

نمونه مقدار رطوبت بتن داخلی در سازه های در معرض آب و هوای طبیعی

چکیده

رطوبت در بتن داخلی به طور مستقیم عامل اصلی مؤثر در پدیده زوال سازه های بتنی است. در این مطالعه، یک روش برای پیش بینی رطوبت محیط طبیعی و بتن داخلی بر اساس رطوبت نسبی (RH) و تراکم بخار آب (WVD) مفاهیم مورد استفاده داده های هواشناسی پیشنهاد شده است. تغییرات رطوبت در محیط زیست و بتن داخلی اندازه گیری و مدلسازی شده است. پس از اعتبارسنجی تجربی، مدل رطوبت بمنظور بررسی طیف عمل رطوبت در محیط و طیف واکنش رطوبت در بتن داخلی بر اساس داده های هواشناسی ماهانه و سالانه تمديد شد. نتایج نشان می دهد که ویژگی های RH و WVD از یکدیگر در هر دو هم محیط زیست و هم بتن داخلی به عنوان یک نتیجه از ویژگی های ذاتی بتن متفاوت است. در جو، نوسان دوره ای RH با چرخه روزانه، در حقیقت WVD فقط کمی نوسانات را نشان می دهد. در بتن داخلی، نوسان دوره ای WVD، در حقیقت RH نسبتاً پایدار است و به سمت یک ثابت فراتر از یک عمق بحرانی تمایل دارد. بنابراین، پیشنهاد شده است که WVD، توسط RH پشتیبانی شود، به لحاظ کمی تشخیص رطوبت مورد استفاده قرار می گیرد و RH در تشخیص کیفی رطوبت استفاده می شود.

کلمات کلیدی: بتن. مرطوب. محیط طبیعی. طیف. واکنش

1. معرفی

در حال حاضر، طراحی دوام و ارزیابی سازه های بتنی از یک نسخه در یک رویکرد مبتنی بر عملکرد در حال تغییر است. در این تحقیقات و طراحی محیط زیست، تجزیه و تحلیل کمی و مدل سازی دقیق مکانیسم زوال در

سازه‌های بتنی نیاز به مطالعه بیشتر دارد. دقت پیش‌بینی رطوبت بتن برای شرایط مختلف محیطی برای استفاده به عنوان ورودی در طراحی دوام و ارزیابی سازه‌های بتنی ضروری است. این اهمیت ناشی از این واقعیت است که پدیده زوال بتن، مانند کربنات، حمله با کلرید و سولفات، انجماد و یا ذوب، و در برابر خوردگی میلگرد در بتن، عمدتاً توسط انتقال جرم از رطوبت ایجاد می‌شود، و سطح رطوبت به طور قابل توجهی تحت تاثیر روش نقل و انتقالات و واکنش‌های درگیر در زوال قرار می‌گیرد.

تحقیقات گسترده روی اثر رطوبت بر وخامت سازه‌های بتنی انجام شده است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که نرخ زوال ساختاری، مانند کربنات بتن، نفوذ کلرید و خوردگی میلگرد در بتن، بستگی به شدت در محیط زیست میکرو در بتن داخلی دارد؛ در همین حال، پیش‌بینی به طور مستقیم زوال بر روی محیط زیست آب و هوای طبیعی اساسی نادرست بوده است. درجه حرارت و رطوبت در بتن سازه داخلی بطور قابل توجهی متفاوت از جو هستند، اما میکرو محیط بتن داخلی به وضوح وابسته به هر دو هم آب و هوا طبیعی و هم خواص ذاتی بتن می‌باشد. Baroghel-Bouny و همکارانش خواص تعادل و انتقال رطوبت بتن را با استفاده از دفع و جذب آزمایش همدمای بررسی کردند و سپس به توصیف تحول زمانی پروفایل رطوبت پرداختند. شین و همکارانش یک روش برای تعیین ضریب نفوذ سخت شدن بتن با اندازه‌گیری رطوبت نسبی منافذ پروفیل‌های (RH) با استفاده از تجزیه و تحلیل غیر خطی انتشار معکوس پیشنهاد کردند. یوان و همکارانش درجه حرارت آب و هوا و طیف عمل RH و طیف واکنش نسبی در بتن داخلی را بر اساس نتایج تجربی و روش کالبد شکافی شدیداً متفاوت ساختند. ریو و همکارانش اثر شرایط محیطی شبیه‌سازی شده بر روی RH و توزیع نسبی رطوبت داخلی بتن را مورد مطالعه قرار دادند. روش الکتروود و سنسورهای رطوبت برای توضیح اثرات تغییرات چرخه‌ی روزانه در شرایط محیطی (دما و رطوبت نسبی) و بارش در RH داخلی و نسبت توزیع مقدار رطوبت در معرض بتن مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داده‌اند که دمای خارجی / تنها تغییرات RH و توزیع نسبی رطوبت داخلی RH در منطقه سطح بتن را تغییر داد؛ مقدار رطوبت با کاهش بسیار آرام فراتر از سطح یافت شد.

