعت)	تغییرات شار (وات بر متر مربع) با زمان (ساعت)
ژانویه	۰ - ۷/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۷/۵ - ۹/۵	$I_h=139(t-9.5)+371$ $I_{dh}=-12(t-11.8)^2+280$
	۹/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-30(t-11.7)^2+516$ $I_{dh}=-12(t-11.8)^2+280$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-130(t-14.5)+281$ $I_{dh}=-12(t-11.8)^2+280$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
فوریه	۰ - ۶/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۹/۵	$I_h=-161(t-9.5)+493$ $I_{dh}=-10.6(t-12)^2+329$
	۹/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-34(t-11.7)^2+658$ $I_{dh}=-13(t-12)^2+329$
	۱۳/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-153(t-13.5)^2+548$ $I_{dh}=-13(t-12)^2+329$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
مارس	۰ - ۶/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۹/۵	$I_h=-177(t-9.5)+629$ $I_{dh}=-11.5(t-12)^2+410$
	۹/۵ - ۱۲/۵	$I_h=-35(t-11.7)^2+798$ $I_{dh}=-11.5(t-12)^2+410$
	۱۲/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-35(t-11.7)^2+798$ $I_{dh}=-11.5(t-11.6)^2+410$
	۱۴/۵ - ۱۷/۵	$I_h=-169(t-14.5)+524$ $I_{dh}=-11.5(t-11.6)^2+410$
	۱۷/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
آوریل	۰ - ۵/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۷/۵	$I_h=-167(t-9.5)+716$ $I_{dh}=-105(t-7.5)+248$
	۷/۵ - ۹/۵	$I_h=-167(t-9.5)+716$ $I_{dh}=-13(t-12)^2+511$
	۹/۵ - ۱۲/۵	$I_h=-34(t-11.6)^2+866$ $I_{dh}=-13(t-12)^2+511$
	۱۲/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-34(t-11.6)^2+866$ $I_{dh}=-18(t-11.7)^2+511$
	۱۳/۵ - ۱۵/۵	$I_h=-167(t-13.5)+743$ $I_{dh}=-18(t-11.7)^2+511$
	۱۵/۵ - ۱۷/۵	$I_h=-167(t-13.5)+743$ $I_{dh}=-81(t-15.5)+251$
	۱۷/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
می	۰ - ۵/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۷/۵	$I_h=-182(t-8.5)+678$ $I_{dh}=-93(t-7.5)+268$
	۷/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-182(t-8.5)+678$ $I_{dh}=-12(t-11.6)^2+470$
	۱۳/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-36(t-11.5)^2+1002$ $I_{dh}=-12(t-11.6)^2+470$
	۱۶/۵ - ۱۸/۵	$I_h=-171(t-13.5)+858$ $I_{dh}=-12(t-16.5)^2+470$
	۱۸/۵ - ۲۴	$I_h=-171(t-13.5)+858$ $I_{dh}=-90(t-16.5)+182$
	۲۴ - ۱۸/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
ژوئن	۰ - ۴/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۴/۵ - ۷/۵	$I_h=-182(t-9.5)+913$ $I_{dh}=-82(t-7.5)+250$
	۷/۵ - ۹/۵	$I_h=-182(t-9.5)+913$ $I_{dh}=-9.5(t-11.7)^2+418$
	۹/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-35(t-11.6)^2+1068$ $I_{dh}=-9.5(t-11.7)^2+418$
	۱۶/۵ - ۱۸/۵	$I_h=-185(t-14.5)+774$ $I_{dh}=-9.5(t-11.7)^2+418$
	۱۸/۵ - ۲۴	$I_h=-185(t-14.5)+774$ $I_{dh}=-89(t-16.5)+199$
	۲۴ - ۱۸/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
جولای	۰ - ۵/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۸/۵	$I_h=-182(t-8.5)+670$ $I_{dh}=-90(t-8.5)+350$
	۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-33(t-11.6)^2+987$ $I_{dh}=-13(t-11.8)^2+492$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-170(t-14.5)+710$ $I_{dh}=-13(t-11.8)^2+492$
	۱۶/۵ - ۱۸/۵	$I_h=-170(t-14.5)+710$ $I_{dh}=-91(t-16.5)+205$

