

بررسی اثر دما روی عمق ناحیه همرفت رطوبت در بتن مطالعه عددی - آزمایشگاهی

مهدی نعمتی چاری^{۱*} و محمد شکرچی زاده^۲

^۱ استادیار بخش فناوری بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

^۲ استاد دانشکده مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۱۸، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۶، نشر آنلاین: ۱۳۹۷/۱۱/۶)

چکیده

پروفیل رطوبت در منافذ بتنی که در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی مانند شرایط جزر و مد سواحل دریاهای آزاد قرار دارد، به صورت دائم در حال تغییر است. بخشی از ضخامت سطحی بتن که مقدار رطوبت موجود در منافذ آن در هر چرخه تر و خشک شدن، تغییر می‌نماید، ناحیه همرفتی نامیده می‌شود. تغییرات رطوبت در ناحیه همرفتی، مسئول انتقال بخش عمده‌ای از یون‌های مهاجم مانند کلراید در شرایط جزر و مدی و در نتیجه خوردگی میلگردهای مدفون در بتن می‌باشد. در این مقاله، چهار طرح مخلوط بتن عادی با نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm) ۰/۴۰، ۰/۴۵، ۰/۵۰ و ۰/۵۵، همچنین دو طرح مخلوط شامل دوده سیلیس و زئولیت طبیعی با ۰/۴۵ w/cm ساخته شد و ضریب انتقال رطوبت آن در دماهای ۲۳°C، ۴۳°C و ۶۳°C با استفاده از روش ترکیبی آزمایشگاهی - عددی تعیین شد. سپس، با استفاده از ضرایب انتقال رطوبت به دست آمده و مدل عددی اجزاء محدود در نرم افزار ANSYS 5.4، توزیع رطوبت در بتن پس از قرارگیری در معرض چرخه‌های جزر و مد پیش‌بینی شده و عمق ناحیه همرفتی و حجم رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد برای هر مخلوط بتن تعیین گردید. دستاوردهای این تحقیق بیانگر اثرات مثبت کاهش w/cm و جایگزینی بخشی از سیمان با دوده سیلیس و زئولیت طبیعی در کاهش عمق ناحیه همرفتی و حجم رطوبت ورودی به بتن بود. ضمناً نتایج نشان داد که با افزایش دما از ۲۳°C به ۶۳°C، عمق ناحیه همرفتی بتن عادی و بتن حاوی مواد پوزولانی به ترتیب به میزان ۹۱ و ۱۲۴ درصد زیاد می‌شود. همچنین این افزایش دما، باعث افزایش حجم رطوبت ورودی در بتن در هر چرخه جزر و مد به ترتیب به میزان ۱۷۵ و ۲۰۲ درصد گردید.

کلیدواژه‌ها: دما، عمق ناحیه همرفتی، پروفیل رطوبت، بتن اشباع نشده، دوده سیلیس، زئولیت، روش اجزاء محدود، مدل سازی عددی.

۱- مقدمه

در سازه‌های واقع در سواحل دریاها که در معرض جزر و مد قرار دارند، لایه‌های سطحی مقاطع بتنی در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن قرار می‌گیرند. پروفیل رطوبت در منافذ بتنی که در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن متوالی قرار دارد، به صورت دائم در حال تغییر است. بخشی از ضخامت سطحی بتن که مقدار رطوبت موجود در منافذ آن در هر چرخه تر و خشک شدن، تغییر می‌نماید، ناحیه همرفتی نامیده می‌شود. در پیش‌بینی پروفیل یون کلراید در بتن، به عنوان یک روش جایگزین، انتقال یون کلراید در بتن می‌تواند تنها در ناحیه انتشار و با دانستن عمق ناحیه همرفتی و غلظت کلراید در انتهای این ناحیه، همچنین با استفاده از قانون دوم فیک^۱ تخمین زده شود (Andrade و همکاران، ۱۳۹۹۷؛ Nilsson و همکاران، ۲۰۰۰؛ Andrade و همکاران، ۲۰۰۰).

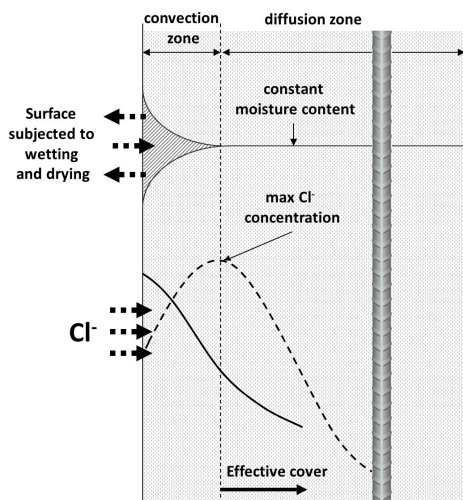
عمق ناحیه همرفتی به مشخصات بتن و شرایط رویارویی بستگی دارد و معمولاً برای بتن عادی از ۱۰ mm تا ۲۰ mm تغییر

در ده‌های اخیر، طراحی سازه‌های بتن مسلح به‌ویژه سازه‌های واقع در سواحل دریاها بر اساس دوام، از اهمیت قابل‌ملاحظه‌ای برخوردار شده است. مشخص گردیده که دوام بتن، اصولاً به نحوه انتقال رطوبت و متعاقباً ورود یون‌های مهاجم مانند کلراید ناشی از تغییرات رطوبتی در بتن بستگی دارد. ورود یون کلراید و تغییرات رطوبت در بتن، باعث خوردگی میلگردهای مدفون در بتن و کاهش دوام سازه‌های بتنی می‌گردد (Sabir و همکاران، ۱۹۹۸؛ Hubert و همکاران، ۲۰۰۳؛ Prabakar و همکاران، ۲۰۱۰؛ Yoo و همکاران، ۲۰۱۱؛ شکرچی زاده و همکاران، ۱۳۹۵؛ طریقت و افصلی، ۱۳۹۶).

به‌منظور پیش‌بینی عمر مفید و طراحی سازه‌های دریایی بر اساس دوام، تعیین توزیع رطوبت در بتن، الزامی است (Yang و همکاران، ۲۰۰۶؛ Samson و همکاران، ۲۰۰۸؛ Chunqiu و همکاران، ۲۰۰۸؛ Shekarchi و همکاران، ۲۰۱۰).

1. Fick

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۲-۱۷۵۹۹۷۴
آدرس ایمیل: m.nemati@bhrc.ac.ir (م. نعمتی چاری)، shekarch@ut.ac.ir (م. شکرچی زاده).



شکل ۱- تغییرات شمانیک رطوبت و یون کلراید در پوشش بتن مسلح در معرض تر و خشک شدن (Tuutti, ۱۹۸۲؛ Nemati Chari و همکاران، ۲۰۱۸)

سپس، با استفاده از ضرایب انتقال رطوبت تعیین شده و مدل عددی اجزاء محدود، توزیع رطوبت در بتن در معرض چرخه‌های جزر و مد، پیش‌بینی شده و عمق ناحیه همرفتی در آن‌ها تعیین گردید. همچنین مقدار رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد در شرایط مختلف محاسبه شد. در نهایت اثر دما روی عمق ناحیه همرفتی و مقدار رطوبت وارد شده در مخلوط‌های مختلف بتن در شرایط دمایی متفاوت، بررسی شد.

۲- انتقال رطوبت

۲-۱- تئوری و فرمولاسیون

در طی سال‌های گذشته، تئوری‌هایی برای انتقال رطوبت در حالت مایع یا حالت بخار در میان منافذ متخلخل بتن ارائه شده است. این تئوری‌ها بر اساس قوانین بقای جرم، ممنوم و انرژی بنا نهاده شده و با استفاده از قانون داریسی^۲ و قانون دوم انتشار فیک بیان می‌شوند (Bazant, ۱۹۸۸؛ Nguyen و همکاران، ۲۰۰۸؛ Baroghel-Bouny و همکاران، ۲۰۱۳). بسته به مکانیسم قالب، انتقال رطوبت می‌تواند به دو صورت رطوبت نسبی و آب قابل تبخیر در منافذ بیان شود (Bazant و Najjar, ۱۹۷۲). جریان مایع یا بخار معمولاً در یک جهت صورت می‌پذیرد که معمولاً به‌ندرت می‌توان آن‌ها را به صورت مجزای از هم در مطالعات در نظر گرفت. البته چنانچه نیاز باشد توزیع رطوبت برای مدل‌سازی انتقال یونی در شرایط تر و خشک شدن بررسی شود، لازم است به صورت انتقال مایع در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد (Nemati Chari و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸).

فرم انتشار برای معادله دیفرانسیل حاکم بر پدیده انتقال رطوبت در حالت معادل مایع در شرایط هم‌دما، می‌تواند به

می‌نماید (Andrade و همکاران، ۱۹۹۶). در یک دوره مد، یون کلراید به دلیل فرایند جذب مویینه درون لایه‌های سطحی بتن غیر اشباع (عمق همرفتی) وارد می‌شود؛ اما یون کلراید همراه رطوبت وارد شده در دوره جزر بعدی، درون منافذ باقی می‌ماند. این امر باعث نوسان غلظت کلراید در ناحیه همرفتی و رسیدن آن به مقدار حداکثر در انتهای ناحیه همرفتی می‌شود (شکل ۱) (Tuutti, ۱۹۸۲؛ Martin-Perez, ۱۹۹۹؛ Castro و همکاران، ۲۰۰۱؛ Dousti و همکاران، ۲۰۱۱).

