



تخمین همزمان خواص ترموفیزیکی و ضرایب انتقال حرارت جابجایی یک اتاق نمونه در تهران در یک مساله محاسبه بار حرارتی - برودتی معکوس

زهرا پولائی موزیرجی^۱، عزیز عظیمی^{۲*}، سیامک کاظم‌زاده حنانی^۳، محمد نجفی^۴

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دماوند، دماوند، ایران

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد اهواز، اهواز، ایران

^۳ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

^۴ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۲ تیر ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۱ آذر ۱۳۹۴
پذیرش: ۱۲ دی ۱۳۹۴
ارائه آنلاین: ۱۹ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

تخمین همزمان
روش گرادیان مزدوج
آنالیز معکوس
تخمین شرایط مرزی
بار حرارتی ساختمان

چکیده: در این مقاله، خواص ترموفیزیکی و ضرایب انتقال حرارت جابجایی یک اتاق نمونه در تهران، در یک مساله محاسبه بار حرارتی-برودتی معکوس به‌طور جداگانه و همزمان تخمین زده شده‌اند. در این راستا، ابتدا مدل‌سازی حرارتی اتاق جهت محاسبه بار حرارتی-برودتی آن به‌عنوان مساله مستقیم با فرض اینکه خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی معلوم هستند، انجام گرفته‌است. معادلات حاکم بر این مساله، معادلات هدایت حرارتی گذرا در دیوارها به‌همراه شرایط مرزی ترکیبی جابجایی و تشعشع با در نظر گرفتن تشعشع بین سطوح داخلی دیوارهای اتاق و همچنین مدل توده‌های برای بقای انرژی فضای اتاق هستند. برای حل عددی این معادلات از روش حجم محدود و همچنین برای حل عددی معادلات مربوط به مدل توده‌های فضا و ضرایب حساسیت از روش گسسته‌سازی تفاضل محدود پسر استفاده شده‌است. سپس از روش تخمین پارامتر گرادیان مزدوج برای تعیین پارامترهای مجهول ضریب انتقال حرارت هدایت، ظرفیت حرارت کلی، و ضرایب انتقال حرارت جابجایی داخلی و خارجی با استفاده از مقادیر تجربی شبیه‌سازی شده با/بدون اغتشاش انجام پذیرفته‌است. نتایج نشان می‌دهند که تخمین جداگانه و همزمان پارامترهای موثر بر بار حرارتی-برودتی و مصرف انرژی ساختمان با استفاده از روش تخمین پارامتر گرادیان مزدوج قابل حصول می‌باشد.

۱- مقدمه

سه‌م بسیار بالای مصرف انرژی در ساختمانهای مسکونی و تجاری و همچنین استاندارد نبودن شرایط طراحی و مصالح کاربردی آنها، موجب شده‌است تا محاسبات صحیح بار حرارتی، تحلیل دقیق عملکرد و بهینه‌سازی ساختمانها به‌منظور کاهش مصرف انرژی احساس شود. در این راستا، برای ارزیابی و کاهش مصرف انرژی ساختمان در فاز طراحی ساختمان و همچنین در هنگام ارتقای سیستم‌های موجود در ساختمان باید مصرف انرژی ساختمان را مدل‌سازی و شبیه‌سازی نمود. برای مدل‌سازی و محاسبه مصرف انرژی ساختمانها، پارامترها و مولفه‌های زیادی از جمله ساختار ساختمان، شرایط محیطی و مرزی، سیستم تهویه ساختمان و تاثیرات متقابل بین آنها، مورد نیاز می‌باشد که عملکرد هر یک از آنها بر بار گرمایشی-سرمایشی و مصرف انرژی ساختمان تاثیر می‌گذارد. این در حالی است که ممکن است در شبیه‌سازی‌های معمول، این پارامترها و شرایط، غیر قابل محاسبه یا مجهول باشند و با فرضیات ساده‌شده‌های مورد استفاده قرار گرفته‌باشند و یا به‌علت پرهزینه بودن و در برخی شرایط به‌واسطه محدودیت‌های اجرایی و اندازه‌گیری، انجام آزمایش‌های متعدد برای تحلیل حرارتی ساختمان غیرممکن شود. بدین‌گونه استفاده از روش‌های روش‌هایی نو، کارآمد و کم‌هزینه با کاربرد روزافزون در زمینه‌های کاربردی همچون آنالیز معکوس

برای تعیین مقادیر پارامترهای مجهول در ساختمان پیشنهاد می‌شود. فعالیتها در زمینه شبیه‌سازی بار حرارتی و انرژی در دهه ۱۹۶۰ میلادی آغاز شد. در آن زمان تنها روش‌های ساده دستی برای تخمین بار تحمیلی به ساختمان و مصرف انرژی ساختمان استفاده می‌شد. از اینرو، گروه‌های تحقیقاتی بسیاری از قبیل مرجع [۱] و محققانی مانند استفنسون و میتالاس [۲] فعالیت‌های خود را به مطالعه در زمینه تئوری پایه شبیه‌سازی و الگوریتم‌های تخمین میزان بار تحمیلی به ساختمان اختصاص دادند. با این حال برای در نظر گرفتن تمام پیچیدگیهای موجود در ساختمان نیاز به مدل‌سازی و شبیه‌سازی به‌صورت دینامیکی می‌باشد. از جمله کارهای انجام‌شده در این زمینه، شبیه‌سازی دینامیکی یک سیستم با گرمایش رادیاتور با شیر کنترل ترموستاتیک توسط باوپینگ و همکاران [۳] می‌باشد. زیوانیدیس و همکاران [۴] یک شبیه‌سازی عددی بر اساس روش تفاضل محدود جهت پیشبینی رفتار حرارتی ساختمانهای آتن به‌منظور تخمین مصرف انرژی برودتی در شرایط مختلف را ارائه نمودند. مدل‌سازی عددی برای تعادل حرارتی اتاقهایی که با سیستم‌های حرارتی تشعشعی تجهیز شده‌اند، توسط کارلی و همکاران [۵] انجام شد. آنها رفتار دینامیکی سیستم‌های برودتی و حرارتی را بررسی نموده و نتایج شبیه‌سازی با اندازه‌گیری‌های انجام شده در اتاق را معتبرسازی نمودند.

امروزه آنالیز معکوس با تکیه بر افزایش دقت داده‌های حاصل از

اندازه‌گیری دما جهت تحلیل مسائل انتقال حرارت و انرژی مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. به‌طوریکه مسائل معکوس کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف علوم و مهندسی به‌ویژه در آنالیز و طراحی سیستم‌های حرارتی و انرژی دارند. از جمله کاربردهای آنالیز معکوس میتوان به موارد کاربردی همچون تخمین شرایط سطح مانند دما و شار مرزی توسط لی و یانگ [۶]، محاسبه خواص حرارتی از قبیل ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت حرارتی جسم توسط دانتاس و اورلانده [۷] و تخمین شرایط اولیه مانند توزیع دمای اولیه در جسم [۸ و ۹] اشاره نمود. همچنین میتوان به کاربرد آنالیز معکوس در تخمین ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت حرارت کلی با استفاده از معادله هدایت حرارتی گذرای یکبعدی توسط ساوف و اوزیسیک [۱۰] و هوآنگ و یان [۱۱] اشاره کرد.

کاکایی و فرهانیه [۱۲] مساله هدایت حرارتی معکوس را با استفاده از روش آنالیز معکوس لونبرگ-مارکوارت جهت تخمین مقادیر دما روی مرز متحرک از سوزش سوخت جامد همگن یک پرتابه مورد بررسی قرار دادند. روش حل مساله مستقیم نیز روش عددی اجزاء محدود بود و از مقادیر اندازه‌گیری شده دما در درون دامنه محاسباتی در آنالیز معکوس استفاده شد. بهبهانینیا و کوثری [۱۳] نیز یک راه حل بهبودیافته از روش تعیین تابع متوالی بک و روش عددی المان مرزی در حل مسائل هدایت حرارتی معکوس دوبعدی شامل تخمین شرط مرزی شار حرارتی وابسته به مکان و زمان ارائه دادند. آنها از مقادیر دما در درون جسم/روی مرزهای غیرفعال به‌عنوان داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده نمودند.

عظیمی و همکاران [۱۴] روش حل شبکه‌های چندبُلوکی با سازمان از مسائل هدایت حرارتی معکوس گذرای دوبعدی در مختصات کارترین را ارائه نمودند. فنگ و جیانلی [۱۵] از آنالیز معکوس برای تخمین توزیع اولیه ترکیبات ارگانیک سبک در ساختمان با استفاده از معادلات بقای جرم، استفاده نمودند. ایمانی و همکاران [۱۶] برای طراحی حرارتی یک اتاق مسکونی به‌منظور ایجاد شرایط آسایش حرارتی از روش آنالیز معکوس استفاده نمودند. کوثری و نظری [۱۷] یک مساله هدایت حرارتی یکبعدی معکوس را در یک محیط متخلخل بین دو صفحه موازی را تحت شرایط دمایی غیرتعادلی با استفاده از روش گرادیان مزدوج مورد بررسی و تحلیل قرار دادند. در این راستا آنها معادلات مربوط به هر دو فاز جامد و سیال را به‌دست آورده و در نهایت شار حرارتی گذرای اعمال شده به مرز جسم متخلخل را تخمین زدند. نظری و همکاران [۱۸] از روش‌های هموارسازی و فیلتر نمودن داده‌های اندازه‌گیری شده به‌منظور برطرف نمودن بدرفتاری مساله معکوس هدایت حرارتی در یک محیط متخلخل استفاده نمودند. آنها شار حرارتی گذرای اعمال شده به مرز جسم متخلخل را تحت شرایط دمایی غیرتعادلی با استفاده از روش گرادیان مزدوج تخمین زدند. در نهایت در کار آنها، اثرات روش‌های هموارسازی و فیلتر نمودن داده‌ها و همچنین خطای موجود در داده‌های ورودی به آنالیز معکوس بر تخمین شار حرارتی مورد بررسی قرار گرفت.

همتیان و کرمی [۱۹] با استفاده از آنالیز المان مرزی معکوس به حل دو مساله هدایت حرارتی معکوس پرداختند. پارامترهای مجهول مورد بررسی در این دو مساله هدایت حرارتی خطی و غیرخطی (ضریب هدایت حرارتی وابسته به دما)، موقعیت و مقدار قدرت منابع تولید حرارت نقطه‌ای و خطی مجهول بود. برای هموارسازی جواب‌های حاصل از این دو مساله معکوس از روش حداقل مربعات و روشی با مرتبه مشتق‌گیری صفر استفاده کردند.