$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴-۱۸/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۵/۵-۰	
$I_h=-198(t-8.5)+671$	$I_{dh}=-8.9(t-11.8)^2+389$	۸/۵-۵/۵	
$I_h=-36(t-11.6)^2+1017$	$I_{dh}=-8.9(t-11.8)^2+389$	۱۴/۵-۸/۵	آگوست
$I_h=-196(t-14.5)+714$	$I_{dh}=-82(t-14.5)+324$	۱۷/۵-۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴-۱۷/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۵/۵-۰	
$I_h=-197(t-8.5)+611$	$I_{dh}=-8(t-11.5)^2+316$	۸/۵-۵/۵	
$I_h=-38(t-11.5)^2+953$	$I_{dh}=-8(t-11.5)^2+316$	۱۴/۵-۸/۵	سپتامبر
$I_h=-228(t-14.5)+611$	$I_{dh}=-8(t-11.5)^2+316$	۱۷/۵-۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴-۱۷/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۶/۵-۰	
$I_h=-112(t-8.5)+452$	$I_{dh}=-10(t-11.3)^2+317$	۸/۵-۶/۵	
$I_h=-10(t-11.4)^2+755$	$I_{dh}=-10(t-11.3)^2+317$	۱۳/۵-۸/۵	اکتبر
$I_h=-177(t-13.5)+596$	$I_{dh}=-10(t-11.3)^2+317$	۱۶/۵-۱۳/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴-۱۶/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۶/۵-۰	
$I_h=-162(t-9.5)+520$	$I_{dh}=75(t-8.5)+173$	۸/۵-۶/۵	
$I_h=-162(t-9.5)+520$	$I_{dh}=-7(t-11.1)^2+221$	۹/۵-۸/۵	
$I_h=-37(t-11.4)^2+653$	$I_{dh}=-7(t-11.1)^2+221$	۱۳/۵-۹/۵	نوامبر
$I_h=-163(t-13.5)+490$	$I_{dh}=-7(t-11.1)^2+221$	۱۵/۵-۱۳/۵	
$I_h=-163(t-13.5)+490$	$I_{dh}=0$	۱۶/۵-۱۵/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴-۱۶/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۷/۵-۰	
$I_h=-133(t-9.5)+367$	$I_{dh}=-12(t-11.5)^2+260$	۹/۵-۷/۵	
$I_h=-30(t-11.5)^2+487$	$I_{dh}=-12(t-11.5)^2+260$	۱۳/۵-۹/۵	دسامبر
$I_h=-131(t-13.5)+367$	$I_{dh}=-12(t-11.5)^2+260$	۱۵/۵-۱۳/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴-۱۵/۵	

