نشریه هنرهای زیبا - معماری و شهرسازی • شماره ۴۰ • زمستان ۱۳۸۸

تحلیل عملکرد حرارتی- رطوبتی پوسته ساختمان با دو روش پایدار و ناپایدار

مهدیه آب روش*[۱]، دکتر شاهین حیدری[۲]

[۱] کارشناس ارشد معماری و انرژی، دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

[۲] استادیار دانشکده معماری، پردیس هنرهای زیبا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

(تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۱۰/۲۶، تاریخ پذیرش نهایی: ۸۸/۱۲/۱۵)

چکیده:

با افزایش وقوع خرابی‌های ناشی از رطوبت در ساختمان، نیاز به پیشرفت روش‌های محاسبه و ارزیابی رفتار رطوبتی در اجزای ساختمانی بیشتر احساس می‌شود. عواملی نظیر خرابی‌های سازه‌ای که به دلیل نفوذ رطوبت در پوسته ساختمان‌ها، خیس شدن عایق حرارتی و چرخه‌های تبخیر / میعان در اجزای مختلف ساختمانی رخ می‌دهد، سبب بالا رفتن اتلاف حرارت و کاهش مقاومت حرارتی اجزای ساختمانی می‌گردد. اقدامات بهینه‌سازی مصرف انرژی، به منظور جلوگیری از ایجاد مشکلات حرارتی در ساختمان‌ها، به شدت به عملکرد رطوبتی سازه‌های آن بستگی دارد. یافتن راه‌حل‌هایی برای رفع این مشکلات زمانی دشوار خواهد بود که چندین مکانیسم در انتقال رطوبت نقش داشته باشند. بنابراین، نیاز مبرمی به اطلاعات عملکرد حرارتی و رطوبتی پوسته ساختمان احساس می‌شود. از آنجا که بررسی‌های تجربی این امر بسیار پرهزینه و دشوار می‌باشد، در نتیجه، استفاده از مدل‌های صحیح و معتبر ریاضی و شبیه‌سازی رایانه‌ای گزینه مناسب‌تری می‌باشد. در این تحقیق، عملکرد حرارتی- رطوبتی جدارهای ساختمانی در دو شرایط پایدار و ناپایدار مورد بررسی قرار گرفته‌است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که در روش پایدار، پیش بینی وقوع میعان در لایه‌های جدار از دقت کم‌تری برخوردار است. اما در روش ناپایدار به لحاظ در نظر گرفتن کلیه شرایط، عملکرد حرارتی- رطوبتی جدار با دقت بیشتری بررسی می‌شود و نتایج آن منجر به ارئه راه‌کارهای متفاوتی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

عملکرد حرارتی و رطوبتی، پوسته ساختمان، روش برتیه، روش ووفی، میعان.

* نویسنده مسئول: تلفن: ۰۹۱۲۲۰۲۳۳۴۱، نمابر: ۸۸۲۵۵۹۴۲-۰۲۱، E-mail: m_abravesh@yahoo.com.

مقدمه

رطوبت، عامل بالقوه‌ای در ساختمان است که می‌تواند سلامتی و آسایش ساکنین آن را به مخاطره اندازد و به زیبایی و دوام مصالح ساختمان لطمه وارد کند. انتقال آن از اجزای ساختمانی تأثیرات قابل ملاحظه‌ای بر تبادل حرارت در ساختمان دارد (آب‌روش، ۱۳۸۸، ۸). یکی از مهم‌ترین این موارد، تأثیر رطوبت در کاهش مقاومت حرارتی جدارهای ساختمانی و افزایش بارهای گرمایی و سرمایی ساختمان می‌باشد. بنابراین، کنترل رطوبت تأثیر به‌سزایی بر مصرف انرژی ساختمان، هزینه اولیه و نگهداری آن خواهد داشت و یکی از عوامل مهم در طراحی ساختمان‌ها محسوب می‌شود.

انتقال رطوبت در مصالح متخلخل بر اثر اختلاف دما و اختلاف فشار جزئی بخار آب (که از اختلاف دما و رطوبت نسبی ناشی می‌شود) در فضاهای طرفین صورت می‌گیرد (آب‌روش، ۱۳۸۸، ۵۷). در اکثر موارد، بخش اعظم انتقال رطوبت به‌صورت بخار آب است. میعان زمانی ایجاد می‌گردد که قطرات آب بر روی عنصر ساختمانی (میعان سطحی) و یا در خلل و فرج تشکیل‌دهنده آن (میعان عمقی) پدیدار شود.

پیش‌بینی و رفع خطر میعان در لایه‌های جدار نه تنها در جهت تضمین عمر مفید ساختمان‌ها است، بلکه به‌عنوان یک عامل تعیین‌کننده در تأمین شرایط حداقل بهداشت ساکنان نیز مطرح می‌باشد. امروزه، تلاش و کوشش معماران و مهندسین بر این است که علاوه بر طراحی ساختمان‌هایی با ظاهری زیبا و جذاب، جنبه‌های دیگر نیز در طراحی لحاظ شود. ساختمان‌های امروز علاوه بر زیبایی، باید شامل فضاهایی سالم باشند تا بتوانند راحتی و آسایش را برای ساکنین آن به همراه داشته باشند. بنابراین، پدیده میعان خطری جدی برای دوام پوسته خارجی ساختمان محسوب می‌شود، و لازم است با استفاده از روش‌های گوناگون، طراحی جدارهای ساختمان به‌گونه‌ای انجام گیرد که از بروز میعان جلوگیری شود.

طی چند دهه اخیر، استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی (www.eere.energy.gov) برای برآورد میزان مصرف انرژی در ساختمان و عملکرد حرارتی- رطوبتی جدارهای آن پیشرفت چشمگیری داشته است (Woloszyn, 2008, 6). اما، تنها تعداد بسیار محدودی از این نرم‌افزارها برای بررسی فرآیندهای پیچیده انتقال حرارت و رطوبت به طور همزمان مناسب می‌باشند (Karagiozis, 2001, 159).

با توجه به پیچیدگی عملکرد حرارتی و رطوبتی جدارهای ساختمان و زمان‌بر بودن اندازه‌گیری‌های دستی (Holm, 2000, 1)، در این مقاله با بهره‌گیری از دو روش پایدار و مدل‌سازی در یک نرم‌افزار معتبر شبیه‌سازی عملکرد حرارتی- رطوبتی به بررسی روش‌های گوناگون تحلیل عملکرد حرارتی- رطوبتی پوسته ساختمان و مقایسه آنها پرداخته شده است و تأثیر راهکارهای گوناگون برای جلوگیری از رخ دادن پدیده میعان و مشکلات رطوبتی در یک نمونه موردی مورد بررسی قرار گرفته است.