عظیمی و همکاران [۲۰] از یک روش تخمین پارامتر آنالیز معکوس به‌منظور تخمین شرایط مرزی حرارتی جریان ورودی و دیواره جسم در یک مساله انتقال حرارت جابجایی اجباری آرام گذرای معکوس دوبعدی استفاده نمودند. آنها معادلات غیردائم‌ناویر-استوکس تراکم‌ناپذیر دوبعدی به شکل معادلات تابع چرخش-تابع جریان به‌همراه معادله غیردائم انرژی را به‌عنوان معادلات حاکم بر مساله مستقیم به‌کار گرفتند. از روش اختلاف محدود فاکتورگیری شده، به شکل دلتا و غیرصریح بیم و وارمینگ به‌منظور حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی مساله در یک سیستم مختصات کارترین استفاده نمودند. در مساله معکوس مورد بررسی با به‌کارگیری روش تخمین پارامتر لونبرگ-مارکوارت، شرایط مرزی و ورودی مجهول وابسته به زمان را تخمین زدند که تخمین‌های آنها از دقت بالایی برخوردار بود.

پایان و همکاران [۲۱] بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های انتقال حرارت را به‌منظور طراحی مرزی تخمین توزیع شار حرارتی روی سطح گرمکن محافظه‌ای با جابجایی آزاد مورد مطالعه قرار دادند. برای حل عددی مسائل مستقیم و حساسیت از روش حجم محدود استفاده نمودند. در مساله معکوس، از روش گرادیان مزدوج برای بهینه کردن تابع هدف استفاده نمودند. کارایی و دقت روش حاضر برای حل مسائل انتقال حرارت جابجایی با مقایسه نتایج آن با یک مسئله نمونه و مثال‌های عددی مورد بررسی قرار گرفت.

نظری و کوثری [۲۲] به بررسی انتقال حرارت هدایتی معکوس گذرا در کانال حاوی ماده متخلخل با در نظر گرفتن شرط عدم تعادل حرارتی بین دو فاز پرداختند. آنها در مساله معکوس از دو روش معکوس تخمین متوالی تابع و گرادیان مزدوج الحاقی به‌منظور تخمین شار حرارتی سطحی نسبت به زمان استفاده نمودند. در نهایت، علاوه بر ارائه مقایسه‌ای بین دو روش معکوس فوق در تخمین شار حرارتی، تاثیر پارامترهایی مثل ضریب توالی در روش تخمین متوالی تابع مجهول، خطای دماهای اندازه‌گیری شده در محل سنسور و محل قرارگیری حسگرها بر توزیع شار تخمین زده شده را مورد بحث و بررسی قرار دادند.

پایان و سروری [۲۳] طراحی معکوس مرزی سیستم‌های حرارتی با انتقال حرارت ترکیبی جابجایی اجباری-تابش را مورد مطالعه قرار دادند. هدف از طراحی مرزی ایجاد توزیع دما و شار حرارتی یکنواخت روی سطح محصول (سطح طراحی) بین دو صفحه موازی با بهینه‌سازی توان گرمکن‌های موجود روی سطح گرمکن بود. مسئله مستقیم شامل حل معادلات تابش و جابجایی اجباری بود که به وسیله معادله انرژی و شرایط مرزی به هم متصل شده بودند.

به پیچیدگی و اثر متقابل معادلات حاکم بر مساله از روش گرادیان مزدوج و عدم وابستگی کمیت‌های مجهول به زمان و مکان (مقادیر ثابت) از نسخه تخمین پارامتر آنالیز معکوس استفاده شده‌است. روش عددی مورد استفاده برای حل مساله مستقیم روش حجم محدود است. همچنین برای تخمین پارامترهای مجهول در آنالیز معکوس از دمای سنسورهای شبیه‌سازی شده به صورت عددی با/بدون اغتشاش به‌عنوان مقادیر اندازه‌گیری شده استفاده شده‌است. در نهایت حساسیت مقادیر دما نسبت به محل قرارگیری سنسورها و اثر خطای موجود در داده‌های آنها بر نتایج به‌دست آمده از آنالیز معکوس مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌است.

۲- مساله مستقیم و روش حل عددی آن

مدلسازی فرآیند انتقال حرارت ساختمان شامل پارامترهای مختلفی می‌باشد. هدایت حرارتی گذرا در دیوارها، انتقال حرارت جابجایی در سطوح، انتقال حرارت تشعشع داخلی و خارجی تعدادی از پارامترهایی هستند که در مدلسازی حرارتی ساختمان در نظر گرفته می‌شوند. معادله انتقال حرارت هدایت گذرای دیوارها، به شکل رابطه (۱) است.

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

در مساله مستقیم، معادله حاکم (۱) همراه با شرط مرزی ترکیبی جابجایی

$$q_{\text{conv}} = h(T_{\text{air}} - T(x, t)) \quad (2)$$

و تشعشع خورشیدی، q_{sol} ، برای دیوار خارجی که دمای خارج نیز از داده‌های سازمان هواشناسی کشوری اخذ شده‌اند، حل می‌شود. با توجه به اینکه شار تشعشعی جذب شده در سطوح خارجی ناشی از تشعشع خورشید می‌باشد، پارامتر q_{sol} برای سطوح خارجی دیوارها قابل محاسبه است [۲۶].

$$q_{\text{sol}} = I_b \cos(\theta) \frac{A_{\text{SL}}}{A} + I_{\text{dif}} F_{\text{DS}} + I_G F_{\text{SG}} \quad (3)$$

که در آن

$$\begin{aligned} \cos(\theta) &= \sin(\delta) \sin(\phi) \cos(\beta) \\ &- \sin(\delta) \cos(\phi) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ &+ \cos(\delta) \sin(\phi) \sin(\beta) \cos(\omega) \cos(\gamma) \\ &+ \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\beta) \cos(\omega) \\ &+ \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\omega) \sin(\gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

$$I_G = [I_b \cos(\theta_z) + I_{\text{dif}}] R_{\text{gr}} \quad (5)$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) \quad (6)$$

که چگونگی محاسبه زوایای فوق در مرجع [۲۶] آورده شده‌است. برای شرط مرزی جابجایی بین سطوح داخلی دیوارها و فضای داخل، از دمای 21°C استفاده شده‌است. همچنین با فرض یکنواخت بودن تابش‌ها در تمامی جهات و کدر و خاکستری بودن کلیه سطوح داخلی دیوارهای ساختمان، شار حرارت تشعشعی وارده به سطوح داخلی ناشی از تابش حرارتی بین دیوارها (شکل ۱) به صورت رابطه (۷) خواهد بود [۲۷].

دانشگر و عظیمی [۲۴] تخمین توان منبع آلودگی گازی در یک اتاق را در یک مساله پدیده نشت گاز دی‌اکسیدکربن دوبعدی معکوس با استفاده از روش گرادیان مزدوج الحاقی انجام دادند. ابتدا معادله انتقال جرم با وجود منبع آلودگی گازی و پدیده دیفیوژن را در قالب یک مساله مستقیم با استفاده از روش تابع گرین در دستگاه مختصات کارتزین دوبعدی حل نموده و سپس توزیع غلظت آلودگی گازی را به دست آوردند. آنها در مساله مستقیم، دو حالت توان منبع آلودگی گازی ثابت و توان منبع آلودگی گازی تابع خطی با زمان را مورد بررسی قرار داده و در نهایت حالت تخمین توان منبع آلودگی را در قالب یک مساله معکوس حل نمودند.

عظیمی و همکاران [۲۵] شرط مرزی سطح تماس مشترک بین دو قطعه گوشت فرآوری شده در دو دمای متفاوت که به‌طور ناگهانی در تماس با هم قرار گرفته بودند، در یک مساله هدایت حرارتی غیرفوری معکوس تخمین زدند. مساله مستقیم، انتقال حرارت هدایتی غیرفوری‌ای بیان شده توسط مدل تأخیر فاز منفرد کسری در قطعه‌ای که در دمای اتاق است، بود. آنها معادلات حاکم را با استفاده از روش صریح مک کورمک تعمیم یافته حل عددی نمودند. روش آنالیز معکوس به کار رفته در تحقیق آنها، روش تخمین پارامتر گرادیان مزدوج بدون/با مساله الحاقی بود. آنها در مساله مستقیم، نتایج حاصل از حل عددی مدل‌های خطی تأخیر فاز دوگانه و تأخیر فاز منفرد کسری را مورد مقایسه قرار دادند. نتایج به‌دست آمده از حل مساله معکوس، نشان از تخمین مناسبی برای شرط مرزی تماسی مجهول در هدایت حرارتی غیرفوری کسری داشت.

با بررسی و مطالعه کارهای قبلی انجام شده و اطلاعات موجود، به نظر می‌رسد که در حوزه کاربرد آنالیز معکوس در زمینه شبیه‌سازی بروندی و حرارتی ساختمان‌ها به‌منظور تعیین و تخمین پارامترهای مجهول موثر در محاسبات بارهای بروندی و حرارتی ساختمان‌ها، گزارش و مطالعه جامعی انجام نگرفته‌است.

برجستگی تحقیق حاضر در کاربرد آنالیز معکوس در تعیین همزمان مقدار کمیت‌هایی همچون شرایط مرزی به‌منظور طراحی و محاسبات بار حرارتی و بروندی ساختمان‌های مسکونی است. این در حالی است که ممکن است این کمیت‌ها در کتب، مراجع و استانداردهای مختلف براساس شرایط آن منطقه و یا نوع ساختمان خاصی ارائه شده و با تغییر ساختار و شرایط آب و هوایی تغییر کرده باشند. همچنین نوآوری دیگر این تحقیق در تخمین مقدار کمیت‌هایی مثل خواص ترموفیزیکی مواد به کار رفته در ساختمان که در اسناد و گزارش‌های طراحی یک ساختمان از بین رفته و یا مفقود شده باشند و جهت بازسازی ساختمان و تجهیزات تهویه مطبوع ساختمان، به آنها نیاز باشد. در این تحقیق، به بررسی و تخمین جداگانه و همزمان خواص ترموفیزیکی دیوارها و شرایط مرزی ساختمان با اعمال شرایط مرزی پیچیده جابجایی-تشعشع و با در نظر گرفتن تشعشع بین سطوح داخلی دیوارهای ساختمان پرداخته شده‌است. در این راستا، از یکی از روش‌های کمینه‌سازی همراه با آنالیز حساسیت برای تخمین پارامترها استفاده شده‌است. با توجه

جمله حاوی دمای تجهیزات، همان انتقال حرارت به طریق جابجایی از تجهیزات به هوای اتاق میباشد؛ این تجهیزات به علت تشعشعات وارده به اتاق از طریق دیوارها و جذب این تشعشعات، گرم شده و انرژی خودشان را از طریق جابجایی به هوای اتاق میدهند. در اثر تبادل حرارتی، دمای تجهیزات فوق نیز تغییر میکند و در درون این تجهیزات، گرادیان دمایی وجود دارد، ولی به علت جلوگیری از پیچیدگی مدل، یک دمای متوسط برای کل آنها در نظر گرفته می‌شود. توازن حرارتی برای این تجهیزات به صورت رابطه (۱۱) می‌باشد.

$$m_{fur} c_{p,fur} \frac{dT_{fur}}{dt} = -h_{fur} A_{fur} (T_{fur} - T_{air}) + q_{Rad,in} \quad (11)$$

که در آن، $q_{rad,in}$ تشعشع حرارتی خالص وارده به تجهیزات می‌باشد. برای حل معادلات (۱۰) و (۱۱)، از روش گسسته‌سازی تفاضل محدود پسر و استفاده شده‌است و با حل دستگاه معادلات حاصل از گسسته‌سازی، بردار مجهولات دما دیوارها، سقف و کف و در نتیجه آن بار حرارتی به دست می‌آیند.

