

اثر افزودنی‌های معدنی بر ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر سیمان

پرویز قدوسی^۱، علی اکبر شیرزادی جاوید^{۲*}، محمدعلی اعتباری قصبه^۳

۱. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

Shirzad@iust.ac.ir

تاریخ دریافت ۹۸/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش ۹۹/۲/۱۷

چکیده

تغییر در دمای بتن سبب ایجاد کرنش‌های انبساطی در بتن شده که تبدیل به تنش کششی می‌شود. با کاهش ضریب انبساط حرارتی بتن، خطر ترک‌خوردگی آن تحت تغییرات دما کمتر می‌شود. در این پژوهش به منظور بررسی اثر افزودنی‌های معدنی بر ضریب انبساط حرارتی، نمونه‌های بتن و خمیر سیمان حاوی افزودنی‌های معدنی دوده سیلیس، متاکائولن و سرباره با نسبت آب به مواد سیمانی و مقدار مواد سیمانی ثابت ساخته شده و آزمایش‌های مقاومت فشاری، تخلخل کل، توزیع اندازه منافذ و تعیین ضریب انبساط حرارتی روی نمونه‌ها انجام شده است. همچنین ضریب انبساط حرارتی تا سن ۱۲۰ روز به فاصله هر ۷ روز بررسی شده است و اثر روند هیدراسیون و واکنش پوزولانی بر آن بررسی شده است. طبق نتایج به دست آمده، ضریب انبساط حرارتی بتن‌های حاوی دوده سیلیس و متاکائولن ۱۴٪ کمتر از بتن بدون افزودنی معدنی بوده است. درحالی‌که بتن حاوی سرباره، کمی بیشتر از بتن بدون افزودنی معدنی بوده است. با افزایش سن نمونه تا سن ۶۰ روز، ضریب انبساط حرارتی بتن بدون افزودنی معدنی ۱۲٪ کاهش و پس از آن تا سن ۱۲۰ روز ثابت شده است. در بتن‌های حاوی دوده سیلیس و متاکائولن، این مقدار کاهش برابر با ۸٪ بوده است و مانند بتن بدون افزودنی معدنی پس از ۶۰ روز ثابت شده است. در بتن حاوی سرباره، تا سن ۶۰ روز تغییر چشمگیری مشاهده نشده است و از سن ۶۰ تا ۱۲۰ روز، ۱۰٪ کاهش مشاهده شده است. با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، مدلی برای پیش‌بینی ضریب انبساط حرارتی بتن در سنین مختلف با استفاده از ضریب انبساط حرارتی بتن در سن ۷ روز ارائه شده است. در ادامه، ارتباط بین ضریب انبساط حرارتی با مقاومت فشاری، تخلخل کل و قطر میانه منافذ بررسی شده است که بیشترین ارتباط بین ضریب انبساط حرارتی با قطر میانه منافذ بوده است.

کلمات کلیدی: ضریب انبساط حرارتی، بتن، خمیر سیمان، افزودنی معدنی

۱. مقدمه

با توجه به قرارگیری سازه‌های بتنی در معرض تغییرات دمای ناشی از تغییر شب و روز و تغییر فصل، در اثر این تغییر دما بتن مانند مواد دیگر تمایل به تغییر حجم دارد که در صورت مقید بودن بتن، سبب ایجاد تنش حرارتی در بتن خواهد شد. هرچه ضریب انبساط حرارتی بتن بیشتر باشد، تغییر حجم و به سبب آن تنش ایجاد شده در بتن بیشتر شده و خطر ترک‌خوردگی بالا می‌رود. در سازه‌هایی مانند روسازی‌های بتنی یا پل‌ها که طول زیادی نسبت به عرض و ارتفاع دارند، این تغییرات حجم به صورت تغییر طول خود را نشان می‌دهد. تغییرات طول در طول واحد به ازای هر درجه اختلاف دما، ضریب انبساط حرارتی خطی نامیده می‌شود.

به دلیل کوچک بودن تغییر طول، در مقیاس میکرو نمایش داده می‌شود. افزایش ضریب انبساط حرارتی سبب افزایش میزان ترک و خرابی رویه بتنی می‌شود به شکلی که با افزایش مقدار ضریب انبساط حرارتی از ۹/۵ به ۱۱ میکرو کرنش بر درجه سانتی‌گراد، ۲۰ درصد به ترک رویه بتنی افزوده می‌شود [1].

AASHTO T336-11 [2] استاندارد را برای اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی بتن ارائه کرده است که با تغییر دمای بتن درون حوضچه آب بین ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد تغییرات طول نمونه استوانه‌ای خوانده می‌شود. TI-B 101 نیز روشی برای اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی نمونه منشوری با تغییر دما بین ۵ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد ارائه کرده است [3].

از آنجایی که بتن یک جسم کامپوزیت است، رفتار بتن به رفتار عوامل تشکیل‌دهنده آن مرتبط است. به دلیل بیشتر بودن حجم سنگ‌دانه در بتن، ضریب انبساط حرارتی سنگ‌دانه بیشترین اثر را بر ضریب انبساط حرارتی بتن دارد. استفاده از سنگ‌دانه‌های سیلیسی می‌تواند منجر به افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن به میزان ۳۰ درصد نسبت به سنگ‌دانه‌های آهکی شود [4]. همچنین میزان مشارکت درشت‌دانه در میزان سنگ‌دانه نیز بر ضریب انبساط حرارتی بتن اثرگذار است به صورتی که با افزایش سهم سنگ‌دانه درشت شاهد کاهش ضریب انبساط حرارتی بتن خواهیم بود [5].

علاوه بر سنگ‌دانه، خمیر سیمان نیز بر مقدار ضریب انبساط حرارتی بتن مؤثر است. درصد رطوبت خمیر سیمان تأثیر بسیاری بر ضریب انبساط حرارتی آن دارد به طوری که بیشترین مقدار در رطوبت ۷۰٪ مشاهده شده است و در حالت خشک، کمترین ضریب انبساط حرارتی به دست می‌آید در حالت اشباع مقدار ضریب انبساط حرارتی کمی بیشتر از حالت خشک است [6]. پژوهش‌ها نشان داده است که ضریب انبساط حرارتی خمیر سیمان بیشتر از دو برابر ضریب انبساط حرارتی سنگ‌دانه است که این امر می‌تواند منجر به ریزترک‌هایی در مرز میان سنگ‌دانه و خمیر در بتن شود به طوری که بعد از ۱۲۰ چرخه دما، ۳۰ درصد از مقاومت فشاری بتن کاهش می‌یابد [7]. از این رو کاهش ضریب انبساط حرارتی خمیر سیمان می‌تواند به بهبود کیفیت بتن منجر شود. مهم‌ترین عوامل بر ضریب انبساط حرارتی خمیر سیمان، مواد جامد، آب و منافذ داخل خمیر سیمان است [8].