از این روست که به‌دلیل ورود بیشتر یون کلراید در اثر همرفت رطوبت در ناحیه همرفتی سطح بتن، خوردگی میلگرد و در نتیجه تخریب سازه‌های بتنی در محیط‌های دریایی، شدیدتر است (Broomfield, ۱۹۹۷؛ Olajumoke و همکاران، ۲۰۰۹؛ Akindahunsi و همکاران، ۲۰۱۰). از طرفی در سواحل دریاهایی مانند خلیج فارس و دریای عمان که دارای شرایط سخت آب و هوایی مانند دماهای زیاد هستند، متوسط دمای هوا از 10°C تا 40°C تغییر می‌نماید. دمای سطح مقاطع بتنی در معرض تابش نور خورشید حتی تا 60°C نیز افزایش می‌یابد. بنابراین در این محیط‌های دریایی، سطح آسیب‌دیدگی به‌دلیل شدت بیشتر دما و نوسانات رطوبت در منافذ بتن و در نتیجه ورود یون‌های کلراید بیشتر، افزایش می‌یابد (Temperley, ۱۹۶۵؛ Haque و همکاران، ۲۰۰۷). یکی از دلایل اصلی افزایش در میزان یون کلراید ورودی ناشی از افزایش دما، تغییرات عمق ناحیه همرفتی در بتن است. به‌منظور تعیین عمق ناحیه همرفتی، لازم است توزیع رطوبت در بتن در چرخه‌های متوالی تر و خشک‌شدن تخمین زده شود. ضریب انتقال رطوبت در بتن، یکی از پارامترهای اصلی مدل‌سازی انتقال رطوبت و پیش‌بینی پروفیل رطوبت در بتن می‌باشد. چنانچه ضریب انتقال رطوبت در دماهای مختلف در دست باشد، می‌توان تغییرات عمق ناحیه همرفتی ناشی از نوسانات دما را بررسی نمود. در سال‌های اخیر، مطالعات محدودی در خصوص بررسی اثر دما روی ضریب انتقال رطوبت انجام شده است. هرچند بر اساس تحقیقات انجام شده، توافق شفافی در مورد اثر دما روی ضریب انتقال رطوبت بتن وجود ندارد (Bazant و Najjar, ۱۹۷۲؛ Mukhopadhyaya و همکاران، ۲۰۰۲؛ Conciatori و همکاران، ۲۰۱۱). در این مقاله، شش طرح اختلاط شامل چهار طرح اختلاط بتن عادی با نسبت آب به مواد سیمانی $0/40$ ، $0/45$ ، $0/50$ و $0/55$ ، همچنین دو طرح اختلاط شامل دوده سیلیس و زئولیت طبیعی با نسبت آب به مواد سیمانی $0/45$ ساخته شد. ضریب انتقال رطوبت آزمون‌های تهیه شده از مخلوط‌های بتنی با استفاده توأم از روش آزمایشگاهی وزن‌سنجی و مدل عددی اجزاء محدود در سه دمای 23°C و 43°C تعیین شد.

۲-۲- مدل سازی انتقال رطوبت

در این مقاله، روش باقی مانده وزنی (گالرکین)^۳ با استفاده از روش عددی اجزاء محدود برای حل رابطه (۳) مورد استفاده قرار گرفته است. با کاربرد روش باقی مانده وزنی گالرکین برای رابطه (۳) داریم:

$$[K]\{w_i\} + [C]\{\dot{w}_i\} = \{f\} \quad (۶)$$

که:

$$[K] = D \int_V [B]^T [B] dv + h \int_S \{N_i\}^T ds$$

$$[C] = \int_V \{N_i\}^T \{N_i\} dv \quad \{f\} = h \int_S \{N_i\}^T \{w_e\} d\Omega$$

و N_i ، S و V ، به ترتیب تابع شکل، مرز و دامنه هستند. $[B]$ برابر $\nabla\{N_i\}$ است و i بیانگر شماره تابع شکل می باشد. برای تعیین توزیع رطوبت، با استفاده از تخمین تفاضل محدود از رابطه (۶) در طول زمان انتگرال گیری می شود (Prazak و همکاران، ۱۹۹۰؛ Martin-Perez و همکاران، ۲۰۰۱).

h ، ضریب انتقال رطوبت سطحی (m/s) است و w_e برابر مقدار w در سطح رویارویی جسم بتنی می باشد. زمانی که سطح بتن در معرض آب قرار می گیرد، مقدار w_e برابر یک و زمانی که سطح بتن در معرض محیط آزاد قرار دارد، مقدار w_e برابر مقدار تخمین زده شده در ارتباط با ایزوترم^۴ و اجذب در دوره خشک شدن سطح بتن می باشد (McCarter، ۱۹۹۳). به عبارت دیگر رابطه ایزوترم و اجذب، رابطه بین رطوبت نسبی منافذ بتن و مقدار آب قابل تبخیر در آن است که یک رابطه پیچیده و غیرخطی می باشد. رایج ترین رابطه ایزوترم و اجذب، رابطه BET^۵ به شرح زیر است (Brunauer و همکاران، ۱۹۳۸؛ Nemati Chari و همکاران، ۲۰۱۸):

$$w_e = \frac{(1-k)[1+(C-1)kRH_e]}{(1-kRH_e)[1+(C-1)kRH_e]} \quad (۷)$$

که:

$$n = \left(2.5 + \frac{15}{t_e}\right) (0.33 + 2.2w/cm)$$

$$\text{اگر } t_e > 5 \text{ days and } 0.3 < \frac{w}{cm} < 0.6$$

$$C = e^{\frac{855}{T}}$$

$$k = \frac{\left(1 - \frac{1}{n}\right)C - 1}{C - 1} \quad 0 < k < 1$$

در روابط فوق، RH_e ، T و t_e به ترتیب رطوبت نسبی محیط، دمای بتن (°C) و سن معادل بتن (روز) می باشد. h با استفاده از ضخامت معادل (l_e) بتن در مجاورت سطح رویارویی از رابطه $h = D/l_e$ محاسبه می شود. Bazant و Najjar (۱۹۷۲) با استفاده از تحلیل داده های آزمایشگاهی، مقدار l_e را برابر

صورت زیر بیان شود (Carpenter و همکاران، ۱۹۹۳؛ Claissse و همکاران، ۱۹۹۷):

$$q_m = -D\nabla w \quad (۱)$$

که q_m ، D و w به ترتیب جریان معادل کل رطوبت (m/s)، ضریب انتقال رطوبت معادل (m²/s) در حالت مایع و درجه اشباع منافذ (بخشی از حجم منافذ که با آب پر می شود) است. با صرف نظر کردن از اثرات ثقلی و فرض عدم تغییرات جرم رطوبت در منافذ بتن (Ishida و Iqbal، ۲۰۰۹)، شار انتقال رطوبت در واحد سطح در یک جهت مشخص، متناسب با گرادیان غلظت رطوبت در همان جهت می باشد. در این صورت، معادله دیفرانسیل حاکم بر توزیع درجه اشباع منافذ بتن (w)، طبق رابطه زیر بیان خواهد شد (Crank، ۱۹۷۵؛ Navarri و Andrieu، ۱۹۹۳):

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (q_m) - Q = 0 \quad (۲)$$

که Q ، بیانگر آب قابل تبخیر مصرفی در اثر هیدراتاسیون یا سایر واکنش های شیمیایی است. با فرض عدم واکنش شیمیایی بین آب و فاز جامد ساختار منافذ و شرایط هم دم، با جایگزین کردن رابطه (۱) در رابطه (۲) داریم:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D\nabla^2 w \quad (۳)$$

موضوع مهم در تعیین ضریب انتقال رطوبت (D)، وابستگی آن به مقدار آب موجود در منافذ و یا به عبارت دیگر، درصد اشباع منافذ است. روابط تجربی متعددی برای تخمین ضریب انتقال رطوبت در طی فرایند جذب آب (ترشدن) (Dietl و همکاران، ۱۹۹۸؛ Buchwald، ۲۰۰۰) یا افت رطوبت (خشک شدن) (Xi و همکاران، ۱۹۹۴؛ Ayano و Wittmann، ۲۰۰۰؛ Janz، ۲۰۰۲؛ Kodikara و Chakrabarti، ۲۰۰۵؛ Idiart و همکاران، ۲۰۱۱) پیشنهاد شده است. در میان روابط مختلف پیشنهاد شده، معمولاً رابطه (۴) و رابطه (۵) برای مدل سازی ارتباط ضریب انتقال رطوبت با درصد اشباع منافذ و به ترتیب برای دوره تر شدن و دوره خشک شدن مورد استفاده قرار می گیرد.

$$D_w = D_1 e^{-\beta w} \quad (۴)$$

$$D_d = D_2 \left[\alpha + \frac{1-\alpha}{1 + \left(\frac{1-w}{1-w_{cr}}\right)^N} \right] \quad (۵)$$

که D_w و D_d به ترتیب بیانگر ضریب انتقال رطوبت در دوره تر شدن و دوره خشک شدن است. D_1 بیانگر D_w در زمانی است که منافذ بتن کاملاً خشک است. همچنین D_2 برابر D_d می باشد وقتی منافذ بتن کاملاً اشباع است. α ، β ، w_{cr} و N ، پارامترهای مدل هستند.

آزمونه‌ها به مدت یک سال در شرایط مرطوب آزمایشگاه نگهداری شدند. به منظور به حداقل رساندن اثرات جداره قالب، از هر وجه آزمونه‌ها، $1/25\text{cm}$ برش زده شده و آزمونه‌های برش خورده با ابعاد $12/5\text{cm}$ تهیه شدند.