۲-۱- حل عددی معادلات حاکم

حل معادله (۱) به همراه شرایط اولیه و مرزی مربوطه با استفاده از روش حجم محدود انجام پذیرفته‌است که جمله مشتق زمانی به شکل تفاضل محدود پسر و تقریب زده شده‌است. همچنین جملات سمت چپ معادله با استفاده از رابطه (۱۲) گسسته شده‌اند.

$$\rho c_p \frac{T - T^0}{\delta t} \delta x_{node} = \theta (a_w T_w + a_e T_e - a_p T_p) + (1 - \theta) (a_w T_w + a_e T_e - a_p T_p)^0 \quad (12)$$

در رابطه فوق، پارامترهای دارای بالانویس ۰ به معنی محاسبه در زمان فعلی و پارامترهای بدون این بالانویس، به معنی محاسبه در زمان آینده هستند. پس از گسسته‌سازی معادله فوق توسط روش حجم محدود، هر گره یک معادله جبری خواهد داشت که به شکل رابطه (۱۳) خواهد بود.

$$a_p T_p = a_w [\theta T_w + (1 - \theta) T_w^0] + a_e [\theta T_e + (1 - \theta) T_e^0] + [a_p^0 - (1 - \theta) a_w - (1 - \theta) a_e] T_p^0 \quad (13)$$

که

$$a_p = \theta (a_w + a_e) + a_p^0 \quad a_p^0 = \rho c_p \frac{\delta x_{node}}{\delta t}$$

$$a_w = \frac{k_w}{\delta x_{WP}}, \quad a_e = \frac{k_e}{\delta x_{PE}} \quad (14)$$

صورت دقیق معادله گسسته‌شده نهایی به مقدار θ بستگی دارد. هنگامیکه صفر θ می‌باشد، روش صریح است و عملاً نیازی به حل دستگاه معادلات نمی‌باشد. در این حالت ممکن است که حل واگرا شود و این محدودیتی را برای گام زمانی (δt) ایجاد میکند. این محدودیت در رابطه (۱۵) نشان داده شده‌است.

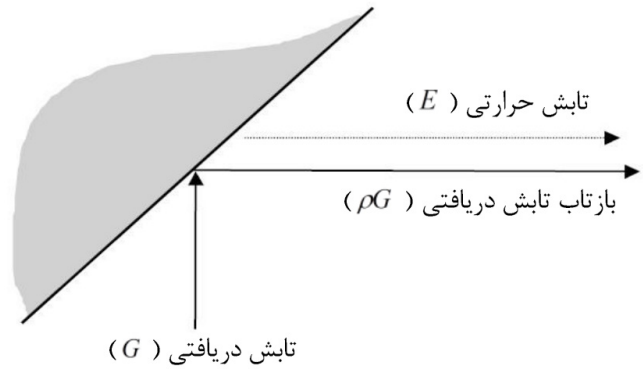


Fig. 1. Different quantities of radiation emitted from the surface of an object

شکل ۱: کمیت‌های مختلف در تابش از سطح یک جسم.

$$\begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{1-1} & -\rho_1 F_{1-2} & \dots & -\rho_1 F_{1-n} \\ -\rho_2 F_{2-1} & 1 - \rho_2 F_{2-2} & \dots & -\rho_2 F_{2-n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\rho_n F_{n-1} & -\rho_n F_{n-2} & \dots & 1 - \rho_n F_{n-n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \dots \\ J_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

که در آن، E انرژی ساطع شده از جسم به واسطه دمای خود جسم و F_{ij} ها، ضرایب شکل می‌باشند. J مجموع تابش حرارتی و بازتابش تشعشع دریافتی و G نیز به مجموع تابش دریافتی از کل اجسام اطراف آن گفته می‌شود که برای سطح i با رابطه زیر نشان داده می‌شوند.

$$G_i = \sum_{j=1}^n F_{i-j} J_j \Rightarrow \rho_i \sum_{j=1}^n F_{i-j} J_j + E_i = J_i \quad (8)$$

پس از حل این معادلات، میتوان شار خالص خروجی از هر یک از سطوح را محاسبه کرد.

$$q_i = J_i - G_i \quad (9)$$

پس از بررسی نحوه مدل‌سازی حرارتی دیوار، برای محاسبه بار ساختمان لازم است معادله توازن حرارتی برای هوای داخل اتاق نوشته شود. هوای داخل اتاق در اثر تبادل حرارتی با دیوارها و لوازم درون فضا از طریق جابجایی و همچنین تولید یا استخراج حرارت در درون اتاق، تغییر دما می‌دهد. معادله حاکم، همان معادله بقای انرژی است که همراه با مدل توده‌ای، به شکل رابطه (۱۰) میباشد [۲۷].

$$m_{air} c_{p,air} \frac{dT_{air}}{dt} = \sum_i h_i A_i (T_{s,i} - T_{air}) + h_{fur} A_{fur} (T_{fur} - T_{air}) + q_{gen} \quad (10)$$

که در آن T_{fur} و $T_{s,i}$ نیز بهترتیب دمای سطح نام و دمای لوازم و سایر اجزای موجود در داخل اتاق و q_{gen} تولید یا استخراج حرارت در درون اتاق میباشد. علت استفاده از مدل توده‌ای در این است که این مدل کارایی خود را در تحلیل و محاسبه بار برودتی و حرارتی با دقت مناسب و در حد انتظار محاسبات مهندسی نشان داده که در این راستا، نرم‌افزارهایی همچون کریر از این مدل استفاده میکنند.

بقای انرژی برای تجهیزات داخل اتاق را حل نمود.

پس از پایان یک مرحله کامل حل، مقادیر دماها در زمان جدید محاسبه می‌شوند. حال از مقادیر جدید استفاده میشود و روند بالا تکرار میشود. روند تکرار تا جایی ادامه مییابد که تغییرات بین دو تکرار مختلف، از حد معیار کمتر باشد. در فرآیند حل مساله مستقیم فرض می‌شود که تمام ثوابت، خواص ترمودینامیکی و شرایط اولیه و مرزی معلوم بوده و مجهول مورد نظر، توزیع دما در دیوارها و سقف و همچنین بار حرارتی یا بروندی ساختمان می‌باشد.

۳- مساله معکوس برای تخمین پارامترها

در مساله معکوس ممکن است خواص ترموفیزیکی و یا شرایط مرزی مجهول باشند. در واقع هدف تخمین این پارامترهای مجهول با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده در زمانهای مختلف ($i=1,2,\dots,I$) از سنسورهای مستقر در یک مکان مناسب از دیوار می‌باشد. در این راستا ابتدا اختلاف بین دماهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده از مساله مستقیم به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته و سپس به کمینه‌سازی آن پرداخته میشود. روش‌های مختلفی برای تعریف تابع هدف وجود دارد که یکی از متداول‌ترین آنها روش کمترین مربعات^۱ خطاهاست که به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۹].

$$S(\mathbf{P}) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^I [Y_{i,m} - T_{i,m}(\mathbf{P})]^2 \quad (17)$$

که Y و T به ترتیب تعداد اندازه‌گیری‌های سنسور، تعداد سنسورها و دماهای اندازه‌گیری و محاسبه شده می‌باشند. نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که حل مساله معکوس عموماً ناپایدار است. بنابراین، هر اغتشاش کوچک در داده‌های ورودی، موجب تغییرات چشمگیری در جواب مساله می‌شود. بدین‌گونه روند حل مسائل بدرفتار، ناپایدار می‌شود و نیاز است تا از تکنیک‌های ویژه‌ای برای جلوگیری از ناپایدار شدن آنها استفاده نمود. بدین منظور در روش‌های معکوس از یک تکنیک بهینه‌سازی همراه با روش هموارسازی^۲ برای کمینه‌سازی تابع هدف استفاده می‌شود. روش گرادینان مزدوج، روش معکوسی می‌باشد که دارای یک الگوریتم تکرار برای حل مسائل کمترین مربعات غیرخطی تخمین پارامتر می‌باشد. این روش برای حل مسائل تخمین پارامتر غیرخطی توصیه میشود، همچنین به خوبی برای حل مسائل خطی که بسیار بدرفتار هستند نیز به کار میرود [۲۸]. با این حال این روش معیاری اعم از محاسبه زمان بر ماتریس حساسیت برای هر کمیت مجهول دارد که امکان بدرفتاری آن به‌واسطه ماهیت مسائل معکوس، نیز وجود دارد. زمانبر بودن محاسبه ماتریس حساسیت به‌ویژه در مواقعی که نتوان این ماتریس را به‌طور مستقیم محاسبه نمود و لازم شود تا ماتریس ضرایب حساسیت را از طریق روش اختلاف محدود محاسبه نمود، بیشتر نمایان میشود.

در این مقاله با توجه به پیچیدگی و اثر متقابل معادلات حاکم بر مساله،

$$\delta t < \rho c_p \frac{\delta X^2}{k} \quad (15)$$

در روش ضمنی یا غیرصریح، $0 < \theta \leq 1$ ، دماها در زمان جدید، در هر دو طرف معادله استفاده میشوند و لذا نیازمند حل دستگاه معادلات جبری چند مجهولی برای تمام نقاط گره‌های است. $\theta=1$ و $\theta=0.5$ به ترتیب روش‌های کاملاً ضمنی و کرنک-نیکلسون به‌دست می‌آیند. میتوان ثابت کرد که حل معادله (۱۳) برای کلیه روش‌هایی که در آنها $0.5 < \theta \leq 1$ بوده، برای تمام مقادیر زمانی به‌طور غیرمشرط همگرا می‌باشد. لذا در این تحقیق از روش ضمنی که به‌طور نامشرط پایدار است، استفاده شده است.