طبق نظر میندس [9] و همکاران [9] تخلخل داخل بتن به ۳ بخش منافذ ژل (کوچک‌تر از ۱۰ نانومتر)، منافذ مویینه کوچک (بین ۱۰ تا ۵۰ نانومتر) و منافذ مویینه بزرگ (بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) تقسیم می‌شود. پژوهش‌های متعددی بر اثر افزودنی‌های معدنی متاکائولن و دوده سیلیس بر تخلخل کل خمیر سیمان و بتن انجام شده است که نتایج متناقضی در کاهش و افزایش تخلخل کل گزارش شده است [10-12]. افزودنی‌های معدنی با انجام واکنش پوزولانی، سبب تغییر در تخلخل بتن می‌شوند. اثر واکنش پوزولانی در زمان‌های مختلف، متفاوت است. لی [۲] و همکاران [13] با افزودنی سرباره و خاکستر بادی به خمیر سیمان، شاهد افزایش تخلخل کل در سنین ابتدایی بوده و با افزایش سن نمونه و واکنش پوزولانی، پس از ۲۸ روز شاهد کاهش تخلخل کل نمونه‌های حاوی افزودنی معدنی نسبت به نمونه معمولی بوده‌اند. منهومان [۳] و مهتا [14] نیز با افزودن سرباره به خمیر سیمان، شاهد افزایش تخلخل کل و درعین حال ریزتر شدن منافذ بوده‌اند. همچنین پندی و شارما

1. Mindess
2. Li
3. Manmohan
4. Mehta
5. Pandey

[15] افزایش تخلخل کل در اثر اضافه کردن سرباره و خاکستر بادی به ملات‌های سیمانی در سنین ابتدایی را اعلام کرده‌اند. پون^۲ و همکاران [16] با اضافه کردن خاکستر بادی، متاکائولن و دوده سیلیس به بتن، ساختار منافذ آن را بررسی کردند. طبق پژوهش آن‌ها، افزودن تمام مواد افزودنی معدنی سبب تغییر در ساختار منافذ بتن شده است به طوری که سبب ریزتر شدن منافذ شده است.

تغییر در ساختار منافذ خمیر سیمان منجر به تغییر مقدار ضریب انبساط حرارتی آن می‌شود. شوی^۳ و همکاران [17] با جایگزینی کردن خاکستر بادی و سرباره به خمیر سیمان شاهد تغییر در تخلخل و ضریب انبساط حرارتی خمیر بودند. با افزایش مقدار جایگزینی خاکستر بادی و سرباره شاهد کاهش تخلخل و با افزایش مقدار دوده سیلیس شاهد کاهش تخلخل بودند که دلیل این را کوچک‌تر بودن اندازه دوده سیلیس نسبت به سیمان و بهبود سرعت هیدراسیون سیمان و از طرفی کند بودن روند واکنش پوزولانی خاکستر بادی و سرباره ارائه کردند. از طرفی در خمیر حاوی خاکستر بادی و سرباره با افزایش تخلخل، شاهد کاهش ضریب انبساط حرارتی خمیر و در خمیر حاوی دوده سیلیس با افزایش تخلخل، شاهد افزایش ضریب انبساط حرارتی بودند.

گاو^۴ و همکاران [18] نیز دریافتند با افزودن خاکستر بادی به بتن سبب کاهش قابل توجه ضریب انبساط حرارتی شده اما اضافه کردن سرباره سبب افزایش در سنین ابتدایی شده است. اما با افزایش سن نمونه شاهد کاهش ضریب انبساط حرارتی بوده و این مقدار کاهش برای بتن حاوی سرباره بیشتر از بتن عادی بوده به طوری که در سن ۵۰ روز تقریباً برابر شده‌اند و کمترین مقدار کاهش مربوط به بتن حاوی خاکستر بادی است. پژوهش‌های دیگری در مورد اثر سن نمونه بر ضریب انبساط حرارتی انجام شده است که می‌توان به پژوهش ونه اشاره کرد. وی با اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی تا سن ۲۲ روز شاهد ثابت بودن این پارامتر بوده و هیچ تغییری ثبت نکرده است

[5]. در پژوهش دیگری آلونگه^۶ و همکاران [19] به بررسی ضریب انبساط حرارتی بتن‌های ساخته‌شده از ۳ نوع سنگدانه مختلف و ۳ مقدار مختلف برای مقدار سیمان در نسبت‌های مختلف آب به سیمان پرداخته‌اند. با اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی بتن در حالت اشباع، یکسان بودن ضریب انبساط حرارتی بتن در سن ۲۸ روز و ۹۰ روز برای تمامی نمونه‌ها مشاهده شده است.

همچنین اثر افزودنی‌های معدنی بر مقاومت فشاری، تخلخل و ساختار تخلخل بتن و خمیر سیمانی، پژوهش بسیاری از محققان بوده است. افزودنی‌های معدنی با انجام واکنش پوزولانی، سبب تغییر در ساختار فیزیکی و شیمیایی خمیر سیمان و ناحیه انتقالی میان خمیر و سنگدانه در بتن شده به طوری که سبب بهبود خواص مکانیکی و دوامی بتن می‌شوند [20-24].

در این پژوهش به منظور بررسی اثر خمیر سیمان بر ضریب انبساط حرارتی بتن، با افزودنی دوده سیلیس، متاکائولن و سرباره به بتن و خمیر سیمان، روند تغییر تخلخل بتن و خمیر، به سبب هیدراسیون و واکنش‌های پوزولانی و همچنین تغییرات ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر در طول زمان بررسی شده است. همچنین با هدف پیش‌بینی ضریب انبساط حرارتی بتن در سنین مختلف، مدلی برای بتن بدون افزودنی معدنی و بتن با افزودنی معدنی با استفاده از ضریب انبساط حرارتی آن در سن ۷ روز ارائه شده است تا ضریب انبساط حرارتی بتن در سن دلخواه پیش‌بینی شود. به این منظور، مخلوط‌های بتن و خمیر بدون افزودنی معدنی و مخلوط‌های حاوی افزودنی معدنی دوده سیلیس، حاوی متاکائولن، حاوی هم‌زمان دوده سیلیس و متاکائولن و حاوی سرباره ساخته‌شده و از سن ۷ روز تا ۱۲۰ روز بررسی شده است. همچنین با به دست آوردن توزیع اندازه تخلخل بتن، ارتباط بین اندازه منافذ بتن و ضریب انبساط حرارتی آن بررسی شده است.