۲-۳- آماده‌سازی آزمونه‌ها و روش انجام آزمایش

مخلوط‌های بتنی طبق الزامات استاندارد ASTM C192 ساخته شده و آزمونه‌های بتنی در ابعاد 15cm تهیه گردید. برای به حداقل رساندن اثر هیدراتاسیون در طول آزمایش به‌ویژه طرح Z10،

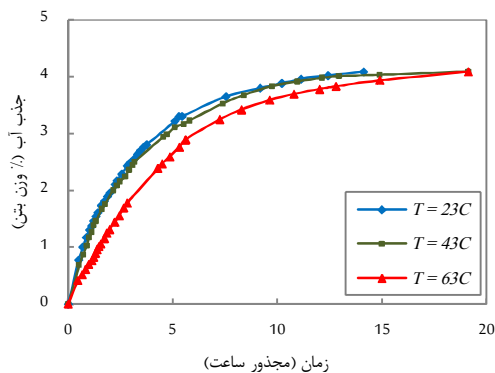
جدول ۳- طرح‌های مخلوط بتن

وزن اجزا در طرح‌های مخلوط مختلف (kg/m^3)						مصالح تشکیل دهنده
Z10	SF7.5	WC55	WC50	WC45	WC40	
۳۱۵	۳۲۴	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	۳۵۰	سیمان نوع ۲
-	۲۶	-	-	-	-	دوده سیلیس
۳۵	-	-	-	-	-	زئولیت
۱۵۸	۱۵۸	۱۹۳	۱۷۵	۱۵۸	۱۴۰	آب
۰/۴۵	۰/۴۵	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۴۵	۰/۴۰	نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm)
۱۱۷۰	۱۱۷۰	۱۱۱۲	۱۱۴۱	۱۱۷۰	۱۱۹۵	ماسه ۰-Amm
۶۳۰	۶۳۰	۵۹۹	۶۱۴	۶۳۰	۶۴۵	شن ۹/۵-۱۹mm
۱/۰۵۰	۱/۱۹۰	۰	۰	۰/۲۸۰	۰/۷۰۰	فوق روان‌کننده (پایه پلی‌کربوکسیلات)

جدول ۴- مشخصات بتن تازه و سخت‌شده برای طرح‌های مخلوط بتن

طرح‌های مخلوط مختلف						مشخصات بتن
Z10	SF7.5	WC55	WC50	WC45	WC40	
۱۰/۵	۱۲	۲۴	۱۸	۱۲	۱۱	اسلامپ (cm)
۳/۰	۳/۲	۱/۲	۱/۹	۲/۲	۳/۴	درصد هوا
۱۵/۶	۲۱/۲	۹/۸	۱۲/۵	۱۷/۷	۲۲/۱	مقاومت فشاری مکعبی ۳ روزه (MPa)
۲۵/۹	۳۱/۰	۱۷/۳	۲۲/۴	۲۸/۰	۳۰/۴	مقاومت فشاری مکعبی ۷ روزه (MPa)
۳۹/۲	۴۷/۴	۳۱/۱	۳۴/۱	۳۹/۱	۴۲/۷	مقاومت فشاری مکعبی ۲۸ روزه (MPa)
۴۴/۷	۵۲/۱	۳۵/۲	۴۰/۳	۴۴/۶	۴۹/۰	مقاومت فشاری مکعبی ۹۰ روزه (MPa)
۵۲/۲	۵۸/۶	۴۱/۳	۴۵/۴	۴۸/۹	۵۱/۰	مقاومت فشاری مکعبی ۳۶۵ روزه (MPa)

نشان می‌دهد که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار جذب آب و افت رطوبت بتن در طول زمان افزایش یافته است. همچنین با افزایش دما، فرایند افت رطوبت تسریع می‌گردد. البته بر خلاف افت رطوبت، روند جذب آب کلیه طرح‌های مخلوط بتن با افزایش دما، کاهش یافته است.

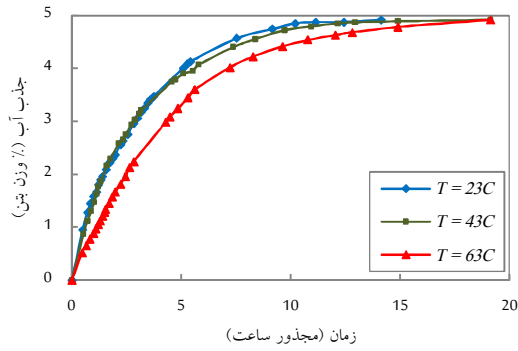


شکل ۴- روند جذب آب نمونه WC40

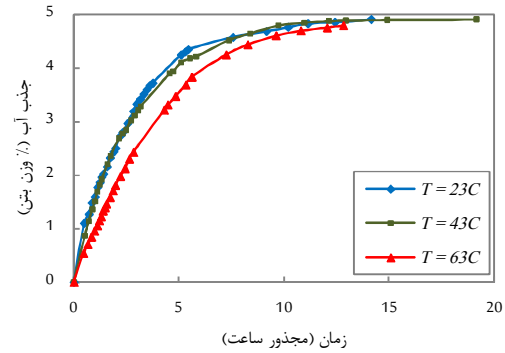
تمامی آزمونه‌ها در آون با دمای $110 \pm 5^\circ\text{C}$ خشک شده و سپس در دسیکاتور^۷ تا دمای موردنظر (23°C ، 43°C و 63°C) سرد شدند. وزن آزمونه‌ها قبل و بعد از دسیکاتور اندازه‌گیری شد تا از عدم جذب رطوبت در مدت سرد شدن تا دمای موردنظر، اطمینان حاصل شود. پس از تعیین وزن، آزمونه‌ها در آب با دماهای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ، $43 \pm 2^\circ\text{C}$ و $63 \pm 2^\circ\text{C}$ به صورت مستغرق قرار داده شدند. در زمان‌های معین، جرم آزمونه‌ها طبق روش استاندارد ASTM C642 اندازه‌گیری شده و مقدار رطوبت جذب شده تا شرایط اشباع کامل، تعیین گردید. سپس آزمونه‌های اشباع‌شده در محفظه کنترل‌شده با دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ، $43 \pm 2^\circ\text{C}$ و $63 \pm 2^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی $1 \pm 0.5\%$ ، $30 \pm 2\%$ و $50 \pm 1\%$ قرار داده شدند. در زمان‌های معین، جرم آزمونه‌ها اندازه‌گیری شده و مقدار افت رطوبت تا مدت ۴۲ روز، تعیین گردید.

۳-۳- نتایج آزمایش و تعیین ضریب انتقال رطوبت

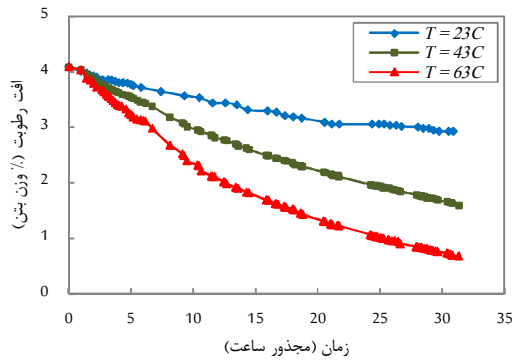
نتایج آزمایش جذب آب و افت رطوبت طرح‌های مخلوط ساخته‌شده در شکل‌های (۴) تا (۱۵) نشان داده شده است. نتایج