همچنین معادله (۱۰) به‌صورت رابطه (۱۶) گسسته‌سازی میشود. گسسته‌سازی معادله (۱۱) نیز کاملاً مشابه معادله (۱۰) است.

$$T_{air}^{n+1} = T_{air}^n + \frac{1}{m_{air} c_{p,air}} \left(\sum_i^5 h_i (T_{s,i}^{n+1} - T_{air}^n) + h_{fur} (T_{fur}^{n+1} - T_{air}^n) + q_{gen}^n \right) \quad (16)$$

با حل معادلات فوق، بردار مجهولات دما (دمای دیوارها و سقف)، دمای کف و بار حرارتی (از رابطه (۱۶) با توجه به این که دمای هوا ثابت است) به‌دست می‌آیند.

همانطور که تشریح شد، معادلات ذکر شده برای دیوارها، هوا و همچنین تجهیزات داخل اتاق به یکدیگر وابسته هستند. این وابستگیها شامل موارد زیر است:

۱. دمای هوای اتاق، شرط مرزی برای معادله انتقال‌حرارت هدایتی گذرای دیوار محسوب میشود.
 ۲. دمای سطح دیوار در معادله بقای انرژی هوای اتاق، رابطه (۱۰)، ظاهر میشود.
 ۳. تشعشع بین دیوارها و تجهیزات، از طرفی به‌عنوان شرط مرزی در معادله دیوارها و از طرفی در معادله بقای انرژی تجهیزات، در رابطه (۱۱) وارد می‌شود.
- لذا حل همزمان معادلات پیچیده شده و از طرفی دیگر، این وابستگی غیرخطی بوده و لذا حتماً باید از حل تکراری استفاده کرد.

۲-۲- الگوریتم حل عددی مساله مستقیم

الگوریتم حل مساله مستقیم بدین صورت است که ابتدا مشخصات هندسی دیوارها و سقف، خواص ترموفیزیکی مواد تشکیل‌دهنده دیوارها و هوای داخل، شرایط اجرای برنامه شبیه‌سازی و مشخصات دما و تشعشع خورشید تعریف میشوند.

اولین معادله‌ای که حل میشود، تشعشع بین اجزای مختلف است. این بدین علت است که جواب این معادله به عنوان شرط مرزی برای معادلات دیگر استفاده میشود. پس از این مرحله، معادله هدایت حرارتی در دیوارها حل میشود. با حل این معادله، میتوان شار حرارتی وارد به اتاق را محاسبه و در نتیجه معادله بقای انرژی در اتاق را حل نمود. در نهایت نیز میتوان معادله

1 Least Square Method
2 Regularization Method

می‌باشند، بنابراین مرتبه بزرگی ضرایب حساسیت مربوط به آنها نیز متفاوت است. این امر باعث ایجاد مشکلاتی در مقایسه و شناسایی وابستگی خطی این ضرایب می‌شود. این مشکلات می‌تواند با استفاده از ضرایب حساسیت نسبی^۲ برطرف شود. ضرایب حساسیت نسبی به صورت رابطه (۲۱) تعریف می‌شوند.

$$\chi = \frac{P}{T} \left[\frac{\partial T}{\partial P} \right] \quad (21)$$

لازم به ذکر است که ضرایب حساسیت نسبی بدون بعد بوده و لذا می‌توان ضرایب حساسیت نسبی پارامترهای مختلف را با هم مقایسه نمود.

۳-۲- فرآیند تکراری

ماتریس حساسیت تابعی غیرخطی از بردار پارامترهای مجهول می‌باشد. بنابراین به منظور خطی‌سازی مساله و هموارسازی حساسیت مساله به خطاهای موجود در مقادیر اندازه‌گیری شده، به یک فرآیند تکرار نیاز است. روش‌های گرادیان مزدوج نوعا در قالب روش‌های تکراری جهت پایداری حل و حل مسائل چندبعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. تکنیک گرادیان مزدوج، یک روش قدرتمند برای مسائل خطی و غیرخطی می‌باشد. در این روش برای تعیین P^{k+1} از رابطه (۲۲) استفاده می‌شود.

$$P^{k+1} = P^k - \kappa^k d^k \quad (22)$$

که در آن d^k بردار هادی بهسوی پاسخ نهایی است و به صورت رابطه (۲۳) محاسبه می‌شود.

$$d^k = \nabla S(P^k) + \lambda^k d^{k-1} \quad (23)$$

گرادیان تابع هدف، در واقع مشتق آن نسبت به پارامترهای مجهول می‌باشد و مؤلفه λ آن به صورت رابطه (۲۴) می‌باشد.

$$[\nabla S(P^k)]_j = [-2(\chi^k)[Y - T(P)]]_j = -2 \sum_{i=1}^I \frac{\partial T_i}{\partial P_j} [Y_i - T_i(P)] \quad (24)$$

و مقادیر κ^k و λ^k به ترتیب با استفاده از روابط (۲۵) و (۲۶) به دست می‌آیند.

$$\kappa^k = \frac{[\chi^k d^k]^T [T(P^k) - Y]}{[\chi^k d^k]^T [\chi^k d^k]} \quad (25)$$

$$\lambda^k = \frac{\sum_{j=1}^N \{ [\nabla S(P^k)]_j [\nabla S(P^k) - \nabla S(P^{k-1})]_j \}}{\sum_{j=1}^N \nabla [\nabla S(P^{k-1})]_j^2} \quad (26)$$

برای $\lambda^0 = 0$ و $\kappa^0 = 0$ در نظر گرفته می‌شود.

رابطه فوق برای حالتی است که یک تابع مجهول در مساله باشد. اگر دو تابع مجهول وجود داشته باشد، می‌بایست اندازه گام جستجو را با

از روش گرادیان مزدوج و همچنین عدم وابستگی کمیت‌های مجهول به زمان و مکان (مقادیر ثابت) از نسخه تخمین پارامتر آنالیز معکوس استفاده شد. مراحل اساسی تحلیل معکوس در این مقاله شامل آنالیز حساسیت، فرآیند تکرار، معیار همگرایی و الگوریتم محاسباتی می‌باشد که در ادامه به آنها پرداخته می‌شود.

۳-۱- آنالیز حساسیت

قبل از اینکه برای حل مساله معکوس تلاش شود، بهتر است که حساسیت آن و میزان حساسیت مقادیر دما نسبت به تغییرات کوچک پارامترهای مجهول محاسبه شود. چنین بررسی، شاخصی از بهترین موقعیت مکانی سنسورهای اندازه‌گیری دما و معیاری برای پایداری حل معکوس ارائه خواهد داد. در این راستا، ضرایب حساسیت توسط روش اختلاف محدود محاسبه می‌شوند.

$$\chi = \frac{\partial T}{\partial P} = \frac{T(P + \Delta P) - T(P)}{\Delta P} \quad (18)$$

بنابراین به منظور محاسبه ضرایب حساسیت از رابطه فوق، ابتدا مقادیر دما در محل سنسور در گامهای زمانی مختلف با حل مساله مستقیم براساس مقادیر بردار مجهولات P و بردار $P + \Delta P$ (به هر عضو ΔP مقداری برابر با 0.01 داده می‌شود) به طور جداگانه محاسبه می‌شوند. سپس مقادیر دمای محاسبه شده بدون ایا اغتشاش فوق در رابطه (۱۸) قرار می‌گیرند و ضرایب حساسیت در محل سنسور محاسبه می‌شوند. ماتریس حساسیت رابطه (۱۸) به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌شود.

$$\chi(P) = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial P_1} & \frac{\partial T_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial T_1}{\partial P_N} \\ \frac{\partial T_2}{\partial P_1} & \frac{\partial T_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial T_2}{\partial P_N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial T_I}{\partial P_1} & \frac{\partial T_I}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial T_I}{\partial P_N} \end{bmatrix} \quad (19)$$

که در آن N تعداد پارامترهای مجهول می‌باشد. المان‌های این ماتریس حساسیت به ضرایب حساسیت^۱ مشهور بوده و نمایش تانسوری ضرایب حساسیت به صورت رابطه (۲۰) است.

$$\chi = \frac{\partial T}{\partial P} \quad (20)$$

وقتی که ضرایب حساسیت کوچک است مساله معکوس بدرفتار می‌باشد. این بدین معنی است که مساله معکوس به خطاهای اندازه‌گیری حساس است و نمی‌توان تخمین‌های دقیقی از پارامترها به دست آورد. بنابراین داشتن ضرایب حساسیت مستقل خطی با مقادیر مطلق بزرگ مطلوب است و پایداری آنالیز معکوس را به دنبال دارد.

با توجه به اینکه پارامترهای این تحقیق دارای مرتبه‌های بزرگی مختلفی

۳-۴- الگوریتم محاسباتی مساله معکوس

الگوریتم محاسباتی روش گرادیان مزدوج به صورت زیر می باشد:

۱. ابتدا فرض بر این است که مقادیر اندازه گیری شده دما Y در زمانهای مورد نظر و مکان سنسورها داده شده اند. مقادیر اولیه ای برای پارامترهای مجهول P^0 در نظر گرفته میشود.
۲. حل مساله مستقیم با دادههای تکرار قبل یا دادههای اولیه برای پارامترهای مجهول به منظور به دست آوردن مقادیر دما $T(P^k)$.
۳. معیار توقف فرآیند تکرار مورد بررسی قرار گرفته و در صورت برقرار شدن شرط توقف، فرآیند تکرار پایان یافته و مساله حل میشود و در صورت برقرار نشدن شرط توقف به مرحله بعدی رفته و فرآیند تکرار ادامه مییابد.
۴. محاسبه ماتریس ضرایب حساسیت برای هر پارامتر مجهول.
۵. محاسبه $\nabla T(P^k)$ و ضریب گرادیان برای هر پارامتر مجهول.
۶. محاسبه بردار هادی d^k برای هر پارامتر مجهول.
۷. محاسبه اندازه گام جستجو κ^k برای هر پارامتر مجهول.
۸. محاسبه مقادیر جدیدی برای پارامترهای مجهول P^{k+1} .
۹. استفاده از P^{k+1} به عنوان P^k و بازگشت به مرحله ۲.

۴- نتایج عددی

برای تخمین خواص ترموفیزیکی و شرایط مرزی ساختمان با تحلیل معکوس، یک اتاق نمونه در شهر تهران مورد بررسی قرار گرفته است. ابعاد اتاق شبیه سازی ۵ متر (طول) \times ۴ متر (عرض) \times ۳ متر (ارتفاع) است که دیوار به طول ۵ متر در جهت شمالی قرار گرفته اند. هر چهار دیوار و همچنین سقف آن، به محیط بیرون (تهویه نشده) راه دارند. مشخصات دیوارها و سقف در جداول ۱ و ۲ ارائه شده اند.

