

مطالعه تجربی و ارزیابی عددی مشخصات حرارتی بتن حجیم خودتراکم

محمود نیلی *

دانشیار مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

امیرحسین قربانخانی

دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

چکیده

استفاده از بتن در سازه‌های خاص همواره با چالش‌هایی در اجرا مواجه است. در اعضای حجیم بتن مسلح با تراکم زیاد میلگرد استفاده از بتن خودتراکم باعث سهولت اجرا خواهد شد. از طرف دیگر افزایش مقدار سیمان جهت افزایش مقاومت، گرادیان حرارتی بین سطح و مرکز تنش حرارتی را افزایش خواهد داد و لذا شناخت رفتار حرارتی این بتن و ارزیابی ترک‌خوردگی ضروری است. در این مقاله مطالعه آزمایشگاهی مشخصات حرارتی و مکانیکی بتن خودتراکم حجیم و تحلیل تنش حرارتی انجام گرفته است. نتایج حاکی از آن است که به‌منظور کاربرد بتن خودتراکم در المان‌های حجیم پرمقاومت، این بتن در مقایسه با بتن معمولی علاوه بر مشخصات مکانیکی مطلوب‌تر در سطح و مرکز بتن حجیم، رژیم حرارتی متفاوت و مناسب‌تری داشته است. مقدار کرنش کمتر و افزایش زمان رخداد تبدیل تنش منجر به کاهش تنش حرارتی شده و در نهایت ریسک ترک‌خوردگی تاسی‌وشش درصد کاهش یافته است.

واژه‌های کلیدی: بتن حجیم، خودتراکم، مدول الاستیسیته، رژیم حرارتی، ریسک ترک‌خوردگی.

* نویسنده مسئول: nili36@yahoo.co.uk

۱- مقدمه

مقایسه با بتن معمولی می شود [4]. اگرچه پودر سنگ آهک فعالیت پوزولانی ندارد اما اثر پرکنندگی آن می تواند خمیر سیمان و منطقه انتقال در سطح بین ماتریس و سنگ دانه را متراکم تر کند و باعث بهبود عملکرد بتن شود [5]. همچنین پودر سنگ آهک می تواند درجه هیدراسیون سیمان را بهبود بخشد و با تولید C_3A و محصولات هیدراسیون بیشتر در سنین اولیه، منجر به کاهش تخلخل شود. اثر فیزیکی پودر سنگ آهک بدلیل تغییر توزیع اندازه ذرات و هسته زایی ناهمگن ایجاد می شود. پدیده هسته زایی غیرهمگن به این صورت تعریف شده است که در سیمان های پرتلند آهکی واکنشی بین C_3S و کرنات کلسیم انجام می شود و سبب افزایش سرعت هیدراسیون C_3S شده و نسبت کلسیم به سیلیس را در ژل CSH اصلاح می نماید و در نهایت منجر به تغییراتی در منافذ مویینه می شود. در نتیجه، اصلاح توزیع اندازه ذرات می تواند تولید C_3S را تسریع نموده، مقدار محصولات هیدراتاسیون را افزایش و تخلخل خمیر سیمان را در سنین اولیه کاهش دهد و خواص بتن را بهبود بخشد [6,7]. نتایج تحقیق های انجام شده حاکی از این واقعیت است که نسبت های مطلوب آب به سیمان بتن دامنه گسترده ای دارد. نسبت های کمتر و بیشتر از حد بهینه ممکن است باعث انسداد یا تفکیک مخلوط شود و خصوصیات مکانیکی بتن را کاهش دهد [8]. تاکنون تلاش های زیادی برای مشخص شدن پارامترهای تأثیرگذار روی بتن معمولی نیز انجام شده است. به عنوان مثال پارامترهایی مانند نسبت آب به سیمان، مقدار سیمان و خمیر سیمان، نوع مواد مکمل سیمانی، حجم سنگدانه، شکل و بافت سنگ دانه درشت و نوع مواد افزودنی که ممکن است بر خصوصیات و به ویژه رفتار حرارتی بتن تأثیر گذار باشد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بتن حجیم عموماً راهکار تعبیه لوله های سرد کننده جهت کاهش دمای هیدراسیون مورد استفاده قرار می گیرد اما این راهکارها عمدتاً باعث افزایش هزینه اجرایی شده و در بعضی موارد منجر به کاهش کیفیت بتن گردد [9-12]. راهکارهای معمول برای غلبه بر چالش های بتن حجیم استفاده از مواد افزودنی و کاهش مقدار سیمان است که با توجه به آن که در بعضی از سازه ها با توجه به نیاز به مقاومت زیاد باعث کاهش مقاومت شود ممکن است راهگشا واقع نشود. از سوی دیگر در برخی از سازه های با مقاطع حجیم مانند ستون های سازه های بلندمرتبه با تراکم بسیار زیاد میلگرد استفاده از

بتن با دارا بودن ویژگی های مطلوب فنی و اقتصادی پرکاربردترین مصالح ساختمانی در جهان است. با بهینه سازی طرح مخلوط بتن ویژگی های مورد نیاز مانند مقاومت و دوام ارتقا خواهد یافت اما همواره مهندسين با چالش هایی در اجرای سازه های بتنی مواجه هستند. یکی از این چالش ها حرارت هیدراسیون سیمان است که در سازه های حجیم منجر به بروز تنش حرارتی شده و در صورت عدم رعایت تمهیدات مقتضی ترک خوردگی ممکن است سازه را از سرویس دهی خارج کند. با افزایش نیاز به بتن های با مقاومت زیاد و استفاده در مقاطع با تراکم زیاد میلگرد، بتن خودتراکم (SCC) بعنوان بتنی که بدون تراکم تحت وزن خود در قالب جریان می یابد برای اولین بار در کشور ژاپن در اواخر دهه ۸۰ میلادی ابداع شد [1]. تحقیقات برای گسترش این نوع بتن توسط ازوا و ماکاو در دانشگاه توکیو به انجام رسید و امروزه چنین مشخصات اجرایی مطلوبی باعث شده است که کاربردهای جدید آن بخصوص در اعضای سازه ای با تراکم زیاد میلگرد روز به روز بیشتر شود [2]. طرح مخلوط بتن خودتراکم دارای مؤلفه های اساسی مشابه با بتن معمولی و بتن با کارایی بالا است، اگرچه به علت میزان بالای پرکننده نظیر پودر سنگ آهک، ساختار آن متفاوت خواهد بود. در سازه های بلندمرتبه با مقاطع بزرگ، استفاده از بتن بارده مقاومتی بالا بدلیل امکان بهینه سازی فنی و اقتصادی رواج یافته است و با وجود گسترش استفاده از بتن خودتراکم به دلیل عدم نیاز به تراکم در مقاطع در سازه های بلند با تراکم بسیار زیاد میلگرد، رفتارهای این نوع بتن به طور کامل در ساختارهای حجیم شناخته نشده است. تلاش های زیادی برای یافتن دلایل بهبود خواص مکانیکی SCC انجام شده است. برخی از محققان نسبت اجزای بتن خود تراکم به ویژه اثر پودر سنگ آهک را مورد بررسی قرار داده و برخی ریزساختار این نوع بتن را ارزیابی نموده و دلایلی همچون واکنش پوزولانی ثانویه، دارای خاصیت پلاستیسیته معدنی و تسریع واکنش ترکیب های سیمان را برای بهبود خصوصیات ارائه کرده اند [3]. استفاده از پودر سنگ در بتن خودتراکم منجر به اصلاح ریزساختار بتن می گردد و باعث می گردد سنگ دانه در خمیر سیمان توزیع یکنواخت تری پیدا کند و در نهایت منجر به توزیع مناسب تر تنش هنگام بارگذاری شده و باعث بهبود خواص مکانیکی SCC در