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که به منظور توسعه یک مدل رطوبت کمی بتن داخلی، دقت پیش‌بینی پدیده زوال ضروری است. با این حال، این مطالعات نشان می‌دهند که این یک مشکل پیچیده است. آن به خوبی شناخته شده است که تغییرات RH در محیط خارجی طبیعی می‌تواند بر رطوبت در بتن تاثیر گذارد، اما هر دو هم درجه

حرارت و هم رطوبت نسبی در جو از آنهایی است که در بتن داخلی به دلیل هدایت حرارتی و نفوذ پذیری بتن متفاوت است. علاوه بر این، RH در نوسان محیط طبیعی هم سالانه (با فصل) و هم بیش از دوره‌های کوتاه‌تر (روزانه) است. نوسانات کوتاه مدت که با توجه به عوامل زوال مرتبط با انتقال رطوبت مهمتر هستند. وابستگی زمانی، تصادفی، و تنوع منطقه‌ای RH در محیط طبیعی و پسماند رطوبت در بتن داخلی همه به رفتار پیچیده‌ی رطوبت در بتن، موانع پیش‌بینی‌های دقیق کمک می‌کنند. بنابراین، مدل ساده رطوبت کمی بتن داخلی در سازه‌های در معرض آب و هوای طبیعی یافت نشده است. مطالب موجود به طور عمده متمرکز بر انتقال خواص رطوبت بتن و آزمون‌های واکنش داخلی ساختار بتن در معرض شبیه‌سازی به سادگی محیط زیست طبیعی می‌شوند. این هنوز بسیار دشوار برای به دست آوردن به طور موثر رطوبت کمی در بتن داخلی در معرض آب و هوای طبیعی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی زوال ساختار است.

برای حل این مشکل، این مقاله یک مدل رطوبت کمی بتن داخلی بر اساس مفاهیم RH و تراکم بخار آب (WVD) با استفاده از اطلاعات هواشناسی را نشان می‌دهد. در ابتدا، یک مدل رطوبت کمی بر اساس RH و WVD، به عنوان مثال، مفهوم رطوبت مطلق، با استفاده از اطلاعات روزانه هواشناسی ساخته شده است. دوم اینکه، تغییر رطوبت در محیط خارجی و اینکه در بتن داخلی اندازه‌گیری و مدل‌سازی شده است. پس از اعتبار سنجی تجربی، مدل رطوبت به بررسی طیف عمل رطوبت در محیط خارجی و طیف واکنش رطوبت در بتن داخلی بر اساس اطلاعات هواشناسی ماهانه و سالانه توسعه یافته است. به جز این تعریف شده‌ها و دستورات عملی، خواص اصلی نمونه‌ی مورد مطالعه در نظر گرفته شد بطوریکه یک ثابت و اثرشان بر تغییر رطوبت در بتن در این پژوهش شرکت نداشته بودند.

2. مدل رطوبت کمی آب و هوا و بتن داخلی

به خوبی شناخته شده است که رطوبت را می‌توان با RH و WVD توصیف کرد. میزان رطوبت نسبی به صورت نسبت فشار بخار جزئی به فشار بخار اشباع تعریف شده است و در درجه اول تابعی از درجه حرارت است. میزان RH و WVD از نزدیک مرتبط هستند، اما معانی متفاوتی دارند. در این مطالعه، مدل رطوبت بر اساس RH

معمولی و WVD با استفاده از داده‌های هواشناسی برای توصیف طیف عمل رطوبت در محیط خارجی و طیف واکنش رطوبت در بتن داخلی است.

2.1. مدل رطوبت برای محیط خارجی

فشار بخار آب اشباع که معمولاً از چنین معادلاتیاز قبیل Goff-Gratch، وکسلر-گرینسپن و معادلات کلایوس-کلایرونمحااسبه می‌شود. معادله کلایوس-کلایرون ادغام عملکرد فشار بخار آب با توجه به دما، حجم، و اثر حرارتی می‌باشد و سپس متناسب با معادله به نمایندگی از تعادل فاز، نشان داده شده در معادله (1) به شرح زیر است:

$$\frac{de_s(T)}{dT} = \frac{L_v e_s(T)}{R_v T^2} \quad (1)$$

که در آن T دمای مطلق در K است، $e_s(T)$ فشار بخار اشباع از سطح مایع در T در Pa ، R_v ثابت گاز خاص بخار آب در $(kg K)$ است، و L_v گرمای تبخیر آب مایع در kJ/mol است. هنگامی که مدل ارائه شده در محدوده دمای $273-373K$ اعمال می‌شود، L_v ممکن است دمای مستقل در نظر گرفته شود. معادله (1) به شرح زیر است تبدیل شده است:

$$e_s(T) = e_{s0} \exp \left[\frac{L_v}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

که در آن e_{s0} و T_0 فشار مرجع و دمای مرجع، به ترتیب هستند.

جایگزینی معادله (2) در فرمول WVD در معادله (3)، فرمول WVD توصیف شده با معادله (5) سپس به طور همزمان با ترکیب فرمول RH نشان داده شده در معادله (4) حل شده به شرح زیر است:

$$\rho_v = \frac{e_s(T)}{R_v T} = \frac{\varepsilon e_s(T)}{R_d T} \quad (3)$$

$$\rho'_v = RH \rho_v \quad (4)$$

$$\rho'_v = RH \frac{\varepsilon e_s(T)}{R_d T} \quad (5)$$

که در آن ρ_v اشباع WVD هوا در kg/m^3 است، ρ'_v WVD هوا در kg/m^3 است، RH مربوطه در kg/m^3 است، R_d ثابت گاز خاص هوای خشک در $(kg K)$ است، و ε نسبت جرم مولی بخار آب و هوای خشک، با ارزش توصیه شده 0.622 است.

میزان رطوبت نسبی هوا در محیط خارجی همچنین می‌تواند از طریق معادله (6) تعیین شده باشد، به شرح زیر است:

$$RH = \frac{e}{e_s(T)} \quad (6)$$

جایگزینی معادله (2) در معادله (6) مربوط به RH و دما به شرح زیر است:

$$RH = \frac{e}{e_{s0}} \exp \left[\frac{L_V}{R_V} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (7)$$

که در آن e مربوط به فشار بخار آب در دمای T در Pa است. هنگامی که روز بدون بارندگی و آب و هوایی شدید رخ می‌دهد، WVD در هوا به سمت یک حالت شبه تعادل می‌رود، به این معنی که فشار بخار آب، گرمای تبخیر آب مایع L_V ، و ثابت گاز خاص R_V بخار آب همه ثابت‌ها هستند.

