



«یادداشت تحقیقاتی»

تأثیر محتوای رطوبتی مصالح ساختمانی بر عملکرد حرارتی جداره‌های خارجی ساختمان

امیر امیدوار^{۱*}، بهنام رستی^۲

۱- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز

* شیراز، صندوق پستی ۷۱۵۵۵-۳۱۳، omidvar@sutech.ac.ir

چکیده- در این تحقیق اثر محتوای رطوبتی بر روی پارامترهای عامل کاهیدگی و تأخیر زمانی برای دیوار بدون عایق و دیوار عایق‌کاری شده بررسی شد. نتایج نشان داد که درصد رطوبت مصالح ساختمانی تأثیر چشمگیری بر رفتار حرارتی جداره دارد. ضخامت بهینه عایق حرارتی جداره برای سه حالت، عایق داخلی، عایق میانی و عایق خارجی تحت شرایط رطوبتی مختلف محاسبه شد. بررسی‌ها نشان داد که ناچیز فرض نمودن اثرات رطوبت می‌تواند خطای چشمگیری را در محاسبه ضخامت بهینه عایق حرارتی به دنبال داشته باشد. مقدار خطای ایجاد شده بسته به نوع عایق‌کاری و محل قرارگیری عایق در ضخامت جداره متفاوت است.

کلیدواژگان: رطوبت، پاسخ حرارتی، ساختمان، عایق حرارتی.

«Research Note»

Effect of moisture content of building materials on thermal performance of exterior building walls

A. Omidvar^{1*}, B. Rosti²

1- Assist. Prof., Mech. Eng., Shiraz Univ. Tech., Shiraz, Iran

2- MSc. Student, Mech. Eng., Shiraz Univ. Tech., Shiraz, Iran

* P.O.B. 71555-313 Shiraz, Iran. omidvar@sutech.ac.ir

Abstract- In this research, the effect of moisture content on time lag and decrement factor has been investigated for insulated and non insulated walls. Results indicated that moisture content has a very profound effect on transient thermal performance of building walls. The optimum thermal insulation thickness has been calculated for three different configurations, inner, outer and central layer insulation, under various moisture contents. Results showed that in calculating optimum thickness of thermal insulations significant errors can arise from the assumption of dry concrete. The amount of the error depends on the position of the thermal insulation in the wall.

Keywords: Moisture, Thermal Response, Building, Thermal Insulation.

۱- مقدمه

یکسان است، لذا در تحلیل‌های حرارتی، می‌توان بتن را با تقریب خوبی به عنوان نماینده کلیه مصالح ساختمانی در نظر گرفت و از داده‌های گزارش شده برای بتن به جای برخی دیگر از مصالح همانند آجر و ملات نیز استفاده کرد. در پژوهش حاضر سعی خواهد شد تا تأثیر محتوای رطوبتی مصالح ساختمانی بر عملکرد حرارتی جداره خارجی ساختمان مورد بررسی قرار گیرد. بر اساس آخرین جستارهای نگارندگان، این موضوع تاکنون بررسی نشده است.

۲- تعریف مسأله و مدل‌سازی ریاضی

در این تحقیق یک دیوار خارجی چند لایه مدل‌سازی شده است. معادله انتقال حرارت یک بعدی ناپایا در دیوار چند لایه با رابطه (۱) بیان می‌شود.

$$k_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} = \rho_j c_j \frac{\partial T_j}{\partial t}, j = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

که x و t مختصات مکان و زمان، T دما، ρ چگالی، c ظرفیت گرمایی ویژه و k ضریب انتقال حرارت هدایت است. m تعداد لایه‌های دیواره است.

دمای هوای محیط (T_o) در طول یک شبانه روز از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$T_o(t) = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{p} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (2)$$

که $T_{\max}$ و $T_{\min}$ بیانگر مقادیر بیشینه و کمینه دمای هوای محیط بیرون و P دوره تناوب نوسان که برابر ۲۴ ساعت است. در سطح داخلی دیوار شرط مرزی جابه‌جایی حرارتی و در سطح خارجی آن شرط جابجایی و تابش حرارتی به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده است. همچنین متوسط دمای هوای بیرون به عنوان شرط اولیه دیوار در نظر گرفته شده است. در این پژوهش مقادیر شدت تابش خورشیدی برای یک دیوار عمودی (با جهت جنوبی) در طول و عرض جغرافیایی شهر تهران به صورت ساعت به ساعت توسط نرم افزار کریر برای مرداد ماه محاسبه شده و مورد استفاده قرار گرفته است. در این محاسبات از اثرات ناصافی هوا صرف‌نظر شده است.