تأمین شده است. شن و ماسه مصرفی با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر از شرکت بتن صنعت پریس در همدان تهیه شده است. وزن مخصوص شن ریز، شن درشت و ماسه به ترتیب ۲/۶۴، ۲/۵۵ و ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب و جذب آب آن‌ها ۰/۵، ۰/۱ و ۲/۹ درصد تعیین شده است. پودر سنگ به میزان ۱۵ درصد وزنی مصالح سنگی به عنوان ماده اصلاح کننده لزجت مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور تنظیم کارآیی از فوق روان کننده بر پایه پلی‌کربوکسیلاتی شرکت LG با کد NE 320-P استفاده شده است.

۲-۲- برنامه ساخت

دوازده طرح مخلوط با سه نسبت آب به سیمان ۰/۳، ۰/۳۷ و ۰/۴۴ با دو مقدار سیمان ۴۱۸ و ۵۱۸ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن آماده شده است. طرح مخلوط بتن معمولی بر اساس روش ملی طرح مخلوط بتن ایران و بتن خودتراکم طبق ضوابط [22] EFNARC انجام شده است. در جدول ۱ مقادیر مصالح مصرفی در یک متر مکعب بتن در طرح‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۱- مقادیر مصالح مصرفی در هر متر مکعب بتن بر حسب کیلوگرم

نوع بتن	$\frac{w}{c}$	مقدار سیمان	آب	ماسه	شن ریز	شن درشت	پودر سنگ
N	0.44	418	184	1042	434	260	-
		518	228	921	384	230	-
	0.37	418	155	1088	453	271	-
		518	192	979	408	245	-
	0.3	418	125	1134	473	284	-
		518	155	1036	432	259	-
SCC	0.44	418	184	1032	258	172	258
		518	228	922	230	153	230
	0.37	418	155	1088	272	181	272
		518	192	979	245	163	245
	0.3	418	125	1134	284	189	284
		518	155	1036	286	173	286

در کدگذاری طرح‌ها به این صورت عمل شده است که N معرف بتن معمولی و SCC معرف بتن خود تراکم است. عدد اعشاری گویای نسبت آب به سیمان و عدد بعدی بیانگر مقدار سیمان کیلوگرم در هر متر مکعب بتن است. بعنوان مثال SCC-0.44-418 معرف بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ و مقدار سیمان ۴۱۸ کیلوگرم در یک متر مکعب بتن می‌باشد.

بتن خودتراکم اجتناب ناپذیر است. با وجود گسترش استفاده از بتن خودتراکم در المان‌های حجیم مانند ستون‌ها و دیواره‌های برشی سازه‌های بلند و برخی بتن‌ریزی‌های خاص با مقاومت بالا، تا کنون توافقی در خصوص پیش‌بینی رفتار حرارتی SCC حاصل نشده است و به تحقیقات بیشتری برای پاسخ به سولاتی که در بتن‌ریزی SCC ایجاد می‌شود نیاز است [13].

در سازه‌های حجیم افزایش دمای ناشی از هیدراسیون بدلیل ضریب هدایت حرارتی کم بتن در زمان کوتاهی به سطح منتقل نمی‌شود و اختلاف دمای بین سطح و مرکز (هسته) در صورت وجود گیرداری در قید تکیه‌گاه سازه منجر به کرنش حرارتی شده و با تبدیل به تنش حرارتی سازه را در معرض ریسک ترک قرار خواهد داد. این تنش حرارتی در صورتی که از مقاومت کششی بتن فراتر رود منجر به رخداد ترک شده و افزایش مشخصات مکانیکی بتن مانند مقاومت و مدول الاستیسیته می‌تواند این ریسک را کاهش دهد [14].

[15] روابط متعددی برای مشخصات مکانیکی بتن معمولی ارائه شده است اما بررسی صحت روابط و نسبت‌های آیین‌نامه‌ها مانند رابطه مقاومت فشاری با مدول الاستیسیته در خصوص بتن حجیم و خودتراکم موضوعی ارزشمند است که آیا امکان استفاده از این روابط با توجه به تفاوت اجزا و نسبت‌های این دو بتن و بخصوص در موضوع بتن حجیم وجود دارد یا خیر [16-18].

از منظر دوامی نیز موضوع ترک خوردگی حرارتی می‌تواند منجر به بروز مخاطرات دوامی شود و سرویس‌دهی سازه را با ورود مواد مضر مختل نماید [19]. این دلایل پژوهش محققین را به سمت ارزیابی عمیق‌تر و بر اساس میزان تاثیر هر یک از اجزا در بروز تنش و ترک حرارتی بتن حجیم معطوف نموده است و نیز به ارزیابی تاثیر حرارتی بطور خاص بر رفتار مکانیکی بتن وجود دارد [20]. در این مقاله تلاش شده است ارزیابی جامع شناخت ماهیت حرارتی بتن خودتراکم با مقاومت زیاد و تاثیر آن بر مشخصات مکانیکی و تحلیل تنش ارائه شده و رویکرد جدیدی در ارزیابی مشخصات سطح و مرکز بتن حجیم نسبت به رژیم حرارتی در نظر گرفته شده است.