روش پایدار

روش‌های پایدار، روش‌های ساده ی محاسبات جهت تعیین مخاطرات میعان می‌باشند. در این روش‌ها، شرایط محیطی به صورت ثابت در نظر گرفته می‌شوند و فرض می‌شود که رطوبت در مواد تشکیل‌دهنده پوسته ناچیز است، در حدی که انتقال رطوبت فقط به صورت بخار آب صورت می‌گیرد. به عبارت دیگر، به‌محض این‌که پدیده میعان در بخشی از پوسته ظاهر شود، این روش‌ها فاقد اعتبار می‌شوند.

در روش‌های پایدار، دبی رطوبت در پوسته خارجی متناسب با گرادیان فشار جزئی بخار آب در نظر گرفته می‌شود. معادله انتقال رطوبت در حالت پایدار به صورت زیر نوشته می‌شود (کاری، ۱۳۸۶، ۱۶۵):

$$m_v = \frac{\pi.(P_{ve} - P_{vi})}{d} (kg/m^2.s)$$

در این رابطه:

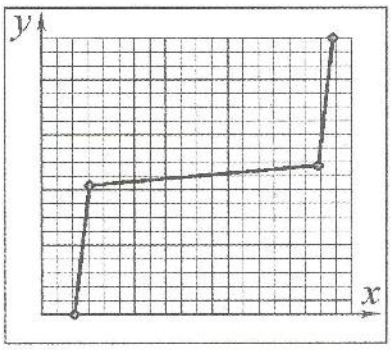
m_v ، شار جریان بخار آب[1]

π ، ضریب نفوذپذیری بخار آب

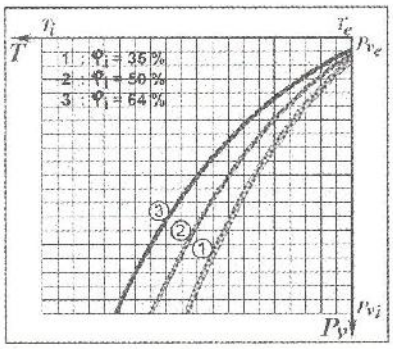
P_{ve} ، فشار جزئی بخار آب خارج

P_{vi} ، فشار جزئی بخار آب داخل

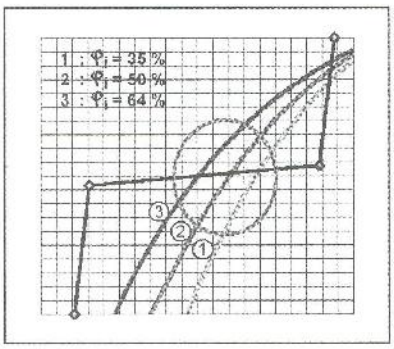
d ، ضخامت لایه



تصویر ۱ - نمودار مربوط به تغییرات فشار جزئی بخار آب (P_v) مربوط به نقاط داخلی جدار.
(مأخذ: کاری، ۱۳۸۶، ۱۶۷)



تصویر ۲ - نمودار روش برتیه.
(مأخذ: همان، ۱۶۷)



تصویر ۳ - منحنی‌های تغییرات فشار جزئی بخار آب در حالت اشباع (P_{vs})
(مأخذ: همان، ۱۶۸)

برای استفاده از این روش‌ها، لازم است مشخصات حرارتی-رطوبتی (مقاومت حرارتی و نفوذپذیری بخار آب) لایه‌های مختلف تشکیل‌دهنده جدار شناخته شده باشد.

یکی از این روش‌ها، که نسبت به سایر روش‌های پایدار دارای نقاط قوت بیشتری است، روش محاسباتی برتیه[۲] نام دارد (همان، ۱۶۶). در این روش، تعیین خطر میعان با رسم منحنی مربوط به تغییرات فشار جزئی بخار آب (P_v) مربوط به نقاط داخلی جدار (تصویر ۱) و مقایسه آن با منحنی‌های تغییرات فشار جزئی بخار آب در حالت اشباع (P_{vs})(تصویر ۲)، که فقط به شرایط حاکم در فضاهای دو طرف پوسته بستگی دارد، صورت می‌گیرد (همان، ۱۶۷). اگر خطوط وصل‌کننده این نقاط با منحنی ترسیم شده تلاقی کند، خطر میعان وجود خواهد داشت (تصویر ۳).

روش ناپایدار

در عمل، شرایط جوی و وضعیت فضاهای داخلی در طول زمان متغیر و ناپایدار می‌باشد و نیازمند انجام محاسبات پیچیده‌ای است که این امر با استفاده از نرم‌افزارهای رایانه‌ای ممکن می‌شود. در این نرم‌افزارها، داده‌های آب و هوایی سالانه ساعت به ساعت محل استقرار ساختمان به عنوان ورودی دریافت می‌شود و عملکرد اجزای مختلف ساختمان در طول زمان و نسبت به شرایط متغیر کلیه عناصر اقلیمی شبیه‌سازی می‌گردد.

یکی از روش‌های بررسی عملکرد حرارتی- رطوبتی جدارها در شرایط ناپایدار، شبیه‌سازی جدار مورد نظر به کمک نرم‌افزار وفی[۳] می‌باشد. این نرم‌افزار، یک برنامه شبیه‌ساز حرارتی - رطوبتی پیشرفته است که مناسب معماران و طراحان پوسته ساختمان است (Karagiozis, 2001, 169). هدف آن، کمک به مرحله طراحی جهت بالا بردن عملکرد حرارتی و رطوبتی پوسته ساختمان است.

مقاطع دیوارها، سقف‌ها و زیرزمین‌های قرارگرفته در شرایط آب و هوایی طبیعی خارج نمونه‌هایی از سیستم‌های پوسته ساختمان به شمار می‌روند. این نرم‌افزار بر پایه جدیدترین تکنولوژی درک فیزیک ساختمان نسبت به خطوط هم‌دمایی جذب و جذب سطحی، انتشار بخار، انتقال مایع و تغییرات فاز قرار دارد. بررسی درستی‌سنجی این نرم‌افزار از طریق مقایسه اطلاعات ارزیابی‌شده و عملکردی در این زمینه انجام شده است (Künzel, 2001,12).

نرم‌افزار ووفی

نرم‌افزار ووفی یک برنامه رایانه‌ای برای تحلیل مشخصات حرارتی- رطوبتی پوسته ساختمان در شرایط ناپایدار است. این نرم‌افزار مشترکاً توسط آزمایشگاه بین‌المللی اُکریج[۴] (مرکز تکنولوژی ساختمان[۵]) و مؤسسه فرانهوفر در زمینه فیزیک ساختمان[۶] برای برآورد فنی مشکلات رطوبت، که انتقال ناپایدار حرارت و رطوبت را پیش‌بینی می‌کند، تهیه شده است. صحت نتایج مربوط به این نرم‌افزار توسط مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی تولیدکننده آن اعلام گردیده است و امروزه این نرم‌افزار به عنوان یک مرجع معتبر در زمینه تحقیقات و طراحی جدارهای نوین ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل از سال ۱۹۹۴ یک مدل حرارتی- رطوبتی مبنا به شمار می‌رود. (Karagiozis, 2001, 158)

شبیه‌سازی با این نرم‌افزار، امکان دستیابی به مدل‌های ناپایداری را فراهم می‌نماید که می‌تواند برای برآورد توزیع حرارت و رطوبت برای محدوده وسیعی از مصالح ساختمانی و شرایط گوناگون آب و هوایی مورد استفاده قرار گیرد.