جدول ( پ - ۶ ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم یزد

ماه	زمان (ساعت)	تغییرات شار (وات بر متر مربع) با زمان (ساعت)
ژانویه	۰ - ۶/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۷/۵	$I_h=132(t-9.5)+398$ $I_{dh}=0$
	۷/۵ - ۹/۵	$I_h=-132(t-9.5)^2+398$ $I_{dh}=-15(t-11.6)^2+357$
	۹/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-29(t-11.5)+514$ $I_{dh}=-15(t-11.6)^2+357$
	۱۴/۵ - ۱۵/۵	$I_h=-120(t-14.5)+253$ $I_{dh}=-15(t-11.6)^2+357$
	۱۵/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-120(t-14.5)+253$ $I_{dh}=-78(t-15.5)^2+80$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
فوریه	۰ - ۶/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۸/۵	$I_h=-170(t-8.5)+387$ $I_{dh}=-95(t-8.5)+226$
	۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-34(t-11.6)^2+714$ $I_{dh}=-13(t-11.7)^2+359$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-173(t-14.5)^2+428$ $I_{dh}=-13(t-11.7)^2+359$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
مارس	۰ - ۶/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۸/۵	$I_h=-149(t-8.5)+409$ $I_{dh}=-106(t-9.5)+360$
	۸/۵ - ۹/۵	$I_h=-30(t-11.5)^2+679$ $I_{dh}=-106(t-9.5)+360$
	۹/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-30(t-11.5)^2+679$ $I_{dh}=-40(t-11.4)^2+505$
	۱۳/۵ - ۱۶/۵	$I_h=-146(t-13.5)+559$ $I_{dh}=-65(t-13.5)+329$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
آوریل	۰ - ۵/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۸/۵	$I_h=-146(t-8.5)+499$ $I_{dh}=-93(t-8.5)+311$
	۸/۵ - ۱۱/۵	$I_h=-31(t-11.5)^2+778$ $I_{dh}=-37(t-11.4)^2+622$
	۱۱/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-31(t-11.5)^2+778$ $I_{dh}=-25(t-11.3)^2+622$
	۱۴/۵ - ۱۵/۵	$I_h=-155(t-14.5)^2+499$ $I_{dh}=-25(t-11.3)^2+622$
	۱۵/۵ - ۱۷/۵	$I_h=-155(t-14.5)+499$ $I_{dh}=-82(t-15.5)+181$
مئی	۰ - ۵/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۷/۵	$I_h=-172(t-8.5)+648$ $I_{dh}=-113(t-7.5)+327$
	۷/۵ - ۸/۵	$I_h=-172(t-8.5)+648$ $I_{dh}=-17(t-11.3)^2+572$
	۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-33(t-11.4)^2+926$ $I_{dh}=-17(t-11.3)^2+572$
	۱۴/۵ - ۱۷/۵	$I_h=-175(t-14.5)+609$ $I_{dh}=-111(t-14.5)+398$
	۱۷/۵ - ۲۴	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
ژوئن	۰ - ۴/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۴/۵ - ۷/۵	$I_h=-176(t-8.5)+718$ $I_{dh}=-101(t-7.5)+312$
	۷/۵ - ۸/۵	$I_h=-176(t-8.5)+718$ $I_{dh}=-14(t-11.3)^2+514$
	۸/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-34(t-11.4)^2+1004$ $I_{dh}=-14(t-11.3)^2+514$
	۱۳/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-181(t-13.5)+854$ $I_{dh}=-14(t-11.3)^2+514$
	۱۴/۵ - ۱۷/۵	$I_h=-181(t-13.5)+854$ $I_{dh}=-96(t-14.5)+371$
جولای	۰ - ۵/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۷/۵	$I_h=-182(t-8.5)+682$ $I_{dh}=-102(t-7.5)+295$
	۷/۵ - ۸/۵	$I_h=-182(t-8.5)+682$ $I_{dh}=-14(t-11.5)^2+519$
	۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-34(t-11.5)^2+988$ $I_{dh}=-14(t-11.5)^2+519$
	۱۴/۵ - ۱۵/۵	$I_h=-184(t-14.5)+682$ $I_{dh}=-14(t-11.5)^2+519$