۲- مصالح مصرفی، برنامه ساخت و آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان مورد استفاده از نوع دو از کارخانه سیمان هگمتان همدان

۳-۲- برنامه آزمایش‌ها

آزمایش‌ها شامل دو بخش مشخصات مکانیکی و حرارتی بوده است. در بخش اول، مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز متأثر از تغییر پارامترهای نوع بتن، مقدار سیمان و شرایط عمل‌آوری ارزیابی شده و آزمایش تنش-کرنش برای تعیین مدول الاستیسیته استاتیکی مطابق با ASTM [26] C469 انجام شده است. در بخش دوم ثبت رژیم حرارتی و اندازه‌گیری کرنش به‌منظور بررسی مشخصه‌های نمودار رژیم حرارتی و تفاوت ماهیت رژیم حرارتی بتن خودتراکم و بتن معمولی انجام شده است و تاثیر اعمال رژیم حرارتی بر مشخصات مکانیکی نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است. شرایط عمل‌آوری در آب (W) به‌عنوان عمل‌آوری رطوبتی استاندارد (مرجع) در نظر گرفته شده و حالات (L) و (TMCC) به‌ترتیب معرف شرایط سطح بتن حجیم (در دمای محیط) و هسته بتن می‌باشد. تعداد روزهای اعمال دمای هیدراسیون در هسته متناسب با زمان قالب برداری بصورت یک، دو و پنج روزه لحاظ شده است و عدد مقابل TMCC معرف تعداد

روزهای اعمال رژیم حرارتی بر آزمون‌ها می‌باشد.

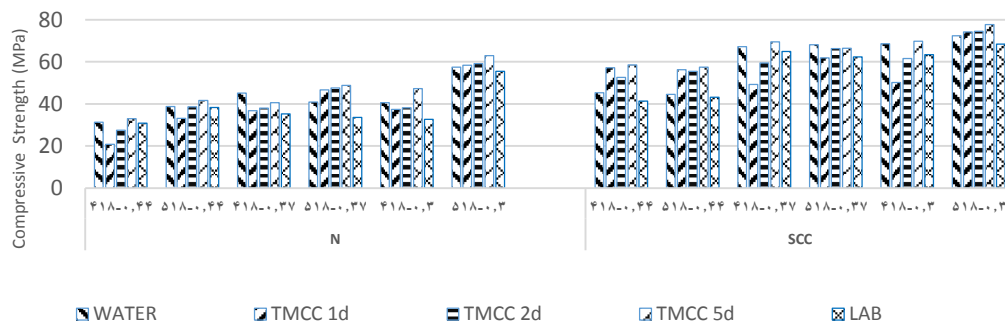
۳- نتایج آزمایشگاهی

۳-۱- مشخصات رئولوژی بتن تازه خودتراکم

مشخصات رئولوژی بتن‌های خودتراکم که با محدوده مجاز مقایسه شده است در جدول ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که کلیه نتایج به‌دست آمده در محدوده مجاز بوده است.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های کارآیی بتن خودتراکم و محدوده مجاز مطابق با EFNARC [22]

کد طرح	Slump Flow (mm)	T50 (sec)	L-Box	V-Funnel
			$\frac{H_2}{H_1}$	t_v (sec)
SCC-0.44-418	765	2.5	0.93	6.1
SCC-0.44-518	755	2.7	0.9	6.6
SCC-0.37-418	740	3.1	0.87	7.3
SCC-0.37-518	720	3.5	0.85	7.9
SCC-0.30-418	695	3.9	0.83	10.2
SCC-0.30-518	660	4.5	0.82	10.7
محدوده مجاز EFNARC	650-800	2-5	0.8-1.0	6-12



شکل ۱- مقادیر مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز

۳-۲- مشخصات مکانیکی

۳-۲-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری بیست و هشت روزه طرح‌های مختلف در شکل ۱ نمایش داده شده است و در بخش تفسیر، مقادیر با نتایج سایر محققین نیز مورد مقایسه قرار گرفته است.

تمامی مقادیر مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن خودتراکم بیش از ۴۰ مگاپاسکال و بیشتر از بتن معمولی متناظر بوده است. با مقایسه مقادیر مشخص شد که در مقدار سیمان یکسان، درصد افزایش مقاومت فشاری با کاهش نسبت آب به سیمان (کاهش مقدار آب) بیشتر بوده و افزایش مقدار سیمان دارای تاثیر مثبت کمتری است.

بنظر می‌رسد علت این افزایش، کاهش حجم خمیر سیمان و افزایش مقدار سنگدانه بوده و منجر به بهینه‌سازی و افزایش مقاومت شود [3-5]. این موضوع بدلیل امکان‌پذیری ایجاد روانی بدون جداشدگی در بتن خودتراکم، کاهش مقدار سیمان بتن حجیم و کاهش حرارت هیدراسیون مطلوب‌تر است. همچنین تاثیر تغییر مشخصات طرح‌ها بر مقاومت فشاری دارای حد بهینه بوده است که در ادامه به تفکیک عامل مورد بررسی ارائه شده است.

۳-۲-۱-۱- اثر نوع بتن بر مقاومت فشاری

در بررسی تاثیر نوع بتن، مقاومت فشاری طرح‌های بتن خودتراکم

مقدار سیمان، نتایج نسبت مقاومت فشاری طرح‌های با مقدار سیمان ۵۱۸ کیلوگرم سیمان در هر متر مکعب بتن بر مقاومت طرح متناظر با مقدار سیمان ۴۱۸ در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- نسبت مقادیر مقاومت فشاری بتن با مقدار سیمان ۵۱۸ بر مقاومت فشاری با مقدار سیمان ۴۱۸

شرایط	0.44		0.37		0.3	
	SCC	N	SCC	N	SCC	N
عمل‌آوری						
W	0.98	1.24	1.01	0.91	1.06	1.42
TMCC-1d	1.17	1.59	1.26	0.75	1.48	1.56
TMCC-2d	1.06	1.40	1.11	1.25	1.21	1.55
TMCC-5d	0.98	1.26	0.96	1.20	1.11	1.33
L	1.05	1.24	0.95	0.95	1.08	1.70

