

تحقیقات بتن
سال یازدهم، شماره سوم
پائیز ۹۷
ص ۱۸ - ۵
تاریخ دریافت: ۹۶/۸/۵
تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۱/۲۵

مدل سازی حرارتی ستون‌های حجیم بتنی در شرایط آب و هوایی سرد و گرم

محمود نیلی

دانشیار گروه عمران دانشگاه بوعلی سینا همدان
علیرضا یزدان دوست همدانی*
کارشناسی ارشد سازه دانشگاه بوعلی سینا همدان

چکیده

موضوع تحقیق حاضر بررسی اثر جایگزینی سرباره کوره بلند ذوب آهن و دوده سیلیسی بجای درصدی از وزن سیمان بر رفتار حرارتی و روند کسب مقاومت بتن‌های حجیم می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق ده طرح مخلوط با نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ و عیار سیمان مصرفی ۴۱۸ کیلوگرم در متر مکعب ساخته شده است. در یک سری از طرح‌ها به منظور بررسی اثر جایگزینی سرباره، علاوه بر طرح شاهد، چهار طرح با جایگزینی سرباره به میزان ۲۰، ۳۵، ۵۰ و ۶۵ درصد وزنی سیمان تهیه گردیده است. همچنین در سری دیگر از طرح‌ها جهت بهبود مقاومت سنین اولیه، میزان ده درصد دوده سیلیسی به همراه طرح‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره تهیه شده است. رژیم حرارت هیدراسیون بتن، بوسیله کالریمتر نیمه آدیاباتیک محاسبه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که جایگزینی سرباره و دوده سیلیسی سبب کاهش حرارت زایی بتن می‌گردد، به طوری که جایگزینی سرباره به میزان ۳۵ درصد به همراه ۱۰ درصد دوده سیلیسی نتیجه مناسبی از حیث حرارت زایی و کسب مقاومت دربر داشته است.

واژه‌های کلیدی: بتن حجیم، سرباره کوره بلند ذوب آهن، ریسک ترک خوردگی، حرارت زایی بتن، مقاومت فشاری بتن و نفوذپذیری.

* نویسنده مسئول: alirezayazdandost@yahoo.com

۱- مقدمه

کاسته می‌شود. اما باید توجه گردد اگرچه استفاده از پوزولان‌ها بدلیل هیدراسیون آرام سبب کاهش حرارت‌زایی در بتن می‌گردند، اما در بیشتر موارد مقاومت بتن در سنین کوتاه مدت و حتی دراز مدت را کاهش می‌دهند. لذا همواره یکی از دغدغه‌های سازندگان سازه‌های حجیم بتنی، انتخاب مناسب‌ترین پوزولان بوده است [۳].

بر اساس مطالعات صورت گرفته، اضافه کردن سرباره باعث کاهش نرخ تولید گرما می‌گردد. مادامی که هیدروکسید کلسیم حاصل از واکنش‌های سیمانی به مقدار کافی در محیط حضور داشته باشد، سرباره می‌تواند به‌طور مستقل وارد واکنش شده، اما در درصد‌های جایگزینی بالای سرباره، واکنش‌های پوزولانی به دلیل کمبود هیدروکسید کلسیم به حالت سکون خواهند رسید [۴].

امیر مسعود صالحی [۵]، تحقیقی آزمایشگاهی بر روی جایگزینی درصد‌های مختلف مواد مکمل سیمانی و توسعه حرارت هیدراسیون انجام داده است. در بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر حرارت‌زایی بتن، مشاهده گردید که کاهش نسبت آب به سیمان سبب کاهش حرارت‌زایی گردیده‌است، دلیل اصلی این مسئله کاهش میزان آب لازم جهت هیدراسیون مصالح سیمانی است. همچنین در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۶ خاکستر بادی هم از حیث حرارت‌زایی در پائین‌ترین سطح می‌باشد و هم از لحاظ مقاومتی از میزان قابل قبولی برخوردار است.