$I_h = -184(t-14.5) + 682$	$I_{dh} = -104(t-15.5) + 295$	۱۷/۵ - ۱۵/۵	آگوست
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۲۴ - ۱۷/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۵/۵ - ۰	
$I_h = -186(t-8.5) + 647$	$I_{dh} = -103(t-7.5) + 271$	۷/۵ - ۵/۵	
$I_h = -186(t-8.5) + 647$	$I_{dh} = -14(t-11.5)^2 + 495$	۸/۵ - ۷/۵	
$I_h = -35(t-11.5)^2 + 962$	$I_{dh} = -14(t-11.5)^2 + 495$	۱۳/۵ - ۸/۵	
$I_h = -35(t-11.5)^2 + 962$	$I_{dh} = -96(t-13.5) + 439$	۱۴/۵ - ۱۳/۵	
$I_h = -190(t-14.5) + 647$	$I_{dh} = -96(t-13.5) + 439$	۱۷/۵ - ۱۴/۵	سپتامبر
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۲۴ - ۱۷/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۵/۵ - ۰	
$I_h = -197(t-8.5) + 627$	$I_{dh} = -12(t-11.2)^2 + 412$	۷/۵ - ۵/۵	
$I_h = -197(t-8.5) + 627$	$I_{dh} = -12(t-11.2)^2 + 412$	۸/۵ - ۷/۵	
$I_h = -38(t-11.3)^2 + 925$	$I_{dh} = -12(t-11.5)^2 + 412$	۱۳/۵ - ۸/۵	
$I_h = -178(t-13.5) + 741$	$I_{dh} = -12(t-11.2)^2 + 412$	۱۵/۵ - ۱۳/۵	
$I_h = -178(t-13.5) + 741$	$I_{dh} = -93(t-15.5) + 190$	۱۷/۵ - ۱۵/۵	اکتبر
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۲۴ - ۱۷/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۶/۵ - ۰	
$I_h = -117(t-8.5) + 473$	$I_{dh} = -16(t-11)^2 + 417$	۸/۵ - ۶/۵	
$I_h = -34(t-11.2)^2 + 721$	$I_{dh} = -16(t-11)^2 + 417$	۱۳/۵ - ۸/۵	
$I_h = -167(t-13.5) + 541$	$I_{dh} = -95(t-13.5) + 317$	۱۶/۵ - ۱۳/۵	نوامبر
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۲۴ - ۱۶/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۶/۵ - ۰	
$I_h = -145(t-9.5) + 357$	$I_{dh} = 138(t-7.5) + 173$	۷/۵ - ۶/۵	
$I_h = -145(t-8.5) + 357$	$I_{dh} = -15(t-11)^2 + 357$	۸/۵ - ۷/۵	
$I_h = -30(t-11.2)^2 + 576$	$I_{dh} = -15(t-11)^2 + 357$	۱۳/۵ - ۸/۵	دسامبر
$I_h = -99(t-13.5) + 417$	$I_{dh} = -86(t-13.5) + 263$	۱۵/۵ - ۱۳/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۲۴ - ۱۵/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۶/۵ - ۰	
$I_h = -132(t-8.5) + 282$	$I_{dh} = -13(t-11.3)^2 + 309$	۸/۵ - ۶/۵	
$I_h = -31(t-11.3)^2 + 525$	$I_{dh} = -13(t-11.3)^2 + 309$	۱۳/۵ - ۸/۵	دسامبر
$I_h = -135(t-13.5) + 375$	$I_{dh} = -13(t-11.3)^2 + 309$	۱۵/۵ - ۱۳/۵	
$I_h = 0$	$I_{dh} = 0$	۲۴ - ۱۵/۵	