همچنانکه در این جداول دیده می شود، خواص میانگین و یکسانی برای لایه های دیوار و سقف برای آنالیز معکوس در نظر گرفته شده است. اطلاعات آب و هوایی شهر تهران از سازمان هواشناسی ایران استخراج شده و در جدول ۳ ارائه شده اند [۲۹]. برای اجرای برنامه و حل مساله از دو گام زمانی کمینه و بیشینه به ترتیب برابر با 0.0001 و 60 ثانیه استفاده شده است. در گام های زمانی ابتدایی از گام زمانی کمینه و در گام های بعدی از گام زمانی بیشینه استفاده شده است. همچنین، از تعداد گره های 80 و 60 به ترتیب برای دیوارها و سقف استفاده شده است. گام مکانی در نظر گرفته شده در میانه دیوار بیشتر از گام مکانی نقاط نزدیک به مرزها میباشد.

۴-۱- نتایج مساله مستقیم

قبل از بیان نتایج مساله معکوس، ابتدا نتایج مساله مستقیم ارائه و اعتبارسنجی می شوند. در راستای اعتبارسازی مدل ارائه شده و برنامه کامپیوتری نوشته شده، بار برودتی ساعتی به دست آمده از برنامه کامپیوتری حاضر با نتایج نرم افزار کریر مقایسه شدند. نمودار تغییرات بار برودتی ساعتی

کمینه سازی تابع $S(P_1^{k+1}, P_2^{k+1})$ نسبت به κ^k به دست آورد. سپس پس از مراحل خطی سازی، استفاده از بسط تیلور و مشتق گیری، معادلات (۲۷) و (۲۸) برای محاسبه گام جستجوی مربوط به پارامترهای مجهول P_2 و P_1 به دست می آید.

$$\kappa_1^k = \frac{F_1 A_{22} - F_2 A_{12}}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2} \quad (27)$$

$$\kappa_2^k = \frac{F_2 A_{11} - F_1 A_{12}}{A_{11} A_{22} - A_{12}^2} \quad (28)$$

که توابع A و F با روابط (۲۹) تا (۳۳) محاسبه می شوند.

$$A_{11} = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_{jl}(P_1^k)}{\partial P_1^k} \right)^T d_1^k \right]^2 \quad (29)$$

$$A_{22} = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_{jl}(P_2^k)}{\partial P_2^k} \right)^T d_2^k \right]^2 \quad (30)$$

$$A_{12} = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_{jl}(P_1^k)}{\partial P_1^k} \right)^T d_1^k \right] \left[\left(\frac{\partial T_{jl}(P_2^k)}{\partial P_2^k} \right)^T d_2^k \right] \quad (31)$$

$$F_1 = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_{jl}(P_1^k)}{\partial P_1^k} \right)^T d_1^k \right] [T_{jl}(P_1^k, P_2^k) - Y_{jl}] \quad (32)$$

$$F_2 = \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^I \left[\left(\frac{\partial T_{jl}(P_2^k)}{\partial P_2^k} \right)^T d_2^k \right] [T_{jl}(P_1^k, P_2^k) - Y_{jl}] \quad (33)$$

۳-۳- معیار همگرایی

در روش گرادیان مزدوج، وقتی مقادیر تخمین زده شده به مقادیر واقعی بسیار نزدیک میشوند، ممکن است نوساناتی در جواب پدید آید و جواب واگرا شود. این بدان معنی است که نمیتوان بیش از حد خاصی به جوابهای واقعی نزدیک شد. این محدودیت، شرط ناسازگاری^۱ نامیده شده که بیان میکند که اختلاف مقادیر واقعی سنسور (Y_i) و مقادیر محاسبه شده با در نظر گرفتن مقادیر تخمین زده برای مجهولات (T_i) باید تقریباً همان اندازه انحراف معیار اندازه گیری دما توسط سنسورها باشد [۹]:

$$S(P^{k+1}) < \varepsilon \quad (34)$$

پارامتر معیار ε نیز عبارتست از [۹]:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^I \sigma_i^2 \quad (35)$$

که σ_i انحراف معیار اندازه گیری نام دما توسط سنسور است.

جدول ۱: مقادیر ضرایب انعکاس

Table 1. Reflection coefficient values

سازه	دیوار شمالی	دیوار شرقی	دیوار جنوبی	دیوار غربی	سقف	کف
دیوار شمالی*	۰	۰/۱۸۵	۰/۱۷۲	۰/۱۸۵	۰/۲۲۹	۰/۲۲۹
دیوار شرقی*	۰/۱۸۵	۰	۰/۱۸۵	۰/۱۷۲	۰/۲۲۹	۰/۲۲۹
سقف*	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵	۰/۱۸۵	۰	۰/۲۶۰

*دیوارهای جنوبی و غربی و کف به ترتیب مقادیری مشابه با دیوارهای شمالی و شرقی و سقف دارند.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به لایه‌های دیوار و سقف

Table 2. Information of the wall and ceiling layers

سازه	تعداد لایه‌ها	ضخامت هر لایه (mm)	C (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	F _{SG}	F _{DS}	R _{gr}	ε _r		ρ _i	
									داخلی	خارجی	داخلی	خارجی
دیوارها	۳	۷۱/۶	۸۹۵/۲۸	۱۲۷۱	۰/۴۹۸۷	۰/۵	۰/۵	۰/۲	۰/۹	۰/۹	۰/۱	۰/۱
سقف	۳	۷۱/۶	۱۲۴۹	۱۰۷۱	۰/۱۰۰۸۷	۰	۱	۰/۲	۰/۹	۰/۹	۰/۱	۰/۱

جدول ۳: اطلاعات مربوط به دما هوای خارج و تشعشع خورشیدی برای ۳ روز از تیرماه

Table 3. Information of outside air temperature and solar radiation for 3 days of June

زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
دمای هوای خارج	۲۶/۶	۲۵/۶	۲۴/۷	۲۴	۲۳/۶	۲۳/۵	۲۳/۷	۲۴/۵	۲۵/۷	۲۷/۱	۲۸/۸	۳۰/۴	۳۱/۹	۳۳/۱	۳۳/۹	۳۴/۱	۳۴	۳۳/۵
I _b	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۲۴	۴۸	۶۹	۸۱	۸۲	۷۳	۵۴	۳۰	۱۰	۱
I _{dif}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳۹	۷۲	۱۲۴	۱۸۸	۲۴۳	۲۷۵	۲۷۹	۲۵۴	۲۰۴	۱۴۱	۸۴	۴۷
زمان	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴	۲۵	۲۶	۲۷	۲۸	۲۹	۳۰	۳۱	۳۲	۳۳	۳۴	۳۵	۳۶
دمای هوای خارج	۳۲/۸	۳۱/۹	۳۰/۸	۲۹/۶	۲۸/۲	۲۶/۹	۲۵/۷	۲۴/۶	۲۳/۷	۲۳	۲۲/۵	۲۲/۴	۲۲/۷	۲۳/۷	۲۵/۲	۲۷/۱	۲۹/۲	۳۱/۴
I _b	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۳	۲۹۱	۴۹۳	۶۱۳	۱۲۶	۷۲۴	۷۴۴
I _{dif}	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹	۱۰۴	۱۳۸	۱۶۶	۲۶۷	۱۹۷	۲۰۴
زمان	۳۷	۳۸	۳۹	۴۰	۴۱	۴۲	۴۳	۴۴	۴۵	۴۶	۴۷	۴۸	۴۹	۵۰	۵۱	۵۲	۵۳	۵۴
دمای هوای خارج	۳۳/۳	۳۴/۸	۳۵/۸	۳۶/۱	۳۵/۹	۳۵/۵	۳۴/۸	۳۳/۸	۳۲/۷	۳۱/۴	۳۰/۱	۲۸/۷	۲۷/۵	۲۶/۳	۲۵/۴	۲۴/۷	۲۴/۲	۲۴/۱
I _b	۷۴۶	۷۳۱	۶۹۷	۶۳۶	۵۳۳	۸	۸۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲۲
I _{dif}	۲۰۵	۲۰۰	۱۸۹	۱۷۲	۱۴۹	۵۳	۴۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۹
زمان	۵۵	۵۶	۵۷	۵۸	۵۹	۶۰	۶۱	۶۲	۶۳	۶۴	۶۵	۶۶	۶۷	۶۸	۶۹	۷۰	۷۱	۷۲
دمای هوای خارج	۲۴/۵	۲۵/۵	۲۷/۳	۲۹/۴	۳۱/۸	۳۴/۲	۳۶/۳	۳۸	۳۹/۱	۳۹/۵	۳۹/۳	۳۸/۸	۳۷/۹	۳۶/۸	۳۵/۵	۳۴	۳۲/۴	۳۰/۹
I _b	۳	۴۹۳	۶۱۲	۶۸۳	۷۲۴	۷۴۴	۷۴۶	۱۶۹	۱۳۸	۶۳۶	۵۳۳	۳۵۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰
I _{dif}	۴۱	۱۳۸	۱۶۶	۱۸۵	۱۹۷	۲۰۴	۲۰۵	۳۳۱	۲۸۵	۱۷۲	۱۴۹	۱۱۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰

به اینکه در شرایط تابستان حساسیت دیوار شرقی نسبت به دیوارهای دیگر بیشتر است، مکان قرارگیری سنسور، دیوار شرقی انتخاب شده است. علت بالا بودن حساسیت دیوار شرقی در تابستان را میتوان بدینصورت توضیح داد که این دیوار از همان ساعات اولیه روز در معرض تشعشع خورشید قرار گرفته و آثار این تشعشع در ساعات بعدی بر توزیع دمای درون دیوارها و بار حرارتی ساختمان باقی میماند. شکل‌های ۳ تا ۶ ضرایب حساسیت دمای دیوار شرقی به ترتیب نسبت به پارامترهای h_i ، C و h_o در سه گره مختلف را در تیرماه نشان می‌دهند.