آن را به خوبی شناخته شده است که درجه حرارت می‌تواند با استفاده از منحنی‌های سینوسی یا کسینوسی باشد. مدل‌های عمل دمای محیط در شرایط امن در مطالعه دیگری، با نتایج زیر استخراج شد:

$$T(t) = \begin{cases} T_P + T_b \cos \left(\frac{\pi}{t_a} t - \frac{t_a + t_{\min}}{t_a} \pi \right), & \text{Temperature-rise period : } t \in (t_{\min}, t_{\min} + t_a) \\ T_P + T_b \cos \left(\frac{\pi}{24 - t_a} t - \frac{t_a + t_{\min}}{24 - t_a} \pi \right), & \text{Temperature-fall period : } t \in (t_{\min} + t_a, t_{\min} + 24) \end{cases} \quad (8)$$

که در آن T_P و T_D متوسط دما و درجه حرارت دامنه تنوع محیط زیست در $^{\circ}\text{C}$ به ترتیب هستند؛ t_{\min} نقطه زمان از پایین‌ترین درجه حرارت روزانه در ساعت است؛ $T(t)$ دمای هوا در $^{\circ}\text{C}$ در زمان t است؛ و t_a تفاوت در زمان بین درجه حرارت حداکثر و حداقل در ساعت است.

جایگزینی معادله (8) به جای معادله (7)، مدل RH محیط زیست در زمان t به شرح زیر است:

$$RH(t) = \frac{e}{e_{s0} \exp \left(\frac{L_V}{R_V T_0} \right)} \times \begin{cases} \exp \left[\frac{L_V}{R_V} \frac{1}{T_P + T_c \cos \left(\frac{\pi}{t_a} t - \frac{t_a + t_{\min}}{t_a} \pi \right)} \right], & t \in (t_{\min}, t_{\min} + t_a) \\ \exp \left[\frac{L_V}{R_V} \frac{1}{T_P + T_c \cos \left(\frac{\pi}{24 - t_a} t - \frac{t_a + t_{\min}}{24 - t_a} \pi \right)} \right], & t \in (t_{\min} + t_a, t_{\min} + 24) \end{cases} \quad (9)$$

در اغلب موارد، به دست آوردن بخار آب فشار الکترونیکی به طور مستقیم، محدود کردن استفاده از معادله (9) دشوار است. بنابراین، مدل RH محیط زیست با استفاده از یک تابع تکه‌ای ساده شده است.

همانطور که در معادله (7) نشان داده شده است، اگر درجه حرارت در طیف وسیعی از دمای معمولی است، توابع نمایی می‌توانند با استفاده از یک بسط تیلور مشتق شوند، همانطور که در معادله (10) نشان داده شده است:

$$RH(T) = \frac{e}{e_{s0}} \left(1 + \frac{L_v}{R_v T T_0} (T_0 - T) \right) \quad (10)$$

شبهه به تابع تکه‌ای دما، یک تابع تکه‌ای برای مدل RH مشتق شده به شرح زیر است:

$$RH(t) = \begin{cases} RH_a + RH_0 \cos\left(\frac{\pi}{t_a} t - \frac{t_{min}}{t_a} \pi\right), & \text{Humidity-fall period : } t \in (t_{min} \leq t < t_{min} + t_a) \\ RH_a + RH_0 \cos\left(\frac{\pi}{24-t_a} t - \frac{t_{min}+24}{24-t_a} \pi\right), & \text{Humidity-rise period : } t \in (t_{min} + t_a \leq t < t_{min} + 24) \end{cases} \quad (11)$$

که در آن RH_a و RH_0 به طور متوسط RH و دامنه تنوع RH برای محیط زیست در % هستند، که می‌توان به راحتی از اطلاعات هواشناسی، مانند مقادیر مشخصه RH (به عنوان مثال، حداکثر، حداقل و مقدار متوسط) ارائه شده توسط یک مرکز آب و هوا مشتق گرفته شود.

جایگزینی معادله (11) در رابطه (5)، مدل WVD محیط زیست به شرح زیر است:

$$\rho'_v(t) = \frac{\varepsilon e_s(T)}{R_d T} \times \begin{cases} RH_a + RH_0 \cos\left(\frac{\pi}{t_a} t - \frac{t_{min}}{t_a} \pi\right), & t \in (t_{min} \leq t < t_{min} + t_a) \\ RH_a + RH_0 \cos\left(\frac{\pi}{24-t_a} t - \frac{t_{min}+24}{24-t_a} \pi\right), & t \in (t_{min} + t_a \leq t < t_{min} + 24) \end{cases} \quad (12)$$

2.2. مدل رطوبت برای بتن داخلی

آب در داخل منافذ بتن به عنوان هر دو هم مایع و هم بخار، دارای منافذ ریز و مرکب بطری با RH بالاتر وجود دارد. به طور کلی، آب مایع هنوز هم در منافذ ریز در شرایط پایین RH وجود دارد. بر اساس فرمول کلونین نشان داده شده در معادله (13)، حداکثر شعاع منافذ می‌تواند در شرایط مختلف RH به شرح زیر محاسبه شود:

$$\ln(RH) = \frac{2\gamma M_w}{R_e T \rho_1 r} \quad (13)$$

که در آن R_e ثابت گاز ایده آل در (mol K) است، γ کشش سطحی آب مایع در N/m، ρ_1 چگالی آب مایع در kg/m^3 است و M_w جرم مولی آب در kg/mol است.