جدول ( پ - ۷ ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم تبریز

ماه	زمان (ساعت)	تغییرات شار (وات بر متر مربع) با زمان (ساعت)
ژانویه	۷/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۹/۵ - ۷/۵	$I_h=85(t-9.5)+192$ $I_{dh}=61(t-9.5)+136$
	۱۴/۵ - ۹/۵	$I_h=-17(t-11.9)^2+290$ $I_{dh}=-12(t-12)^2+211$
	۱۶/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-75(t-14.5)+175$ $I_{dh}=-58(t-14.5)+136$
	۲۴ - ۱۶/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
فوریه	۷/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۱۰/۵ - ۷/۵	$I_h=-159(t-10.5)+384$ $I_{dh}=-81(t-10.5)+233$
	۱۴/۵ - ۱۰/۵	$I_h=-20(t-11.9)^2+423$ $I_{dh}=-15(t-12.2)^2+276$
	۱۷/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-143(t-14.5)+288$ $I_{dh}=-98(t-14.5)+197$
	۲۴ - ۱۷/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
مارس	۶/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۷/۵ - ۶/۵	$I_h=-110(t-9.5)+360$ $I_{dh}=0$
	۹/۵ - ۷/۵	$I_h=-110(t-9.5)+360$ $I_{dh}=-77(t-9.5)+252$
	۱۰/۵ - ۹/۵	$I_h=-22(t-11.9)^2+798$ $I_{dh}=-77(t-9.5)+252$
	۱۳/۵ - ۱۰/۵	$I_h=-22(t-11.9)^2+487$ $I_{dh}=-16(t-12)^2+352$
	۱۴/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-99(t-13.5)+431$ $I_{dh}=-16(t-12)^2+352$
	۱۷/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-99(t-13.5)+431$ $I_{dh}=-75(t-14.5)+252$
آوریل	۲۴ - ۱۷/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۸/۵ - ۵/۵	$I_h=-94(t-8.5)+293$ $I_{dh}=-75(t-9.5)+307$
	۹/۵ - ۸/۵	$I_h=-19(t-11.8)^2+500$ $I_{dh}=-75(t-9.5)+307$
	۱۴/۵ - ۹/۵	$I_h=-19(t-11.8)^2+500$ $I_{dh}=-15(t-11.9)^2+393$
می	۱۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-34(t-11.6)^2+866$ $I_{dh}=-18(t-11.7)^2+511$
	۲۴ - ۱۸/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۸/۵ - ۵/۵	$I_h=-108(t-8.5)+378$ $I_{dh}=-81(t-8.5)+281$
	۱۳/۵ - ۸/۵	$I_h=-20(t-11.7)^2+583$ $I_{dh}=-15(t-11.8)^2+444$
ژوئن	۱۴/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-98(t-13.5)+518$ $I_{dh}=-15(t-11.8)^2+444$
	۱۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-98(t-13.5)+518$ $I_{dh}=-78(t-14.5)+335$
	۲۴ - ۱۸/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۸/۵ - ۵/۵	$I_h=-137(t-8.5)+504$ $I_{dh}=-82(t-9.5)+372$
جولای	۹/۵ - ۸/۵	$I_h=-9.5(t-11.7)^2+765$ $I_{dh}=-82(t-9.5)+372$
	۱۳/۵ - ۹/۵	$I_h=-24(t-11.8)^2+765$ $I_{dh}=-17(t-11.9)^2+470$
	۱۴/۵ - ۱۳/۵	$I_h=-24(t-11.8)^2+765$ $I_{dh}=-77(t-13.5)+427$
	۱۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-130(t-14.5)+590$ $I_{dh}=-77(t-13.5)+427$
	۲۴ - ۱۸/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
جولای	۵/۵ - ۰	$I_h=0$ $I_{dh}=0$
	۸/۵ - ۵/۵	$I_h=-129(t-9.5)+581$ $I_{dh}=-80(t-8.5)+274$
	۹/۵ - ۸/۵	$I_h=-129(t-9.5)+581$ $I_{dh}=-16(t-12)^2+470$
	۱۴/۵ - ۹/۵	$I_h=-24(t-11.9)^2+719$ $I_{dh}=-13(t-11.8)^2+470$
	۱۸/۵ - ۱۴/۵	$I_h=-124(t-14.5)+557$ $I_{dh}=-83(t-14.5)+370$
	۲۴ - ۱۸/۵	$I_h=0$ $I_{dh}=0$