1. Sharma
2. Poon
3. Shui
4. Gao
5. Won

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

در این پژوهش از سیمان تیپ ۲ با چگالی 3150 Kg/m^3 که طبق استاندارد ASTM C188 [25] اندازه‌گیری شده، استفاده شده است. افزودنی‌های معدنی استفاده شده در این پژوهش دوده سیلیس با چگالی 2200 Kg/m^3 ، متاکائولن با چگالی 2500 Kg/m^3 و سرباره کوره آهن‌گدازی با چگالی 2700 Kg/m^3 بوده است. مشخصات شیمیایی سیمان و افزودنی‌های معدنی در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۲- نسبت مخلوط بتن‌ها و خمیرها

در این پژوهش ۵ مخلوط مختلف بتنی C، C-MK، C-SF، C-SL و C-MK در ترتیب معرف بتن معمولی، بتن حاوی دوده سیلیس، حاوی متاکائولن، حاوی هم‌زمان دوده سیلیس و متاکائولن و مخلوط بتن حاوی سرباره هستند ساخته شده‌اند. همچنین ۵ مخلوط خمیر (ترکیب آب و مواد سیمانی بدون هیچ‌گونه سنگ‌دانه) متناسب با هر بتن با نسبت آب به سیمان و درصد مشارکت افزودنی‌های معدنی یکسان ساخته شده است. نسبت آب به مواد سیمانی در تمامی نمونه‌های بتن و خمیر 0.45 ثابت در نظر گرفته شده است. مقدار مواد سیمانی در نمونه‌های بتنی به ازای هر مترمکعب 400 کیلوگرم در نظر گرفته شده است. تمامی نمونه‌ها پس از ساخت به مدت 24 ساعت زیر گونی خیس و پس‌از آن تا رسیدن به سن آزمایش

در حوضچه آب‌آهک اشباع با دمای 21 درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند.

نسبت مخلوط بتن‌ها در جدول (۲) ارائه شده است. به منظور جلوگیری از کلوخه شدن دوده سیلیس در زمان اختلاط بتن و ناهمگن شدن مخلوط بتن، این ماده قبل از اضافه شدن به مخلوط بتنی در مقداری از آب اختلاط ریخته شده و پس از مخلوط شدن ترکیب دوده سیلیس و آب و تشکیل ژل دوده سیلیس، این ژل به دیگر مواد بتن داخل مخلوط‌کن اضافه و اختلاط انجام شده است.

جدول ۱. مشخصات شیمیایی سیمان و افزودنی‌های معدنی

Properties	Cement type II	Silica fume	Metakaolin	Slag
SiO_2	20.74	94	75.29	34.91
Al_2O_3	4.9	1	17.03	13.36
Fe_2O_3	3.5	0	0.54	0.54
CaO	62.95	1	1.34	37.57
MgO	1.2	0.6	0.7	5.2
SO_3	3	1.2	-	3.36
Na_2O	0.47	0.3	2.26	1.1
K_2O	0.58	0.37	0.84	1.1

Table 1. Chemical properties of cement and mineral admixtures

جدول ۲. نسبت مخلوط بتن‌ها

Mix ID	W/C	Binder	Cement	Silica fume	Metakaolin	Slag	Gravel	Sand	Slump (mm)
	(kg/m ³)								
C	0.45	400	400	0	0	0	1053	702	60
C-SF	0.45	400	368	32	0	0	1043	698	45
C-MK	0.45	400	320	0	80	0	1043	695	60
C-SF-MK	0.45	400	288	32	80	0	1036	691	40
C-SL	0.45	400	200	0	0	200	1037	691	70

Table 2. Concrete mix design

۲-۳-۲- آزمایش‌ها

۲-۳-۲-۲- تخلخل کل و مقاومت فشاری بتن و خمیر

برای اندازه‌گیری تخلخل بتن از استاندارد ASTM C642 [26] استفاده شده است. طبق این استاندارد در زمان موردنظر پس از خشک کردن نمونه در گرمخانه با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد، وزن آن را اندازه‌گیری کرده (A) و بعد از خنک شدن نمونه در هوای آزاد، آن را به مدت حداقل ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار داده و پس از اشباع شدن کامل سطح آن را خشک کرده و وزن حالت اشباع با سطح خشک اندازه‌گیری شده است (B)، در ادامه نمونه را در آب در حال جوش قرار داده و پس از ۵ ساعت وزن اشباع با سطح خشک نمونه پس از قرارگیری در آب جوش نیز اندازه‌گیری شده است (B). سپس وزن نمونه را به حالت غوطه‌وری اندازه‌گیری کرده (C) و طبق رابطه ۱ مقدار تخلخل کل نمونه محاسبه شده است. این آزمایش در سن ۷، ۲۸، ۵۶ و ۱۲۰ روز انجام شده است.

$$(1) \quad \text{تخلخل کل بتن} = \frac{(B - A)}{(B - C)} \times 100$$

که در این رابطه، A وزن نمونه در حالت کاملاً خشک، B وزن نمونه در حالت اشباع با سطح خشک پس از ۲۴ ساعت قرارگیری در آب و ۵ ساعت قرارگیری در آب جوش و C وزن غوطه‌وری نمونه است.

برای محاسبه تخلخل خمیر، از روش تزریق گاز نیتروژن استفاده شده است به صورتی که نمونه استوانه‌ای به قطر ۲/۵ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر ساخته شده و پس از محاسبه حجم، گاز نیتروژن به درون نمونه تزریق شده طبق رابطه (۲)، تخلخل به دست آمده است.

$$(2) \quad \text{تخلخل کل خمیر} = \frac{V_g}{V_1} \times 100$$

که در این رابطه، V_g حجم گاز نیتروژن وارد شده به نمونه و V_1 حجم نمونه خمیر است.

آزمایش مقاومت فشاری برای بتن روی نمونه‌های مکعبی به ابعاد $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و برای خمیر به ابعاد $5 \times 5 \times 5$ سانتی‌متر انجام شده است.

۲-۳-۲- توزیع اندازه تخلخل (MIP)

به منظور بررسی اثر توزیع اندازه تخلخل بر انبساط حرارتی، در سن ۲۸ روز نمونه‌هایی با ابعاد ۵ میلی‌متر از بتن به گونه‌ای که درشت‌دانه در آن‌ها نباشد، جدا شده و آزمایش تخلخل سنجی با جیوه روی این نمونه‌ها انجام شده است. نمونه‌ها قبل از آزمایش به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه داخل گرمخانه خشک شده و تا زمان آزمایش در دسیکاتور نگهداری شده‌اند. در این آزمایش، منافذ بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر قابل‌دسترسی بوده‌اند.