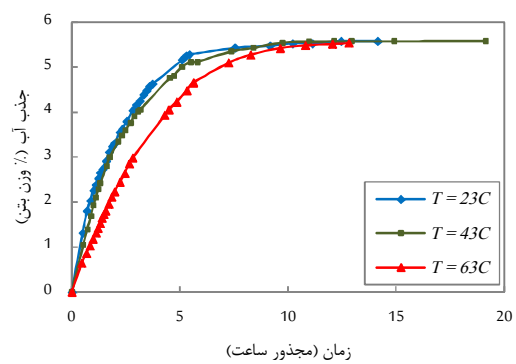
شکل ۹- روند جذب آب نمونه Z10



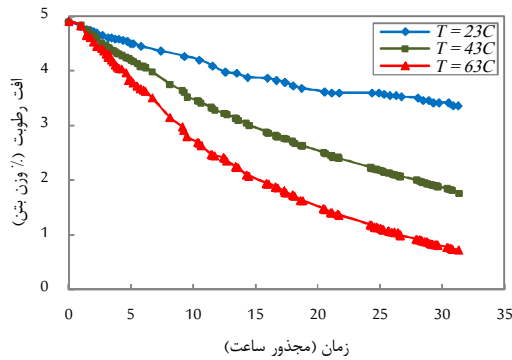
شکل ۵- روند جذب آب نمونه WC45



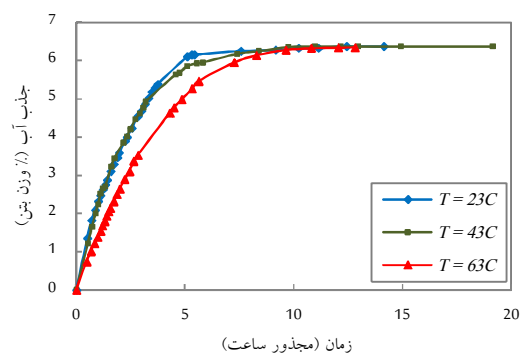
شکل ۱۰- روند افت رطوبت نمونه WC40



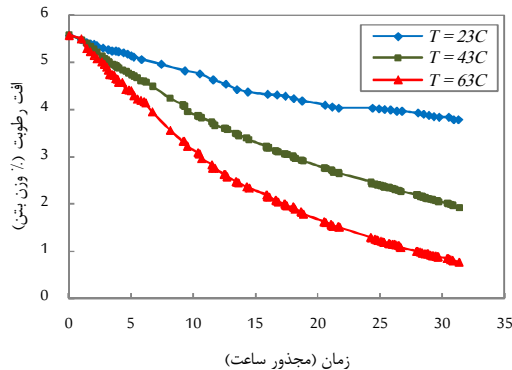
شکل ۶- روند جذب آب نمونه WC50



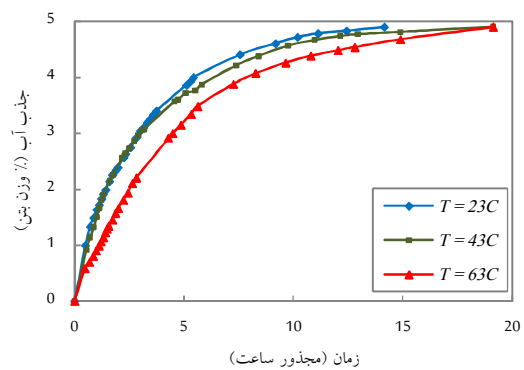
شکل ۱۱- روند افت رطوبت نمونه WC45



شکل ۷- روند جذب آب نمونه WC55



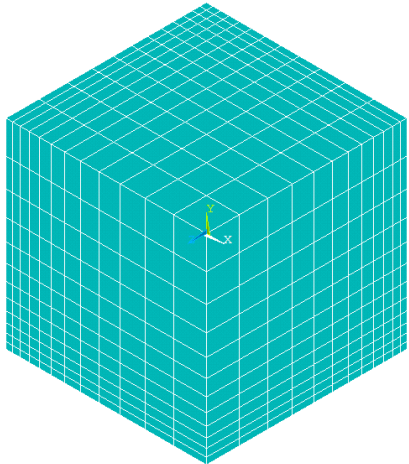
شکل ۱۲- روند افت رطوبت نمونه WC50



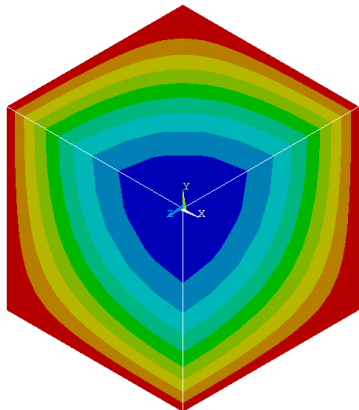
شکل ۸- روند جذب آب نمونه SF7.5

صورت همگن و ایزوتروپیک هستند و هیدراتاسیون سیمان در آن، حداقل می‌باشد.

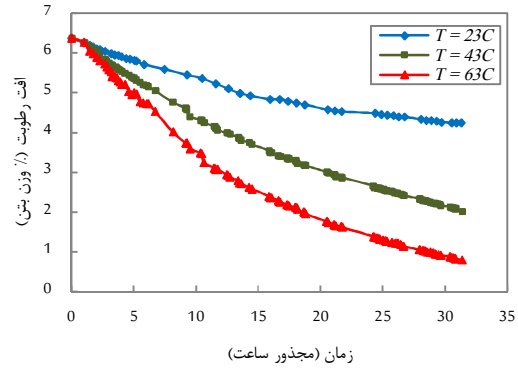
به‌منظور افزایش سرعت آنالیز و کاهش زمان، همچنین با توجه به تقارن جسم بتنی و شرایط رویارویی در هر جهت، یک المان سه‌بعدی که معادل یک‌هشتم آزمون مکعبی ۱۲/۵cm است، ساخته شد. برای کاهش اثر سطح رویارویی و تغییرات بیشتر رطوبت در سطح المان، تقسیم‌بندی المان‌ها به‌گونه‌ای انجام شد که المان‌های نزدیک سطح رویارویی، دارای ابعاد کوچک‌تر و المان‌های نزدیک به مرکز جسم بتنی، دارای اندازه بزرگ‌تر باشند (شکل (۱۶)). شکل (۱۷)، کانتور^۸ توزیع رطوبت در جسم بتنی را نشان می‌دهد. ضریب انتقال رطوبت به‌وسیله به حداقل رساندن مجموع مجذور تفاوت بین مقدار رطوبت متوسط هر آزمون (Wave) حاصل از آزمایش و مقدار رطوبت متوسط به عنوان خروجی مدل عددی تعیین شد.



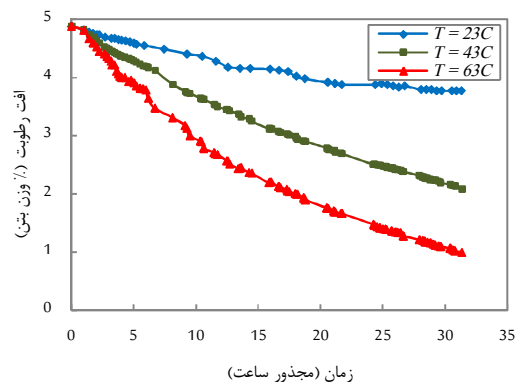
شکل ۱۶- مدل سه‌بعدی اجزاء محدود برای مش‌بندی المان بتنی



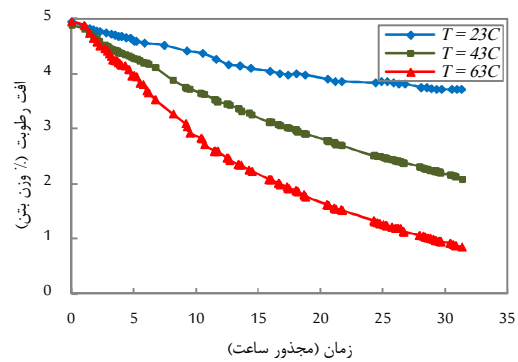
شکل ۱۷- کانتور توزیع رطوبت در جسم بتنی



شکل ۱۳- روند افت رطوبت نمونه WC55



شکل ۱۴- روند افت رطوبت نمونه SF7.5



شکل ۱۵- روند افت رطوبت نمونه Z10

۴- مدل سازی و نتایج عددی مدل‌ها

۴-۱- تعیین ضریب انتقال رطوبت

یک مدل سه‌بعدی اجزاء محدود برای حل معادله دیفرانسیل حاکم بر انتقال رطوبت و وابسته به زمان مورد استفاده قرار گرفت. به دلیل این‌که تمامی وجوه آزمون مکعبی در تماس با محیط رویارویی قرار می‌گیرند، باید شرایط مرزی به تمامی سطوح اختصاص داده شود. علاوه بر این، فرض شد تا مصالح به

۵۷ درصد، ضریب انتقال رطوبت در حالت ترشدن را کاهش دهد. از طرف دیگر، این زیاد شدن دما، ضریب انتقال رطوبت در حالت خشک شدن را به طور متوسط ۱۷ برابر، افزایش داده است. همان طور که مشخص است، افزایش نسبت آب به مواد سیمانی نیز باعث افزایش ضریب انتقال رطوبت هم در حالت ترشدن و هم در حالت خشک شدن، گردیده است. استفاده از مواد پوزولانی مانند دوده سیلیس و زئولیت طبیعی^۹، باعث کاهش ضریب انتقال رطوبت چه در حالت ترشدن و چه در حالت خشک شدن، گردیده است. البته اثر دوده سیلیس در کاهش ضریب انتقال رطوبت، بیشتر از زئولیت طبیعی بود. اگرچه زئولیت طبیعی اثر قابل توجهی در حالت ترشدن، نداشته است ولی اثر قابل توجهی در کاهش ضریب انتقال رطوبت در حالت خشک شدن، داشته است.

با استفاده از مدل عددی اجزاء محدود و سازگار کردن نتایج آزمایشگاهی و نتایج به دست آمده از مدل عددی، ضریب انتقال رطوبت طرح‌های اختلاط مختلف به دست آمد که مقادیر به دست آمده در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است که، پارامترهای مدل برای حالت خشک شدن به ترتیب برابر $\alpha=0/05$ ، $w_{cr}=0/10$ و $N=6$ به دست آمده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش دما، ضریب انتقال رطوبت در حالت ترشدن، کاهش یافته است؛ در صورتی که ضریب انتقال رطوبت در حالت خشک شدن به شدت افزایش یافته است. ضریب انتقال رطوبت، از دمای 23°C تا 43°C ، چندان تغییر نداشته است؛ در صورتی که این ضریب از دمای 43°C تا 63°C ، به شدت تغییر کرده است. دلیل این امر می‌تواند تغییر نیروی موینگی دیواره منافذ و تغییر بخشی از رطوبت از حالت مایع به حالت بخار در دماهای بالاتر باشد. افزایش دما از 23°C تا 63°C توانسته است به طور متوسط

جدول ۵- پارامترهای تخمین زده شده ضریب انتقال رطوبت توسط مدل عددی سه بعدی اجزاء محدود

Z10	SF7.5	WC55	WC50	WC45	WC40	کد اختصاری نمونه
۳/۹	۶/۰	۳/۰	۳/۴	۳/۶	۳/۸	$D_1 \times 10^{-8} (m^2/s), T=23^{\circ}\text{C}$
۳/۴	۵/۱	۲/۴	۲/۷	۲/۹	۳/۱	$D_1 \times 10^{-8} (m^2/s), T=43^{\circ}\text{C}$
۱/۷	۲/۷	۱/۲	۱/۴	۱/۶	۱/۷	$D_1 \times 10^{-8} (m^2/s), T=63^{\circ}\text{C}$
۲/۶	۳/۵	۱/۱	۱/۵	۲/۱	۲/۸	β
۱/۶	۱/۲	۳/۳	۲/۸	۲/۶	۲/۲	$D_2 \times 10^{-10} (m^2/s), T=23^{\circ}\text{C}$
۱۰/۵	۸/۷	۱۶/۵	۱۴/۱	۱۳/۰	۱۱/۱	$D_2 \times 10^{-10} (m^2/s), T=43^{\circ}\text{C}$
۳۳/۲	۲۷/۰	۴۵/۳	۴۱/۲	۳۹/۱	۳۴/۹	$D_2 \times 10^{-10} (m^2/s), T=63^{\circ}\text{C}$

المان‌های بتنی در اثر تابش مستقیم نور خورشید، ممکن است به بیش از 60°C درجه سانتی‌گراد هم برسد. مدت چرخه‌های جزر و مد به موقعیت قرارگیری سازه بتنی بستگی دارد. در بیشتر سواحل خلیج فارس، دو چرخه جزر و مد در شبانه‌روز اتفاق می‌افتد. در این تحقیق با توجه به شرایط محیطی ساحل بندرعباس، به طور متوسط مدت هر چرخه، ۶ ساعت در نظر گرفته شد.