در مطالعه‌ای که توسط Gebregziabihier و همکاران [۴]، در سال ۲۰۱۴ بر روی واکنش‌پذیری سرباره‌های فعال شده انجام گرفته شده‌است، مشاهده می‌گردد جایگزینی ۵۰٪ سرباره باعث کاهش کل گرمای هیدراسیون و حداکثر دمای نمونه‌ی بتنی شده‌است، در حالی که زمان رخداد حداکثر دما در نمونه‌ی حاوی ۵۰٪ سرباره زودتر از نمونه‌ی فاقد سرباره می‌باشد. این محققان با بررسی ریزساختار نمونه‌ها دریافتند که در نمونه‌هایی که سرباره جایگزین درصدی از سیمان می‌گردد، ابتدا سیمان وارد واکنش شده و باعث افزایش خاصیت قلیایی در منافذ بتن می‌گردد. افزایش خاصیت قلیایی در بتن و تولید هیدروکسید کلسیم سبب تسریع در انجام واکنش‌های پوزولانی گردیده است و این محیط قلیایی باعث انحلال لایه‌ی نفوذناپذیر اطراف دانه‌های سرباره شده است.

پیشرفت تکنولوژی بتن در دهه‌های اخیر قابلیت استفاده و اجرای بتن‌های پرمقاومت در پروژه‌های مختلف را فراهم نموده است. مشخصه اصلی بتن‌های پرمقاومت نسبت آب به سیمان کم و عیار سیمانی زیاد است که باعث حرارت‌زایی ذاتی بالای بتن می‌شود. این مسئله زمانی مشکل‌ساز می‌شود که این بتن‌ها در ساخت عضوهای با سطح مقطع بزرگ به کار رفته و باعث بروز ترک‌خوردگی حرارتی شوند.

به‌طور کلی گیرش و سخت‌شدگی در بتن از نتایج واکنش‌های فیزیکی و شیمیایی است که بین آب و سیمان رخ می‌دهد. این واکنش‌های شیمیایی که به هیدراسیون سیمان معروف می‌باشند گرمازا بوده و این گرمای آزاد شده موجب افزایش دما در بتن می‌گردد. در بتن‌های حجیم، گرمای آزاد شده و افزایش دما می‌تواند به اندازه‌ای باشد که اختلاف دماهای بین هسته داخلی بتن و سطوح خارجی تر آن موجب ترک‌خوردگی و آسیب‌های ناشی از آن در بتن گردد. چنین آسیب‌هایی می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری سازه و همچنین کاهش دوام بتن با نفوذ یون‌های مخربی مانند سولفات‌ها و کلرایدها در عضو بتنی شود. بنابراین مشخصه مهم برای بتن حجیم، رفتار حرارتی آن است که طراح سازه‌های بتن حجیم باید جهت از بین بردن یا کم کردن و کنترل نمودن عرض و فاصله بین ترک‌ها تمهیداتی را اتخاذ نماید. بنابراین بتن حجیم^۱ به بتنی اطلاق می‌گردد که در آن، ابعاد به‌اندازه‌ای باشد که رفتار حرارتی ممکن است منتهی به ایجاد ترک گردد [۱]. بر اساس آئین‌نامه بتن ایران (آبا)، در صورتی که کوچک‌ترین بعد بتنی که در یک نوبت ریخته می‌شود، از ۶۰۰ میلی‌متر بیشتر باشد، به‌ویژه زمانی که عیار سیمان از ۴۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب بیشتر باشد، باید تدابیری اتخاذ گردد که حرارت ناشی از هیدراسیون آهسته‌تر آزاد شود [۲]. یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش دما در بتن استفاده از مواد مکمل سیمانی است. در این نوع بتن کل گرمای آزاد شده با جایگزینی این مواد همانند سرباره، خاکستر بادی، دوده سیلیسی و دیگر پوزولان‌های طبیعی کاهش می‌یابد. همچنین با جایگزینی این مواد از نرخ گرمای آزاد شده در سنین اولیه و متناسب با درصد جایگزینی و نوع مواد مکمل سیمانی

¹ Mass Concrete

بر اساس رابطه (۱) تنش‌های حرارتی (σ_T) تابعی از تغییر دما (ΔT) - ضریب انبساط حرارتی (α_c) - مدول الاستیسیته (E_c) و پارامتر درجه گیرداری (K_T) می‌باشد.