۲-۳-۳- ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر

ضریب انبساط حرارتی نمونه‌های بتن و خمیر طبق استاندارد TI-B 101 اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی هر مخلوط بتنی، دو نمونه منشوری با ابعاد $40 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر و برای خمیر سیمان ۲ نمونه منشوری با ابعاد $28 \times 2/5 \times 2/5$ سانتی‌متر ساخته شده و از سن ۷ روز تا ۱۲۰ روز به فاصله هر ۷ روز، ضریب انبساط حرارتی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. طبق استاندارد TI-B 101، با قرار دادن نمونه داخل آب با دمای ۲۰ درجه و رسیدن به تعادل گرمایی، ۲ شاخص فلزی (دمک) در ۱۰ سانتی‌متر میانی نمونه چسبانده شده سپس دمای آب اطراف نمونه تغییر و در دمای ۵ و ۳۰ درجه سانتی‌گراد، پس از رسیدن به تعادل گرمایی، فاصله بین شاخص‌های فلزی قرائت شده است. به منظور اطمینان از رسیدن به تعادل گرمایی، پس از تغییر دمای آب، به فاصله هر ۱۵ دقیقه فاصله بین شاخص‌های فلزی قرائت شده و پس از ثابت ماندن این طول طی ۲ قرائت متوالی، این عدد به عنوان طول نمونه در آن دما ثبت شده است و در نهایت، ضریب انبساط حرارتی (CTE) طبق رابطه (۳) به دست آمده است. لازم به ذکر است که این ضریب در دو مسیر افزایش دما و کاهش دما اندازه‌گیری و در صورت وجود اختلاف، آزمایش مجدد انجام شده است. نمونه‌ها پس از انجام هر آزمایش، تا نوبت بعدی آزمایش (۷ روز بعد) در حوضچه عمل‌آوری

اثر افزودنی‌های معدنی بر ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر سیمان قرار گرفته‌اند. چگونگی اندازه‌گیری تغییر طول در شکل (۱) ارائه شده است.

$$CTE = \frac{1}{L_0} \frac{\Delta L}{\Delta \theta} \quad (3)$$

که در این رابطه، ΔL تغییرات طول برحسب میکرومتر، L_0 طول اولیه برحسب متر، $\Delta \theta$ تغییرات دما برحسب درجه سانتی‌گراد و CTE ضریب انبساط حرارتی برحسب میکرو کرنش بر درجه سانتی‌گراد است.

شکل ۱. اندازه‌گیری تغییر طول بتن و خمیر



Fig. 1. Measuring length change of concrete and cement paste

۳-۳- نتایج و تحلیل

۳-۳-۱. تخلخل کل و مقاومت فشاری

درصد جذب آب نمونه‌های بتن و خمیر در شکل (۱) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در نمونه‌های بتن جذب آب نمونه‌های حاوی افزودنی معدنی دوده سیلیس و متاکائولن، کمتر از نمونه‌ی بدون افزودنی معدنی بوده است. از

طرف دیگر، نمونه حاوی سرباره، جذب آب بالاتری نسبت به بتن بدون افزودنی معدنی داشته است. اما با افزایش سن نمونه و واکنش پوزولانی آن، در سن نهایی جذب آب نهایی آن نزدیک به دیگر بتن‌ها شده است. از طرف دیگر در نمونه‌های خمیر ملاحظه می‌شود که جذب آب خمیر حاوی سرباره بیشترین مقدار در بین خمیرها بوده و جذب آب خمیر حاوی دوده سیلیس کمترین مقدار است.

علاوه بر این مشاهده می‌شود که جذب آب خمیر حاوی متاکائولن، بیشتر از خمیر بدون افزودنی معدنی است. در صورتی‌که جذب آب بتن حاوی متاکائولن، کمتر از بتن بدون افزودنی معدنی بوده است.

مقدار تخلخل کل نمونه‌های بتن و خمیر در سنین مختلف در شکل (۲) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با اضافه کردن دوده سیلیس و متاکائولن به بتن، مقدار تخلخل کل بتن نسبت به بتن معمولی در تمامی سنین کمتر است. اما با اضافه کردن سرباره به بتن، در سنین اولیه سبب افزایش تخلخل کل بتن شده است و در سنین نهایی با انجام واکنش پوزولانی، تخلخل آن کاهش یافته است. از طرف دیگر در خمیرها، نتایج متفاوت با بتن مشاهده شده است. بیشترین تفاوت مربوط به خمیر حاوی متاکائولن بوده که در این خمیر نسبت به خمیر ساده، افزایش تخلخل در تمامی سنین دیده شده است.

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن و خمیر در شکل (۳) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی دوده سیلیس و متاکائولن در تمامی سنین بیشتر از بتن ساده بوده است. همچنین مقاومت فشاری بتن حاوی سرباره کمی کمتر از بتن ساده بوده است. از طرف دیگر در ارتباط با خمیر، خمیرهای حاوی افزودنی معدنی در سنین ابتدایی مقاومت کمتری نسبت به خمیر ساده داشته‌اند و با افزایش سن نمونه، مقاومت فشاری آن‌ها افزایش بیشتری نسب به خمیر ساده داشته به‌طوری‌که در سنین نهایی دارای مقاومت بیشتری بوده‌اند. در این میان بیشترین رشد مقاومت مربوط به خمیر حاوی سرباره بوده است که از سن ۷ تا ۱۲۰ روز، شاهد رشد ۱۰۰ درصدی بوده است.

با مقایسه تخلخل و مقاومت فشاری نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که در نمونه‌های بتن، با کاهش تخلخل نمونه، مقاومت فشاری آن

سرباره، منافذ درشت‌تر شده‌اند به طوری که حجم منافذ درشت، بیشتر و حجم منافذ کوچک، کمتر شده است.

جدول ۳. نتایج توزیع تخلخل نمونه‌های بتنی

Mix ID	Small pore (mm ³ /g)	Medium pore (mm ³ /g)	Total pore (mm ³ /g)	D50
C	23	45	68	96
C-SF	39	24	63	35
C-MK	35	25	60	31
C-SF-MK	36	25	61	28
C-SL	18	53	71	113

Table. 3. Pore size distribution of concrete

افزایش یافته است. اما در نمونه‌های خمیر، این ارتباط مشاهده نشده است به طوری که برای نمونه خمیر حاوی دوده سیلیس، در سن ۷ روز، با وجود کمتر بودن میزان تخلخل، مقاومت فشاری آن نیز نسبت به خمیر ساده کمتر بوده است.

۳-۲. توزیع اندازه تخلخل

در جدول (۳)، حجم منافذ مویینه بزرگ (۵۰ تا ۱۰۰۰ نانومتر) و مویینه کوچک (۱۰ تا ۵۰ نانومتر)، اندازه میانه منافذ (اندازه منفذ با ۵۰ درصد حجم تجمعی) و حجم کلی منافذ ارائه شده است. در بتن‌های حاوی دوده سیلیس و متاکائولن، کوچک شدن منافذ مشاهده می‌شود به طوری که از حجم منافذ بزرگ کم و به حجم منافذ کوچک اضافه شده است. اما در بتن حاوی