همانطور که در معادله (13) نشان داده شده است، شعاع اشباع منافذ با RH در بتن متفاوت است. برای حفظ یک حالت تعادل، آب مایع و بخار آب می‌توانند از طریق تبخیر و تراکم مبادله شوند. اگر چه گرادیان دما، تنها تاثیر کمی در تغییر رطوبت در بتن دارد، در اکثر موارد، آب مایع در حفره توسط محاسبات نظری پیش بینی شده در معادله (13) وجود دارد. در نتیجه، آب مایع در حفره به بخار آب یا به حفظ حالت تعادل کمی متغیر یا ثابت در

کوتاه مدت تبدیل خواهد شد. علاوه بر این، تخلخل کم و منافذ بسته‌ی بتن ساختار با نفوذپذیری بسیار عالی ارائه می‌دهد.

به این دلایل، از RH بتن داخلی یک تابع خطی از زمان فرض می‌شود که به شرح زیر است:

$$RH(t) = Kt + C \quad (14)$$

که در آن K و C نشان دهنده ثابت منحنی برازش هستند.

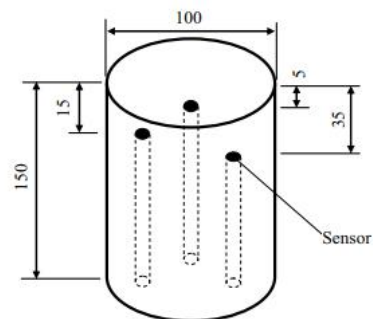
جایگزینی معادله (14) بر روی معادله (5)، مدل موج بتن داخلی به شرح زیر است:

$$\rho'_v = (Kt + C) \frac{\epsilon \epsilon_s(T)}{R_d T} \quad (15)$$

دمای T بتن داخلی در شرایط محافظت به شرح زیر تعیین می‌شود:

$$T(x, t) = \begin{cases} T_p + T_b e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha t}}} \cos\left(\frac{\pi}{t_a} t - \frac{t_a + t_{\min}}{t_a} \pi - x\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha t_a}}\right) & t \in (t_{\min}, t_{\min} + t_a) \\ T_p + T_b e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha(24-t)}}} \cos\left(\frac{\pi}{24-t_a} t - \frac{t_a + t_{\min}}{24-t_a} \pi - x\sqrt{\frac{\pi}{2\alpha(24-t_a)}}\right) & t \in (t_{\min} + t_a, t_{\min} + 24) \end{cases} \quad (16)$$

که در آن $T(x, t)$ دمای هوا در $^{\circ}\text{C}$ در بتن داخلی در عمق x و زمان t ؛ t_a زمان مورد نیاز برای رسیدن به حداکثر دمای حداقل درجه حرارت در ساعت است؛ و α یک ضریب نفوذ حرارتی در m^2/s است.



(a) Schematic illustration



(b) Specimen

Fig. 1. Schematic illustration and specimen of concrete used for the humidity testing.

3. تنوع رطوبت در محیط خارجی و داخلی بتن

3.1. فرایندهای تجربی

در این مطالعه، سیمان 42.5 درجه پرتلند معمولی، بنابر استانداردهای چینی، با $0.48\% \text{Na}_2\text{O}$ و $7.08\% \text{C}_2\text{A}$ مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، کلاس I خاکستر بادی و کلاس S95 خاکستر به عنوان مواد افزودنی شامل شدند. ذرات درشت در سراسر این کار شامل ماسه کوارتز سنگ آهک اعم از 5 میلی متر تا 20 میلی متر در قطر، یک عامل کاهنده آب از سری پلی، شن و ماسه رودخانه‌های محلی با مدول نرمی 2.9 و ضربه آب مورد استفاده قرار گرفت. نسبت اختلاط بتن برای این آزمایش سیمان بود: خاکستر: خاکستر بادی: شن و ماسه: شن: آب: کاهنده آب = 375: 85: 35: 720: 1085: 152: 5 در هر متر مکعب و مقاومت فشاری اندازه گیری 53 مگاپاسکال در 28 روز بود.

مکعب بتن استاندارد (150 میلی متر×150 میلی متر×150 میلی متر) ریخته شد. پس از یک عمل‌آوری استاندارد 28 روزه، نمونه استوانه‌ای، 100 میلی‌متر در قطر×150 میلی متر در ارتفاع، از مکعب بتن استاندارد کشیده شد. سوراخ 10 میلی متر قطر در نمونه استوانه‌ای با عمق از سطح بتن از 5 میلی متر، 15 میلی متر و 35 میلی متر حفر شد. سنسور دما-رطوبت در سوراخ تعبیه شده و با همان درجه از بتن‌بسته شده است. در نهایت، کل نمونه در یک فلاسک Dewar با همان درجه از بتن ساخته شد. تصویر شماتیک از نمونه بتن مورد استفاده برای تست رطوبت در شکل 1 نشان داده شده است.

قبل از اندازه گیری، نمونه‌ها در محیط برای زمان کافی در رسیدن به یک حالت تعادل قرار داده شدند. نمونه پس از آن در روی صفحه نمایش دماسنج 1.5 متر از زمین قرار داده شد، و رطوبت و درجه حرارت در بتن داخلی در زمان واقعی ثبت شد. علاوه بر این، RH و دمای محیط تحت نظر قرار گرفتند.

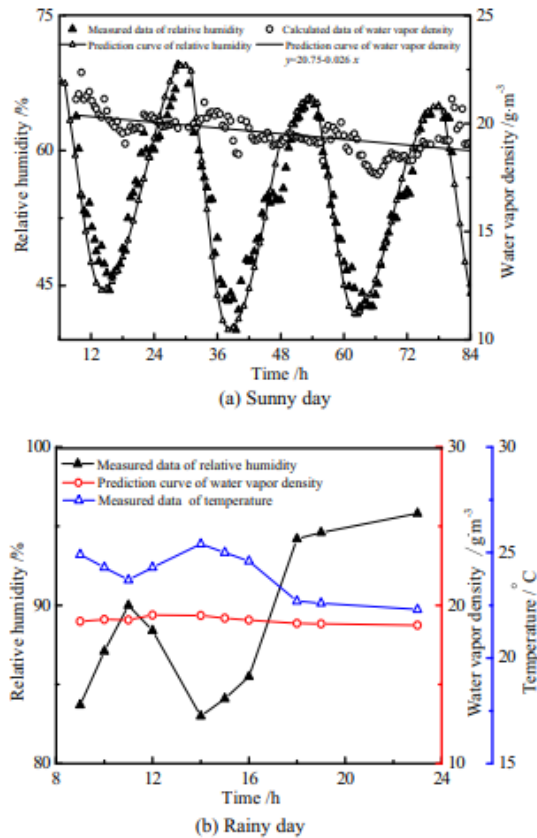


Fig. 2. Variation of RH and WVD in the environment (from August 19 to 20, 2011).