۴-۴- مدل سازی عددی

یک مدل عددی یک بعدی اجزاء محدود برای تعیین عمق ناحیه همرفتی، ساخته شد. سعی شد تا مش بندی المان یک بعدی، به نحوی باشد تا المان‌های کوچک‌تر در سطح رویارویی و المان‌های بزرگ‌تری در عمق بتن ایجاد شود. نسبت طول بزرگ‌ترین المان به کوچک‌ترین المان، 10 ، و نسبت طول المان بزرگ‌تر به المان کوچک‌تر مجاور، $1/0.8$ در نظر گرفته شد. همچنین دماهای رویارویی 23°C ، 43°C و 63°C برای آنالیز مدنظر قرار گرفت.

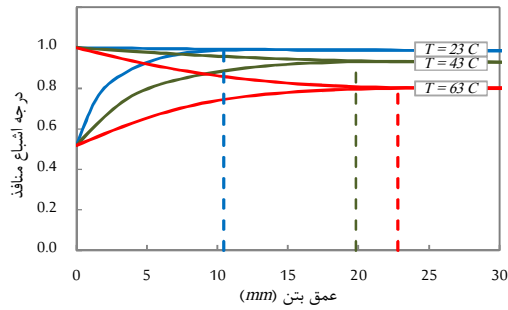
۴-۲- تعیین عمق ناحیه همرفتی و حجم انتقال رطوبت

منطقه همرفتی^{۱۰}، به محدوده از سطح بتن گفته می‌شود که در معرض چرخه‌های تر و خشک شدن قرار دارد. به عبارت دیگر، منطقه همرفتی به محدوده‌ای گفته می‌شود که رطوبت آن در هر فرایند خشک شدن، کاهش قابل ملاحظه‌ای، یافته و در فرایند تر شدن بعدی، رطوبت از دست رفته را جذب نماید.

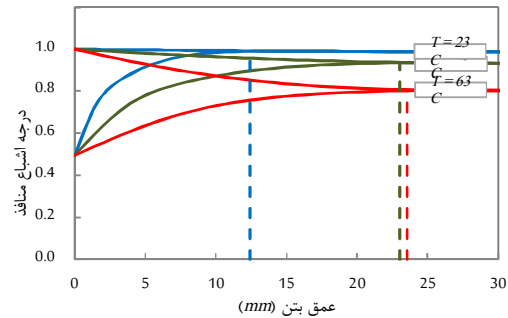
از آنجایی که، یکی از عوامل مؤثر بر میزان کلراید وارد شده در هر چرخه خشک و تر شدگی، عمق منطقه همرفتی می‌باشد، در این تحقیق با شبیه‌سازی شرایط محیطی خلیج فارس، اثر عوامل مختلف به‌ویژه دما روی عمق منطقه همرفتی بررسی شده است.

۴-۳- شرایط محیطی خلیج فارس

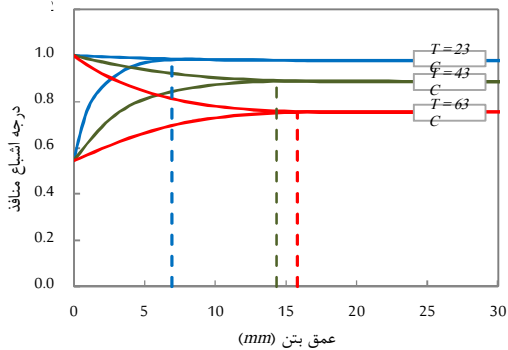
بیشینه دمای متوسط ماهیانه در شهر بندرعباس، $34/5^{\circ}\text{C}$ است که معمولاً در تیرماه اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر کمینه دمای متوسط ماهیانه، $18/1^{\circ}\text{C}$ است که معمولاً در دی ماه رخ می‌دهد. همچنین متوسط درصد رطوبت ساحل بندرعباس، $65/$ است. البته ممکن است حداکثر دمای روزانه در برخی از روزهای تابستان به بیش از 45°C درجه سانتی‌گراد برسد. البته دمای سطح



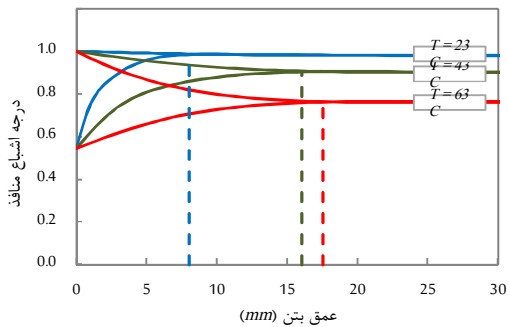
شکل ۲۰- پروفیل رطوبت در طرح WC50 در چرخه تر و خشک شدن



شکل ۲۱- پروفیل رطوبت در طرح WC55 در چرخه تر و خشک شدن



شکل ۲۲- پروفیل رطوبت در طرح SF7.5 در چرخه تر و خشک شدن

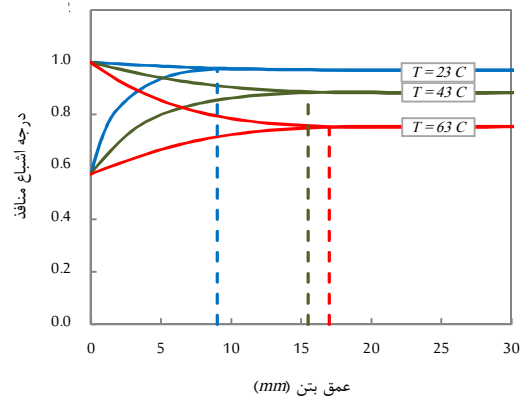


شکل ۲۳- پروفیل رطوبت در طرح Z10 در چرخه تر و خشک شدن

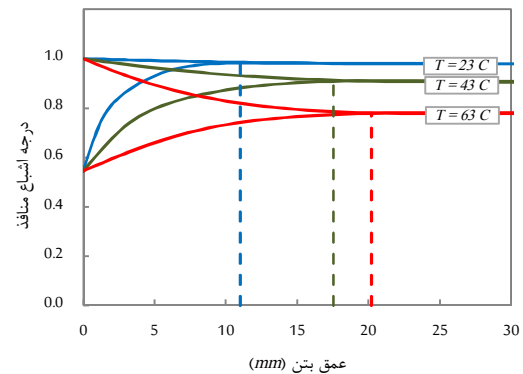
شرایط مرزی از یک وجه به جسم بتنی اختصاص داده شد که در آن رطوبت محیط رویارویی در زمان تر شدن برابر یک و رطوبت معادل محیط رویارویی در هنگام خشک شدن با استفاده از ایزوترم واجذب محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، هنگام جزر، شرایط مرزی (W_e) به عنوان شرایط مرزی به مدل اختصاص داده می‌شود. بنابراین هنگام مد، ورود رطوبت به بتن و هنگام جزر، خروج رطوبت از بتن صورت می‌گیرد.

۵- بحث و بررسی نتایج

پروفیل توزیع رطوبت با توجه به شماره طرح اختلاط به ترتیب در شکل‌های (۱۸) تا (۲۳) ارائه شده است. همچنین عمق ناحیه همرفتی در جدول (۶) محاسبه گردیده است. مقدار رطوبت ورودی در یک چرخه جزر و مد با استفاده از محاسبه سطح بین دو پروفیل رطوبت در زمان جزر و زمان مد به دست آمد که نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است.



شکل ۱۸- پروفیل رطوبت در طرح WC40 در چرخه تر و خشک شدن



شکل ۱۹- پروفیل رطوبت در طرح WC45 در چرخه تر و خشک شدن

۵-۱- اثر نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm)

طبق جدول (۷)، افزایش w/cm باعث افزایش قابل ملاحظه

میزان رطوبت وارد شده در هر چرخه جزر و مد شده است. دلیل این افزایش، افزایش جذب آب کل بتن و همچنین سطح بین دو پروفیل رطوبت حالت تر شدن و حالت خشک شدن همراه با زیاد شدن نسبت w/cm می‌باشد. به‌طور متوسط در دماهای مختلف، افزایش w/cm از ۰/۴۰ به ۰/۵۵ باعث افزایش ۱۳۸ درصدی مقدار رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد شده است.

همان‌طوری که در جدول (۶) مشاهده می‌شود با افزایش w/cm عمق ناحیه همرفتی در دماهای مختلف، افزایش داشته است. افزایش w/cm از ۰/۴۰ به ۰/۵۵، باعث افزایش عمق ناحیه همرفتی از ۹/۰ mm به ۱۲/۵ mm در دمای ۲۳°C و از ۱۷/۰ mm به ۲۳/۵ mm در دمای ۶۳°C شده است. به‌طور متوسط در دماهای مختلف، افزایش w/cm از ۰/۴۰ به ۰/۵۵ باعث افزایش ۴۱ درصدی عمق ناحیه همرفتی شده است.