تأثیر افزایش مقدار سیمان بر مقاومت فشاری بتن خودتراکم حداکثر چهل و هشت درصد بوده درحالی‌که در بتن معمولی تا هفتاد درصد افزایش رخ داده است. این تأثیر با کاهش نسبت آب به سیمان افزایش یافته است و افزایش مقدار سیمان به لحاظ اقتصادی، زیست محیطی و افزایش دمای ناشی از هیدراسیون بتن نیز توصیه نمی‌شود. بررسی سایر محققین نیز حاکی از آن است که مقاومت فشاری بهینه لزوماً با کاهش نسبت آب به سیمان محقق نشده و بهینه‌سازی مقاومت بر اساس پارامترهای ورودی که نسبت‌های مخلوط بوده است با نتایج آزمایشگاهی منجر به تعیین درصد بهینه نسبت آب به سیمان جهت حصول مقاومت حداکثر ارائه شده است [25].

۳-۲-۱-۳- اثر شرایط عمل‌آوری بر مقاومت فشاری

در رژیم حرارتی بتن حجیم، در طی مدت افزایش دما سطح (پوسته) و مرکز (هسته) به ترتیب در تنش‌های کششی و فشاری قرار گرفته و این روند در ناحیه سرد شدن پس از حداکثر دمای هیدراسیون بر عکس خواهد شد، نسبت مقادیر مقاومت سطح به هسته حائز اهمیت است و لذا نمی‌توان تنها مقاومت هسته را کافی دانست. این نسبت و مقایسه با عمل‌آوری استاندارد در آب در جدول ۵ ارائه شده است.

باتوجه به نسبت‌های مقاومت بتن در مرکز و سطح، مقادیر مقاومت فشاری بتن حجیم پس از پنج روز اعمال رژیم حرارتی بیش از مقادیر شرایط عمل‌آوری در آب است که گویای رخداد نوعی

بر مقاومت فشاری بتن معمولی متناظر تقسیم شده و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. در بررسی اثر نوع بتن، نسبت مقاومت بتن خودتراکم بر بتن معمولی متناظر ملاک ارزیابی بوده است.

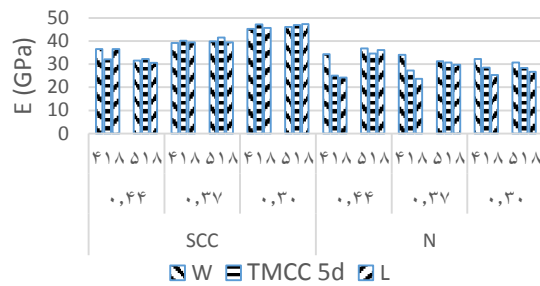
جدول ۳- نسبت مقادیر مقاومت فشاری بتن خودتراکم بر بتن معمولی

شرایط	نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان					
	0.44		0.37		0.3	
عمل‌آوری	418	518	418	518	418	518
W	1.44	1.15	1.49	1.67	1.69	1.26
TMCC 1D	1.86	1.70	1.34	1.33	1.34	1.27
TMCC 2D	1.91	1.44	1.57	1.39	1.61	1.26
TMCC 5D	1.78	1.38	1.72	1.36	1.48	1.23
L	1.34	1.13	1.99	1.86	1.94	1.23

با تغییر نوع بتن از معمولی به خودتراکم، تمامی مقادیر مقاومت فشاری در طرح‌های متناظر افزایشی بوده و مقدار این افزایش در بازه ۱۳ تا ۹۹ درصد بوده است و حاکی از آن است که طرح بهینه با توجه به نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان با حداکثر نسبت افزایش وجود دارد. توزیع همگن‌تر سنگدانه در خمیر سیمان می‌تواند دلیلی بر افزایش مقاومت فشاری بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی نظیر باشد. مطالعه‌های مشابهی نیز توسط سایر محققین بر روی مقایسه مشخصات مکانیکی بتن خودتراکم و معمولی انجام شده است و بعنوان دلایل این افزایش، اشاره شده است که علاوه بر نسبت‌های اختلاط، تفاوت تراکم ریزساختاری نیز بر این افزایش موثرند. کاهش تخلخل به دلایل ریزساختار متراکم‌تر بتن خودتراکم نسبت به معمولی، توزیع همگن‌تر اجزای بتن و در نتیجه توزیع تنش یکنواخت‌تر و بهبود ناحیه انتقالی ITZ از دلایل این افزایش در نسبت مقاومت‌ها ذکر شده است [23]. نتایج مشابهی در ارزیابی سایر محققین حاکی از آن است که در بتن معمولی احتمال جداشدگی و توزیع ناهمگن سنگدانه‌ها بیش از بتن خودتراکم بوده و با توجه به تعادل بین مقدار تخلخل و همگنی توزیع تنش بتن خودتراکم، افزایش مقاومت در نسبت آب به سیمان یکسان نسبت به بتن معمولی گزارش شده است [24].

۳-۲-۱-۲- اثر افزایش مقدار سیمان بر مقاومت فشاری

با افزایش مقدار سیمان افزایش دمای مرکز منجر به افزایش اختلاف دما در بتن حجیم خواهد شد. به‌منظور تعیین اثر افزایش



شکل ۲- مقادیر مدول الاستیسیته استاتیکی

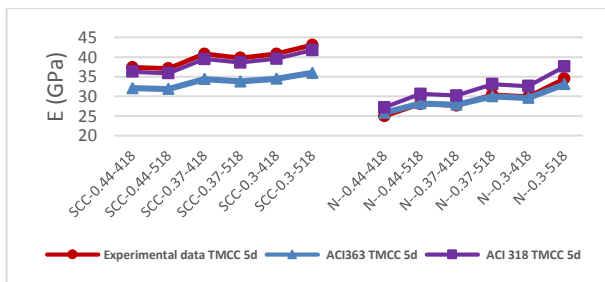
همانگونه که مشاهده می‌گردد مقادیر مدول الاستیسیته همانند مقاومت فشاری، در بتن خودتراکم بیش از بتن معمولی بوده و حداکثر تا هشتاد درصد افزایش نسبت به طرح متناظر افزایش ثبت شده است.