3.2. تنوع رطوبت در محیط خارجی

تغییرات درجه حرارت و RH در محیط خارجی هر نیم ساعت توسط سنسور دما-رطوبت اندازه گیری شد، و ارزش WVD توسط معادله (5) با استفاده از داده‌های اندازه گیری محاسبه شد. شکل 2 تغییرات RH و WVD در محیط خارجی طبیعی را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 2 مشاهده می‌شود، نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که RH در روزهای آفتابی نوسانات دوره‌ای ناشی از چرخه روزانه را نمایش می‌دهد. حداکثر دامنه نوسان RH حدود 35٪ با تنوع 10 درجه سانتی گراد است. بیش از یک روز تمام، در حالی که WVD تنها نوسانات جزئی را نشان می‌دهد (شکل 2a). در روزهای بارانی، RH در محدوده 85-95٪ متفاوت است، نوسان نامنظم در کل روز. با این حال، WVD کمی در ابتدا افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد، زمین مسطح به یک مقدار ثابت (شکل 2b). RH مقدار نسبی است، که شامل اثر جفت بارش و دما، و ظهور تصادفی و عدم قطعیت می‌شود. WVD مطلق، مقدار مستقل از دما است و در نتیجه نظم کامل در روزهای بارانی را ارائه می‌دهد. این یافته نشان می‌دهد که نوسان RH با درجه حرارت و آب و هواست اما WVD با توجه به تغییرات دما است. شکل

2 همچنین نشان می‌دهد که منحنی‌های پیش‌بینی RH به خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده موافق است، که عقلانیت مدل RH ارائه شده در این مطالعه را تایید می‌کند.

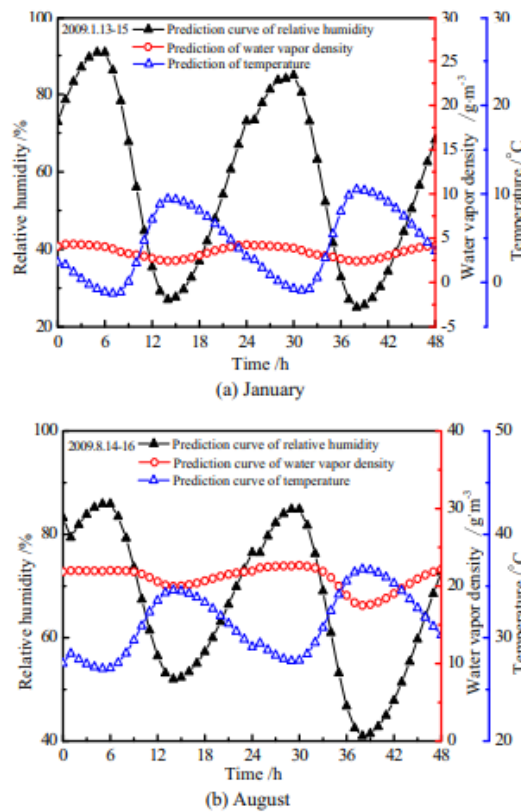


Fig. 3. Variation of RH and WVD in January and August (2009).

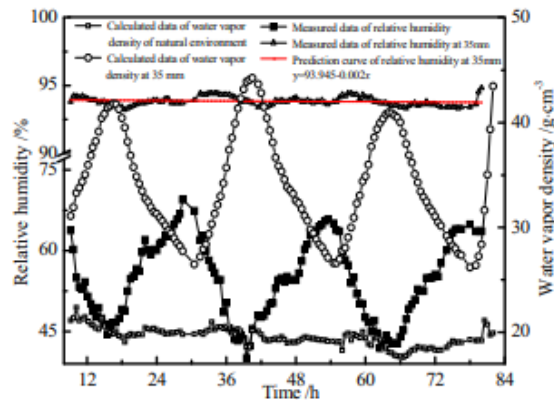


Fig. 4. Variation of the RH and the WVD at a depth of 35 mm in concrete (from August 16 to 19, 2011).

به همین دلیل، ما از داده‌های هواشناسی ارائه شده توسط یک ایستگاه هواشناسی محلی به منظور بررسی تنوع RH و WVD در فصول مختلف استفاده کردیم. شکل 3 تغییرات درجه حرارت، RH و WVD در ماه ژانویه (زمستان) و ماه اوت (تابستان) را نشان می‌دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، RH حساسیت بیشتری نسبت به نوسانات در چرخه روزانه‌ای است که WVD است. محدوده نوسان RH در ماه ژانویه و اوت حدود 30-90٪ و

90-40٪ بود، نشان می‌دهد که RH با تغییر در فصل کمی تغییر می‌کند. بر خلاف RH، WVD بطور قابل ملاحظه بین زمستان (حدود $3.5 \pm 1 \text{ g/m}^3$) و تابستان (حدود $20 \pm 2 \text{ g/m}^3$) متفاوت است. تغییر ناچیز WVD در جو را ممکن است به تعادل بین تبخیر، میعان و انتقال در میان زمین، جو و لایه ابر بالایی نسبت داد.