به کمک این نرم‌افزار می‌توان به برآورد زمان‌های خشک شدن سازه‌های سبک و سنگین با رطوبت‌های پنهان‌شده یا به دام افتاده، بررسی خطر میعان عمقی یا مطالعه تأثیر کج‌باران‌ها روی اجزای خارجی پوسته ساختمان پرداخت. همچنین، می‌توان با توجه به واکنش‌های اجزای ساختمانی نسبت به اقلیم‌های گوناگون، راه‌حل‌هایی برای بهبود آنها پیدا کرد. این کار امکان مقایسه و اولویت‌بندی طراحی‌های گوناگون را بر اساس حداکثر عملکرد حرارتی- رطوبتی می‌دهد (همان، ۱۶۲).

بررسی نمونه موردی

در این قسمت، به منظور مقایسه عملکرد حرارتی- رطوبتی جدار در دو حالت پایدار و ناپایدار، محاسبات دستی و تحلیل شبیه‌سازی مربوط به یکی از جدارهای ساختمانی به صورت نمونه در اقلیم گرم و مرطوب مورد بررسی قرار می‌گیرد.

اطلاعات و مفروضات

در این قسمت، اطلاعات مربوط به محاسبات عملکرد حرارتی- رطوبتی یک نمونه موردی در دو حالت پایدار و ناپایدار در اقلیم گرم و مرطوب داده شده است.

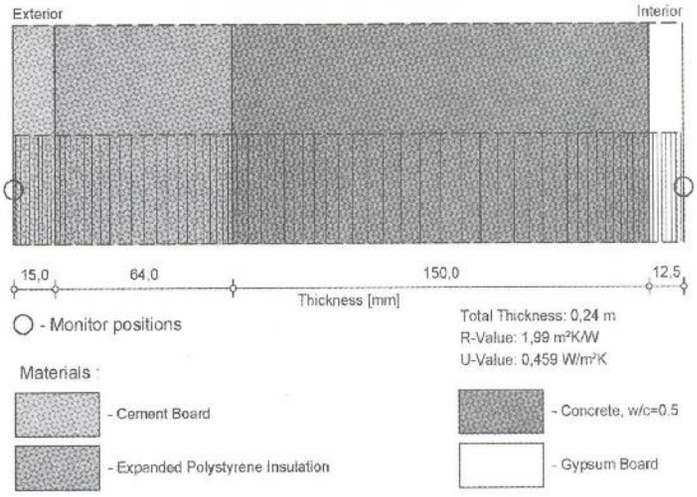
لایه‌های تشکیل‌دهنده این جدار از داخل به خارج عبارتند از تخته‌گچی، بتن، عایق حرارتی از جنس پلی‌استایرن و تخته‌سیمانی که ضخامت و سایر مشخصات آنها در تصویر ۴ نشان داده شده است.

در روش پایدار، شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای جدار نمونه مطابق جدول ۱ می‌باشد.

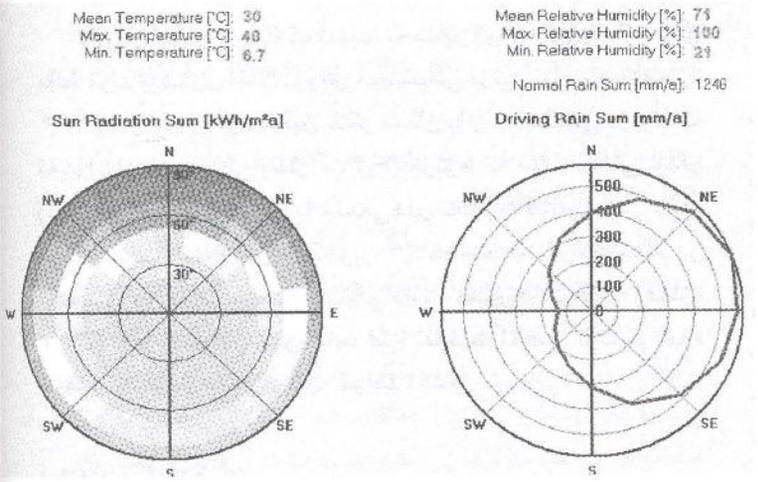
در روش ناپایدار، یک نمونه شرایط اقلیمی که مشخصات کلی آن در تصویر ۵ نشان داده شده است، در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات مصالح به‌کار رفته در شبیه‌سازی که از پایگاه داده‌های نرم‌افزار انتخاب شده است، مطابق جدول ۲ می‌باشد.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

در مرحله اول، بررسی عملکرد حرارتی- رطوبتی جدار توسط روش پایدار (برتیه) انجام شده است. همان طور که



تصویر ۴ - لایه‌های تشکیل‌دهنده دیوار نمونه.
(مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۵ - مشخصات اقلیم گرم و مرطوب در نظر گرفته شده جهت شبیه‌سازی.
(مأخذ: نگارندگان)

جدول ۱ - شرایط مرزی مورد بررسی در محاسبات برتیه برای دیوارهای نمونه.

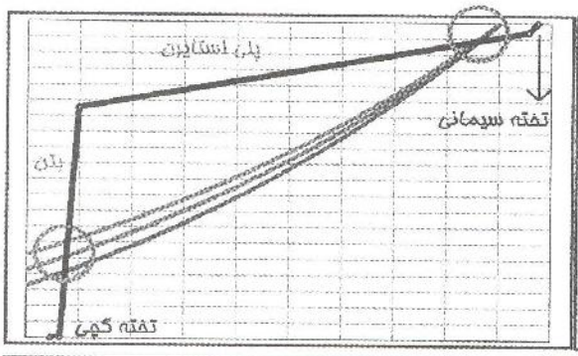
	دمای خارج (درجه سانتی‌گراد)	دمای داخل (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت نسبی خارج (٪)
شرایط حاد دوره گرم	۴۰	۲۰	۹۰
شرایط حاد دوره سرد	۷	۲۰	۸۰

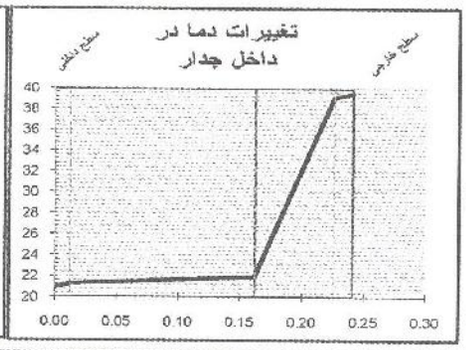
(مأخذ: نگارندگان)

جدول ۲- مشخصات حرارتی- رطوبتی مصالح مورد استفاده.