جدول ۶- عمق ناحیه همرفتی، DCZ (mm)

Z10	SF7.5	WC55	WC50	WC45	WC40	دما (°C)
۸/۰	۷/۰	۱۲/۵	۱۱/۵	۱۰/۵	۹/۰	۲۳
۱۶/۰	۱۴/۵	۲۲/۵	۲۰/۰	۱۷/۵	۱۵/۵	۴۳
۱۷/۵	۱۶/۰	۲۳/۵	۲۲/۵	۲۰/۰	۱۷/۰	۶۳
۲/۲	۲/۳	۱/۹	۲/۰	۱/۹	۱/۹	نسبت DCZ در ۶۳°C به DCZ در ۲۳°C
٪۱۲۴		٪۹۱		متوسط افزایش DCZ از ۲۳°C تا ۶۳°C		

جدول ۷- حجم رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد، AWE (gr/m2)

Z10	SF7.5	WC55	WC50	WC45	WC40	دما (°C)
۹۵	۸۲	۱۹۱	۱۴۹	۱۲۱	۸۸	۲۳
۲۲۵	۱۹۸	۴۱۵	۳۲۱	۲۵۲	۱۷۵	۴۳
۲۸۶	۲۴۹	۵۵۸	۴۳۶	۳۲۸	۲۱۵	۶۳
۳/۰	۳/۰	۲/۹	۲/۹	۲/۷	۲/۴	نسبت AWE در ۶۳°C به AWE در ۲۳°C
٪۲۰۲		٪۱۷۵		متوسط افزایش AWE از ۲۳°C تا ۶۳°C		

۵-۳- اثر دما

همان‌طوری که در جدول (۶) مشاهده می‌شود با افزایش دما از ۲۳°C به ۶۳°C، عمق ناحیه همرفتی در همه مخلوط‌های بتنی با نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی افزایش یافته است. تغییر w/cm، تأثیر محسوس‌تری روی این نسبت افزایش نداشته است و به‌طور متوسط افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C و ۲۳°C به ۶۳°C به ترتیب باعث افزایش عمق ناحیه همرفتی به میزان ۷۳ و ۹۱ درصد شده است. این در حالی است که افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C و ۴۳°C به ۶۳°C طبق نتایج جدول (۵) باعث افزایش ضریب انتقال رطوبت حالت خشک شدن به ترتیب به میزان ۵ و ۱۵ برابر و کاهش ضریب انتقال رطوبت حالت تر شدن به میزان ۲۰ و ۵۷ درصد شده بود. بنابراین دلیل تأثیر قابل ملاحظه افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C روی عمق ناحیه همرفتی نسبت به اثر افزایش دما از ۴۳°C به ۶۳°C را می‌توان به دلیل جهت مخالف تغییرات ضریب انتقال رطوبت حالت تر شدن و خشک شدن دانست. این اثر را می‌توان در تغییر شیب پروفیل رطوبت حالت تر شدن نسبت به خشک شدن در دماهای مختلف در شکل‌های (۱۸) تا (۲۳) نیز مشاهده نمود.

۵-۲- اثر مواد پوزولانی

استفاده از دوده سیلیس و زئولیت طبیعی، هم‌زمان با کاهش ضریب انتقال رطوبت، باعث کاهش عمق ناحیه همرفتی و حجم رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد نیز شده‌اند. به‌طور متوسط جایگزینی ۷/۵ درصد از سیمان با دوده سیلیس باعث کاهش عمق ناحیه همرفتی به میزان ۲۳ درصد شده است. جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان با زئولیت طبیعی نیز باعث کاهش عمق ناحیه همرفتی به مقدار ۱۵ درصد گردید.

با توجه به تغییر عمق ناحیه همرفتی، استفاده از دوده سیلیس و زئولیت طبیعی در مقادیر استفاده شده، باعث کاهش حجم رطوبت ورودی به ترتیب به میزان ۲۶ و ۱۵ درصد شده است. بنابراین اثر مثبت دوده سیلیس و زئولیت طبیعی در کاهش امکان ورود یون‌های مهاجم محلول در آب دریا در دماهای مختلف به‌وضوح قابل لمس است. هرچند این بهبود در دماهای پایین‌تر، بیشتر بوده و با افزایش دما اثر بهبوددهندگی دوده سیلیس و زئولیت طبیعی، کاهش یافته است.

۷- تشکر و قدردانی

از انستیتو مصالح ساختمانی و آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران، همچنین مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی به دلیل حمایت از انجام آزمایش‌های تحقیق حاضر، همچنین کارشناسان و تکنسین‌های آزمایشگاه به‌ویژه آقایان مهندس مسعود ریحانی و مهندس مجید نعمتی چاری، تشکر و قدردانی می‌شود.

۸- مراجع

طریقت ا، افضل‌نیز ا، "بررسی خواص مکانیکی و برخی شاخص‌های دوام بتن حاوی ریزالیاف ولستونیت و پوزولان میکروسیلیس"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۶، ۴۷ (۳)، ۱-۷.

شکرچی زاده م، فراهانی ع، تدین م ح، خاقانپور ر، "بررسی بلندمدت نفوذپذیری یون کلراید در آزمون‌های حاوی متاکائولن در شرایط روبرویی پاشش در جزیره قشم"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۵، ۴۶ (۳)، ۳۱-۴۱.

Akindahunsi A, Falade FA, Afolayan JO, Oke IA, "Characterization and Mathematical Modeling of Chloride Diffusion in Lagos Coastal Waters", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2010, 10 (3), 169-177.

Andrade C, Alonso C, "Progress on design and residual life calculation with regard to rebar corrosion of reinforced", In Neal Berke, Edward Escalante, Charles Nmai, and David Whiting (Eds.), *Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures*, ASTM STP 1276, 1996, 23-40.

Andrade C, Diez JM, Alonso C, "Mathematical modeling of a concrete surface skin effect on diffusion in chloride contaminated media", *Advanced Cement Based Materials*, 1997, 6 (2), 39-44.

Nilsson LO, Andersen A, Tang L, Utgenannt P, "Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment", In: Andrade, Joerg Kröpp, editors. *Proceedings of 2nd international RILEM workshop on testing and modelling chloride ingress into concrete*, Paris: RILEM, 2000.

Andrade C, Sagrera JL, Sanjuán MA, "Several years study on chloride ion penetration into concrete exposed to Atlantic Ocean water", In: Carmen Andrade, Joerg Kröpp, editors. *Proceedings of 2nd international RILEM workshop on testing and modelling chloride ingress into concrete*, Paris: RILEM, 2000.

Ayano T, Wittmann FH, "Drying, moisture distribution, and shrinkage of cement-based materials", *Materials and Structures*, 2002, 35 (3), 34-40.

Baroghel-Bouny V, Thiéry M, Wang X, "Modelling of isothermal coupled moisture-ion transport in cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, 2011, 41 (8), 828-841.

تغییرات دما، اثرات متفاوتی روی بتن‌های حاوی مواد پوزولانی داشته است. به‌طور متوسط افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C و ۲۳°C به ۶۳°C به ترتیب باعث افزایش عمق ناحیه همرفتی به میزان ۱۰۴ و ۱۲۴ درصد در بتن‌های پوزولانی شده است. به عبارت دیگر تغییرات دما، اثرات بیشتری روی بتن‌های حاوی دوده سیلیس و زئولیت طبیعی در مقایسه با بتن عادی داشته است.

افزایش دما، اثر قابل توجهی روی مقدار رطوبت ورودی به بتن در هر چرخه جزر و مد داشت. به‌طوری که افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C و از ۲۳°C به ۶۳°C به ترتیب حجم رطوبت ورودی را ۱۱۰ و ۱۷۵ درصد برای بتن عادی و ۱۳۹ و ۲۰۲ درصد برای بتن حاوی مواد پوزولانی زیاد کرده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، چهار طرح اختلاط بتن عادی با نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm) مختلف، همچنین دو طرح اختلاط شامل دوده سیلیس و زئولیت طبیعی ساخته شد و ضریب انتقال رطوبت آن‌ها در دماهای ۲۳°C، ۴۳°C و ۶۳°C تعیین شد. سپس، با استفاده از ضرایب انتقال رطوبت به دست آمده و مدل عددی اجزاء محدود ساخته شده، عمق ناحیه همرفتی و حجم رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد تعیین شد و نتایج زیر حاصل گردید:

- افزایش w/cm از ۰/۴۰ به ۰/۵۵ به‌طور متوسط باعث افزایش ۴۱ درصدی عمق ناحیه همرفتی و افزایش ۱۳۸ درصدی مقدار رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد، در دماهای مختلف شده است.

- جایگزینی ۷/۵ درصد از سیمان با دوده سیلیس، به‌طور متوسط باعث کاهش عمق ناحیه همرفتی به میزان ۲۳ درصد و کاهش مقدار رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد به میزان ۲۶ درصد، در دماهای مختلف شده است.

- جایگزینی ۱۰ درصد از سیمان با زئولیت طبیعی، به‌طور متوسط باعث کاهش ۱۵ درصدی عمق ناحیه همرفتی و مقدار رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد، در دماهای مختلف شده است.

- افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C و ۲۳°C به ۶۳°C به ترتیب باعث افزایش عمق ناحیه همرفتی بتن بدون مواد پوزولانی به میزان ۷۳ و ۹۱ درصد و بتن حاوی مواد پوزولانی به میزان ۱۰۴ و ۱۲۴ درصد شده است.

- افزایش دما از ۲۳°C به ۴۳°C و ۲۳°C به ۶۳°C به ترتیب باعث افزایش میزان رطوبت ورودی در هر چرخه جزر و مد در بتن بدون مواد پوزولانی به میزان ۱۱۰ و ۱۷۵ درصد و بتن حاوی مواد پوزولانی به میزان ۱۳۹ و ۲۰۲ درصد شده است.