$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۵/۵ -۰	آگوست
$I_h=-123(t-8.5)+393$	$I_{dh}=-82(t-9.5)+342$	۸/۵ -۵/۵	
$I_h=-24(t-11.8)^2+654$	$I_{dh}=-82(t-9.5)+342$	۹/۵ -۸/۵	
$I_h=-24(t-11.8)^2+654$	$I_{dh}=-16(t-12)^2+442$	۱۳/۵ -۹/۵	
$I_h=-113(t-13.5)+585$	$I_{dh}=-16(t-12)^2+442$	۱۵/۵ -۱۳/۵	
$I_h=-113(t-13.5)+585$	$I_{dh}=-77(t-15.5)+246$	۱۸/۵ -۱۵/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ -۱۸/۵	سپتامبر
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۶/۵ -۰	
$I_h=-133(t-9.5)+491$	$I_{dh}=0$	۷/۵ -۶/۵	
$I_h=-133(t-9.5)+491$	$I_{dh}=-78(t-9.5)+288$	۹/۵ -۷/۵	
$I_h=-26(t-11.8)^2+628$	$I_{dh}=-16(t-11.9)^2+380$	۱۴/۵ -۹/۵	
$I_h=-129(t-14.5)+438$	$I_{dh}=-80(t-14.5)+272$	۱۷/۵ -۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ -۱۷/۵	اکتبر
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۶/۵ -۰	
$I_h=-121(t-9.5)+401$	$I_{dh}=0$	۷/۵ -۶/۵	
$I_h=-121(t-9.5)+401$	$I_{dh}=-68(t-9.5)+228$	۹/۵ -۷/۵	
$I_h=-26(t-11.6)^2+516$	$I_{dh}=-14(t-11.7)^2+296$	۱۳/۵ -۹/۵	
$I_h=-116(t-13.5)+422$	$I_{dh}=-14(t-11.7)^2+296$	۱۴/۵ -۱۳/۵	
$I_h=-116(t-13.5)+422$	$I_{dh}=-70(t-14.5)+186$	۱۶/۵ -۱۴/۵	نوامبر
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ -۱۶/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۷/۵ -۰	
$I_h=-106(t-9.5)+293$	$I_{dh}=58(t-9.5)+166$	۹/۵ -۷/۵	
$I_h=-24(t-11.6)^2+399$	$I_{dh}=-12(t-11.7)^2+224$	۱۳/۵ -۹/۵	
$I_h=-99(t-13.5)+312$	$I_{dh}=-12(t-11.7)^2+224$	۱۴/۵ -۱۳/۵	
$I_h=-99(t-13.5)+312$	$I_{dh}=-60(t-14.5)+130$	۱۶/۵ -۱۴/۵	دسامبر
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ -۱۶/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۷/۵ -۰	
$I_h=-83(t-9.5)+195$	$I_{dh}=-60(t-9.5)+136$	۹/۵ -۷/۵	
$I_h=-18(t-11.8)^2+290$	$I_{dh}=-12(t-11.8)^2+198$	۱۳/۵ -۹/۵	
$I_h=-18(t-11.8)^2+290$	$I_{dh}=-81(t-13.5)+163$	۱۴/۵ -۱۳/۵	
$I_h=-78(t-14.5)+159$	$I_{dh}=-81(t-13.5)+163$	۱۶/۵ -۱۴/۵	دسامبر
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ -۱۶/۵	