شکل ۲. اثر سن نمونه بر تخلخل کل

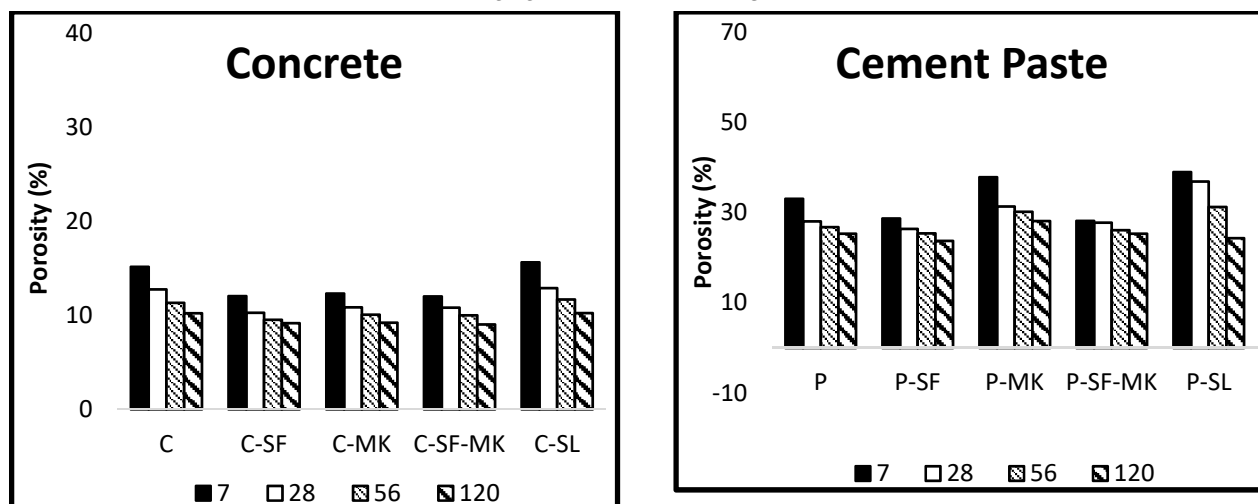


Fig. 2. Effect of age on Porosity

شکل ۳. اثر سن نمونه بر مقاومت فشاری

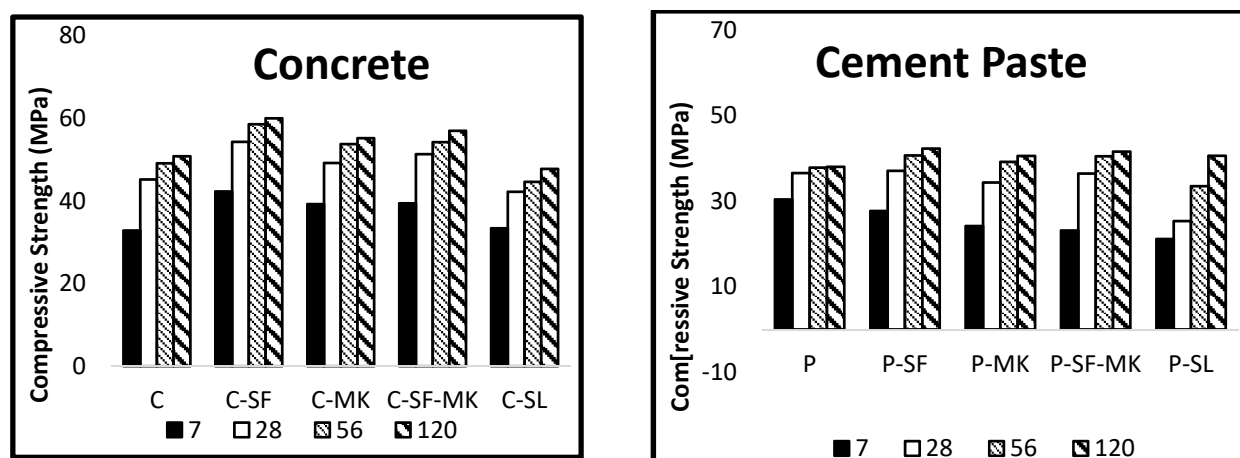


Fig. 3. Effect of age on Compressive Strength

۳-۳-۳. ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر

با اندازه‌گیری ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر در فواصل زمانی ۷ روز، تغییرات ضریب انبساط حرارتی در طول زمان اندازه‌گیری شده و روند زمانی ضریب انبساط حرارتی برای خمیر و بتن در شکل (۴) نشان داده شده است. مشخص است که با گذشت زمان و افزایش سن نمونه، ضریب انبساط حرارتی در بتن و خمیر کاهش می‌یابد اما این مقدار کاهش برای بتن‌های مختلف متفاوت است. بتن حاوی دوده سیلیس و متاکائولن در سنین ابتدایی در وضعیت مطلوب‌تر نسبت به بتن معمولی و بتن سرباره‌ای بوده و با افزایش سن نمونه، تغییر چشمگیری در مقدار ضریب انبساط حرارتی مشاهده نشده است. اما برای بتن معمولی که در ابتدا وضعیت مطلوبی نداشته است، با زیاد شدن سن نمونه، کاهش چشمگیری در ضریب انبساط حرارتی مشاهده شده است، به گونه‌ای که با گذشت ۶۰ روز از سن نمونه، حدود ۱۵٪ ضریب انبساط حرارتی کاهش یافته است. از طرف دیگر برای بتن حاوی سرباره، تا سن ۶۰ روز تغییر چشمگیری مشاهده نشده است اما پس از ۶۰ روز تا ۱۲۰ روز شیب کاهشی منحنی زیادت‌تر شده و تا ۱۲۰ روز حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است.

همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، تغییرات ضریب انبساط حرارتی بتن و خمیر با یکدیگر متفاوت است که این تفاوت می‌تواند به دلیل وجود رفتار متفاوت سنگ‌دانه و همچنین وجود ناحیه انتقالی در بتن باشد. ضریب انبساط حرارتی بتن حاوی متاکائولن در تمامی سنین به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کمتر از بتن معمولی بوده است. اما از سوی دیگر، ضریب انبساط حرارتی خمیر حاوی متاکائولن در سنین ابتدایی تنها کمی کمتر از خمیر معمولی بوده و از سن ۴۰ روز به بعد ضریب انبساط حرارتی خمیر معمولی کمتر از خمیر حاوی متاکائولن شده است. مشخص است که متاکائولن در بتن موجب بهبود زیادی شده است اما در خمیر نتوانسته است بهبودی حاصل کند. این امر می‌تواند به دلیل نقش بسیار مثبت متاکائولن در ناحیه انتقالی و بهبود این ناحیه باشد.