پارامترهای تأخیر زمانی (TL) و عامل کاهندگی (DF) به صورت روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌شوند که که P دوره تناوب موج نوسانی دمای محیط در طول شبانه روز است.

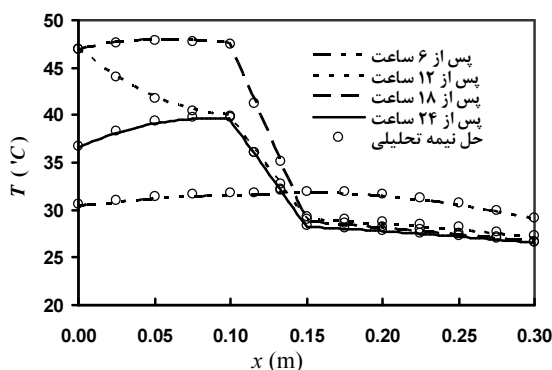
استفاده از عایق‌های حرارتی در جداره‌ها یکی از روش‌های مؤثر در کاهش بار حرارتی و برودتی ساختمان است. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه بهینه‌سازی عملکرد عایق‌های حرارتی صورت گرفته است [۲، ۱]. معمولاً در تحلیل حرارتی عملکرد جداره‌های عایق‌کاری شده ساختمانها از دو پارامتر تأخیر زمانی^۱ و عامل کاهندگی^۲ استفاده می‌شود [۳]. بهترین ترکیب برای اجزای یک دیواره حالتی است که کمترین مقدار عامل کاهندگی و بیشترین مقدار تأخیر زمانی را داشته باشد.

تاکنون نوع و محل فراگیری عایق‌های دو تکه [۴] و سه تکه [۵] بر اساس معیار بیشینه تأخیر زمانی و کمینه عامل کاهندگی بررسی و حالت بهینه معرفی شده است. همچنین اثرات شرایط آب و هوایی [۶] و ضریب جذب تابشی دیواره [۷] بر عملکرد حرارتی دیوار بر اساس معیارهای مذکور بررسی شده است.

تقریباً در تمامی این تحقیقات از اثرات نفوذ رطوبت بر تغییر خواص ترموفیزیکی مصالح ساختمانی صرف‌نظر شده است. از آنجا که مواد ساختمانی اغلب ساختار متخلخل دارند، لذا خواص ترموفیزیکی آنها از قبیل ضریب انتقال حرارت هدایت، چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه به میزان رطوبت موجود در آنها وابسته است. با تغییر رطوبت نسبی هوا^۳، میزان نم موجود در مصالح یا به عبارت بهتر محتوای رطوبتی^۴ مصالح ساختمانی تغییر می‌کند و تا حدی باعث تغییر در خواص ترموفیزیکی آنها می‌شود [۸]. در برخی از پژوهش‌های انجام شده به روش آزمایشگاهی، وابستگی خواص ترموفیزیکی بتن به رطوبت نسبی هوای محیطی که بتن با آن در تماس است مورد مطالعه قرار گرفته و روابطی نیز برای محاسبه این خواص ارائه شده است [۹]. در مورد تأثیر رطوبت جذب شده از محیط بر خواص ترموفیزیکی سایر مصالح ساختمانی داده‌های مشخصی ارائه نشده است، اما برخی بررسی‌ها حاکی از این است که میزان تغییر محتوای رطوبتی بتن و سایر مصالح ساختمانی در اثر تغییر رطوبت نسبی محیط مجاور آنها تقریباً مشابه است [۸]. از آنجا که خواص ترموفیزیکی بتن با سایر مصالح بنایی تقریباً

1. Time Lag
2. Decrement Factor
3. Relative humidity
4. Moisture content

برابر با $22 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ و $6 \text{ (W/m}^2\text{K)}$ در نظر گرفته شده است [۱۰].



شکل ۱ مقایسه توزیع دمای بدست آمده برای دیوار از حل عددی و حل نیمه تحلیلی گزارش شده در [۱۰]

همچنین فرض شده که این دیوار از سوی دیگر با هوای داخل ساختمان با دمای ثابت 26°C درجه سانتی‌گراد در تماس است. خواص ترموفیزیکی مصالح تابعی از میزان محتوای رطوبتی مصالح در نظر گرفته شده است [۹]. مطابق جدول ۱ پنج حالت مختلف برای مقادیر رطوبت نسبی در نظر گرفته شده است. نتایج به دست آمده برای ضخامت بهینه عایق حرارتی در محیط‌هایی با رطوبت نسبی‌های مختلف در شکل ۲ رسم شده است. مشاهده می‌شود که در حالت بتن خشک، مقادیر محاسبه شده برای ضخامت بهینه عایق با حالت‌های دیگر کاملاً متفاوت است. برای مقایسه راحت‌تر، مقادیر خطای ناشی از فرض بتن خشک در محاسبه ضخامت بهینه عایق حرارتی برای پنج حالت فوق‌الذکر در جدول ۲ آمده است. در محاسبه ضخامت بهینه با فرض بتن خشک، دیوار بتنی با عایق بیرونی بیشترین مقدار خطا و دیوار بتنی با عایق داخلی کمترین مقدار خطا را از خود نشان می‌دهند.