جدول ( پ ۸ ) تابع تغییرات شار تابشی خورشیدی اقلیم بندر عباس

ماه	زمان (ساعت)	تغییرات شار (وات بر متر مربع) با زمان (ساعت)
ژانویه	۰ - ۶/۵	$I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۷/۵	$I_{dh}=88(t-7.5)+110$
	۷/۵ - ۹/۵	$I_{dh}=-19(t-11.4)^2+399$
	۹/۵ - ۱۴/۵	$I_{dh}=-19(t-11.4)^2+399$
	۱۴/۵ - ۱۵/۵	$I_{dh}=-19(t-11.4)^2+399$
	۱۵/۵ - ۱۶/۵	$I_{dh}=-72(t-15.5)+80$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_{dh}=0$
فوریه	۰ - ۶/۵	$I_{dh}=0$
	۶/۵ - ۸/۵	$I_{dh}=-125(t-8.5)+287$
	۸/۵ - ۹/۵	$I_{dh}=-20(t-11.5)^2+467$
	۹/۵ - ۱۳/۵	$I_{dh}=-20(t-11.5)^2+467$
	۱۳/۵ - ۱۴/۵	$I_{dh}=-20(t-11.5)^2+467$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_{dh}=-126(t-14.5)+287$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_{dh}=0$
مارس	۰ - ۵/۵	$I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۹/۵	$I_{dh}=-19(t-11.4)^2+399$
	۹/۵ - ۱۱/۵	$I_{dh}=-74(t-11.5)+448$
	۱۱/۵ - ۱۴/۵	$I_{dh}=-19(t-11.4)^2+399$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_{dh}=-85(t-11.5)+449$
	۱۶/۵ - ۲۴	$I_{dh}=0$
آوریل	۰ - ۵/۵	$I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۸/۵	$I_{dh}=22(t-4.5)^2+20$
	۸/۵ - ۹/۵	$I_{dh}=22(t-4.5)^2+20$
	۹/۵ - ۱۰/۵	$I_{dh}=-59(t-9.5)+568$
	۱۰/۵ - ۱۴/۵	$I_{dh}=-19(t-11)^2+637$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_{dh}=-19(t-11)^2+637$
	۱۶/۵ - ۱۷/۵	$I_{dh}=-58(t-16.5)+62$
می	۰ - ۵/۵	$I_{dh}=0$
	۵/۵ - ۸/۵	$I_{dh}=-94(t-8.5)+349$
	۸/۵ - ۱۰/۵	$I_{dh}=153(t-8.5)+349$
	۱۰/۵ - ۱۴/۵	$I_{dh}=-16(t-11.7)^2+659$
	۱۴/۵ - ۱۶/۵	$I_{dh}=-16(t-11.7)^2+659$
	۱۶/۵ - ۱۷/۵	$I_{dh}=-101(t-16.5)+121$
	۱۷/۵ - ۲۴	$I_{dh}=0$
ژوئن	۰ - ۴/۵	$I_{dh}=0$
	۴/۵ - ۸/۵	$I_{dh}=-88(t-8.5)+356$
	۸/۵ - ۱۳/۵	$I_{dh}=-18(t-11.2)^2+487$
	۱۳/۵ - ۱۴/۵	$I_{dh}=-90(t-13.5)+392$
	۱۴/۵ - ۱۷/۵	$I_{dh}=-89(t-13.5)+392$
	۱۷/۵ - ۲۴	$I_{dh}=0$
جولای	۰ - ۵/۵	$I_{dh}=0$