نام مصالح	چگالی [kg/m³]	ضریب نفوذپذیری بخارآب [m³/m³]	ظرفیت حرارتی [J/kg.K]	ضریب هدایت حرارتی [W/m.K]	شاخص مقاومت رطوبتی [-]
بتن (نسبت آب به سیمان=۰.۵)	۲۳۰۰	۰/۱۸	۸۵۰	۱/۶	۱۸۰
پلی‌استایرن منبسط‌شده	۱۴/۸	۰/۹۹	۱۴۷۰	۰/۰۳۶	۷۳/۰۱
تخته‌سیمانی	۱۱۳۰	۰/۴۸	۸۴۰	۰/۲۵۵	۲۸
تخته‌گچی	۸۵۰	۰/۶۵	۸۵۰	۰/۲	۸/۳
لایه هوا	۱/۳	۰/۹۹۹	۱۰۰۰	۰/۲۸	۰/۳۲
اندود سیمان	۱۸۸۵	۰/۴۶۴	۹۰۰	۰/۴۴	۱۴/۸
بخاربند (sd=1500m)	۱۳۰	۰/۰۰۱	۲۳۰	۲/۳	۱۵۰۰۰۰

(مأخذ: نگارندگان)





Te	Ti
40.0	20.0
PHI e	PHI i
90%	35% 50% 64%
Pe	Pi
6623	816 1166 1493

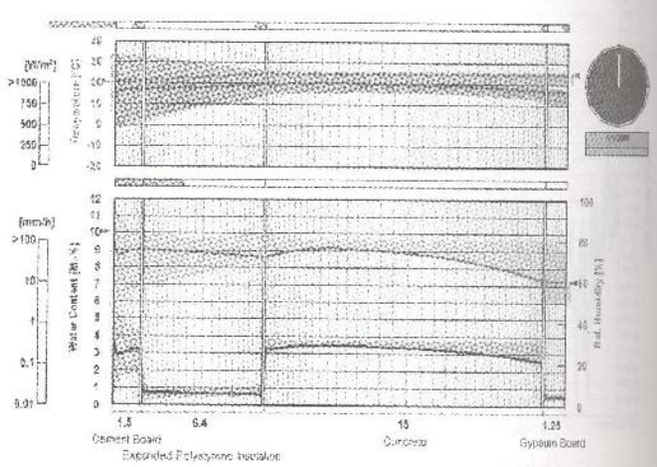
لایه‌های تشکیل‌دهنده دیوار	ضخامت d	هدایت حرارتی λ	نفوذ پذیری π	مقاومت حرارتی Rt	مقاومت رطوبتی Rd	$R_T/\Sigma R_T$	$R_D/\Sigma R_D$	Σd	T
هوای داخل				0.090		0.047			20.94
تخته گچی	0.012	0.35	0.25	0.034	0.048	0.065	0.003	0.0120	21.30
بتن	0.150	2.30	0.01	0.065	12.000	0.099	0.728	0.1620	21.98
پلی استایرن	0.064	0.04	0.02	1.641	4.000	0.956	0.970	0.2260	39.12
تخته سیمانی	0.015	0.44	0.03	0.034	0.500	0.974	1.000	0.2410	39.48
هوای خارج				0.050					
جمع				1.915	16.548				

تصویر ۶- محاسبات تعیین خطر میعان دیوار نمونه در شرایط حاد اقلیمی اقلیم گرم و مرطوب.
(مأخذ: نگارندگان)

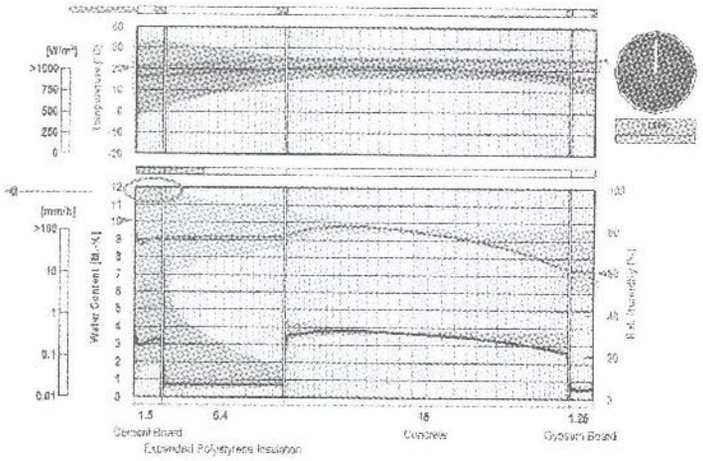
درتصویر ۶ مشاهده می‌شود، منحنی مربوط به تغییرات فشار جزئی بخار آب مربوط به نقاط داخلی جدار مذکور با منحنی‌های تغییرات فشار جزئی بخار آب در حالت اشباع تلاقی پیدا کرده است. بر اساس توضیحات ارائه‌شده در بخش‌های پیشین، این موضوع نشان‌دهنده احتمال وقوع میعان در حدفاصل بین لایه عایق حرارتی و بتن می‌باشد.

در مرحله بعدی، این بررسی توسط نرم‌افزار ووفی صورت گرفته است. شبیه‌سازی این جدار (تصویر ۷) نشان می‌دهد که احتمال وقوع میعان در هیچ‌یک از لایه‌های این جدار وجود ندارد، اما در صورت در نظر گرفتن عامل بارندگی در شبیه‌سازی (تصویر ۸)، ملاحظه می‌گردد که این جدار در لایه تخته‌سیمانی و حدفاصل آن با لایه عایق حرارتی از نظر رطوبتی دچار مشکل خواهد شد.

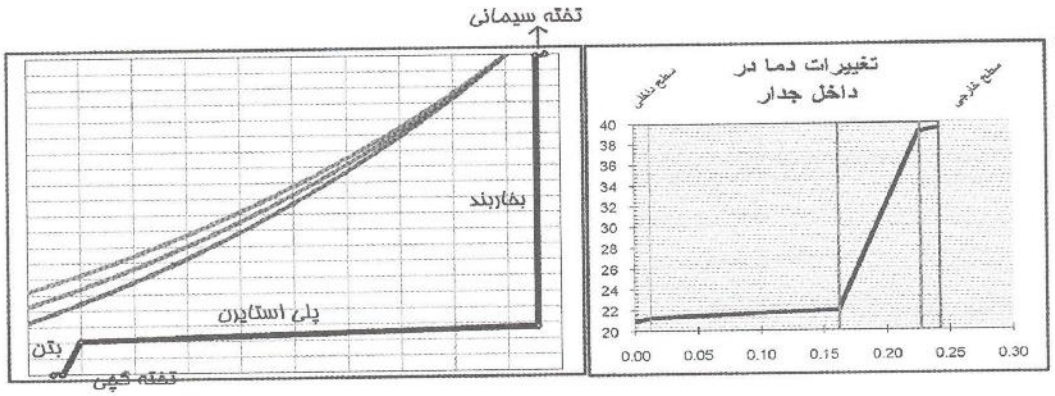
اگر از یک ماده سدکننده بخار (لایه بخاربند) در طرف خارج عایق حرارتی برای کاهش نفوذپذیری رطوبت استفاده گردد، محاسبات روش برتیه نشان می‌دهد که برای شرایط مرزی گرم در نظر گرفته شده، پدیده میعان در هیچ یک از لایه‌های این دیوار به‌وجود نخواهد آمد (تصویر ۹). این حالت در شرایط سرد نیز با روش برتیه محاسبه گردیده است (تصویر ۱۰). همان طور که ملاحظه می‌گردد، استفاده از یک لایه بخاربند در این جدار سبب رخ دادن پدیده میعان در دوره سرد سال می‌شود. بنابراین، نتایج حاصل از این روش نشان می‌دهند دیوار مذکور در اقلیم گرم و مرطوب نیاز به دو لایه بخاربند در دو طرف جدار دارد و در نظر گرفتن تنها یک لایه بخاربند در طرف داخل جدار، باعث ایجاد مشکلات رطوبتی در دوره سرد سال می‌گردد.