- Kodikara J, Chakrabarti S, "Modeling of Moisture Loss in Cementitiously Stabilized Pavement Materials", *International Journal of Geomechics*, 2005, 5 (4), 295-303.
- Martin-Perez B, "Service life modelling of R.C. highway structures exposed to chlorides", PhD thesis, university of Toronto, 1999.
- Martin-Perez B, Pantazopoulou SJ, Thomas MDA, "Numerical solution of mass transport equations in concrete structures", *Computers and Structures*, 2001, 79 (13), 1251-1264.
- Martys N, Ferraris CF, "Capillary transport in mortar and concrete", *Cement and Concrete Research*, 1997, 27 (5), 747-760.
- McCarter WJ, "Influence of surface finish on sorptivity on concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1993, 5 (1), 130-136.
- Mukhopadhyaya P, Kumaran K, Normandin N, Goudreau P, "Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials", *Journal of Building Physics*, 2002, 26 (2), 179-195.
- Navarri P, Andrieu J, "High-intensity infrared drying study: part II. Case of thin coated films", *Chemical Engineering and Process: Process Intensification*, 1993, 32 (5), 319-325.
- Nemati Chari M, Shekarchi M, Ghods P, Moradian M, "A simple practical method for determination of moisture transfer coefficient of mature concrete using a combined experimental-numerical approach", *Computers and Concrete*, 2016, 18, 367-388.
- Nemati Chari M, Shekarchi M, Sobhani J, Nemati Chari M, "The effect of temperature on the moisture transfer coefficient of cement-based mortars: an experimental investigation", *Construction and Building Materials*, 2016, 102, 306-317.
- Nemati Chari M, Shekarchi M, "A Simplified Method for Determination of the Moisture Transfer Coefficient of Concrete", *International Journal of Civil Engineering*, 2017, 15 (8), 1131-1142.
- Nemati Chari M, Shekarchi M, Tadayon MH, Moradian M "Prediction of chloride ingress into blended cement concrete: Evaluation of a combined short-term laboratory-numerical procedure", *Construction and Building Materials*, 2018, 162, 649-662.
- Nguyen TQ, Petkovic J, Dangla P, Baroghel-Bouny V, "Modelling of coupled ion and moisture transport in porous building materials", *Construction and Building Materials*, 200, 22 (11), 2185-2195.
- Olajumoke AM, Oke IA, Fajobi AB, Ogedengbe MO, "Engineering failure analysis of a failed building in Osun State, Nigeria", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2009, 9 (1), 8-15.
- Prabakar J, Devadas Manoharan P, Chellappan A, "Diffusion characteristics of OPC concrete of various grades under accelerated test conditions", *Construction and Building Materials*, 2010, 24 (3), 346-352.
- Prazak J, Tywniak J, Peterka F, Slonc T, "Description of transport of liquid in porous media-a study based on neutron radiography data", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1990, 33 (6), 1105-1120.
- Sabir BB, Wild S, O'Farrell M, "A water sorptivity test for mortar and concrete", *Materials and Structures*, 1998, 31 (8), 568-574.
- Bazant ZP, Najjar LJ, "Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete", *Materials and Structures*, 1972, 5 (25), 3-20.
- Bazant ZP, "Mathematical Modeling of Creep and Shrinkage of Concrete", John Wiley & Sons, London, UK, 1988.
- Broomfield JP, *Corrosion of steel in concrete*, E & FN Spon, London, 1997.
- Brunauer S, Emmett PH, Teller E, "Adsorption of Gases in Multimolecular Layers", *Journal of the American Chemical Society*, 1938, 60 (2), 309-319.
- Buchwald A, "Determination of the ion diffusion coefficient in moisture and salt loaded masonry materials by impedance spectroscopy", *The third international symposium, Vienna, Austria*, 2000, 475-482.
- Carpenter TA, Davies ES, Hall C, Hall LD, Hoff WD, Wilson MA, "Capillary water migration in rock: process and material properties examined by NMR imaging", *Materials and Structures*, 1993, 26 (5), 286-292.
- Castro P, Rincón OT, Pazini EJ, "Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments", *Cement and Concrete Research*, 2001, 31 (4), 529-537.
- Conciatori D, Brühwiler E, Gysler R, "Brine Absorption in Concrete at Low Temperature: Experimental Investigation and Modeling", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23 (6), 846-851.
- Chunqiu L, Kefei K, Zhaoyuan C, "Numerical Analysis of Moisture Influential Depth in Concrete and Its Application in Durability Design", *Tsinghua Science and Technology*, 2008, 13(S1), 7-12.
- Claisse PA, Eisayad BI, Shaaban IG, "Absorption and sorptivity of cover concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 1997, 9 (3), 105-110.
- Crank J, "The mathematics of diffusion", 2nd Ed, Oxford, Clarendon Press, 1975.
- Dietl C, Winter E, Viskanta R, "An efficient simulation of heat and mass transfer processes during drying of capillary porous hygroscopic materials", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, 41 (22), 3611-3625.
- Dousti A, Shekarchi M, Alizadeh R, Taheri-Motlagh A, "Binding of externally supplied chlorides in micro silica concrete under field exposure conditions", *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33 (10), 1071-1079.
- Haque MN, Al-Khaiat H, John B, "Climatic zones- a prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf", *Building and Environment*, 2007, 42 (6), 2410-2416.
- Hubert F X, Burlion N, Shao JF, "Drying of concrete: modeling of a hydric damage", *Materials and Structures*, 2003, 36 (1), 12-21.
- Idiart AE, Lopez CM, Carol I, "Modeling of drying shrinkage of concrete specimens at the meso-level", *Materials and Structures*, 2011, 44 (2), 415-435.
- Iqbal PO, Ishida T, "Modeling of chloride transport coupled with enhanced moisture conductivity in concrete exposed to marine environment", *Cement and Concrete Research*, 2009, 39 (4), 329-339.
- Janz M, "Moisture diffusivities evaluated at high moisture levels from a series of water absorption tests", *Materials and Structures*, 2002, 35 (3), 141-148.

- Samson E, Maleki K, Marchand J, Zhang T, "Determination of the water diffusivity of concrete using drying/absorption test results", Journal of ASTM International, 2008, 5 (7), 1-12.
- Shekarchi M, Bonakdar A, Bakhshi M, Mirdamadi A, Mobasher B, "Transport properties in metakaolin blended concrete", Construction and Building Materials, 2010, 24 (11), 2217-2223.
- Temperley TG, "Corrosion phenomena in the Coastal areas of the Persian Gulf", Corrosion Science, 1965, 5 (8), 581-589.
- Tuutti K, "The effect of individual parameters on chloride corrosion", In Nilsson L. O. (Ed.), Chloride Penetration Into Concrete Structures, pp. 18-12, Goteborg, Sweden.
- Xi Y, Bazant ZP, Molina L, Jennings HM, "Moisture Diffusion in cementitious materials-Adsorption isotherm", Advanced Cement Based Materials, 1994, 1 (6), 248-257.
- Yang Z, Weiss WJ, Olek J, "Water transport in concrete damaged by tensile loading and freeze-thaw cycling", Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18 (3), 424-434.
- Yoo JH, Lee HS, Ismail MA, "An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure", Construction and Building Materials, 2011, 25 (1), 99-108.

EXTENDED ABSTRACT

The effect of Temperature on the Convection Zone of Concrete (Experimental-Numerical Study)

Mehdi Nemati Chari^{a,*}, Mohammad Shekarchi^b

^a Faculty of Concrete Technology Department, Road, Housing & Urban Development Research Center (BHRC), Tehran, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 10 July 2015; Accepted: 27 January 2019

Keywords:

Temperature, Convection zone, Moisture profile, Unsaturated concrete, Silica fume, Zeolite, Finite element method, Numerical modeling.

1. Introduction

The durability-based design of reinforced concrete structures especially in the hot marine environment of Bandar-Abbas became extensively important during the last few years. It has been known that the durability of concrete mainly depends on how easily seawater containing chloride ions can ingress into an unsaturated concrete (Sabir et al., 1998; Hubert et al., 2003; Prabakar et al., 2010; Yoo et al., 2011). Chloride-induced corrosion of embedded reinforcement is more severe in tidal conditions because of more ingress of chloride due to moisture convection phenomena. (Broomfield, 1997; Olajumok et al., 2009; Akindahunsi et al., 2010).

It is necessary to approximate the moisture distribution in concrete due to wetting and drying cycles for the determination of the moisture convection zone. The moisture transfer coefficient (MTC) is one of the most important parameters for the prediction of moisture distribution. The moisture distribution is often influenced by environmental conditions such as temperature. The changes of in the depth of the convection zone can be assessed if MTC is available in various temperatures.

In this research, six concrete mixtures were prepared in which four plain concrete mixtures were proportioned with water to cementitious materials (w/cm) ratios of 0.40, 0.45, 0.50, and 0.55. In addition to the plain concretes, one silica fume and one natural zeolite blended concrete mixtures with cement replacement levels of 7.5, and 10% and a w/cm ratio of 0.45 were considered. The moisture loss or water absorption of specimens exposed to wetting and drying were measured using the gravimetric method at temperatures of 23, 43, and 63 °C. A finite element analysis was performed afterward to fit the experimental data to the governing equations of moisture transfer to determine the MTC. The moisture distribution of concrete exposed to wetting and drying and then the depth of convection zone (DCZ) are determined using approximated MTC and finite element-based model. The amount of water entered (AWE) to concrete surface subjected to tidal condition is also calculated.

2. Methodology

2.1. Determination of the MTC

The gravimetric method was used to obtain the MTC of the concrete, which is a combination of simply measuring the mass and numerical modeling (Samson et al., 2008). In this method, w^{ave} (i.e., average w of the specimen) was experimentally measured as a function of time (t) during the water absorption or moisture loss tests. The difference between w_i^{ave} (at $t = t_i$) and w_j^{ave} (at $t_j = t_i + \Delta t$) is a definite value. The MTC was therefore determined by the minimization of the squared differences between the experimental results of the

* Corresponding Author

E-mail addresses: m.nemati@bhrc.ac.ir (Mehdi Nemati Chari), shekarch@ut.ac.ir (Mohammad Shekarchizadeh).

average moisture saturation degree of a specimen at each time and numerical values obtained from the three-dimensional finite element analysis.

2.2. Determination of the DCZ

The one dimensional finite element model was developed to determine the DCZ. Because the boundary affects one-face of the concrete specimens, it was necessary to assign a moisture flux to the one face of the specimen as the boundary condition. In addition, the concrete material was assumed to be isotropic and the rate of hydration was also neglected during the tests. The exposure temperatures of 23, 43, and 63 °C were considered for numerical analysis.

3. Results and discussion

3.1. The MTC

The MTCs of the concrete mixture were determined using the above-mentioned method in various temperatures and then presented in Table 1. The parameter of the model during drying were approximated as $\alpha=0.05$, $wcr=0.80$, and $N=6$. As seen in Table 1, MTC of the wetting period decreased with increasing in temperature from 23°C to 63°C; Although, MTC of the drying period increased with increasing in temperature.