نتایج تجربی در شکل 2 و 3 نشان داده شده است که RH مقدار نسبی در ارتباط با درجه حرارت را نشان می‌دهد؛ آنست که، آن حساس به دماست اما نه متغیر در فصل. بنابراین، WVD بر اساس RH ممکن است راحت‌تر و دقیق‌تر برای تشخیص رطوبت در محاسبات مدل کمی و شبیه‌سازی آزمایشگاهی برای تحقیقات ساختار دوام بتن باشد.

3.3. تنوع رطوبت در بتن داخلی

شکل 4 تغییرات RH و WVD در محیط خارجی طبیعی و در عمق 35 میلی‌متر در نمونه آزمون را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 5 نشان داده شده است، تغییرات رطوبت در بتن داخلی متفاوت از محیط طبیعی است. در شکل 4 و 5، تغییرات درجه حرارت و رطوبت نسبی توسط سنسور دما-رطوبت اندازه‌گیری شد و WVD محاسبه شده با معادله (5) در داده‌های اندازه‌گیری شده مبنای قرار داده شده بود. WVD نوسان دوره‌ای در محدوده $26-44 \text{ g/m}^3$ ، در حالی است که RH در بتن داخلی نسبتاً پایدار است و به سمت یک مقدار ثابت (حدود 94٪) تمایل دارد. از آنجا که از نفوذپذیری کم بتن، انتقال رطوبت بسیار به آرامی بین محیط خارجی و داخلی بتن می‌باشد. در مقایسه با صحبت، رطوبت در داخل بتن داخلی با تغییر دما و رطوبت شیب بین محیط خارجی و داخلی بتن متفاوت است. زیرا آب مایع در فضاهای مرکب بطری بتن داخلی و تبادل رطوبت کم، یک حالت خود تعادل پویا بین آب مایع و بخار آب ممکن است که در بتن داخلی تحقق می‌یابد. بنابراین، رطوبت در فضاهای مرکب بطری داخل بتن داخلی ممکن است آزاد به عنوان آب تغلیظ شده از طریق تبخیر و میعان در طول زمان توزیع شود. بنابراین، WVD در منافذ بتن تابعی از درجه حرارت است و ممکن است با گذشت زمان در نوسان باشد. اطلاعات موجود در شکل 4 نشان می‌دهد که منحنی‌های نظری RH خوب با داده

های تجربی هستند، که نشان می‌دهد مدل RH استفاده شده در این مطالعه پیش بینی خوبی RH در داخل بتن داخلی می‌باشد.

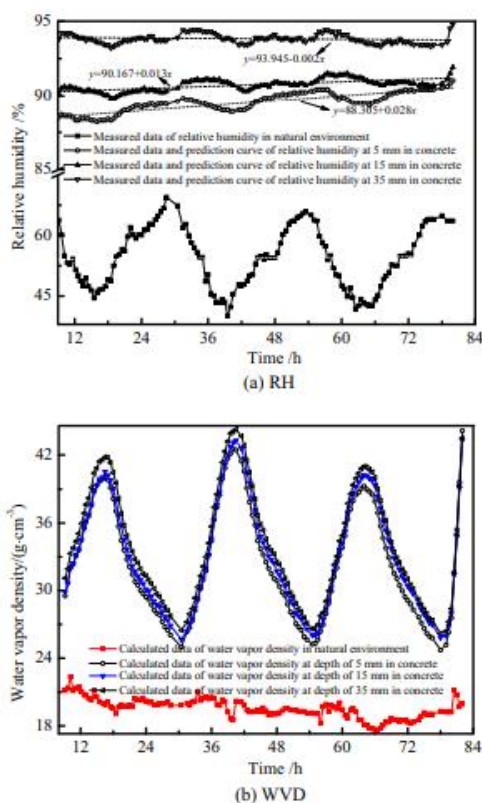


Fig. 5. Variation of the RH and the WVD at different depths in concrete (2011.08.16-19).

میزان رطوبت نسبی در محیط خارجی و در اعماق مختلف (5 میلی متر، 15 میلی متر و 35 میلی متر) در بتن اندازه گیری شد و WVD مربوطه با استفاده از معادله (5) محاسبه شده و داده RH اندازه گیری شد. شکل 5 تغییر RH و امواج در اعماق مختلف در بتن را نشان می‌دهد. همانطور که در بالا ذکر شد، RH در محیط خارجی نوسان می‌کند، در حالی که RH در داخل بتن داخلی (شکل 5a) نسبتاً ثابت است. محدوده نوسان RH در محیط خارجی حدود 40-70٪ است؛ با این حال، مقادیر RH اندازه گیری شده، با تغییرات، در حدود $0.5 \pm 1\%$ ، $0.25 \pm 93\%$ و 90.5% در عمق 5 میلی متر، 15 میلی متر و 35 میلی متر در بتن می‌باشد. تغییر دما باعث تغییر در اشباع فشار بخار آب در هوا می‌شود، اما انتقال فاز مایع و گاز در منافذ ریز بتن می‌تواند از طریق تبخیر و تراکم برای رسیدن به تعادل پویا محلی رخ دهد. این اطلاعات همچنین نشان می‌دهد که عمق افزایش یابد، RH بالاتر و نوسان کمتر است.