تصویر ۷- محدوده تغییرات دما، رطوبت نسبی و میزان رطوبت لایه‌ها در مقطع دیوار نمونه با در نظر گرفتن تمامی شرایط جوی به‌جز عامل بارندگی.
(مأخذ: نگارندگان)

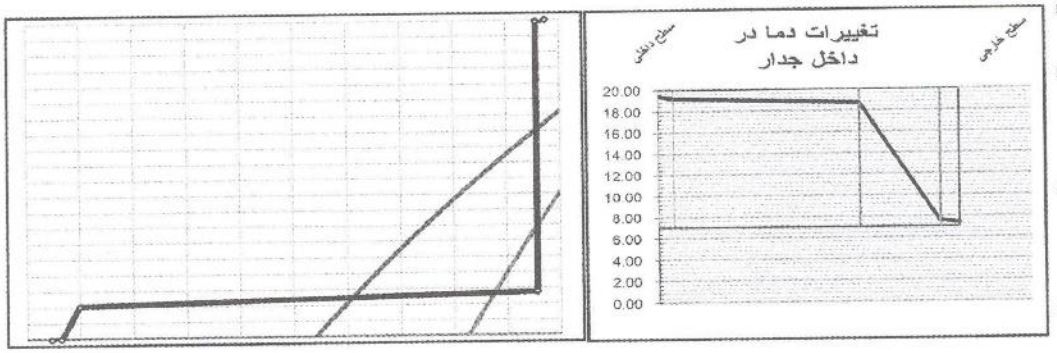


تصویر ۸ - محدوده تغییرات دما، رطوبت نسبی و میزان رطوبت لایه‌ها در مقطع دیوار نمونه با در نظر گرفتن تمامی شرایط جوی.
(مأخذ: نگارندگان)



شرایط خارجی	شرایط داخلی
Te	Ti
40.0	20.0
PHI e	PHI i
90%	35% 50% 64%
Pe	Pi
6623	816 1166 1493

تصویر ۹ - نمودار تعیین خطر میعان دیوار نمونه با یک لایه بخاربند در شرایط گرم.
(مأخذ: نگارندگان)

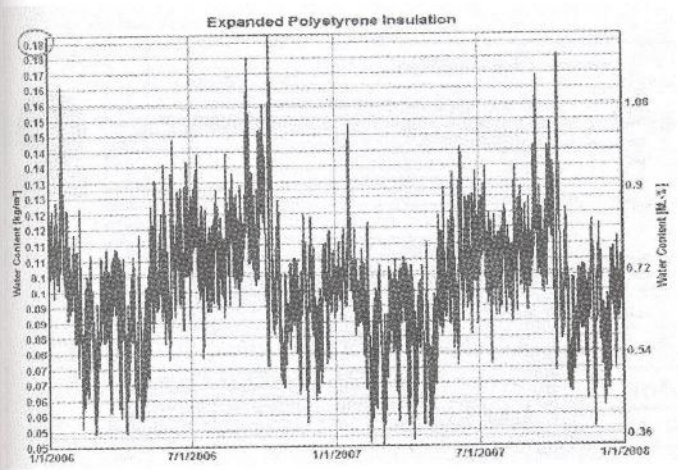


شرایط خارجی	شرایط داخلی
Te	Ti
7.0	20.0
PHI e	PHI i
80%	35% 50% 64%
Pe	Pi
800	816 1166 1493

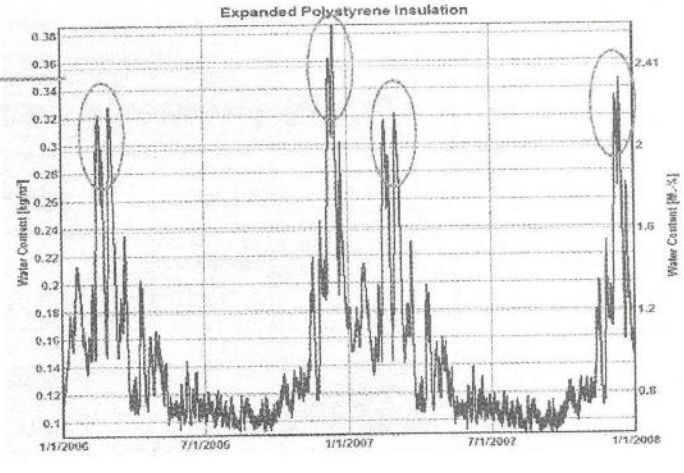
تصویر ۱۰ - نمودار تعیین خطر میعان دیوار نمونه با یک لایه بخاربند در شرایط سرد.
(مأخذ: نگارندگان)

همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید، شبیه‌سازی عملکرد رطوبتی این جدار در نرم‌افزار ووفی حاکی از عدم ایجاد میعان است (تصویر ۷) و به همین دلیل، نیازی به استفاده از لایه بخاربند ندارد. اما، به منظور مقایسه نتایج حاصل از روش برتیه در صورت استفاده از لایه بخاربند در طرف رو به خارج عایق در این دیوار با روش شبیه‌سازی و در شرایط ناپایدار، عملکرد حرارتی- رطوبتی این جدار با یک لایه بخاربند در نرم‌افزار ووفی نیز انجام شده است. این روش نیز مانند روش برتیه نشان‌دهنده ایجاد میعان موضعی در عایق حرارتی در دوره سرد می‌باشد (تصویر ۱۱).