خطر تشکیل ترک بر اثر تنش‌های حرارتی به وسیله مقایسه تنش کششی محاسبه شده با مقاومت کششی بتن که در عمل مقاومت کششی دونیم کردن است، تعیین می‌شود که این مقدار ریسک ترک خوردگی نام دارد. معمولاً با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان، هنگامی که تنش‌های کششی محاسبه شده، تقریباً برابر با 0.8 مقاومت کششی باشد، ترک تشکیل خواهد شد. درحالی که ترک در تنش‌های پایین تر از این حد به ندرت دیده می‌شود [۹].

۳- طراحی آزمایش

۳-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت بتن از سیمان پرتلند نوع ۲ با نرمی 3570 سانتی متر مربع بر گرم و محصول کارخانه سیمان هگمتان استفاده شده است. دوده سیلیسی مصرفی محصول کارخانه فرو سیلیس ایران و سرباره کوره بلند ذوب آهن محصول فرعی کوره بلند ذوب آهن اصفهان است. سنگ دانه‌ی درشت مصرفی در این تحقیق دارای حداکثر اندازه 25 میلی متر با چگالی $2/66$ است. سنگ دانه‌ی ریز (ماسه) مصرفی دارای چگالی $2/53$ و مدول نرمی $3/8$ می‌باشند. در این تحقیق جهت حصول کارایی مطلوب و همگنی مخلوط، از یک نوع کاهنده قوی آب با نام تجاری $WBM-T$ از نوع نسل سوم این ماده و محصول شرکت ال جی استفاده شده است.

۳-۲- طرح اختلاط

یکی از عوامل تأثیرگذار بر حرارت‌زایی بتن، نسبت آب به سیمان است. در این مقاله به منظور بررسی اثر پوزولان‌ها بر حرارت‌زایی و ریسک ترک خوردگی قطعات بتنی، از نسبت آب به سیمان ثابت و برابر با 0.44 استفاده شده است. همچنین عیار مصالح سیمانی مصرفی، 418 کیلوگرم در متر مکعب در تمامی طرح‌ها در نظر گرفته شده است. جزئیات طرح مخلوط‌ها در جدول (۱) قابل مشاهده می‌باشد. قابل ذکر است که در کد طرح‌ها، حرف S و SF به ترتیب نشانگر جایگزینی سرباره و دوده سیلیسی می‌باشد. همچنین عدد ماقبل این حروف درصد جایگزینی آن‌ها را نشان می‌دهد، به طور مثال عبارت $20S10SF$ بیان‌گر طرح با جایگزینی 20% سرباره و 10% دوده سیلیسی می‌باشد.

درحالی که در نمونه‌های 10% سرباره به دلیل عدم تولید هیدروکسید کلسیم، هیدراسیون و در پی آن افزایش دمایی مشاهده نمی‌شود.

Ballim and Graham [۶]، اثر خاکستر بادی، دوده‌ی سیلیسی و سرباره کوره‌ی بلند ذوب آهن را بر روند حرارت‌زایی بتن بررسی نموده‌اند. در این مطالعه مشاهده گردید که جایگزینی سرباره تا میزان 60% درصد وزنی سیمان باعث کاهش نرخ هیدراسیون و حرارت‌زایی بتن و در نتیجه سبب کاهش دمای حداکثر بتن گردیده است. دمای عمل‌آوری به عنوان عاملی دیگر، در حرارت‌زایی بتن‌های حاوی مواد افزودنی معدنی نقش ایفا می‌کند. در بتن‌های حاوی سرباره، افزایش دمای عمل‌آوری بدلیل سرعت بخشیدن به هیدراسیون سیمان و سرباره باعث افزایش حداکثر دمای هیدراسیون نمونه‌های بتنی می‌گردد، همچنین زمان رخداد حداکثر دما با افزایش دمای عمل‌آوری کاهش پیدا کرده و نمونه‌ی بتنی در زمان کمتری دمای حداکثر را تجربه می‌کنند [۷].