طبق راهنمای ارائه شده توسط بامفورث^۱ و همکاران [27] برای طراحی بتن طبق استاندارد اروپا، ضریب انبساط حرارتی بتن ساخته شده با سنگ‌دانه آهکی در طراحی، ۹ میکروکرنش بر درجه سانتی گراد در نظر گرفته شده است که طبق شکل (۳)، مشاهده می‌شود ضریب انبساط حرارتی بتن‌های این پژوهش در سن نهایی در همین محدوده قرار گرفته است

جدول ۴. ضریب انبساط حرارتی بتن در سن ۷، ۶۰ و ۱۲۰ روز

Mix ID	CTE (microstrain/°C)		
	Age (day)		
	7	60	120
C	10.83	9.55	9.32
C-SF	9.12	8.63	8.5
C-MK	9.62	8.92	8.83
C-SF-MK	9.29	8.66	8.41
C-SL	11.02	10.73	9.91

Table 4. CTE of Concrete at age 7, 28 and 120 days

جدول ۵. ضریب انبساط حرارتی خمیر در سن ۷، ۶۰ و ۱۲۰ روز

Mix ID	CTE (microstrain/°C)		
	Age (day)		
	7	60	120
P	21.89	19.35	19.18
P-SF	17.92	17.35	17.17
P-MK	21.31	19.83	19.72
P-SF-MK	19.16	18.05	17.91
P-SL	23.46	21.96	21.56

Table 5. CTE of Cement Paste at age 7, 28 and 120 days

با بررسی ضریب انبساط حرارتی و تخلخل نمونه‌های بتنی می‌توان مشاهده کرد که در تمامی نمونه‌ها با افزایش تخلخل، ضریب انبساط حرارتی افزایش یافته است اما این وابستگی یکسان نبوده و برای بتن‌های متفاوت، مختلف است. همچنین مشخص است که ارتباط قوی میان تخلخل بتن و ضریب انبساط حرارتی آن به‌طوری‌که بتوان با داشتن تخلخل، ضریب انبساط حرارتی را تخمین زد وجود ندارد.

با مقایسه انبساط حرارتی بتن و قطر میانه منافذ (D50) در سن ۲۸ روز مشاهده می‌شود که با کاهش قطر میانه منافذ، ضریب انبساط حرارتی بتن کاهش می‌یابد. این روند در شکل (۵) مشاهده می‌شود. مشخص است که ارتباط قوی میان قطر میانه منافذ و ضریب انبساط حرارتی بتن وجود دارد

شکل ۴. اثر سن نمونه بر ضریب انبساط حرارتی

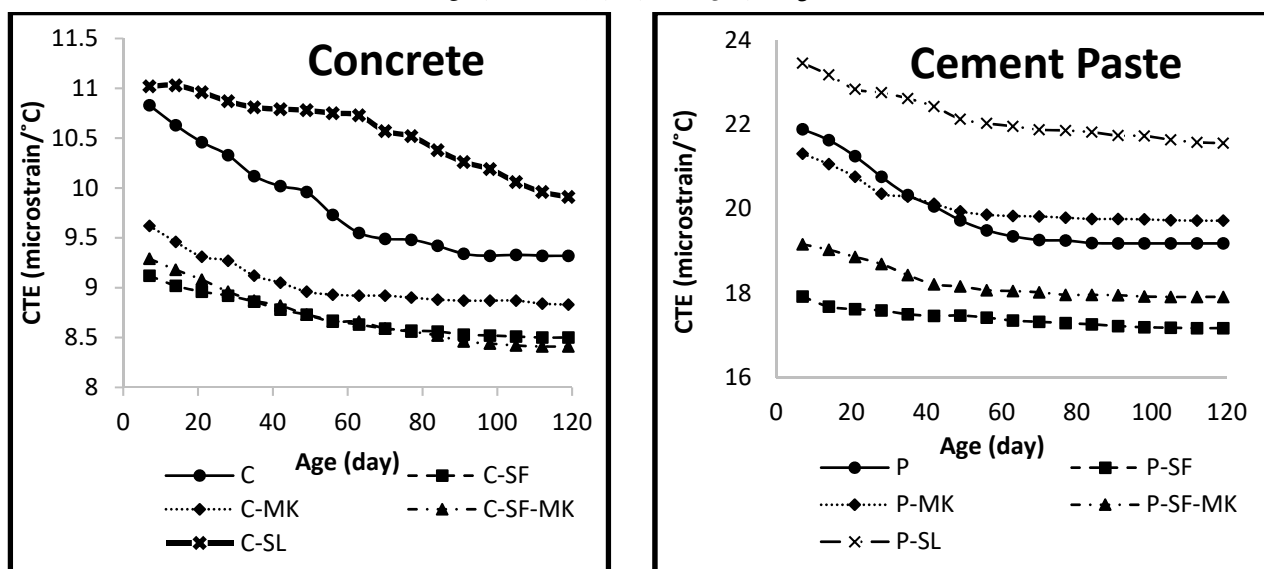


Fig. 4. Effect of age on Coefficient of thermal expansion

شروع به خارج شدن از حفرها می‌کند، همچنین به دلیل بیشتر شدن فشار حفرهای ریزتر، آب از سمت حفرهای ریزتر به سمت حفرهای درشت‌تر حرکت می‌کند که باعث جمع شدگی ناشی از افزایش دما می‌شود. از نتیجه پژوهش بازانت می‌توان این موضوع را برداشت کرد که هرچه حفرها داخل بتن ریزتر باشد، میزان جمع شدگی پس از انبساط، بیشتر است و می‌تواند تا حدی انبساط حرارتی را کاهش دهد. در این پژوهش با اندازه‌گیری قطر میانه منافذ که نشان دهنده میزان ریز بودن منافذ است مشاهده شده است که با کاهش قطر میانه منافذ، ضریب انبساط حرارتی کاهش یافته است.

۳-۳-۴. پیش‌بینی ضریب انبساط حرارتی بتن

پیش‌بینی خواص بتن همواره یکی از دغدغه‌های پروژه‌های عمرانی بوده است. از این‌رو با استفاده از نرم‌افزار Minitab، بر روی داده‌های موجود برازش منحنی انجام شده تا بتوان با داشتن ضریب انبساط حرارتی بتن در سن ۷ روز، این ضریب را در سنین مختلف را پیش‌بینی کرد. مشاهده می‌شود که روند زمانی ضریب انبساط حرارتی برای بتن معمولی و بتن حاوی افزودنی معدنی متفاوت است. از این‌رو با معادله (۵) برای بتن معمولی و رابطه (۶) برای بتن حاوی افزودنی معدنی تخمین زده شده است. به منظور ارزیابی مدل، از داده‌های مربوط به هر بتن، ۳ داده به

شکل ۵. ارتباط بین تخلخل و ضریب انبساط حرارتی در بتن

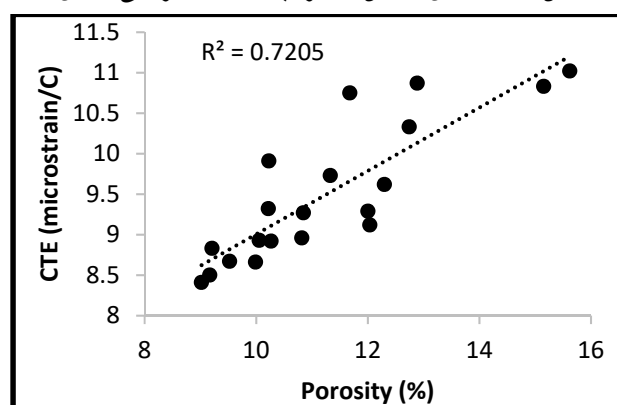


Fig. 5. Relation between Porosity and CTE of concrete

شکل ۶. ارتباط ضریب انبساط حرارتی بتن با قطر میانه منافذ

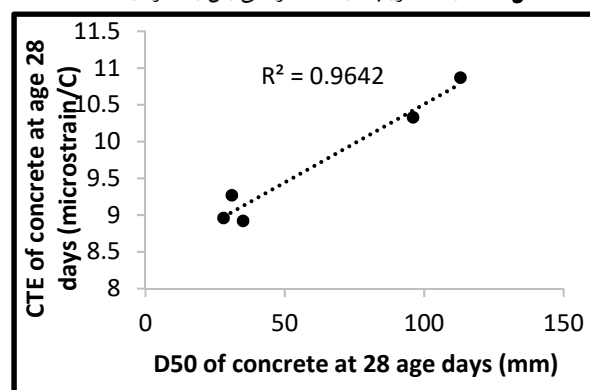


Fig. 6. Relation between D50 and CTE of concrete

بنابر نظر بازانت [6] در اثر افزایش دمای بتن، پس از افزایش حجم، به دلیل افزایش فشار آب داخل حفرهای بتن، آب