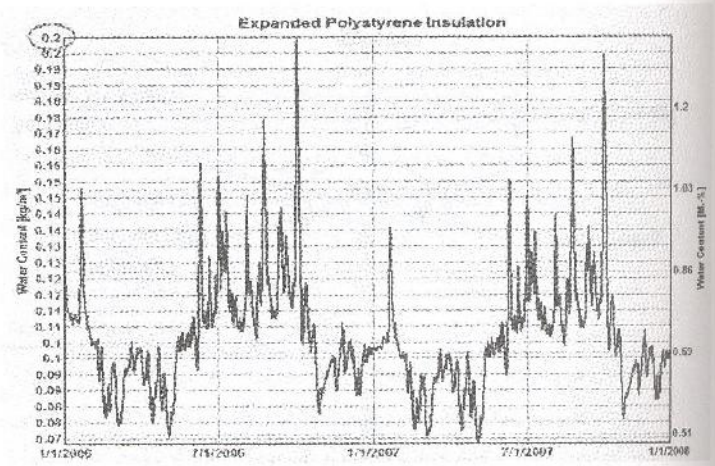
شبیه‌سازی جدار مذکور در نرم‌افزار ووفی با توجه به خصوصیات اقلیم در نظر گرفته‌شده مشکل رطوبتی جدار را در لایه‌های تخته‌سیمانی و عایق حرارتی، به دلیل بارندگی و خیس شدن این دو لایه در صورت بالا بودن تخلخل مصالح نما، پیش‌بینی می‌کند. برای رفع این مشکل می‌توان از یک لایه هوا بین عایق حرارتی و تخته‌سیمانی (تصویر ۱۲) یا کاربرد نماهای گوناگون (تصویر ۱۳) استفاده نمود. همان‌طور که در شکل‌های زیر مشاهده می‌گردد، تعبیه یک لایه هوا بین نما و عایق حرارتی یا استفاده از نمای اندود سیمانی به جای تخته‌سیمانی سبب می‌شود میزان رطوبت در لایه عایق حرارتی از ۰/۴۲ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب به ۰/۱۸ و ۰/۲ کیلوگرم بر مترمکعب کاهش یابد.



تصویر ۱۲ - تغییرات میزان رطوبت در لایه عایق حرارتی دیوار نمونه با یک لایه هوا بین لایه نما و عایق حرارتی.
(مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱۱ - تغییرات میزان رطوبت در لایه عایق حرارتی دیوار نمونه با یک لایه بخاربند در طرف رو به داخل عایق حرارتی.
(مأخذ: نگارندگان)



تصویر ۱۳ - تغییرات میزان رطوبت در لایه عایق حرارتی دیوار نمونه با نمای اندود سیمانی طی دو سال.
(ماخذ: نگارندگان)

بحث و تحلیل علت تفاوت نتایج مدل‌سازی با دو روش پایدار و ناپایدار

اطلاعات به‌دست‌آمده از محاسبات دستی و پایدار کمّی نیستند، همچنین، روش پایداری که برای تخمین میزان و محدوده میعان مطرح شده است، به دلیل تغییرات اساسی مشخصات حرارتی-رطوبتی، در صورت بالا رفتن میزان رطوبت، به هیچ وجه دقیق و اصولی نمی‌باشد، با این حال، می‌توان از این اطلاعات جهت به دست‌آوردن رهنمودهای طراحی استفاده نمود.

مدل‌سازی در حالت پایدار، میزان رطوبت ذخیره‌شده در محل‌های مختلف جدار را در نظر نمی‌گیرد. تنها، مدل‌های ناپایدار که معادلات بقا را در نظر می‌گیرند می‌توانند نشان دهند که در این دیوار، تجمع رطوبت در سطح مشترک بین عایق حرارتی و تخته‌سیمانی (به دلیل بارندگی) شروع می‌شود و میزان رطوبت در صفحه مرزی میعان دیوار که در شرایط پایدار محاسبه شده است، برای ساعات طولانی ناچیز می‌باشد. علت این تفاوت نتایج در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

تفاوت نتایج دو روش برتیه و شبیه‌سازی با نرم‌افزار ووفی را می‌توان به قابلیت‌های بیشتر روش شبیه‌سازی در حالت ناپایدار نسبت داد که شامل موارد زیر است.

۱- در نظر گرفتن تمامی حالات انتقال رطوبت توسط نرم‌افزار. در واقعیت، انتقال رطوبت، علاوه بر انتقال بخارآب شامل انتقال آب به صورت مایع نیز می‌باشد.

۲- لحاظ نمودن تغییر مقاومت حرارتی و رطوبتی لایه‌ها با تغییر شرایط جوی هنگام محاسبات. از محدودیت‌های روش دستی و پایدار این است که مقاومت حرارتی و رطوبتی لایه‌ها در تمامی شرایط جوی ثابت در نظر گرفته می‌شود. در عمل، این کمیت با تغییرات دما، رطوبت نسبی، میزان رطوبت لایه و برخی عوامل دیگر تغییر می‌کند که این موضوع در محاسبات ناپایدار در نظر گرفته می‌شود.

۳- در نظر گرفتن پدیده انتقال رطوبت از درون لایه‌های جدار و تأثیر زمان‌بر بودن این فرایند روی عملکرد حرارتی-رطوبتی مصالح. در روش‌های دستی فرض بر این است که رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد فوراً اتفاق می‌افتد و در نتیجه، زمان‌بر بودن انتقال رطوبت به محلی که میزان رطوبت آن با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد مطابقت دارد در نظر گرفته نمی‌شود، حال آن‌که انتقال رطوبت ممکن است بسته به نوع مصالح به کاررفته مدت‌ها طول بکشد.

۴- در نظر گرفتن ظرفیت ذخیره رطوبت مصالح ساختمانی و خاصیت مویینگی[8] آن. مصالح متداول ساختمانی دارای ظرفیت جذب رطوبت[9] معینی هستند. ظرفیت ذخیره رطوبت مصالح روی تغییرات رطوبت نسبی لایه‌ها در داخل دیوار تأثیرگذار می‌باشد. در محاسبات دستی و پایدار، به دلیل تعیین یک شرایط مرزی برای جدار موردنظر، میعان به صورت لحظه‌ای نمایش داده می‌شود، در صورتی‌که ممکن است میعان در شرایط واقعی رخ ندهد. انتقال حرارت و رطوبت هر دو زمان‌بر هستند، اما مدت زمان انتقال رطوبت بسیار بیشتر است. بنابراین ممکن است زمانی که رطوبت به ناحیه‌ای از دیوار با رطوبت‌نسبی ۱۰۰ درصد می‌رسد، دما افزایش یافته باشد و دیگر پدیده میعان رخ ندهد. در نتیجه، تداوم شرایط مرزی ممکن است به رخ دادن پدیده میعان بیانجامد. در نرم‌افزار ووفی، شرایط محیطی مانند یک موتور محرک عمل می‌کند و چون این موتور محرک در طول زمان متغیر است نتایج حاصل از آن با روش برتیه که فقط یک شرایط مرزی را به صورت پایدار در نظر می‌گیرد متفاوت خواهد شد.