در این مقاله سعی گردیده است اثر جایگزینی سرباره کوره بلند ذوب آهن و دوده سیلیسی به عنوان مواد مکمل سیمانی بر روی تغییرات تاریخچه دمایی بتن مورد بررسی قرار گیرد. همچنین بوسیله مدل‌سازی رایانه‌ای ستون‌های بتنی با ابعاد مختلف در شرایط دمایی متفاوت مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در ادامه جهت بررسی نقش مواد مکمل سیمانی بر نفوذپذیری نمونه‌ها، آزمایش نفوذ آب تحت فشار بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است. در انتها با بررسی دو پارامتر نفوذپذیری و ریسک ترک خوردگی، نمونه‌های بتنی از حیث پارامتر دوامی ارزیابی گردیده‌اند.

۲- تعیین پتانسیل ترک خوردگی

جهت پیش‌بینی دقیق احتمال ترک خوردگی بر اثر تنش‌های حرارتی علاوه بر توسعه دمای داخلی، نرخ کسب مقاومت بتن، تنش‌های ناشی از خزش و تأثیر گیرداری سازه‌ها (چه از طرف داخل و یا خارج سازه) مورد نیاز است [۸].

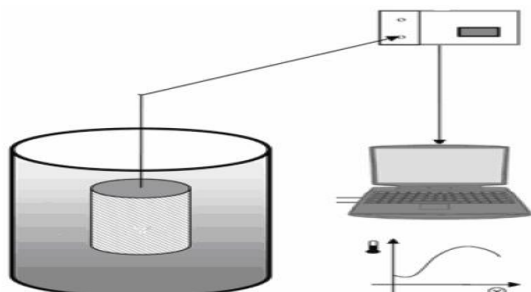
بتن‌های حجیم به دلیل دارا بودن نسبت بالای حجم به سطح، بیشتر در معرض افزایش دماهای داخلی و سرد شدگی‌های غیریکنواخت قرار می‌گیرند؛ درواقع این نوع بتن‌ها نسبت به تنش‌های حرارتی حساس تر می‌باشند. می‌توان تنش‌های حرارتی تولیدشده در بتن را طبق رابطه‌ی زیر بیان نمود:

$$\sigma_T = \Delta T \alpha_c E_c K_T \quad (1)$$

جدول ۱- مقادیر اجزای اختلاط بتن (وزن مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک می باشد)

اسلامپ (Cm)	شن	ماسه	دوده سیلیسی	سرباره	سیمان	آب	$\frac{W}{C}$	کد طرح
۹	۷۱۸	۹۹۲	-	-	۴۱۸	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	0.44C418
۱۲	۷۱۰,۱۰	۹۸۰,۵۵	-	۸۳,۶	۳۳۴,۴	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	20S
۸	۷۰۲,۴۲	۹۷۰	-	۱۴۶,۳	۲۷۱,۷	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	35S
۱۲	۶۹۹,۱	۹۶۵,۴۱	-	۲۰,۹	۲۰,۹	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	50S
۱۵	۶۹۲,۶	۹۶۵,۴	-	۲۷۱,۷	۱۴۶,۳	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	65S
۱۲	۷۱۰,۶	۹۸۱,۴	۴۱,۸	-	۳۷۶,۲	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	10SF
۶	۷۰۲,۵۸	۹۷۰,۲۴	۴۱,۸	۸۳,۶	۲۹۲,۶	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	20S10SF
۱۰	۶۹۶,۵	۹۶۱,۹	۴۱,۸	۱۴۶,۳	۲۲۹,۹	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	35S10SF
۱۲	۶۹۰,۴۸	۹۵۳,۵۲	۴۱,۸	۲۰,۹	۱۶۷,۲	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	50S10SF
۱۳	۶۸۴,۵	۹۴۵,۲۳	۴۱,۸	۲۷۱,۷	۱۰۴,۵	۱۸۳,۹۲	۰,۴۴	65S10SF

جهت تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۱ و همچنین جهت بررسی نفوذپذیری نمونه‌ها، از دستگاه نفوذپذیری تحت فشار آب بر اساس استاندارد BS 1881 استفاده شده است (مطابق شکل ۲).