جدول ۱ حالت‌های مختلف برای رطوبت نسبی محیط‌های اطراف

حالت‌ها	رطوبت نسبی محیط داخل (%)	رطوبت نسبی محیط خارج (%)
۱	۵۰	۰
۲	۵۰	۳۳
۳	۵۰	۵۰
۴	۵۰	۷۵
۵	۵۰	۹۷

$$TL = \phi = \begin{cases} t_{T_o \max} > t_{T_e \max} \Rightarrow t_{T_o \max} - t_{T_e \max} \\ t_{T_o \max} < t_{T_e \max} \Rightarrow t_{T_o \max} - t_{T_e \max} + P \\ t_{T_o \max} > t_{T_e \max} \Rightarrow P \end{cases} \quad (3)$$

$$DF = \frac{A_o}{A_e} = \frac{T_o^{\max} - T_o^{\min}}{T_e^{\max} - T_e^{\min}} \quad (4)$$

۳- روش حل عددی و اعتبار سنجی آن

معادلات حاکم و شرایط مرزی به روش حجم محدود و به صورت ضمنی گسسته سازی شده و دستگاه معادلات به روش الگوریتم سه قطری^۱ حل شده‌اند. شبکه محاسباتی به اندازه‌ای کوچک در نظر گرفته شده که محاسبات از شرط استقلال از شبکه برخوردار باشد. نتایج به دست آمده از برنامه محاسباتی با نتایج یک حل نیمه تحلیلی گزارش شده در مرجع [۱۰] در شکل ۱ در شرایط مشابه مقایسه و اعتبارسنجی شده است.

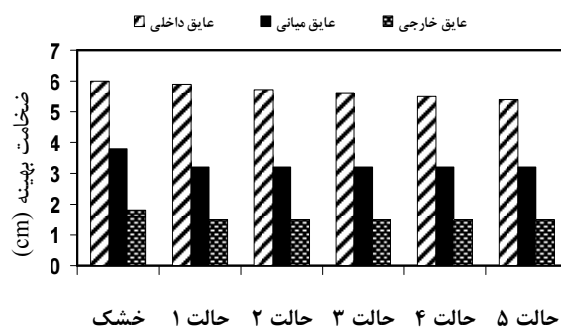
۴- بررسی اثر رطوبت بر عملکرد حرارتی دیوار

به منظور بررسی اثر رطوبت بر عملکرد حرارتی دیوار، ضخامت بهینه عایق حرارتی در دیواره مورد بررسی قرار گرفته است. بهینه سازی ضخامت عایق در عمل، صرفاً یک مسأله حرارتی محض نیست و به تحلیل عوامل اقتصادی نیز نیازمند است [۱]. اما در این تحقیق، هدف تعیین معیاری جهت مقایسه رفتار حرارتی عایق‌ها در شرایط مرطوب و غیرمرطوب، صرف‌نظر از شرایط اقتصادی است. ورود بحث آنالیز اقتصادی گرچه ممکن است مقادیر بهینه محاسبه شده را تغییر دهد، اما بر کلیت موضوع اثری نخواهد داشت. در این پژوهش ۹۵٪ کاهش در عامل کاهندگی مبنا به عنوان معیاری برای تعیین ضخامت بهینه حرارتی عایق انتخاب شده است.