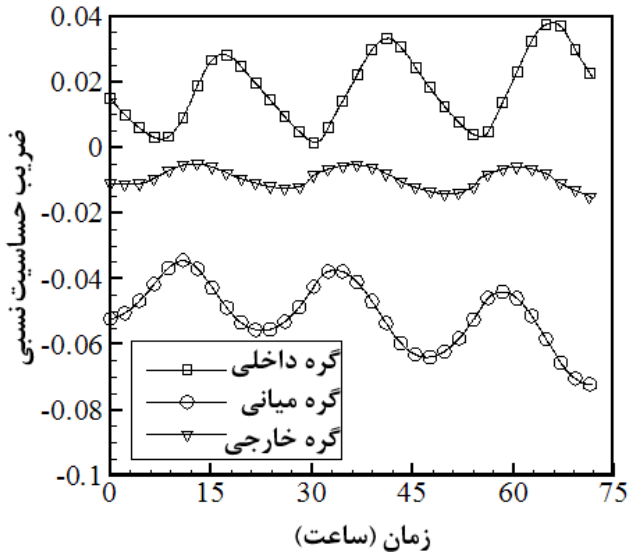


Fig. 3. Relative sensitivity coefficients of k in the eastern wall
شکل ۳: ضرایب حساسیت نسبی k در دیوار شرقی

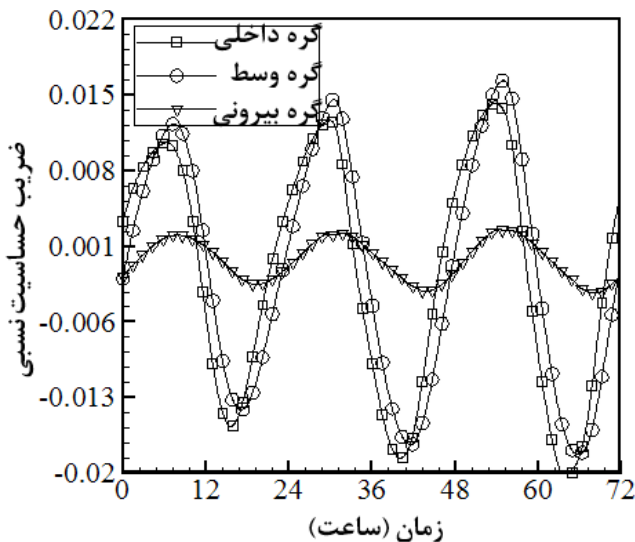


Fig. 4. Relative sensitivity coefficients of C in the eastern wall
شکل ۴: ضرایب حساسیت نسبی C در دیوار شرقی

در طول یک روز از دی ماه و مقایسه آن با نتایج نرم‌افزار کریر در شکل ۲ آورده شده است.

نتایج ارائه شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که بار برودتی همخوانی بسیار خوبی با نتایج نرم‌افزار کریر داشته و بیشینه بار سرمایشی محاسبه شده از دو روش فوق، کمتر از ۵ درصد با یکدیگر تفاوت دارند. اختلاف مقادیر موجود را نمیتوان به هیچوجه دلیل بر مشکلات برنامه کامپیوتری حاضر دانست، چرا که نرم‌افزار کریر معادلات بقاء را به طور کامل حل نمیکند و تنها مدل ساده‌شده‌ای از آن (روش توابع انتقالی) را حل می‌کند. ضرایب استفاده شده در این روش، تجربی بوده و تنها برای ساختمانهای خاصی (جنسهای خاص دیوار) دقیق است و برای بقیه ساختمانها، ضرایب ساختمانهای مشابه را استفاده می‌کند. لذا به طور منطقی، تطبیق کامل نتایج نرم‌افزار با نتایج کد عددی، مورد انتظار نیست.

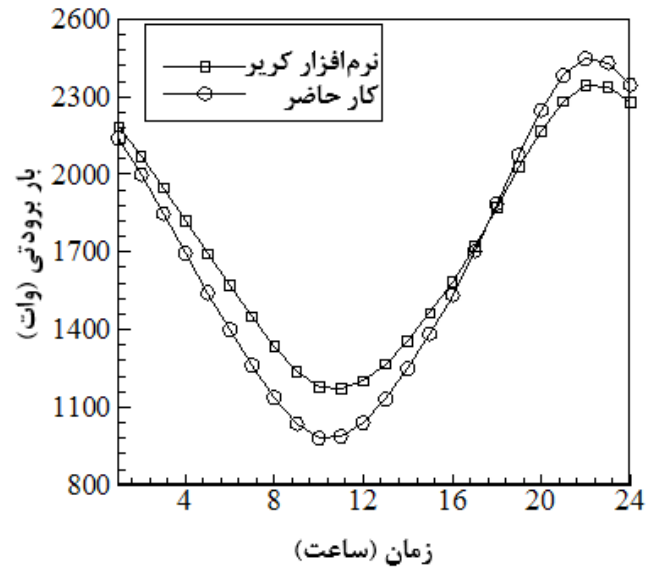


Fig. 2. The results of the cooling load
شکل ۲: نتایج مربوط به بار برودتی

۴-۲- نتایج آنالیز معکوس

به منظور دستیابی به تخمین کمیت‌های مجهول در یک مساله معکوس، یک سری اطلاعات تجربی یعنی همان مقادیر دمای سنسورها مورد نیاز است که با توجه به موجود نبودن داده‌های اندازه‌گیری دمایی، از اطلاعات شبیه‌سازی شده استفاده شده است. در واقع در بسیاری از مقالات ارائه شده در زمینه آنالیز معکوس، از داده‌های شبیه‌سازی شده استفاده می‌شود. همچنین با استفاده از آنالیز حساسیت به منظور یافتن بهترین موقعیت مکانی سنسور دما و مقایسه حساسیت پارامترهای مختلف، ضرایب حساسیت نسبت به پارامترهای مجهول محاسبه شده‌اند. با توجه به امکان نصب سنسور که در واقع فرض شده که محل نصب سنسورها با محدودیت همراه است، سنسورها در روی سطوح داخلی دیوارها نصب شده و ضرایب حساسیت نسبی در گره‌های داخلی محاسبه شده‌اند. نتایج آنالیز حساسیت و آنالیز معکوس برای بازه زمانی ۳ روز از ماه‌های دی و تیر به دست آمده‌اند. همچنین با توجه

فرضی با مقدار متوسط صفر به مقادیر دمای محاسبه شده، اضافه شده است. این بدین علت است که داده‌های تجربی، عموماً دارای توزیع نرمال هستند. البته بسته به دقت اندازه‌گیری، می‌بایستی انحراف معیار توزیع نرمال را تغییر داد. لذا می‌توان از رابطه (۳۶) برای مقادیر سنسورها استفاده کرد.

$$Y(x_j, t) = T(x_j, t) + \sigma \times \omega \times T_{max} \quad \text{for } j=1, 2, \dots, M \quad (36)$$

x_j بیانگر محل سنسور میباشد و ω با استفاده از تابع توزیع نرمال، با احتمال $0/99$ عددی اتفاقی در بازه $(-2/576, 2/576)$ به دست می‌آید [۹]. σ نیز مقدار اغتشاش سنسورها میباشد. شکل‌های ۷ و ۸ داده‌های دمای شبیه‌سازی شده در محل سنسور را براساس رابطه (۳۶) جهت آنالیز معکوس ارائه داده‌اند.

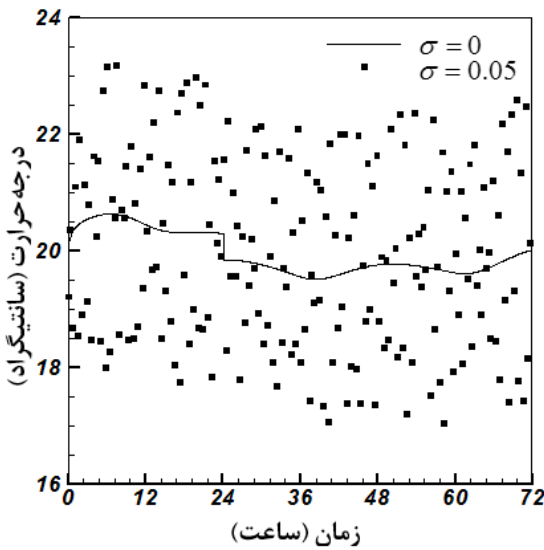


Fig. 7. The simulated temperature distribution at the sensor for January
شکل ۷: توزیع دمای شبیه‌سازی شده در محل سنسور برای دی ماه

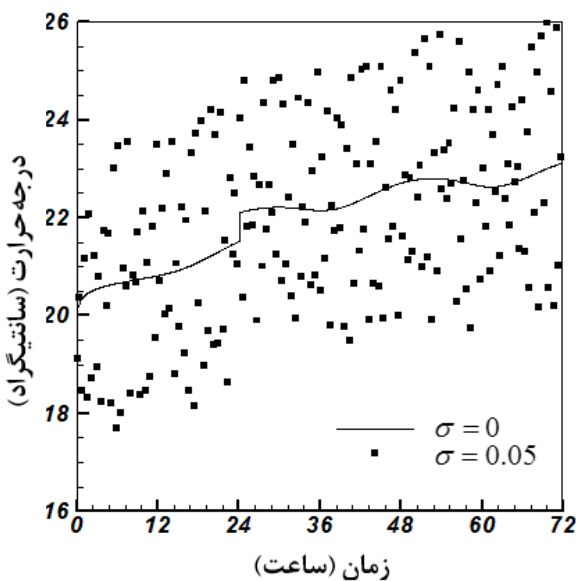


Fig. 8. The simulated temperature distribution at the sensor for July
شکل ۸: توزیع دمای شبیه‌سازی شده در محل سنسور برای تیرماه

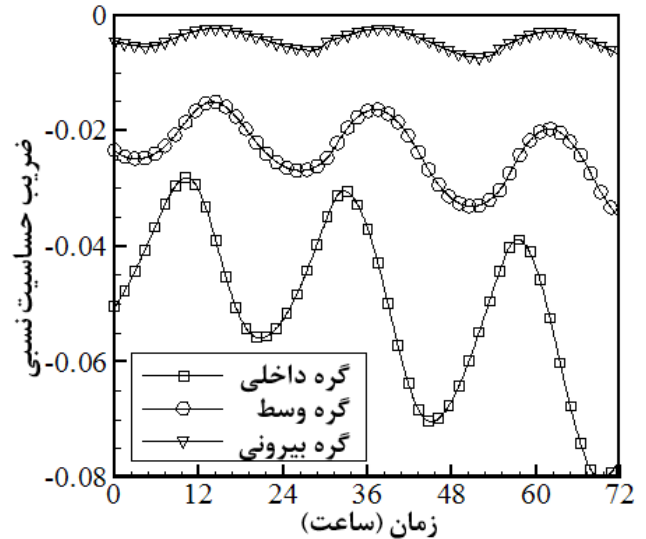


Fig. 5. Relative sensitivity coefficients of h_1 in the eastern wall
شکل ۵: ضرایب حساسیت نسبی h_1 در دیوار شرقی