شکل ۱- محفظه نیمه آدیباتیک متصل به دستگاه ثابت



شکل ۲- شمای کلی دستگاه نفوذپذیری و نمونه‌های تحت آزمایش نفوذ آب

۳-۳- نمونه‌گیری مقاومتی، حرارتی و نفوذپذیری

جهت تعیین میزان حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون سیمان، از یک کالریمتر نیمه آدیباتیک استفاده شده است. انواع کالریمتر نیمه آدیباتیک، شامل یک مخزن ایزوله مناسب است که نمونه بتن در آن قرار می‌گیرد. در این روش اجازه عبور مقدار کمی گرما از بدنه عایق وجود دارد. رژیم حرارتی هیدراسیون از مجموع گرمای ناشی از افزایش دمای نمونه داخل محفظه ایزوله با مقدار حرارت خارج شده از مخزن، قابل حصول است. پس از ساخت هر سری بتن، نمونه استوانه‌ای به ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر مطابق استاندارد تهیه و در درون محفظه نیمه آدیباتیک (Hay box) قرار داده می‌شود. قبل از بسته شدن درب محفظه، حسگر حرارتی داخل نمونه بتنی قرار داده می‌شود.

دمای توسعه یافته بتن که ناشی از حرارت هیدراسیون سیمان است، در هر دقیقه توسط دستگاه ثابت مدل CR10X و نرم‌افزارهای Guardian و PC200 ثبت می‌شود. در شکل شماره (۱) شمای کلی این سیستم قابل مشاهده می‌باشد.

اندازه‌گیری دمای بتن به مدت ۳ روز و تا رسیدن به دمای محیط انجام می‌گیرد. سپس با استفاده از اطلاعات دمای ثبت شده و لحاظ نمودن میزان هدر روی محفظه (که از طریق نگهداری آب ۴۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است)، حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون توسط نرم‌افزار 4C-Heat محاسبه می‌گردد.

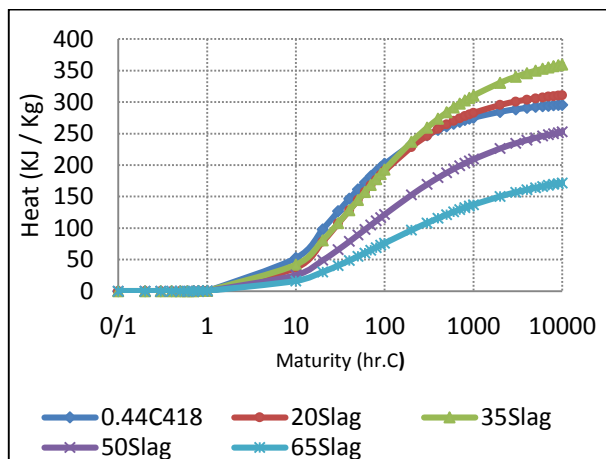
دما را در محیط‌های دوبعدی محاسبه می‌کند و قابلیت انجام تحلیل با فرض کرنش مسطح و تنش مسطح را دارا است. خصوصیات مواد و مصالح، می‌توانند به صورت اعداد ثابت یا توابعی از بلوغ بتن به نرم‌افزار معرفی شوند. استفاده از نرم‌افزار $4C - Temp \& Stress$ ، ما را قادر به محاسبه توزیع دما، توزیع تنش و ریسک ترک خوردگی می‌سازد.

۴- نتایج و تحلیل آن‌ها

۴-۱- منحنی‌های توسعه گرمای هیدراسیون

جهت ترسیم منحنی‌های توسعه گرمای هیدراسیون نمونه‌های بتنی برحسب بلوغ، از معادله (۲) بهره برده شده است. برای محاسبه پارامترهای مدل توسعه گرمای هیدراسیون از نرم‌افزار $4C-Heat$ استفاده شده است. در این نرم‌افزار منحنی تاریخچه‌ی دمای نمونه، به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار تلقی می‌گردد و پارامترهای حرارتی (Q_u ، β و τ) خروجی‌های نرم‌افزار می‌باشند [۱۱].