به منظور بررسی ضخامت بهینه عایق، یک دیوار بتنی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده که قرار است با لایه‌ای از پلی یورتان عایق‌کاری شود. عملکرد لایه پلی یورتان با ضخامت‌های مختلف در سه حالت عایق در سمت داخل دیوار، عایق در وسط و عایق در سمت خارج دیوار بررسی شده است. بیشینه و کمینه دمای هوای محیط خارج به ترتیب ۳۵ و ۲۰ درجه سانتی‌گراد فرض شده است. ضرایب انتقال حرارت همرفتی در سطوح خارجی (h_o) و داخلی (h_i) دیوار به ترتیب

1. Tridiagonal Matrix Algorithm (TDMA)

جداره متفاوت است. در حالتی که عایق در سطح خارجی دیوار قرار دارد، مقدار خطای محاسباتی ناشی از خشک فرض نمودن مصالح می‌تواند تا ۲۱٪ نیز افزایش یابد. این در حالتی است که مقدار این خطا در حالتی که عایق در سطح داخلی قرار دارد می‌تواند بسته به شرایط آب و هوایی محیط خارج ساختمان از ۲٪ تا ۵٪ تغییر نماید. در حالتی که عایق در وسط ضخامت جداره قرار دارد نادیده گرفتن اثرات رطوبت نفوذی به دیوار، در محاسبه ضخامت بهینه عایق حرارتی، خطایی نزدیک به ۱۸٪ را به دنبال خواهد داشت.



شکل ۲ ضخامت بهینه عایق در شرایط رطوبتی مختلف

جدول ۲ درصد خطای ناشی از فرض بتن خشک، در محاسبه

ضخامت بهینه عایق

حالت‌ها	عایق داخلی	عایق میانی	عایق خارجی
۱	۰	۱۸/۴	۲۱/۱
۲	۱/۷	۱۸/۴	۲۱/۱
۳	۳/۴	۱۸/۴	۲۱/۱
۴	۳/۴	۱۸/۴	۲۱/۱
۵	۵/۱	۱۸/۴	۲۱/۱

۶- مراجع

- [1] Kaynakli O., "A review of the economical and optimum thermal insulation thickness for building applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, 2012, pp. 415-425.
- [2] Ebrahimpour A., Maerefat M., Mohammad Kari B., "Optimization of insulation in permanent used buildings based on annual heat loads in iran climate conditions", *Scientific Research Journal of Modares*, Vol. 4, No. 17, 2004, pp. 33-52.
- [3] Asan H., "Numerical computation of time lags and decrement factors for different building materials", *Building and Environment*, Vol. 41, 2005, pp. 615-620.
- [4] Asan H., "Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view", *Energy and Buildings*, Vol. 32, No. 2, 2000, pp. 197-203.
- [5] Ozel M. and Pihtili K., "Optimum location and distribution of insulation layers on building walls with various orientations", *Building and Environment*, Vol. 42, No. 8, 2007, pp. 3051-3059.
- [6] Mavromatidis L.E., Mankibi M.E., Michel P. and Santamouris M., "Numerical estimation of time lag and decrement factors for wall complexes including multilayer thermal insulation, in two different climatic zones", *Applied Energy*, Vol. 92, 2012, pp. 480-491.
- [7] Kontoleon K.J. and Bikas D.K., "The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations", *Energy and Buildings*, Vol. 39, 2007, pp. 1011-1018.
- [8] *The Online Resource for Cement Concrete & Aggregates*, www.concrete.net.au/publications/pdf/Moisture.pdf (accessed 8 March 2013).
- [9] Jansson R. "Measurement of thermal properties at

همچنین نتایج نشان می‌دهد که با افزایش رطوبت نسبی هوای بیرون از صفر تا ۹۷٪ (حالات ۱ الی ۵)، خطای ناشی از فرض بتن خشک در محاسبه ضخامت بهینه عایق داخلی، افزایش می‌یابد ولی در عایق‌کاری میانی و بیرونی تأثیرگذار نیست. این امر به دلیل نفوذ بیشتر رطوبت هوای بیرون در عایق‌کاری داخلی نسبت به عایق‌کاری میانی و بیرونی است. در حالتی که عایق در سطح داخلی جداره قرار دارد، رطوبت موجود در هوای خارج می‌تواند به راحتی در جداره نفوذ نموده و بخش بیشتری از ضخامت جداره را تحت تأثیر قرار دهد.

۵- جمع‌بندی

در این پژوهش تأثیر محتوای رطوبتی مصالح ساختمانی بر عملکرد حرارتی دیوار خارجی ساختمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که ناچیز فرض نمودن اثرات رطوبت می‌تواند خطای نسبتاً چشم‌گیری را در محاسبه ضخامت بهینه عایق حرارتی به دنبال داشته باشد. مقدار خطای ایجاد شده بسته به نوع عایق‌کاری و محل قرارگیری عایق در ضخامت

- [10] Al-Sanea S.A. and Zedan M.F., "Effect of Insulation Location on Initial Transient Thermal Response of Building Walls", *Journal of thermal envelope and building science*, Vol. 24, 2001, pp. 275-300.

elevated temperatures – Brandforsk project 328-031", SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 2004:46, ISBN 91-85 303-22-4, ISSN 0284-5172.