مقادیر محاسبه شده مدول الاستیسیته مطابق با روابط آیین‌نامه‌های ACI (2) [27] 318 و (3) [28] 363 ACI و مقایسه این مقادیر با نتایج آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است.

$$E_c = 0.043 Wc^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

$$E_c = (3320 \sqrt{f'_c} + 6900) \quad (3)$$

در روابط فوق، f'_c مقاومت فشاری بیست و هشت روزه بتن بر حسب مگاپاسکال و Wc چگالی بتن بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.



شکل ۳- مقایسه مقادیر مدول الاستیسیته آزمایشگاهی و آیین‌نامه‌ای

مقایسه مقادیر و روند تغییرات شکل ۳ حاکی از آن است که مقادیر آیین‌نامه ACI 318 برای بتن حجیم خودتراکم و ACI 363 برای بتن حجیم معمولی مقادیر قابل قبولی ارائه می‌نماید.

۳-۴-۳- مشخصات حرارتی بتن حجیم

۳-۴-۱- رژیم حرارتی بتن حجیم

به منظور ارزیابی مشخصات حرارتی از دستگاه نیمه آدیاباتیک اندازه‌گیری دمای بتن در طول زمان استفاده شده و در شکل ۴ نتایج

عمل‌آوری حرارتی و مطلوب است اما مقادیر سطح بتن که کمتر از مقادیر استاندارد در آب است، حاکی از حساسیت بیشتر در سطح بتن حجیم می‌باشد. مقایسه نسبی نتایج حاکی از آن است که میانگین مقادیر کاهش مقاومت بدلیل تغییر شرایط عمل‌آوری بتن خودتراکم هفت و در بتن معمولی دوازده درصد بوده است که حساسیت کمتر بتن خودتراکم به شرایط عمل‌آوری را نشان داده و با توجه به تبدیل نوع تنش در رژیم حرارتی و نیاز به مشخصات مکانیکی با اختلاف کمتر در پوسته و هسته، رفتار این بتن مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود.

جدول ۵- نسبت مقادیر مقاومت فشاری در شرایط مختلف عمل‌آوری

کد طرح	$\frac{L}{W}$	$\frac{TMCC\ 5d}{W}$	$\frac{TMCC\ 2d}{W}$	$\frac{TMCC\ 1d}{W}$	$\frac{L}{TMCC\ 5d}$
SCC 0.44-418	0.91	1.30	1.16	1.06	0.71
SCC 0.44-518	0.97	1.29	1.25	1.26	0.75
SCC 0.37-418	0.93	1.04	0.89	0.73	0.90
SCC 0.37-518	0.87	0.99	0.97	0.91	0.87
SCC 0.3-418	0.92	1.02	0.90	0.73	0.91
SCC 0.3-518	0.94	1.07	1.03	1.02	0.88
N 0.44-418	0.98	1.05	0.88	0.66	0.94
N 0.44-518	0.99	1.07	0.99	0.86	0.93
N 0.37-418	0.69	0.91	0.84	0.82	0.77
N 0.37-518	0.82	1.19	1.16	1.14	0.69
N-0.3-418	0.80	1.17	0.94	0.92	0.69
N 0.3-518	0.97	1.10	1.03	1.02	0.88

۳-۳- مدول الاستیسیته

مقادیر مدول الاستیسیته بر اساس شیب منحنی‌های تنش-کرنش از رابطه (۱) بر اساس ASTM C469 [26] بدست آمده است و در شکل ۲ نمایش داده شده است.

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.00005)} \quad (1)$$

S_2 : تنش در مقدار چهل درصد تنش حداکثر

S_1 : تنش متناظر با کرنش طولی 0.00005

ϵ_2 : کرنش در سطح تنش S_2

جدول ۶- مشخصات حرارتی بتن‌های حجیم خودتراکم

Code	شیب صعود	شیب نزول	حداکثر اختلاف دما (°C)
0.44-418	3.48	0.46	39.7
0.44-518	2.67	0.32	44.2
0.37-418	2.60	0.38	31.8
0.37-518	2.54	0.33	36.9
0.3-418	2.38	0.36	33.4
0.3-518	2.21	0.34	37.1

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار سیمان، شیب هر دو ناحیه صعودی و نزولی کاهش و اختلاف دما افزایش یافته است. مقدار این افزایش با کاهش نسبت آب به سیمان بیشتر بوده است. لذا با توجه به آنکه با افزایش مقدار سیمان مطابق انتظار افزایش حداکثر دما رخ داده و کاهش هر دو شیب مشاهده شده است، زمان رخداد حداکثر دما افزایش بیشتری داشته و نسبت دما به زمان کاهش شیب را ایجاد نموده است. در نتیجه با افزایش مقدار سیمان، زمان رخداد حداکثر دما کاهش یافته و تنش‌های بیشتر منجر به افزایش ریسک ترک شده است.

۳-۴-۲- کرنش حرارتی

نمودار تغییرات کرنش بتن‌های حجیم معمولی و خودتراکم SCC0.44-418 در شکل ۶ ارائه شده است.

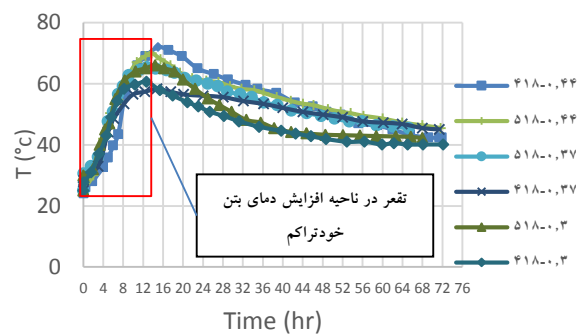
با توجه به اینکه تنها تفاوت آزمون $TMCC$, L اثر رژیم حرارتی است، کرنش حرارتی از اختلاف کرنش در دو شرایط عمل آوری قابل محاسبه است.

همانطور که در نمودار مشخص است مقادیر کرنش در بتن خودتراکم کمتر از بتن معمولی است و حداکثر مقدار کرنش حدود هفتاد درصد کاهش یافته است. همچنین نقطه متناظر با تبدیل تنش فشاری و کششی (تغییر علامت کرنش) در بتن خودتراکم در زمان بیشتری رخ داده است که با توجه به افزایش مقاومت کششی بتن در هسته در این زمان، می‌تواند منجر به کاهش ریسک ترک خوردگی بتن خودتراکم گردد.