در شکل ۵ منحنی توسعه گرمای هیدراسیون نمونه‌های حاوی درصد مختلف سرباره نشان داده شده است. در شکل ۶ منحنی توسعه گرمای هیدراسیون نمونه‌های حاوی درصد مختلف سرباره همراه با ۱۰٪ دوده سیلیسی آورده شده است.



شکل ۵- منحنی توسعه گرمای نمونه‌های حاوی سرباره

بر اساس شکل ۵ به نظر می‌رسد که جایگزینی سرباره به میزان ۲۰ و ۳۵ درصد باعث افزایش گرمای نهایی هیدراسیون شده است؛ اما زمانی که درصد جایگزینی سرباره بیش از ۳۵ درصد می‌شود، به دلیل کاهش میزان $Ca(OH)_2$ و در نتیجه کاهش میزان خاصیت قلیایی مخلوط سیمانی، واکنش پوزولانی با سرعت آهسته‌تری

۳-۴- محاسبه تولید حرارت بتن توسط نرم‌افزار $4C-Heat$

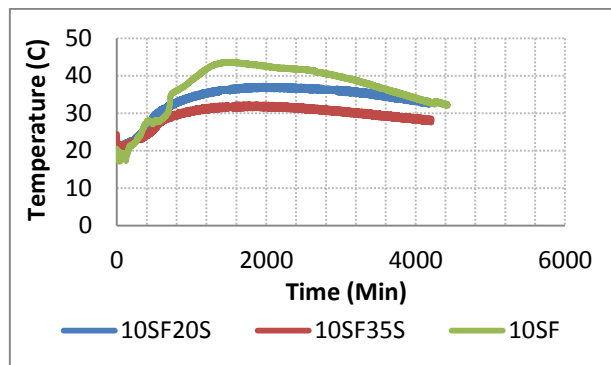
این نرم‌افزار جهت محاسبه حرارت تولیدشده ناشی از هیدراسیون سیمان در بتن از اطلاعات دستگاه $Hay Box$ استفاده می‌کند. اطلاعات خروجی این دستگاه شامل دمای بتن، دمای هوا و ولتاژ دستگاه به صورت تابعی از زمان است. در شکل ۳ و ۴ منحنی دمای نیمه آدیباتیک نمونه‌های بتنی نشان داده شده است. این نرم‌افزار جهت محاسبه مقدار حرارت تولید شده بر اساس پارامتر بلوغ (M) در واحد حجم بتن از رابطه شماره دو که توسط $Hetek$ ارائه شده است استفاده می‌کند [۱۰].

$$Q(M) = Q_u \exp\left[-\left(\frac{\tau}{M}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

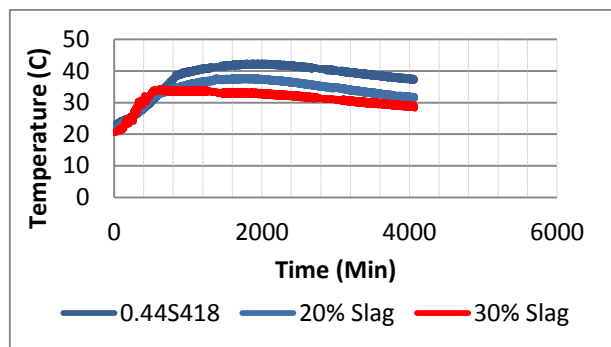
$Q(M)$: مقدار تولید حرارت بتن در بلوغ M

Q_u : تولید حرارت نهایی بتن $\left(\frac{Kj}{Kg}\right)$

τ پارامتر شکل هیدراسیون و β پارامتر زمان هیدراسیون است.