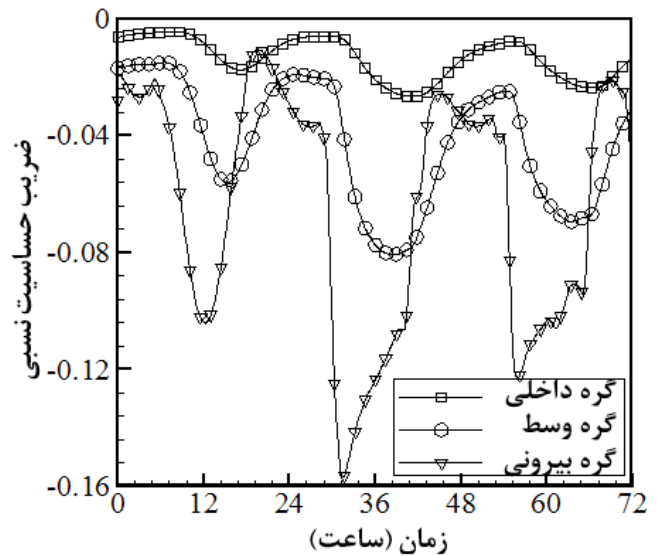


Fig. 6. Relative sensitivity coefficients of h_0 in the eastern wall
شکل ۶: ضرایب حساسیت نسبی h_0 در دیوار شرقی

همانطور که مشاهده می‌شود ضرایب حساسیت ظرفیت حرارت کلی و ضریب انتقال حرارت جابجایی خارجی دارای کمترین مقدار می‌باشند. از این رو انتظار می‌رود که تخمین این پارامترها نسبت به دیگر پارامترها بخوبی انجام نپذیرد. زیرا ضریب حساسیت کمتر، احتمال بدرفتار شدن حل معکوس را افزایش داده و تخمین پارامترهای مجهول را با مشکل مواجه می‌کند.

همانطور که گفته شد، جهت حل مساله معکوس به منظور داشتن مقادیر دمای اندازه‌گیری شده در نقاط استقرار سنسورها، از مقادیر میدان دمای محاسباتی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی کامل داده‌های تجربی در شرایط آزمایشگاهی، می‌بایست وجود خطا در مقادیر اندازه‌گیری شده را نیز در نظر گرفت. به همین دلیل، یک توزیع نرمال^۱ از مقادیر خطای اغتشاشی

¹ Normal Distribution

صورتیکه مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسورها با اغتشاش همراه باشند، تعداد تکرار و در نتیجه زمان لازم برای رسیدن به همگرایی افزایش یافته و مقادیر تخمینی پارامترهای مجهول h_i و k دارای تطابق نسبتاً خوبی می‌باشند ولی مقدار تخمین زده شده h_o دارای خطای نسبتاً زیادی می‌باشد، که این اختلاف به علت ضریب حساسیت پایین این پارامتر در محل قرارگیری سنسور است. تخمین همزمان ضرایب انتقال حرارت جابجایی داخلی و خارجی با دو سنسور در سطوح داخلی و خارجی دیوار شرقی انجام شده است و نتایج عددی این مساله در جدول ۷ ارائه شده است.

با مشاهده مقادیر جدول ۷ میتوان دریافت که مقادیر به دست آمده از آنالیز معکوس با/بدون مقادیر اغتشاش سنسورها با مقادیر واقعی در حالتی که از دو سنسور در سطوح داخلی و خارجی دیوار استفاده شود، تطابق خوبی دارند. دلیل این همپوشانی، مقدار بالای ضریب حساسیت پارامترهای h_i و h_o به ترتیب در سطوح داخلی و خارجی (با توجه به شکل‌های ۷ و ۸ و نتایج آنالیز حساسیت) میباشد. مقادیر خطای نسبی در جدول‌های ۴ الی ۷ مطابق با رابطه (۳۷) محاسبه شده‌اند.

با بررسی نتایج، مشاهده میشود که امکان تخمین همزمان پارامترهای مجهول h_i ، k و h_o با/بدون اغتشاش در مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. در صورتیکه یکی از پارامترهای مجهول C باشد، تخمین همزمان پارامترهای مجهول دیوار با روش آنالیز معکوس گرادیان مزدوج به دلیل حساسیت بسیار

مقادیر اولیه برای تخمین پارامترهای مجهول k ، C ، h_i و h_o به ترتیب ۰/۱، 4×10^{-5} ، ۳ و ۳ می‌باشد. نتایج برای حالت‌های سنسور بدون اغتشاش و با اغتشاش ۰/۰۵ به دست آمده‌اند.

برای بررسی نتایج آنالیز معکوس با روش گرادیان مزدوج، ابتدا تخمین جداگانه پارامترها و سپس تخمین همزمان دو پارامتر ارائه شده است. جدول ۴ نتایج عددی تخمین جداگانه پارامترهای k ، C ، h_i و h_o را با/بدون مقادیر اغتشاش سنسورها نشان می‌دهد. برای مقایسه مقدار تخمینی با مقدار واقعی آن از خطای نسبی که در رابطه (۳۷) ارائه شده، استفاده شده است.

$$\text{Rel.Err.} = \frac{q_{\text{exact}} - q_{\text{estimation}}}{q_{\text{exact}}} \times 100 \quad (37)$$

که در رابطه فوق q می‌تواند هر یک از پارامترهای مجهول k ، C ، h_i و یا h_o باشد. جدول ۴ نشان‌دهنده تطابق بسیار خوب تخمین پارامترها با مقادیر واقعی می‌باشد. جدول ۵ نتایج عددی تخمین همزمان پارامترهای k و h_i و جدول ۶ نتایج عددی تخمین همزمان پارامترهای h_i و h_o را با/بدون مقادیر اغتشاش سنسورها نشان می‌دهند. نتایج این جداول با یک سنسور در سطح داخلی دیوار شرقی به دست آمده‌اند.

نتایج جداول فوق نشان می‌دهند که در تخمین پارامترهای k ، h_i و h_o هنگامیکه از سنسور بدون اغتشاش برای اندازه‌گیری دما استفاده شود، مقادیر تخمین زده شده توسط آنالیز معکوس با مقادیر واقعی تطابق خوبی دارند. در

جدول ۴: نتایج تخمین جداگانه پارامترهای مجهول.

Table 4. The separate estimation of unknown parameters

پارامتر	حدس اولیه	مقدار واقعی	$\sigma = 0$			$\sigma = 0.05$		
			مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار	مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار
k	۰/۱	۰/۴۹۸۷	۰/۴۹۸۷	۰/۰۰۰	۵	۰/۴۹۹۵	۰/۰۱۰	۸
C	۰/۴	۱/۱۳۷۹	۱/۱۳۶۷	۰/۱۰۵	۳	۱/۱۳۷۲	۰/۰۷	۶
h_i	۳	۸/۲۹	۸/۲۸۸	۰/۰۲۵	۴	۸/۲۸۵	۰/۰۶۱	۸
h_o	۳	۱۷/۰۵	۱۶/۹۸	۰/۴۱۰	۵	۱۷/۲۱	۰/۹۳۸	۸

جدول ۵: نتایج تخمین همزمان پارامترهای مجهول.

Table 5. The simultaneous estimation of unknown parameters k and h_i

پارامتر	حدس اولیه	مقدار واقعی	$\sigma = 0$			$\sigma = 0.05$		
			مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار	مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار
k	۰/۱	۰/۴۹۸۷	۰/۴۹۸۷	۰/۰۰۰	۵	۰/۴۹۸۳	۰/۰۸۰	۷
h_i	۳	۸/۲۹	۸/۲۹	۰/۰۰۰		۸/۲۸۲	۰/۰۹۶	

جدول ۶: نتایج تخمین همزمان پارامترهای مجهول.

Table 6. The simultaneous estimation of unknown parameters h_i and h_o

پارامتر	حدس اولیه	مقدار واقعی	$\sigma = 0$			$\sigma = 0.05$		
			مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار	مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار
h_i	۳	۸/۲۹	۸/۲۸۸	۰/۰۲۴	۵	۸/۱۳۷	۰/۱۸۵	۹
h_o	۳	۱۷/۰۵	۱۶/۵۶۷	۰/۹۷۱	۲۴/۷۲۳	۴۵		

جدول ۷: نتایج تخمین همزمان پارامترهای مجهول با دو سنسور.

Table 7. The simultaneous estimation of unknown parameters h_i and h_o by using two sensors

پارامتر	حدس اولیه	مقدار واقعی	$\sigma = 0$			$\sigma = 0.05$		
			مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار	مقدار تخمینی	درصد خطای نسبی	تعداد تکرار
h_i	۳	۸/۲۹	۸/۲۹	۰/۰۰۰	۶	۸/۳	۰/۱۲۱	۹
h_o	۳	۱۷/۰۵	۱۷/۰۴۸	۰/۰۱۲	۱۷/۰۸	۰/۱۷۶		

۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این مقاله تخمین برخی از کمیت‌های مجهولی که امکان دارد در مدل سازی حرارتی ساختمان‌ها با آنها برخورد شود با استفاده از آنالیز معکوس انجام پذیرفته است. بدین منظور به عنوان اولین گام مساله مستقیم یعنی مدل سازی حرارتی اتاق (با استفاده از هدایت حرارتی گذرا در دیوارها به همراه شرایط مرزی ترکیبی جابجایی و تشعشع و مدل توده‌ای برای بقای انرژی فضای ساختمان) انجام پذیرفته و صحت نتایج آن نیز با مقایسه با نتایج کریر تأیید شده است. سپس با توجه به پیچیدگی و اثر متقابل معادلات حاکم بر مساله از روش گرادیان مزدوج و عدم وابستگی کمیت‌های مجهول به زمان و مکان از نسخه تخمین پارامتر آنالیز معکوس جهت تخمین جداگانه و همزمان شرایط مرزی و خواص ترموفیزیکی دیوارها استفاده شده است. نتایج آنالیز حساسیت و آنالیز معکوس نشان می‌دهند که روش آنالیز معکوس گرادیان مزدوج برای تخمین جداگانه و همزمان پارامترهای ساختمان بسیار مناسب می‌باشد. در واقع در این تحقیق، توانایی و کارایی بالای روش آنالیز معکوس در تخمین کمیت‌های مجهول در یک مساله تحلیل بار برودتی و حرارتی به نمایش گذاشته شد.

فهرست علائم

A	مساحت (m^2)
A_{SL}	جزئی از مساحت سطح که نور خورشید به آن تابیده شده است (m^2)

پایین کمیت اندازه‌گیری شده نسبت به این پارامتر، امکانپذیر نمیباشد. لازم بذکر است که روش گرادیان مزدوج با استفاده از سنسورهای بیشتر نیز نتوانست پاسخ همواری برای تخمین همزمان پارامترهای مجهول شامل C به دست آورد.