$I_h=134(t-9.5)+637$	$I_{dh}=97(t-8.5)+253$	۸/۵ - ۵/۵	
$I_h=134(t-9.5)+637$	$I_{dh}=97(t-8.5)+253$	۹/۵ - ۸/۵	
$I_h=-29(t-11.4)^2+742$	$I_{dh}=-13(t-11.3)^2+492$	۱۳/۵ - ۹/۵	
$I_h=-162(t-13.5)+614$	$I_{dh}=-92(t-13.5)+407$	۱۷/۵ - ۱۳/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ - ۱۷/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۵/۵ - ۰	
$I_h=-144(t-8.5)+520$	$I_{dh}=-97(t-8.5)+338$	۸/۵ - ۵/۵	
$I_h=-29(t-11.5)^2+764$	$I_{dh}=-18(t-11.3)^2+479$	۱۴/۵ - ۸/۵	آگوست
$I_h=-150(t-14.5)+485$	$I_{dh}=-92(t-14.5)+295$	۱۷/۵ - ۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ - ۱۷/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۵/۵ - ۰	
$I_h=156(t-8.5)+519$	$I_{dh}=-92(t-8.4)+305$	۸/۵ - ۵/۵	
$I_h=-38(t-11.5)^2+953$	$I_{dh}=77(t-9.5)+611$	۹/۵ - ۸/۵	
$I_h=-228(t-14.5)+611$	$I_{dh}=-8(t-11.5)^2+316$	۱۰/۵ - ۹/۵	سپتامبر
$I_h=-32(t-11.2)^2+752$	$I_{dh}=-29(t-11.3)^2+607$	۱۳/۵ - ۱۰/۵	
$I_h=-158(t-13.5)+512$	$I_{dh}=-29(t-11.3)^2+607$	۱۴/۵ - ۱۳/۵	
$I_h=-158(t-13.5)+512$	$I_{dh}=-129(t-14.5)+310$	۱۶/۵ - ۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ - ۱۶/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۵/۵ - ۰	
$I_h=153(t-8.5)+479$	$I_{dh}=80(t-7.5)+171$	۷/۵ - ۵/۵	
$I_h=153(t-8.5)+479$	$I_{dh}=220(t-8.5)+391$	۸/۵ - ۷/۵	
$I_h=-33(t-11.1)^2+702$	$I_{dh}=-19(t-10.9)^2+501$	۱۳/۵ - ۸/۵	اکتبر
$I_h=-161(t-13.5)+512$	$I_{dh}=-19(t-10.9)^2+501$	۱۴/۵ - ۱۳/۵	
$I_h=-161(t-13.5)+512$	$I_{dh}=-118(t-14.5)+255$	۱۶/۵ - ۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ - ۱۶/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۶/۵ - ۰	
$I_h=-148(t-8.5)+397$	$I_{dh}=75(t-7.5)+130$	۷/۵ - ۶/۵	
$I_h=-148(t-8.5)+397$	$I_{dh}=-185(t-8.5)+315$	۸/۵ - ۷/۵	
$I_h=-30(t-11.1)^2+600$	$I_{dh}=-18(t-10.9)^2+419$	۱۳/۵ - ۸/۵	نوامبر
$I_h=-153(t-13.5)+427$	$I_{dh}=-100(t-13.5)+297$	۱۵/۵ - ۱۳/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ - ۱۵/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۶/۵ - ۰	
$I_h=132(t-9.5)+451$	$I_{dh}=65(t-7.5)+96$	۷/۵ - ۶/۵	
$I_h=132(t-9.5)+451$	$I_{dh}=169(t-8.5)+265$	۸/۵ - ۷/۵	
$I_h=-132(t-9.5)+451$	$I_{dh}=-16(t-11.1)^2+374$	۹/۵ - ۸/۵	
$I_h=-30(t-11.3)^2+549$	$I_{dh}=-16(t-11.1)^2+374$	۱۳/۵ - ۹/۵	دسامبر
$I_h=-147(t-13.5)+404$	$I_{dh}=-16(t-11.1)^2+374$	۱۴/۵ - ۱۳/۵	
$I_h=-147(t-13.5)+404$	$I_{dh}=103(t-14.5)+189$	۱۵/۵ - ۱۴/۵	
$I_h=0$	$I_{dh}=0$	۲۴ - ۱۵/۵	

Abstract:

## Thermal performance analysis of phasing materials as insulation in the external walls of residential buildings

In this research, the performance analysis of Phase Change Materials (PCMs) in the exterior wall of a building has been investigated. For this reason, a new governing equation was developed for predicting the thermal behavior of phase change materials. Then, the thermal behavior of a multi-layer wall that contains phase change materials was numerically analyzed by finite difference approach. Moreover, the effect of using the PCMs on the reduction of interior heat flux of the wall has been investigated in four different climatic conditions: cold, mild, arid and tropical wet. In the following, the effects of varying the melting temperature of PCM on the rate of heat loss through the wall were studied over a year under the mentioned climatic conditions. The results show that using one layer of PCM with appropriate melting temperature in the exterior wall can reduce the annual energy consumption between 4.6% (in Bandar-Abbas as a representative of tropical wet climate) and 8.3% (in Tabriz as a representative of cold climate). Also, the results indicate that, in the arid climate because of the large temperature difference between the warm and cold seasons, using a PCM layer with appropriate melting temperature for the warm months leads to a low thermal storage performance in the cold months and similarly, using a PCM layer with appropriate melting temperature for the cold months leads to a low the thermal storage performance of the wall in the warm months. Therefore, in this research, the idea of using two separate layers of PCMs with the appropriate melting temperatures for both warm and cold months is proposed. Accordingly, the annual heat load can be reduced about 8.8% by implementing the above idea.

Also, in the present study, a proposal for modifying the definition of wall thermal inertia in the 1<sup>st</sup> chapter of National Building Regulations is proposed and some coefficients are presented in order to modify the value of thermal inertia of exterior wall with a layer of PCM.

Keywords: Phase Change Materials (PCM), Building wall, Energy consumption