۳-۴-۳- تحلیل تنش بتن‌های حجیم

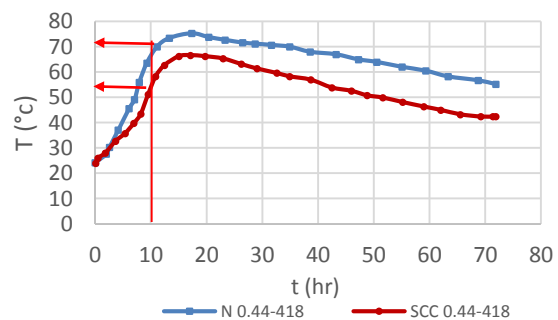
شناخت مشخصات حرارتی بتن حجیم علاوه بر نمودار رژیم حرارتی و مشخصات مکانیکی، با تحلیل تنش حرارتی تکمیل

اندازه‌گیری روند توزیع دما در طول زمان برای طرح‌های مختلف ارائه شده است.



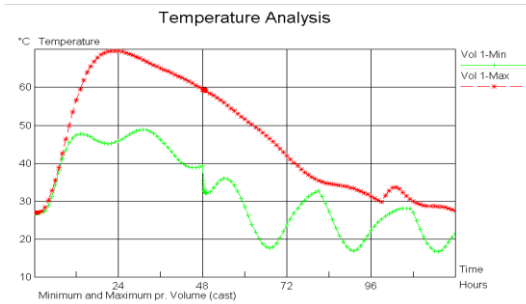
شکل ۴- رژیم حرارتی بتن خودتراکم در طرح‌های مختلف

نمونه‌ای از تفاوت رژیم حرارتی بتن معمولی و خودتراکم در طرح مینا با هدف مشخص نمودن تفاوت ماهیت رفتار حرارتی دو نوع بتن در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵- مقایسه رژیم حرارتی بتن معمولی و خودتراکم

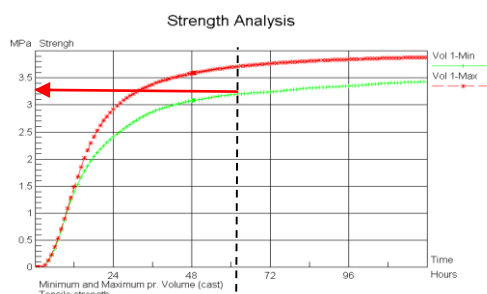
همان‌گونه که مشاهده می‌گردد رژیم حرارتی بتن خودتراکم در ناحیه افزایش دما به صورت مقعر بوده که منجر به تجربه دمای کمتر در زمان یکسان نسبت به بتن معمولی با تحدب نموداری شده است. به نظر می‌رسد که تفاوت در رژیم حرارتی متأثر از تفاوت مواد و نسبت‌های مخلوط است به طوری که نسبت سیمان به مواد پودری و در نتیجه مقدار C_3A در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی متناظر کاهش یافته است. این کاهش به همراه افزایش دمای هیدراسیون (در محدوده ۴۰ درجه سلسیوس) باعث می‌گردد پودر سنگ نیز به عنوان فعال ساز وارد واکنش شده و تبدیل اترینگایت به مونوسولفات به تاخیر خواهد افتاد [29]. مشخصات حرارتی بتن حجیم خودتراکم شامل شیب‌های منطقه افزایش و کاهش دما و حداکثر اختلاف دمای مرکز با سطح از نمودار استخراج شده و در جدول ۶ ارائه شده است.



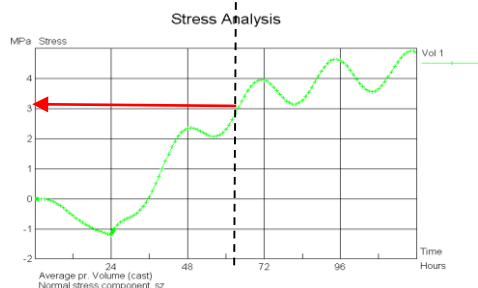
شکل ۷- رژیم حرارتی بتن حجیم خودتراکم در طرح SCC-0.44-418

همانطور که در نمودار فوق مشاهده می‌شود، با قالب برداری اختلاف دمای مرکز و سطح بتن بیشتر شده است و این نکته باید در تحلیل توام مشخصات مکانیکی و حرارتی مدنظر قرار گیرد. لذا با توجه به مقادیر مقاومت فشاری در حالت دو روز اعمال دمای مرکز (TMCC-2d) جهت کسب مقاومت در برابر تنش حرارتی، حفظ قالب حداقل به مدت ۴۸ ساعت منطقی و مناسب به نظر می‌رسد.

مقادیر مقاومت کششی و تنش کششی ناشی از گرادیان حرارتی طرح با نسبت آب به سیمان ۰.۴۴ و مقدار سیمان ۴۱۸ در طول زمان توسط نرم‌افزار محاسبه شده و در شکل ۸ نمایش داده شده است. ریسک ترک این طرح در دو نوع بتن حجیم معمولی و خودتراکم نیز در شکل ۹ مورد مقایسه قرار گرفته است و مقدار ریسک ترک خوردگی بیش از یک به معنای رخداد ترک می‌باشد.



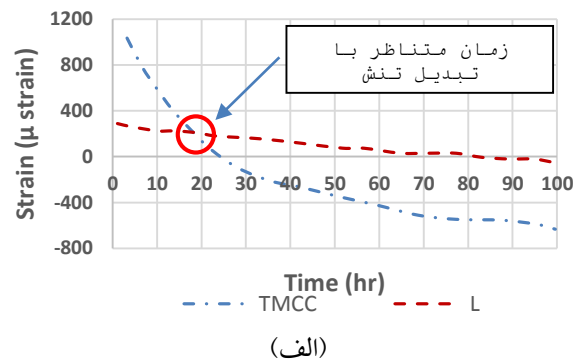
مقاومت کششی



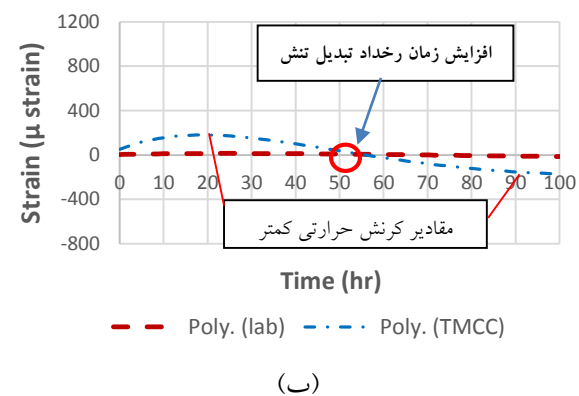
تنش کششی

شکل ۸- نمودار مقاومت کششی و تنش کششی حرارتی بتن معمولی

می‌گردد. در واقع این کرنش‌های حرارتی است که به تنش حرارتی تبدیل شده و در صورتی که تنش از مقاومت کششی بتن تجاوز کند منجر به بروز ترک خواهد شد. به منظور ارزیابی تنش در بتن حجیم خودتراکم دو ستون حجیم با مقطع مربعی به ضلع دو متر شبیه سازی شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۹- کرنش بتن معمولی (الف) و خودتراکم (ب)