اطلاعات موجود در شکل 5b نشان می‌دهد که منحنی WVD فضای داخلی بتن در اعماق مختلف نیز دچار نوسان دوره ای می‌شود، اما آنها به طور قابل توجهی از منحنی RH برای محیط خارجی متفاوت است. در مقایسه با منحنی RH در محیط خارجی، منحنی‌های WVD نرم و صاف و نمایانگر پسماند هستند. اطلاعات نشان می‌دهد که وقتی عمق نمونه سطح افزایش می‌یابد، WVD نوسان کمتر و نمایانگره پسماند بیشتر است که کمتر به شدت محیط خارجی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

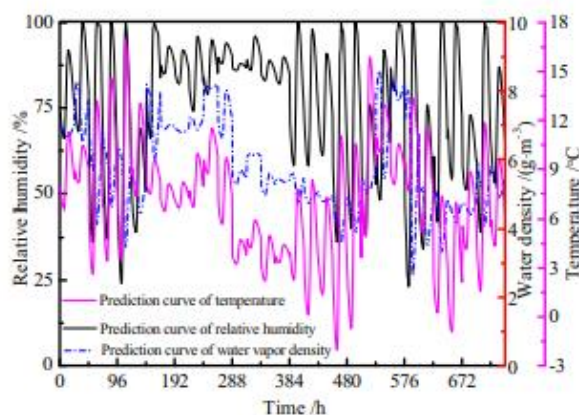


Fig. 6. Curves of temperature and moisture in December 2011.

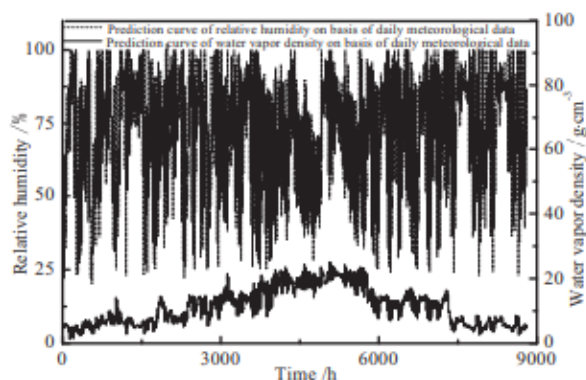


Fig. 7. Action spectrums of moisture in the outside environment (2011).

4. طیف‌های اقدام و طیف‌های پاسخ رطوبت

در بخش 3، تغییرات رطوبت در محیط خارجی و داخلی بتن در طول چرخه روزانه مورد بحث قرار گرفت. تغییرات رطوبت نوسانات و اتفاقات را نمایش می‌دهد. بنابراین، تغییرات رطوبت باید ساده به شکل اقدام رطوبت و طیف پاسخ برای دوره‌های ماهانه و سالانه باشد. طیف عمل رطوبت در محیط خارجی و طیف پاسخ رطوبت در

بتن داخلی بر اساس داده‌های هواشناسی ماهانه و سالانه توسعه یافته است. جزئیات تایید طیف رطوبت می‌تواند در پایان نامه نویسنده یافت شود.

Table 1
Meteorological data for Changsha in December 2011.

Date	Rainfall/mm	Hours of sunshine/h	Average temperature/°C	Date	Rainfall/mm	Hours of sunshine/h	Average temperature/°C
1	1	0	8.9	16	0.2	0	3.9
2	4	0	9.3	17	0.7	5.5	5.0
3	0	7.2	7.9	18	0	3.2	4.2
4	0	7.1	9.0	19	0	3.9	4.3
5	0	9.5	10.2	20	0	7.6	4.5
6	Light rain	0	10.2	21	0	8.4	4.9
7	14.4	0	8.5	22	0	4.7	10.4
8	24.0	0	7.3	23	0.2	0	11.5
9	Light rain	0	7.4	24	3.4	0	9.3
10	7.9	0	8.3	25	Light rain	4.6	10.5
11	0.5	0	10.1	26	Light rain	0	8.3
12	2.7	0	7.7	27	6.4	7.2	3.8
13	21	0	4.0	28	0	4.3	3.0
14	0.5	0	5.1	29	Light rain	0	6.5
15	11.3	0	3.6	30	0	8.0	6.7

4.1. طیف اقدام رطوبت در محیط خارجی

طیف عمل رطوبت در محیط خارجی با استفاده از یک ماه از اطلاعات هواشناسی ارائه شده توسط یک ایستگاه هواشناسی محلی توسعه یافته است. جدول 1 اطلاعات هواشناسی برای چانگشا در دسامبر 2011 را نشان می‌دهد. شکل 6 منحنی‌ها را برای درجه حرارت، رطوبت نسبی، و WVD در محیط خارجی برای همان ماه را نشان می‌دهد. اطلاعات موجود در شکل 6 و جدول 1 نوسان به طور منظم WVD، افزایش در طول هوای بارانی و کاهش در هوای آفتابی را نشان می‌دهند. میزان رطوبت نسبی نوسانات بزرگ نامنظم، جایی که شناسایی تاثیر آب و هوا دشوار است را نشان می‌دهد. از این رو، WVD بهتر می‌تواند عمل رطوبت در محیط خارجی را مشخص کند.

طیف عمل رطوبت در محیط خارجی بر اساس داده‌های دما و رطوبت سالانه در سال 2011 استخراج شدند، همانطور که در شکل 7 نشان داده شده است. منحنی‌های درجه حرارت و رطوبت نسبی از داده‌های هواشناسی روزانه به دست آمده بودند، و منحنی WVD بر اساس دما و رطوبت نسبی توسط معادله (5) محاسبه شد. از شکل 7، مشاهده می‌شود که RH و WVD روند نوسانات مختلف را نشان می‌دهد: WVD با فصل متفاوت است، در زمستان کمترین بودن، در تابستان بیشترین، و در فصل بهار و در پاییز متوسط. با این حال، تمایل RH به نوسان دوره‌ای و تغییرات فصلی برای توصیف دشوار است. تفاوت بین این طیف RH و طیف

WVD ممکن است از اشکال مختلف وجود رطوبت در محیط خارجی باشد. در نتیجه، این طیف WVD ممکن است بیشتر برای مقایسه کمی مفید باشد، در حالی که RH ممکن است بیشتر برای مقایسه کیفی مفید باشد. اطلاعات موجود در شکل 7 نشان می‌دهد که طیف عمل رطوبت بر اساس داده‌های هواشناسی را می‌توان مورد استفاده برای توصیف گرایش سالانه رطوبت در محیط قرار داد، که ممکن است یک روش جدید برای منحنی ساده رطوبت در مدل‌ها و شبیه‌سازی برای تحقیقات دوام بتن فراهم کند.