۵- غیرخطی بودن تغییرات دما و رطوبت نسبی در درون لایه‌های جدار. روش ناپایدار، برخلاف روش پایدار، نشان می‌دهد که تغییرات دما و رطوبت نسبی در درون لایه‌های جدار غیرخطی است. در این مدل، دما، رطوبت نسبی و میزان رطوبت برای تمامی خطوط کم رنگی که روی هر یک از لایه‌ها در مقطع جدار نمایش داده شده است به صورت جداگانه روی آن خط محاسبه می‌شود. روی هر یک از این خطوط نشان داده‌شده، دما و رطوبت نسبی تحت‌تأثیر دو بخش مجاور آن قرار می‌گیرد و سپس مقادیر آن مرز تحت‌تأثیر خصوصیات دو بخش مجاور آن تغییر می‌کند. در روش پایدار محاسبات بر اساس انتقال حرارت و رطوبت به صورت خطی از درون مصالح انجام می‌شود، در حالی‌که با توجه به توضیحات مذکور، مدل ووفی عدم خطی بودن دما و رطوبت نسبی را در درون هر یک از مصالح جدار نشان می‌دهد. به همین دلیل در این مدل، هر یک از لایه‌های جدار به لایه‌های بسیار باریک‌تری تقسیم می‌گردند و محاسبات تغییرات دما و رطوبت نسبی در آن‌ها با دقت بالاتری انجام می‌شود.

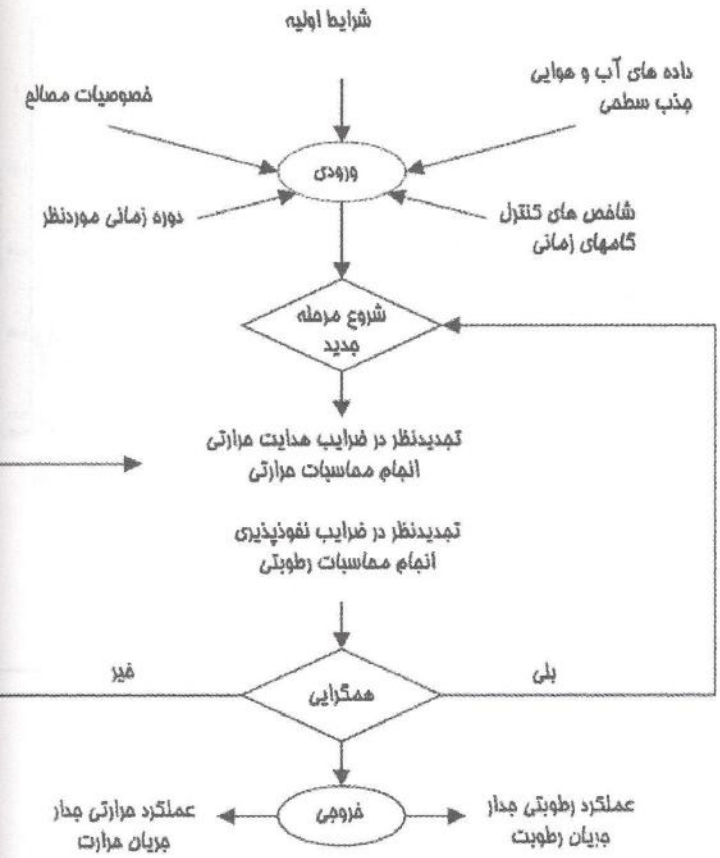
۶- بالاتر بودن دقت محاسبات به دلیل استفاده از روش حجم محدود در محاسبات. در روش ناپایدار از روش حجم محدود

استفاده می‌گردد. در این روش، ابتدا، معادلات دیفرانسیلی بر حسب معادلات تعادل برای حرارت و رطوبت محاسبه می‌شود و سپس معادلات جبری در شرایط اطمینان از توازن حرارت و رطوبت برای هر یک از خطوط تقسیم لایه‌ها نتیجه می‌شود. در تصویر ۱۴ روند آن نشان داده شده است.

۷- در نظر گرفتن شرایط جوی و چرخه‌های خیس و خشک شدن اجزای ساختمانی ناشی از آن. روش برتیه تنها انتقال رطوبت را در شرایط مرزی حاد و پایدار در نظر می‌گیرد و شرایط جوی نظیر تابش آفتاب و بارش باران را لحاظ نمی‌کند. این بدان معناست که این روش تنها یک برآورد کلی از مناسب بودن عملکرد حرارتی- رطوبتی اجزا می‌دهد و به هیچ وجه توانایی مدل‌سازی شرایط حرارتی- رطوبتی واقعی را در این اجزا تحت تأثیر شرایط جوی ندارد.

۸- در نظر گرفتن اکثر خصوصیات مصالح و لحاظ نمودن آن‌ها در محاسبات. در روش دستی پارامترهای کمتری از خصوصیات مصالح منظور می‌گردد، به همین دلیل انتخاب شرایط مرزی مناسب بسیار مهم‌تر از خصوصیات مصالح می‌باشد. در این نرم‌افزار خصوصیاتی نظیر نفوذپذیری، ظرفیت حرارتی، چگالی، ضریب هدایت حرارتی مصالح در حالت مرطوب و ... در نظر گرفته می‌شود و به همین دلیل، انتخاب مصالح در آن نقش مؤثرتری دارد.

۹- تشخیص مدت زمان خیس ماندن لایه‌های جدار ناشی از میعان، بارندگی و سایر عوامل ایجاد رطوبت. خرابی‌های ناشی از بروز میعان و سایر مشکلات رطوبتی در لایه‌های جدار تنها زمانی مشکل ساز می‌شود که مدت زمان تجمع رطوبت در آن‌ها به طول بینجامد و در صورت خشک شدن سریع آن‌ها پس از خیس شدن مشکل خاصی برای آن ایجاد



تصویر ۱۴ - دیاگرام نحوه محاسبات در نرم‌افزار ووفی.
(مأخذ: نگارندگان)

نمی‌کند، مگر این‌که، مصالح مورد استفاده به هیچ وجه دوام مناسبی در برابر رطوبت نداشته باشند. تشخیص این موضوع تنها در روش‌های ناپایدار که تمامی شرایط را در نظر می‌گیرند امکان‌پذیر است. حال آن‌که در روش برتیه تنها وقوع یا عدم وقوع پدیده میعان نشان داده می‌شود.

نتیجه

در این تحقیق، عملکرد حرارتی- رطوبتی یک نمونه جدار در اقلیم گرم و مرطوب در دو حالت پایدار و ناپایدار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که در روش پایدار پیش‌بینی وقوع میعان در لایه‌های جدار با توجه به دلایل ذکرشده در بخش قبلی از دقت کمتری برخوردار است و این روش می‌تواند به‌صورت تقریبی رهنمودی را در خصوص نفوذ بخارآب به داخل لایه‌های جدار نشان دهد. اما در روش ناپایدار به لحاظ در نظر گرفتن کلیه شرایط موجود (شرایط جوی و اقلیمی و خصوصیات مصالح) و تفاوت‌های ذکرشده، عامل نفوذ رطوبت و عملکرد حرارتی- رطوبتی جدار را با دقت بیشتری بررسی می‌نماید و لذا نتایج به‌دست آمده از این روش منجر به ارائه راه‌کارها و تمهیدات مناسب‌تری می‌گردد.