شکل ۷. مقایسه ضریب انبساط حرارتی بتن بدون افزودنی معدنی تخمین زده شده توسط رابطه ۵ و مقدار آزمایشگاهی

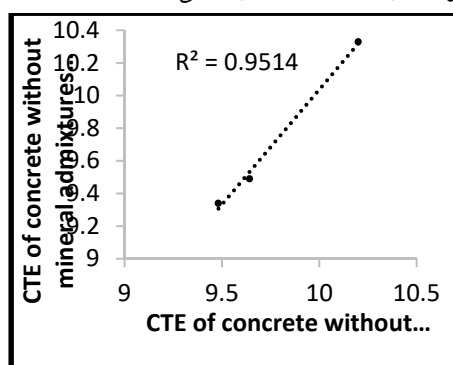


Fig. 7. Comparing the experimental CTE of concrete without mineral admixtures and output of Eq. 5

شکل ۸. مقایسه ضریب انبساط حرارتی بتن حاوی افزودنی معدنی تخمین زده شده توسط رابطه ۶ و مقدار آزمایشگاهی

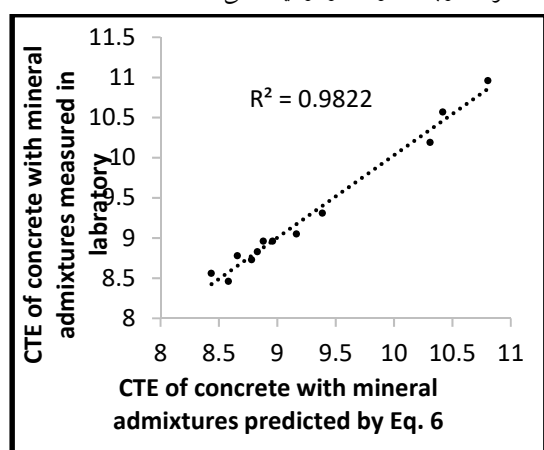


Fig. 8. Comparing the experimental CTE of concrete with mineral admixtures and output of Eq. 6

۴. نتیجه‌گیری

بر اساس بررسی‌ها و آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، موارد زیر نتیجه‌گیری می‌شود:

۱. جایگزین کردن دوده سیلیس و متاکائولن سبب کاهش ضریب انبساط حرارتی بتن در سنین اولیه نسبت به بتن معمولی شده است. این امر به سبب کاهش حجم حفره‌های داخل بتن و همچنین ریزتر کردن ساختار حفره‌های بتن است. اما جایگزین کردن سرباره به علت افزایش حجم حفره‌ها و درشت‌تر کردن ساختار حفره‌ها، سبب افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن در سنین اولیه شده است.

۲. باگذشت زمان و افزایش سن نمونه، ضریب انبساط حرارتی بتن بدون افزودنی معدنی تا سن ۶۰ روز ۱۲٪ کاهش یافته است. اما برای بتن‌های حاوی دوده سیلیس و متاکائولن، باگذشت زمان

صورت تصادفی در سنین مختلف که در جدول (۶) ارائه شده‌اند برای ارزیابی ذخیره و داده‌های دیگر برای ایجاد و آموزش مدل استفاده شده است.

جدول ۶. داده‌های استفاده شده برای ارزیابی روابط ۵ و ۶

Mix ID	Age (day)
C	28
	63
	77
C-SF	21
	42
	84
C-MK	21
	42
	119
C-SF-MK	28
	49
	91
C-SL	21
	70
	98

Table 6. Data for evaluating Eqs. 5 and 6

$$CTE_t = 1.02CTE_7 - 0.61Ln\left(\frac{t}{7}\right) \quad (5)$$

$$CTE_t = 1.01CTE_7 - 0.32Ln\left(\frac{t}{7}\right) \quad (6)$$

که در این روابط: CTE_7 ضریب انبساط حرارتی در سن ۷ روز، t سن نمونه به روز و CTE_t ضریب انبساط حرارتی در سن موردنظر است.

به‌منظور ارزیابی روابط (۵ و ۶)، داده‌های ذخیره شده برای ارزیابی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل در سن متناظر برای بتن بدون افزودنی معدنی در شکل (۷) و برای بتن حاوی افزودنی معدنی در شکل (۸) رسم و مقایسه شده‌اند. ملاحظه می‌شود که ضریب همبستگی مقادیر پیش‌بینی شده و مقادیر اندازه‌گیری شده بالا و خطای روابط، کم بوده و مدل توانسته است به خوبی ضریب انبساط حرارتی بتن در سنین مختلف را پیش‌بینی کند.