طرح با نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ و مقدار سیمان ۴۱۸ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن جهت تحلیل تنش انتخاب شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

در بتن حجیم ریسک ترک بتن نیز بصورت نسبت تنش کششی به مقاومت کششی تعریف شده است [30]. شکل ۷ رژیم حرارتی خروجی نرم‌افزار در طرح با نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ و مقدار سیمان ۴۱۸ را نشان می‌دهد. با مقایسه مشخصات رژیم حرارتی آزمایشگاهی و تحلیل نرم‌افزاری بر اساس شاخص‌های حرارتی جدول ۶ مشخص شد که نمودار رژیم حرارتی بتن حجیم خودتراکم بصورت خروجی نرم‌افزار دارای انطباق مناسبی با داده‌های تجربی در آزمایشگاه است و می‌توان تحلیل‌های بر اساس خروجی را دارای صحت مناسبی دانست.

- با توجه به تغییر نوع تنش های کششی و فشاری در نواحی افزایش و کاهش دمای رژیم حرارتی و لزوم تامین مقاومت کافی در هر دو ناحیه، اختلاف کمتر مقاومت بتن پوسته و هسته رفتار مناسب تر بتن خودتراکم را نشان می دهد.

- منحنی رژیم حرارتی بر حسب زمان در بتن های خود تراکم در ناحیه گرمایشی به صورت مقعر بوده در حالی که نمودار در ناحیه گرمایشی بتن های معمولی دارای تحدب بوده است. این اختلاف در ماهیت رفتار حرارتی حاکی از آن است که در زمان یکسان بتن خود تراکم دمای کمتری را تجربه کرده است.

- نتایج رژیم حرارتی ثبت شده آزمایشگاهی دارای انطباق مناسبی با نتایج آنالیز شبیه سازی عددی بوده است. کرنش کل و حرارتی بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی هفتاد درصد کاهش یافته است و از سوی دیگر نتایج تحلیل عددی نشان دهنده کاهش ریسک ترک خوردگی بتن خود تراکم به میزان سی و شش درصد نسبت به بتن معمولی بوده است.

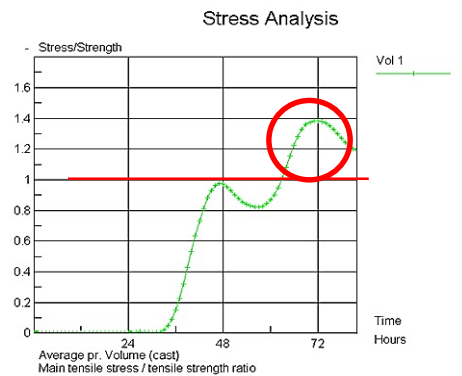
- علاوه بر مقدار کرنش کمتر، تبدیل تنش در بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی در زمان طولانی تری رخ داده است. با طولانی شدن این زمان، دمای هیدراسیون کاهش یافته و از سوی دیگر کسب مقاومت بتن افزایش یافته است که این دو موضوع منجر به کاهش ریسک ترک خوردگی گردیده است.

- نتایج تحقیق حاضر حاکی از آن است که بتن خودتراکم پرمقاومت در سازه های حجیم گزینه مناسب تری از لحاظ خواص مکانیکی و کاهش ریسک ترک خوردگی نسبت به بتن معمولی محسوب می گردد.

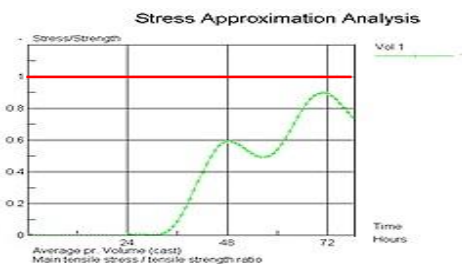
۵- مراجع

- [1] Okamura, H., & Ouchi, M. Self-compacting concrete. Journal of advanced concrete technology, 1(1), 5-15. (2003). <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- [2] Singh, N., Kumar, P., & Goyal, P. Reviewing the behavior of high volume fly ash based self-compacting concrete. Journal of Building Engineering, 100882. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100882>
- [3] Li, P. P., Brouwers, H. J. H., Chen, W., & Yu, Q. (2020). Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. Construction and Building Materials, 242, 118112.

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود در بتن معمولی ریسک ترک خوردگی پس از ۷۲ ساعت بیش از یک بوده در حالی که در زمان یکسان، در بتن خودتراکم متناظر ریسک ترک با ۳۶ درصد کاهش از ۱/۴ به ۰/۹ کاهش یافته که بر احتمال بروز ترک حرارتی دلالت دارد. افزایش مقاومت و کاهش دمای متناظر را می توان دلایل کاهش ریسک ترک خوردگی بتن خودتراکم حجیم دانست.



الف- بتن معمولی



ب- بتن خودتراکم

شکل ۹- ریسک ترک خوردگی بتن معمولی و خودتراکم

۴- نتیجه گیری

- در شرایط نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان مشابه، مقاومت فشاری بتن خود تراکم سیزده تا صد درصد نسبت به بتن معمولی افزایش داشته است.

- مدول الاستیسیته بتن خود تراکم نسبت به بتن معمولی متناظر تا هشتاد درصد افزایش داشته است.

- نتایج اعمال شرایط عمل آوری لایه سطحی و مرکزی سازه های حجیم نشان داد که اختلاف قابل توجهی در مقاومت این دو لایه در بتن خود تراکم وجود نداشته است، در حالی که مقاومت لایه سطحی در بتن های معمولی تفاوت معناداری با مقاومت هسته مرکزی داشته است.