در هر دو روش، نفوذ رطوبت به داخل لایه‌های جدار نمونه در اقلیم گرم و مرطوب ظاهر گردیده است. روش پایدار، نفوذ رطوبت را ناشی از رخ دادن پدیده میعان نشان می‌دهد که برای جلوگیری از آن نیاز به لایه بخاربند و سایر تمهیدات مربوطه می‌باشد. اما، در روش ناپایدار، به دلیل دقت بالاتر و در نظر گرفتن تمامی شرایط، پدیده میعان مشاهده نمی‌شود و نفوذ رطوبت در این جدار را ناشی از بارندگی نشان می‌دهد که به منظور جلوگیری از آن می‌توان از لایه هوا یا نماهای گوناگون نظیر اندود سیمان یا سنگ استفاده نمود.

علاوه بر آن، می‌توان گفت که نتایج حاصل از روش برتیه برای پیش‌بینی وقوع میعان در لایه‌های جدار کمی مبالغه‌آمیز می‌باشد، زیرا در این روش، خاصیت موییینگی و ظرفیت ذخیره

رطوبت مصالح که تأثیر زیادی روی عدم ایجاد میعان عمقی دارند، در نظر گرفته نمی‌شوند.

بررسی عملکرد حرارتی- رطوبتی در مرحله اول محاسبات با روش پایدار به لحاظ سادگی کار مناسب است. چنان‌چه، نتایج حاصل از این روش، از نظر نفوذ رطوبت و رخ دادن پدیده میعان مورد خاصی را نشان ندهد، ارزیابی انجام‌شده کافی می‌باشد. اما، در حالتی‌که نشان دهد جدار از نظر رطوبتی دچار پدیده میعان می‌گردد، لازم است جهت حصول اطمینان از انتقال رطوبت و رخ دادن پدیده میعان، از روش ناپایدار که بر اساس مدل ریاضی و شبیه‌سازی رایانه‌ای بیان می‌گردد استفاده نمود تا تحلیل عملکرد حرارتی- رطوبتی ساختمان مورد ارزیابی دقیق‌تری قرار گیرد.

در نتیجه، برای درک بهتر و دقیق‌تر انتقال رطوبت در جدارهای ساختمانی، باید از روشی قدرتمندتر و دقیق‌تر بهره جست. به همین دلیل، در این تحقیق، به منظور دستیابی به این روش، یک مدل ریاضی بر پایه شبیه‌سازی رایانه‌ای به کار گرفته شده است. در این نرم‌افزار، داده‌های آب و هوایی سالانه ساعت به ساعت محل به عنوان ورودی دریافت می‌شود و عملکرد جدار در طول زمان و نسبت به شرایط متغیر کلیه عناصر اقلیمی شبیه‌سازی می‌گردد. در چنین رویکردی، نگرشی کارآمدتر برای سنجش کارایی و عملکرد حرارتی- رطوبتی ساختمان‌ها ایجاد می‌شود.

بنابراین، پیشنهاد می‌شود، با توجه به نیاز طراح و ارزش ساختمان می‌توان از هر یک از دو روش مذکور استفاده نمود. با به‌کارگیری روش برتیه، که نسبت به روش شبیه‌سازی ساده‌تر است می‌توان به بررسی عملکرد حرارتی-رطوبتی جدارها پرداخت و به صورت تقریبی از آن استفاده نمود. اما، برای ساختمان‌هایی که از ارزش بالاتری برخوردارند، ضروری است که با استفاده از روش شبیه‌سازی به بررسی دقیق عملکرد حرارتی- رطوبتی جدارها پرداخته شود، تا بتوان راه‌کارهای عملی و مناسب‌تری به منظور پیش‌گیری از ایجاد مشکلات رطوبتی در جدارها ارائه نمود. لازم به ذکر است که تحلیل نتایج در این روش مستلزم تخصص و تجربه می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها:

۱ Water vapor flux.
۲ Berthier.
۳ WUFI.
۴ Oak Ridge National Laboratory.
۵ Building Technology Center.
۶ Fraunhofer Institute for Building Physics.
۷ در پایگاه داده های نرم افزار ووفی چگالی پلی استایرن منبسط شده، ۱۴/۸ کیلوگرم بر متر مربع در نظر گرفته شده است. در کشور ایران نیز بیشتر از عایق های حرارتی با این چگالی استفاده می گردد.
۸ Capillary conductivity.
۹ Moisture sorption capacity.

فهرست منابع:

آب‌روش، مهدیه (۱۳۸۸)، بررسی مشکلات میعان و روش‌های پیشگیری آن در طراحی مسکن در اقلیم گرم و مرطوب، پایان‌نامه کارشناسی ارشد معماری و انرژی، دانشگاه تهران، پردیس هنرهای زیبا.

کاری، بهروز و بختیاری، سعید و حریری، محمدتقی و فیاض، ریما و طهماسبی، فرهنگ و ویسه، سهراب و هدایتی، محمدجعفر، (۱۳۸۶)، اصول و روش‌های عایق کاری حرارتی بر اساس مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان، چاپ اول، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

Crawley, DB, Hand JW, Kummert, M and Griffith BT, (2005), *Contrasting the Capabilities of Building Energy Performance Simulation Programs*, Proceeding of the Ninth International IBPSA Conference, Montreal, Canada.

Holm,A and Künzel, H.M, (2000), *Non Isothermal Moisture transfer in Porous Building Materials*, Fraunhofer Institute for Building Physics, Holzkirchen, Germany.

Karagiozis, A., Kunzel, H. and Holm, A., (2001), *WUFI-ORNL/IBP Hygrothermal Model*, Proceedings of Eight Conference on Building Science and Technology, Solutions to Moisture Problems in Building Enclosures, Feb. 22-23, Torento, PP.158-183.

Künzel, H.M., Karagiozis, A.N. and Holm A.,(2001), *WUFI-ORNL/IBP A- Hygrothermal Design Tool for Architects and Engineers*, Chapter ASTM Manual 40 in Moisture Analysis of Buildings.

WUFI (2008), *WUFI Light 4.2 Online-Help*, Microsoft Windows Help, IBP, feature of WUFI Light 4.2 software

WUFI 4.2 Light developed by the Franhofer Institute of Building Physics and adapted for use in North America by the Oak Ridge National Laboratory under contract with the U. S. Department of Energy.

Trechsel H.R., (2001), *Moisture Analysis and Condensation Control in Building Envelopes*, Philadelphia, ASTM Manual.

Trechsel, H.R., (1994), *Moisture Control in Buildings*, Philadelphia: American society for Testing and Materials (ASTM).

Woloszyn, M and Rode, C, (2008), Tools for Performance of Heat, Air and Moisture Conditions of Whole Buildings, *Building Simulation*, pp.5-24.

http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory

http://www.wufi.com