در شکل ۹، روند تغییرات مقدار تابع هدف بر حسب تعداد تکرار در انحراف معیارهای مختلف ($\sigma = 0$ و $\sigma = 0.05$) برای تخمین همزمان پارامترهای h_i و h_o با به کارگیری دو سنسور، ارائه شده است. این مقدار نشان‌دهنده معیاری از خطاست.

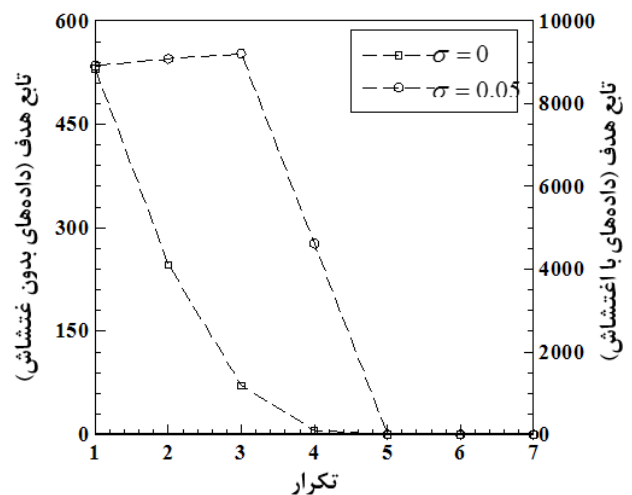


Fig. 9.

شکل ۹: روند تغییرات مقدار تابع هدف (رابطه (۱۷)) به منظور تخمین همزمان h_i و h_o با به کارگیری دو سنسور

اندازه گام جستجو	κ	ظرفیت حرارت کلی ($\text{kJ m}^{-3} \text{K}^{-1}$)	C
عرض جغرافیایی	ϕ	گرمای ویژه در فشار ثابت ($\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	c_p
زاویه برخورد پرتوهای خورشید با سطح	θ	بردار هادی	d
زاویه اوج	θ_z	اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسباتی در محل سنسور	e
چگالی (kJ m^{-3})	ρ	توان صدور (W m^{-2})	E
ضریب انعکاس تشعشع حرارتی	ρ_i	ضریب شکل بین سطوح	F_{ij}
اغتشاش سنسور	σ	تابش کل ساطع شده از یک جسم (W m^{-2})	G
زاویه ساعتی	ω	ضریب انتقال حرارت جابجایی ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	h
ضریب حساسیت	χ	تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در زمان‌های مختلف	I
ماتریس ضرایب حساسیت	χ	تشعشع مستقیم (W m^{-2})	I_b
زیرنویس‌ها		تشعشع پخشی (W m^{-2})	I_{diff}
نشان دهنده سطوح داخلی	i	تشعشع پخشی زمین (W m^{-2})	I_G
نشان دهنده سطوح خارجی	o	کل تابش حرارتی دریافتی توسط یک سطح (W m^{-2})	J
بالانویس‌ها		ضریب هدایت حرارتی ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	k
نشان دهنده هر مرحله تکرار در الگوریتم آنالیز معکوس	k	تعداد سنسورهای اندازه‌گیری درجه حرارت	M
نشانگر ترانهاده یک ماتریس	t	تعداد کل پارامترهای مجهول	N

منابع

- [1] ASHRAE handbook of fundamentals, "American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers", Atlanta, USA, 1997.
- [2] Stephenson, D. G. and G. P. Mitalas, "Cooling load calculations by thermal response factor method", *ASHRAE Transactions*, 73.1 (1967): 509-515.
- [3] Baoping, X. U., F. U. Lin and D. Hongfa, "Dynamic simulation of space heating systems with radiators controlled by TRV sib buildings", *Journal of Energy and Buildings*, 40 (2008): 1755-1764.
- [4] Tzivanidis, C., K. A. Antonopoulos and F. Gioti, "Numerical simulation of cooling energy consumption in connection with thermostat operation mode and comfort requirements for the Athens buildings", *Journal of Applied Energy*, 88 (2011): 2871-2884.
- [5] De Carli, M., M. Scarpa, R. Tomasi, A. Zarrella, "A numerical model for the thermal balance of rooms equipped with radiant systems", *Journal of Building and Environment*, 57 (2012): 126-144.
- [6] Lee, H. L. and Y. C. Yang, "Function estimation in predicting time-dependent heat flux of an annular fin", *Journal of Thermal stresses*, 26 (2003): 799-813.
- [7] Dantas, L. B. and H. R. B. Orlande, "A function estimation approach for determining temperature-dependent thermo-physical properties", *Journal of Inverse Problem Engineering*, 3 (1996): 261-279.

پارامتر مجهول یا پارامتر بهینه‌سازی	\mathbf{P}
شار حرارتی ورودی به سطح دیوار (W m^{-2})	q
تولید یا استخراج حرارت در درون اتاق (W m^{-3})	q_{gen}
ضریب بازگشت زمین	R
تابع هدف	$S(\mathbf{P})$
زمان (s)	t
درجه حرارت (C)	T
بردار مقادیر دما بر حسب زمان در محل سنسور	\mathbf{T}
مکان سنسور	x_j
بردار دمای اندازه‌گیری شده	\mathbf{Y}

علائم یونانی

زاویه ارتفاعی (متمم زاویه اوج)	α
زاویه شیب	β
مقدار زاویه خورشید در ظهر	δ
مقدار تلورانس جهت همگرایی فرآیند تکرار	ε
ضریب جذب تشعشع حرارتی	ε_r
زاویه جهت سطح	γ
ضریب پیوستگی در روش گرادیان مزدوج	λ

- Journal of Heat Transfer Engineering*, 33.8 (2012): 704-711.
- [19] Hematyan, M. R. and Gk. Karami, "Two types of heat conduction problems by inverse boundary element method", *J. Amirkabir Mechanical Engineering*, 46 (2001): 189-201, (In Persian).
- [20] Azimi, A., H. S. Kazemzadeh and B. Farhanieh, "Estimation of Wall Boundary and Inflow Conditions in Inverse Unsteady Forced Convective Heat Transfer in a 2-D Geometry", *The 16th Mechanical Engineering Annal Conference (ISME16)*, Kerman, Iran, 2008 (In Persian).
- [21] Payan, S., S. S. M. Hosseini, H. Ajam and O. Sepahi, "Boundary Inverse Design of 2-D Chambers with Free Convective and Radative Heat Transfers", *The 16th Mechanical Engineering Annal Conference (ISME16)*, Kerman, Iran, 2008 (In Persian).
- [22] Nazari, M. and F. Kosari, "Inverse Conduction Heat Transfer in a Channel Filled with Porous Material under Local Thermal Non-Equilibrium Condition", *J. Amirkabir Mechanical Engineering*, 41.2 (2009): 29-36, (In Persian).
- [23] Payan, S. and S. S. M. Hosseini, "Boundary Inverse Design of 2-D Chambers with Forced Convective and Radative Heat Transfers", *The 17th Mechanical Engineering Annal Conference (ISME17)*, Tehran, Iran, 2009 (In Persian).
- [24] Daneshgar, E. and A. Azimi, "Calculation of the Power of Gaseous Pollutant Source in a Room using Inverse Analysis", *The 15th Fluid Dynamics Annal Conference (FD2013)*, Bandar Abbas, Iran, 2013 (In Persian).
- [25] Azimi, A., P. Goudarzi and Sh. Gholami, "Contact Boundary Condition Estimation in Fractional Non-Fourier Heat Conduction Problem Using Conjugate Gradient Method without/with Adjoint Problem", *J. Modares Mechanical Engineering*, 14.6 (2014): 22-28, (In Persian).
- [26] Duffie, J. A. and W. A. Beckman, "*Solar engineering of thermal processes*", 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1980.
- [27] Tuomaala, P., "*Implementation and evaluation of air flow and heat transfer routines for building simulation tools*", VTT Publications, 2002.
- [28] Beck, J. V., B. Blackwell and C. R. St. Clair, "*Inverse heat conduction: ill-posed problems*", John Wiley, New York, 1985.
- [29] *Climatologically Research Institute*, Iran Meteorological Organization. <<http://www.irimo.ir>>.
- [8] Alifanov, O.M., "*Inverse Heat Transfer Problems*", Springer, Berlin, 1994.
- [9] Ozisik, M. N. and H. R. B. Orlande, "*Inverse Heat Transfer Fundamentals and Application*", Taylor & Francis, New York, 2000.
- [10] Sawaf, B., M. N. Ozisik, "An inverse analysis to estimate linearly temperature dependent thermal conductivity components and heat capacity of an orthotropic medium", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (1995): 3005-3010, .
- [11] Huang, Ch. H., J. Yan, "An inverse problem in simultaneously measuring temperature-dependent thermal conductivity and heat capacity", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 38 (1995): 3433-3441.
- [12] Kakaee, A. H. and B. Farhanieh, "Investigating the effect of different conventional regularization methods on convergence in moving boundary inverse heat conduction problems", *Journal of Scientia Iranica*, 11.1&2 (2004): 104-113.
- [13] Behbahani-nia, A. and F. Kowsary, "A dual reciprocity BE-based sequential function specification solution method for inverse heat conduction problems", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47 (2004): 1247-1255.
- [14] Azimi, A., S. Kazemzadeh Hannani and B. Farhanieh, "Structured multi-block grids solution of two-dimensional transient inverse heat conduction problems in Cartesian Coordinates System", *Journal of Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 48 (2005): 571-590.
- [15] Feng, Li. and N. Jianlei, "An inverse approach for estimating the initial distribution of volatile organic compounds in dry building material", *Journal of Atmospheric Environment*, 39 (2005): 1447-1455.
- [16] Imani, Gh. R., M. Maerefat, F. Kowsary, A. R. Zolfaghari, "Using inverse method for the design of a residential room according to creating thermal relaxation conditions", *Journal of Sharif*, 26-3.1 (2010): 3-10, (In Persian).
- [17] Kowsary, F. and M. Nazari, "Analysis of thermal nonequilibrium inverse heat transfer in a porous channel", *Journal of Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 57.1 (2010): 54-68.
- [18] Nazari, M., S. D. Farahani and F. Kowsary, "Comparison of the mollification and wavelet prefiltering of temperature data in an ill-posed inverse heat conduction problem, application: thermal non-equilibrium porous medium",

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Z. Poolaei Moziraji, A. Azimi, S. Kazemzadeh Hannani, M. Najafi, "Simultaneous Estimation of Thermophysical Properties and Convective Boundary Conditions of a Sample Room in Tehran Using Inverse Analysis", *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(1) (2017) 147-160.
DOI: 10.22060/mej.2016.766