- (2013). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.051>
- [14] Tragardh, J. Microstructural features and related properties of self-compacting concrete. In *Self-Compacting Concrete: Proceedings of the First International RILEM Symposium held in Stockholm*. 175-186. (1999). doi:10.1016/j.proeng.2017.02.122
- [15] نیلی، محمود، صالحی، امیرمسعود. تاثیر عمل آوری حرارتی هسته و سطح ستون های حجیم بر مقاومت درازمدت بتن با مقاومت زیاد، مهندسی عمران امیرکبیر. (۱۳۸۹).
- [16] Nili, M., & Salehi, A. M. Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2108-2116. (2010). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.049>
- [17] Mostofinejad, D., & Nozhati, M. Prediction of the modulus of elasticity of high strength concrete. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 29(B3), 311-321. (2005). <https://doi.org/10.22099/ijstc.2013.785>
- [18] Alsalman, A., Dang, C. N., Prinz, G. S., & Hale, W. M. (2017). Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 918-928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.158>
- [19] نیلی، محمود، یزدان دوست همدانی، علیرضا. (۱۳۹۷). مدل سازی حرارتی ستون های حجیم بتنی در شرایط آب و هوایی سرد و گرم، تحقیقات بتن.
- Doi: 10.22124/jcr.2018.4651.1172: 18-5. 11(3)
- [20] Amin, M. N., Kim, J. S., Lee, Y., & Kim, J. K. Simulation of the thermal stress in mass concrete using a thermal stress measuring device. *Cement and Concrete Research*, 39(3), 154-164. (2009). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.008>
- [21] ASTM, C33. Standard specification for concrete aggregates. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials. (2003).
- [22] BIBM, C., & ERMCO, E. EFNARC The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, Production and Use. (2005)
- [23] Vilanova, A., Fernandez-Gomez, J., & Landsberger, G. A. (2011). Evaluation of the mechanical properties of self compacting concrete using current estimating models: Estimating the modulus of elasticity, tensile strength, and modulus of rupture of self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3417-3426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.033>
- [24] Felekoğlu, B., Türkel, S., & Baradan, B. (2007). Effect of water/cement ratio on the fresh and <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118112>
- [4] Habibi, A., & Ghomashi, J. Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results. *Construction and Building Materials*, 168, 113-123. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.113>
- [5] Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., & Ou, Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. *Construction and Building Materials*, 181, 659-672. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075>
- [6] Ye, G., Liu, X., De Schutter, G., Poppe, A. M., & Taerwe, L. Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(2), 94-102. (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.09.003>
- [7] Tennich, M., Ouezdou, M. B., & Kallel, A. Thermal effect of marble and tile fillers on self-compacting concrete behavior in the fresh state and at early age. *Journal of Building Engineering*, 20, 1-7. (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.06.015>
- [8] Zhutovsky, S., & Kovler, K. Influence of water to cement ratio on the efficiency of internal curing of high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 144, 311-316. (2017). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.203>
- [9] Poole, T. S. Revision of test methods and specifications for controlling heat of hydration in hydraulic cement (No. PCA R&D Serial No. 2007).
- [10] Ballim, Y., & Graham, P. C. The effects of supplementary cementing materials in modifying the heat of hydration of concrete. *Materials and Structures*, 42(6), 803-811. (2009). <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9425-3>
- [11] de Matos, P. R., Junckes, R., Graeff, E., & Prudêncio Jr, L. R. Effectiveness of fly ash in reducing the hydration heat release of mass concrete. *Journal of Building Engineering*, 101063. (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101063>
- [12] Kjellsen, K. O., & Lagerblad, B. Microstructure of tricalcium silicate and Portland cement systems at middle periods of hydration-development of Hadley grains. *Cement and Concrete Research*, 37(1), 13-20. (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.008>
- [13] Nehdi, M. L. Only tall things cast shadows: Opportunities, challenges and research needs of self-consolidating concrete in super-tall buildings. *Construction and Building Materials*, 48, 80-90.

hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42(4), 1795-1802.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.012>

[25] Habibi, A., & Ghomashi, J. (2018). Development of an optimum mix design method for self-compacting concrete based on experimental results. *Construction and Building Materials*, 168, 113-123.

DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.113

[26] ASTM, C469. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression. *Annual book of ASTM standards*, 4. (2002).

[27] ACI Committee 318-95, Building code requirements for reinforced concrete, Metric System, American Concrete Institute, Detroit. (1995).

[28] ACI Committee 363-92, State-of-the-art report on high-strength concrete. *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 3. (1998).

[29] Poppe, A. M., & De Schutter, G. (2005). Cement hydration in the presence of high filler contents. *Cement and Concrete Research*, 35(12), 2290-2299.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.008>

[30] Klemczak, B., Batog, M., Pilch, M., & Żmij, A. (2017). Analysis of cracking risk in early age mass concrete with different aggregate types. *Procedia engineering*, 193, 234-241.

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.209>

Experimental study and numerical evaluation of self-compacting mass concrete thermal properties

Mahmoud Nili *

Associate Professor of Civil Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan.

Ghorbankhani, A. H

PhD student, Bu Ali Sina University, Hamadan.

Abstract

The use of concrete in special structures always faces challenges in implementation. By increasing the amount of cement to increase the compressive strength, the thermal gradient between the surface and the center of the concrete due to hydration heat will lead to an increase in thermal stress. On the other hand, due to the highly congested rebars in massive structural members of reinforced concrete such as columns of high-rise structures, the use of self-compacting concrete will facilitate the implementation and therefore understanding the thermal behavior of concrete and comparing it with ordinary concrete can be a good ground for studying crack risk. In this paper, the evaluation of thermal and mechanical properties affected by the application of high strength self-compacting mass concrete regime with three ratios of water to cement ratio and two cement content has been done in the form of twelve mixed designs. The results show that self-compacting concrete in addition to better mechanical properties on the surface and core of high strength mass concrete had different and more suitable thermal regime compared to ordinary concrete. Its lower strain and higher stress conversion time reduces thermal stress and ultimately reduces the risk of cracking up to thirty-six percent.

Keywords: Mass concrete, Self-compacting, Modulus of elasticity, Thermal regime, Risk of cracking.

* Corresponding Author: nili36@yahoo.co.uk