4.2. طیف پاسخ رطوبت در بتن داخلی

شکل 8 طیف‌های پاسخ دما، رطوبت نسبی، و WVD در عمق 35 میلی‌متر بتن، بر اساس داده‌های هواشناسی از چانگشا در اوت 2011 را نشان می‌دهد. منحنی WVD بر اساس معادله (5) محاسبه شد. همانطور که در بالا ذکر شد، RH در عمق 35 میلی‌متر در بتن نوسانات بسیار کوچک را نشان می‌دهد، همانطور که در شکل 5(a) مشاهده می‌شود. بنابراین، RH در بتن ثابت در نظر گرفته شد، به عنوان مثال، 94٪، در هنگام محاسبه WVD. پاسخ طیف برای WVD در نوسان دوره‌ای بتن با زمان و درجه حرارت و در نتیجه ممکن است برای توصیف و رطوبت کمی در بتن داخلی مفید باشد.

با استفاده از روش مشابه بالا، طیف پاسخ رطوبت فصلی و سالانه به دست آمده است، که مبنای نظری برای تعیین رطوبت برای مدل و شبیه‌سازی برای پژوهش ساختار دوام بتن را فراهم می‌کند.

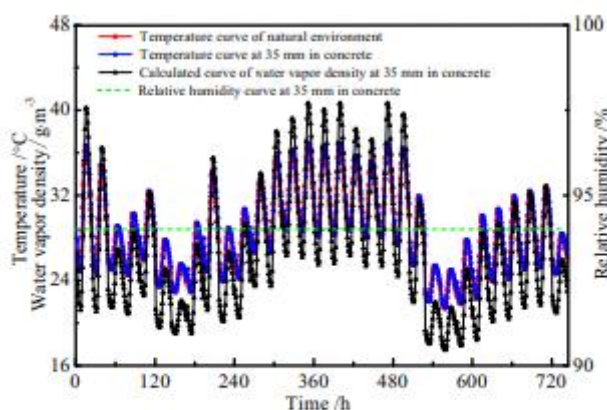


Fig. 8. Response spectrums of moisture in concrete (August, 2011).

References

- [1] D.W. Ryu, J.W. Ko, T. Noguchi, Effects of simulated environmental conditions on the internal relative humidity and relative moisture content distribution of exposed concrete, *J. Cem. Concr. Compos.* 33 (1) (2011) 142–153.
- [2] H.W. Song, S.J. Kwon, K.J. Byun, C.K. Park, Predicting carbonation in early-aged cracked concrete, *J. Cem. Concr. Res.* 36 (5) (2006) 979–989.
- [3] B.H. Oh, S.Y. Jang, Effects of material and environmental parameters on chloride penetration profiles in concrete structures, *J. Cem. Concr. Res.* 37 (1) (2007) 47–53.
- [4] P. Dangla, W. Dridi, Rebar corrosion in carbonated concrete exposed to variable humidity conditions, *J. Corros. Sci.* 51 (8) (2009) 1747–1756.
- [5] J.N. Enevoldsen, C.M. Hansson, B.B. Hope, The influence of internal relative humidity on the rate of corrosion of steel embedded in concrete and mortar, *J. Cem. Concr. Res.* 24 (7) (1994) 1373–1382.
- [6] P. Castro, E.I. Moreno, J. Genesca, Influence of marine micro-climates on carbonation of reinforced concrete buildings, *J. Cem. Concr. Res.* 30 (10) (2000) 1565–1571.
- [7] C. Andrade, J. Sarria, C. Alonso, Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering, *J. Cem. Concr. Res.* 29 (8) (1999) 1249–1259.
- [8] D. Coronelli, P. Gambarova, Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modelling guidelines, *ASCE J. Struct. Eng.* 130 (8) (2004) 1214–1224.
- [9] A.B. Fraj, S. Bonnet, A. Khelidj, New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag, *J. Constr. Build. Mater.* 35 (10) (2012) 761–771.
- [10] V. Baroghel-Bouny, M. Mainguy, T. Lassabatere, O. Coussy, Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials, *J. Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1225–1238.
- [11] D. Xin, D.G. Zollinger, G.D. Allent, An approach to determine diffusivity in hardening concrete based on measured humidity profiles, *J. Adv. Cem. Based Mater.* 2 (4) (1995) 138–144.
- [12] J.H. Jiang, Y.S. Yuan, Quantitative models of climate load and its effect in concrete structure, *J. Constr. Build. Mater.* 29 (4) (2012) 102–107.
- [13] Y.S. Yuan, J.H. Jiang, Climate load model-climate action spectrum for predicting durability of concrete structure, *J. Constr. Build. Mater.* 29 (4) (2012) 291–298.
- [14] T. Ishida, K. Maekawa, T. Kishi, Enhanced modeling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history, *J. Cem. Concr. Res.* 37 (4) (2007) 565–578.
- [15] L. Vandewalle, Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions, *J. Cem. Concr. Compos.* 22 (3) (2000) 201–208.
- [16] M. Wu, B. Johannesson, M. Geiker, A study of the water vapor sorption isotherms of hardened cement pastes: possible pore structure changes at low relative humidity and the impact of temperature on isotherms, *J. Cem. Concr. Res.* 56 (2) (2014) 97–105.
- [17] P. Liu, Z.W. Yu, L. Song, Spectra of temperature action and response of concrete in natural environment, *J. Build. Mater.* 17 (3) (2014) 532–537 (in Chinese).
- [18] P. Liu, Research on similarity of the chloride ingress in concrete under natural and artificial simulation environment (Ph. D. thesis), School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, 2013 (in Chinese).