- transport. *Nuclear Engineering and Design*, 14(2), 308-318.
- [7] Xuan, D. X., Shui, Z. H., & Cao, B. B. 2007. Investigation on Thermal Deformation Divergence Between Components of Cement-basted Materials [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 1.
- [8] Sellevold, E. J., & Bjøntegaard, Ø. 2006. Coefficient of thermal expansion of cement paste and concrete: Mechanisms of moisture interaction. *Materials and Structures*, 39(9), 809-815.
- [9] Darwin, D., Mindess, S., & Young, J. F. 2003. Concrete.
- [10] Cwirzen, A., & Penttala, V. 2005. Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 671-679.
- [11] Frias, M., & Cabrera, J. 2000. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin-cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 561-569.
- [12] Khatib, J. M., & Wild, S. 1996. Pore size distribution of metakaolin paste. *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1545-1553.
- [13] Li, Y. X., Chen, Y. M., Wei, J. X., He, X. Y., Zhang, H. T., & Zhang, W. S. 2006. A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1740-1743.
- [14] Manmohan, D., & Mehta, P. K. 1981. Influence of pozzolanic, slag, and chemical admixtures on pore size distribution and permeability of hardened cement pastes. *Cement, Concrete and Aggregates*, 3(1), 63-67.
- [15] Pandey, S. P., & Sharma, R. L. 2000. The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 19-23.
- [16] Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C., Wong, Y. L., & Wong, R. 2001. Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1301-1306.
- [17] Shui, Z. H., Zhang, R., Chen, W., & Xuan, D. X. 2010. Effects of mineral admixtures on the thermal expansion properties of hardened cement paste. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1761-1767.
- [18] Gao, G. B., Qian, C. X., & Wang, Y. W. 2012. Effect of Fly Ash and Slag Powder on Coefficient of Thermal Expansion of Concrete.
- کاهش ۸ درصدی مشاهده شده است. برای بتن حاوی سرباره، تا سن ۶۰ روز تغییری مشاهده نشده است اما پس از آن تا سن ۱۲۰ روز، ۱۰٪ کاهش در ضریب انبساط حرارتی مشاهده شده است.
۳. ضریب انبساط حرارتی خمیر سیمان در حدود ۲ برابر ضریب انبساط حرارتی بتن متناظر با آن است و تغییرات آن با افزایش سن نمونه و واکنش هیدراسیون و واکنش پوزولانی، متفاوت است. ضریب انبساط حرارتی خمیر حاوی متاکائولن نزدیک به ضریب انبساط حرارتی خمیر بدون افزودنی معدنی بوده است. این در حالی است که ضریب انبساط حرارتی بتن حاوی متاکائولن کمتر از ضریب انبساط حرارتی بتن بدون افزودنی معدنی است. این امر می‌تواند وجود ناحیه انتقالی در بتن و نقش بسیار مؤثر متاکائولن در ناحیه انتقالی باشد.
۴. در نمونه‌های بتن، با کاهش تخلخل کل و افزایش در مقاومت فشاری، کاهش در ضریب انبساط حرارتی مشاهده شده است. همچنین با کاهش قطر منافذ بتن، ضریب انبساط حرارتی کاهش یافته است به طوری که ارتباط قوی بین قطر میانه منافذ و ضریب انبساط حرارتی بتن قابل مشاهده است.

۵. مراجع

- [1] Yang, J., & Kim, S. H. 2014 Factorial effects of mix design variables on the coefficient of thermal expansion of concrete mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 15(4), 942-952.
- [2] AASHTO, 2000. Standard method of test for coefficient of thermal expansion of hydraulic cement concrete..
- [3] TI-B 101 (94) Test Method Expansion Coefficient of Concrete." Danish Technological Institute, M.
- [4] Lukefahr, E., & Du, L. 2010. Coefficients of Thermal Expansion of Concrete with Different Coarse Aggregates-Texas Data. *Journal of Testing and Evaluation*, 38(6), 683-690.
- [5] Won, M. 2005. Improvements of testing procedures for concrete coefficient of thermal expansion. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1919), 23-28.
- [6] Bažant, Z. P. 1970. Delayed thermal dilatations of cement paste and concrete due to mass

- [23] Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. 2006. Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete. *Construction and building materials*, 20(10), 858-865.
- [24] Igarashi, S. I., Kawamura, M., & Watanabe, A. 2004. Analysis of cement pastes and mortars by a combination of backscatter-based SEM image analysis and calculations based on the Powers model. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 977-985.
- [25] ASTM. 2009. Standard test method for density of hydraulic cement.
- [26] Astm, C. 2006. 642, Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete. Annual book of ASTM standards, 4, 02.
- [27] Bamforth, P., et al., Properties of Concrete for use in Eurocode 2. 2008.
- Advanced Materials Research* (Vol. 374, pp. 1230-1234). Trans Tech Publications.
- [19] Alungbe, G. D., Tia, M. A. N. G., & Bloomquist, D. G. 1992. Effect of aggregate, water-cement ratio, and curing on the coefficient of linear thermal expansion of concrete. *Journal of the Transportation Research Record*, 1335, 44-51.
- [20] Bredy, P., Chabannet, M., & Pera, J. 1988. Microstructure and porosity of metakaolin blended cements. MRS Online Proceedings Library Archive, 136.
- [21] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., & Shen, C. 2013. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 1-6.
- [22] Gonen, T., & Yazicioglu, S. 2007. The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Building and Environment*, 42(8), 3080-3085.

Effect of mineral admixtures on coefficient of thermal expansion of concrete and cement paste

Parviz Ghoddousi¹, Ali Akbar Shirzadi Javid², Mohammad Ali Etebari Ghasbeh³

1. Professor, Iran University of Science and Technology, School of Civil Engineering
2. Assistant professor, Iran University of Science and Technology, School of Civil Engineering
3. Master Student, Iran University of Science and Technology, School of Civil Engineering

Abstract

Change in the concrete temperature causes the expansion of the concrete to become tensile stress especially in structures such as concrete pavements which are long. Length change in concrete structures is caused by thermal change is related to length, change in temperature, and coefficient of thermal expansion (CTE) of concrete. The risk of concrete cracking decreases with decreasing CTE under temperature changes. In this research, in order to investigate the effect of mineral admixtures on the coefficient of thermal expansion, five concrete and cement paste samples (reference, containing silica fume, containing metakaolin, containing silica fume and metakaolin, and containing slag) with a constant ratio of water to cement materials (0.45) and the amount of cement materials (400Kg/m^3) are made, and compressive strength and total porosity on 7, 28, 56, and 120 days, pore size distribution on 28 days age, and coefficient of thermal expansion of the samples from 7 days to 120 days each 7 days are examined. All specimens were kept in water tank for curing until the time for each test. For testing CTE, specimens were returned to water tank after each test. The results indicated that by ageing, in both paste and concrete samples, compressive strength increased and porosity decreased. This rate of change was higher in reference concrete and concrete containing slag. In concretes and pastes containing silica fume, better porosity and compressive strength was observed. It also was seen that although the paste containing metakaolin had more porosity than reference paste, reverse trend was observed in concrete samples. It shows that metakaolin did not have much effect on paste but it was very effective on the interfacial transition zone in concrete. In addition, by looking on CTE of concretes and pastes until 120 days, CTE of reference concrete had a descending trend up to 60 days, and diminished by 12%, after which it remained constant. On the other hand, in the slag-containing concrete, after 60 days, the descending trend started and declined by 10% up to 120 days. For the concrete containing silica and metakaolin, at the very early ages, it had 14% less CTE as compared to reference concrete, while with the ageing of the sample, its CTE dropped by around 8%. Across all concretes, reduction of CTE was associated with lowered total porosity. Utilize the experimental data, two models in order to different behavior of concrete with and without mineral admixtures for predicting the coefficient of thermal expansion of them at different ages is presented using coefficient of thermal expansion of concrete at 7-days age. For evaluating models, 3 data for each mix design separated and models were examined with them. It was shown that CTE of concrete can be well estimated. In the following, the relationship between CTE and total porosity and the average diameter of pores has been investigated, which was observed that by decreasing the total porosity and the average diameter of pores, CTE was reduced too. The highest correlation was also found between the coefficient of thermal expansion and the diameter of pores.

Keywords: Coefficient of Thermal Expansion, Concrete, Cement Paste, Mineral Admixtures