Table 1. Estimated moisture transfer coefficients

Mixture ID	WC40	WC45	WC50	WC55	SF7.5	Z10
$D_1 \times 10^{-8} (m^2/s), T=23^\circ C$	3.8	3.6	3.4	3.0	6.0	3.9
$D_1 \times 10^{-8} (m^2/s), T=43^\circ C$	3.1	2.9	2.7	2.4	5.1	3.4
$D_1 \times 10^{-8} (m^2/s), T=63^\circ C$	1.7	1.6	1.4	1.2	2.7	1.7
β	2.8	2.1	1.5	1.1	3.5	2.6
$D_2 \times 10^{-10} (m^2/s), T=23^\circ C$	2.2	2.6	2.8	3.3	1.2	1.6
$D_2 \times 10^{-10} (m^2/s), T=43^\circ C$	11.1	13.0	14.1	16.5	8.7	10.5
$D_2 \times 10^{-10} (m^2/s), T=63^\circ C$	34.9	39.1	41.2	45.3	27.0	33.2

3.2. The moisture profile

The profile of moisture distribution of various mixtures was calculated using the numerical model and shown in Fig. 1. The depth of convection zone was also presented in Table 2.

In addition, the amount of water that entered to the concrete surface subjected to a cycle of wetting and drying was calculated. The obtained results were shown in Table 3.

Table 2. Depth of convection zone, DCZ, (mm)

Temperature (°C)	WC40	WC45	WC50	WC55	SF7.5	Z10
23	9.0	10.5	11.5	12.5	7.0	8.0
43	15.5	17.5	20.0	22.5	14.5	16.0
63	17.0	20.0	22.5	23.5	16.0	17.5
$DCZ_{63^\circ C} / DCZ_{23^\circ C}$	1.9	1.9	2.0	1.9	2.3	2.2

Table 3. Amount of water entered to concrete surface subjected to a cycle of wetting and drying, AWE, (gr/m²)

Temperature (°C)	WC40	WC45	WC50	WC55	SF7.5	Z10
23	88	121	149	191	82	95
43	175	252	321	415	198	225
63	215	328	436	558	249	286
$AWE_{63^\circ C} / AWE_{23^\circ C}$	2.4	2.7	2.9	2.9	3.0	3.0

3.3. The effect of temperature

As seen in Table 2, the DCZ of all mixtures increased with increasing in temperature from 23°C to 63°C. The variation in w/cm had not considerable effects on DCZ. The DCZ increased on average 73% and 91% when temperature increased from 23°C to 63°C and from 23°C to 63°C, respectively. Although, Increase of temperature from 23°C to 43°C and from 23°C to 63°C caused the MTC of drying period to be 5 and 15 times greater and the MTC of the wetting period to increase in 20 and 57%, respectively. Thus, the significant influence of the temperature rise from 23°C to 43°C on the DCZ in comparison with the temperature rise from 43°C to 63°C is related to the inverse variation of the MTC by temperatures. This effect is also obvious with respect to changing in moisture profile slope (Fig. 1).

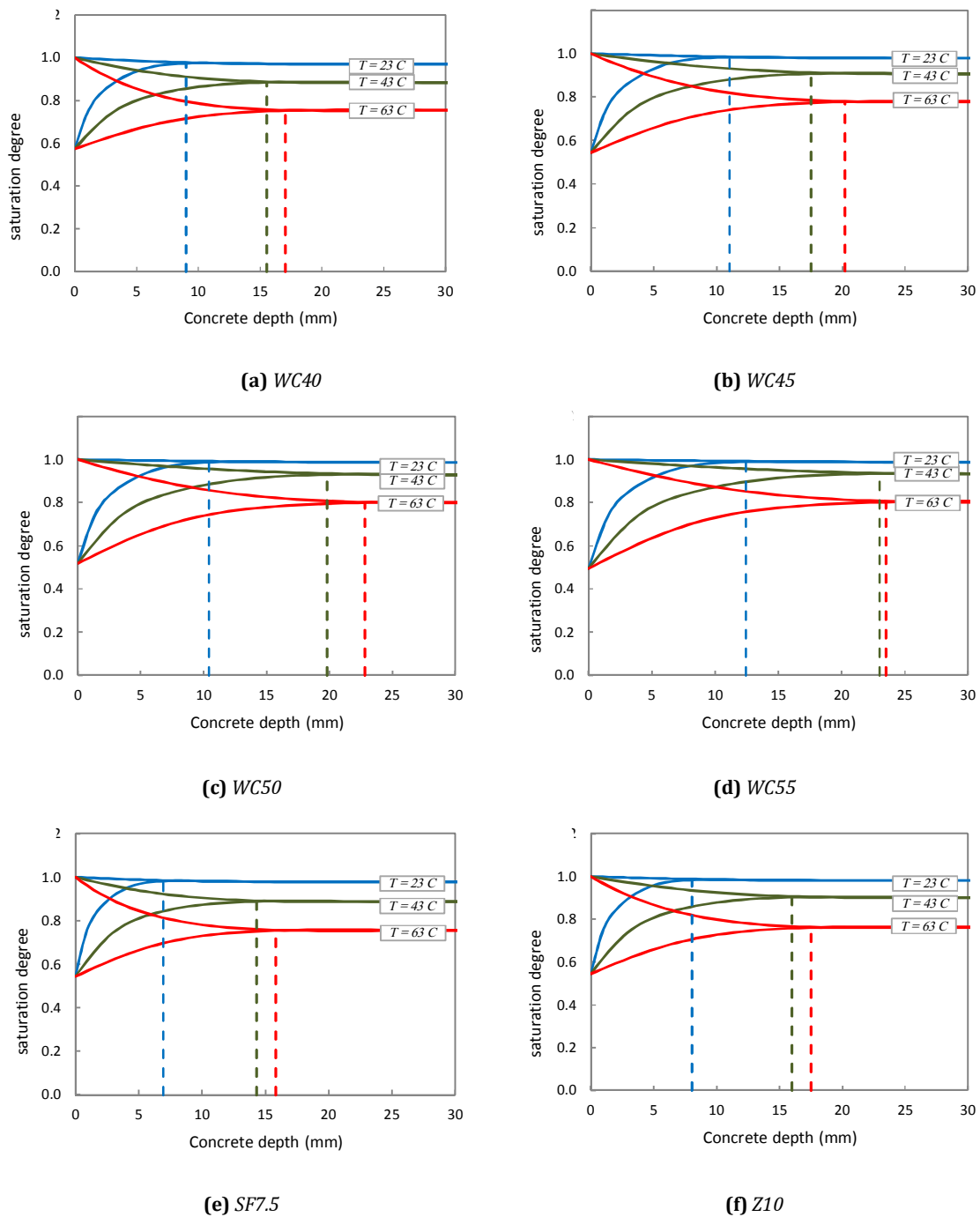


Fig. 1. Moisture profile of concrete mixtures subjected to a wetting and drying cycle

The temperature had a different influence on the blended concrete mixtures. The DCZ increased on average 104% and 124% with an increase of the temperature from 23°C to 43°C and from 23°C to 63°C, respectively. With increasing in temperature from 23°C to 43°C and from 23°C to 63°C, the AWE of plain concrete surface subjected to a cycle of wetting and drying increased 110% and 175%, respectively. With the same temperature rise, the AWE of blended concrete mixtures also increased 139% and 202%.

4. Conclusions

In this paper, four plain concrete mixtures, one silica fume, and one natural zeolite blended concrete mixtures were proportioned. Therefore, the depth of convection zone (DCZ) and the amount of water entered (AWE) to plain concrete surface subjected to a cycle of wetting and drying determined using a moisture transfer coefficient and developed finite element based model. The following remarks are highlighted in this study:

- The DCZ and the AWE increased 41% and 138%, respectively, with increasing in w/cm from 0.40 to 0.55.
- 7.5% of cement substitution by silica fume caused the DCZ and the AWE to decrease 23% and 26%, respectively.
- The DCZ and the AWE decreased 15% with the 10% of cement replacement by natural zeolite.
- With increasing in temperature from 23°C to 43°C and from 23°C to 63°C, the DCZ of plain concrete increased 73% and 91%, respectively. With the same temperature rise, the DCZ of blended concrete mixtures also increased 104% and 124%.
- With increasing in temperature from 23°C to 43°C and from 23°C to 63°C, the AWE of plain concrete increased 110% and 175%, respectively. With the same temperature rise, the AWE of blended concrete mixtures also increased 139% and 202%.

5. References

- Akindahunsi A, Falade FA, Afolayan JO, Oke IA, "Characterization and Mathematical Modeling of Chloride Diffusion in Lagos Coastal Waters", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2010, 10 (3), 169-177.
- Broomfield JP, Corrosion of steel in concrete, E & FN Spon, London, 1997. Hubert FX, Burlion N, Shao JF, "Drying of concrete: modeling of a hydric damage", *Materials and Structures*, 2003, 36 (1), 12-21.
- Olajumoke AM, Oke IA, Fajobi AB, Ogedengbe MO, "Engineering failure analysis of a failed building in Osun State, Nigeria", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2009, 9 (1), 8-15.
- Prabakar J, Devadas Manoharan P, Chellappan A, "Diffusion characteristics of OPC concrete of various grades under accelerated test conditions", *Construction and Building Materials*, 2010, 24 (3), 346-352.
- Sabir BB, Wild S, O'Farrell M, "A water sorptivity test for mortar and concrete", *Materials and Structures*, 1998, 31 (8), 568-574.
- Samson E, Maleki K, Marchand J, Zhang T, "Determination of the water diffusivity of concrete using drying/absorption test results", *Journal of ASTM International*, 2008, 5 (7), 1-12.
- Yoo JH, Lee HS, Ismail MA, "An analytical study on the water penetration and diffusion into concrete under water pressure", *Construction and Building Materials*, 2011, 25 (1), 99-108.