شکل ۳- منحنی دمای محفظه نیمه آدیباتیک بتن حاوی ۱۰٪ دوده سیلیسی به تنهای و همراه با ۲۰ و ۳۵ درصد جایگزینی سرباره



شکل ۴- منحنی دمای نیمه آدیباتیک بتن شاهد و نمونه‌های

حاوی ۲۰ و ۳۵ درصد جایگزینی سرباره

۳-۵- نرم‌افزار $4C Temp \& Stress$

این نرم‌افزار قادر به انجام آنالیزهای حرارتی، بلوغ و تنش در سازه‌های بتنی است. همچنین این نرم‌افزار، تغییرات میدان تنش و

کاهش یافته که علت آن نیز پائین بودن سرعت واکنش پذیری سرباره نسبت به سیمان می‌باشد. Schindler [۱۲]، در تحقیقی مشابه به بررسی اثر جایگزینی سرباره و خاکستر بادی بر پارامترهای منحنی هیدراسیون پرداخته، که در این پژوهش نتایجی مشابه حاصل گردیده است

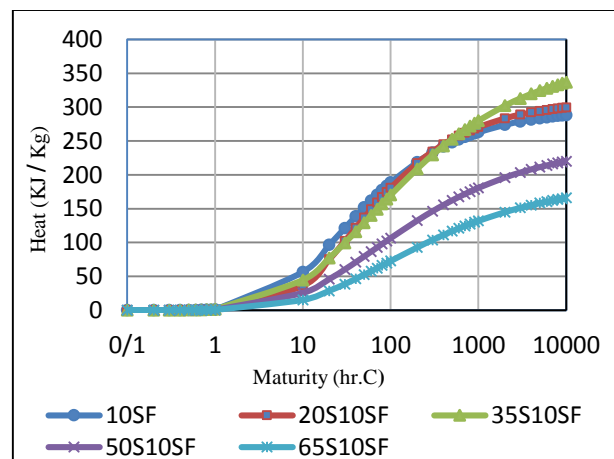
جدول ۲- مشخصات منحنی حرارت هیدراسیون بتن‌ها با نسبت آب به سیمان ۰٫۴۴

کد طرح	τ	β	$Q_u \left(\frac{Kj}{kg} \right)$
0.44C418	۲۴٫۰۷	۰٫۶۳۷	۳۰۲٫۲
20S	۳۴٫۶	۰٫۶۲	۳۲۰٫۳
35S	۴۷٫۹۷	۰٫۵۰۸	۳۸۴٫۵
50S	۶۶٫۵۱	۰٫۴۶	۲۷۹٫۲
65S	۸۹٫۲۹	۰٫۴۲	۱۹۷٫۲
10SF	۲۴٫۹۲	۰٫۵۶	۲۹۸٫۳
20S10SF	۳۵٫۸	۰٫۶	۳۰۹٫۷
35S10SF	۵۸٫۳۶	۰٫۴۳	۳۷۵٫۷
50S10SF	۶۷٫۴۱	۰٫۲۲۳	۲۴۷٫۲
65S10SF	۹۲٫۲۱	۰٫۲۴۸	۱۹۰٫۶

۴-۳- نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری

محاسبه تنش‌های حرارتی و میزان ریسک ترک خوردگی در ستون‌های حجیم، توسط نرم‌افزار $4C-Temp \& Stress$ صورت گرفته است. این تحلیل‌ها در سنین اولیه بتن که دمای هیدراسیون به حداکثر مقدار خود می‌رسد، صورت می‌پذیرد. متغیرهای این تحلیل شامل نوع بتن، ابعاد ستون و تغییرات دمای روزانه است. جهت تحلیل نرم‌افزاری، نیاز به دو سری اطلاعات است. سری اول، اطلاعات گرمایی رژیم حرارتی که شامل Q_u ، β و τ است، از طریق نرم‌افزار $4C-Heat$ برای هر طرح مخلوط بتنی محاسبه می‌گردد. اطلاعات سری دوم، اطلاعات مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای مخلوط‌ها می‌باشد که در شرایط استاندارد نگهداری شده و در سنین ۱ تا ۹۱ روزه تعیین مقاومت گردیده‌اند. سایر اطلاعات شامل مدول الاستیسیته و مقاومت کششی، از طریق روابط موجود در آئین‌نامه‌های معتبر مطابق روابط ۳ و ۴ قابل محاسبه می‌باشد [۱۳].

انجام می‌گیرد. همین اتفاق سبب کاهش گرمای نهایی هیدراسیون نمونه‌ها حاوی بیش از ۳۵ درصد سرباره نسبت به نمونه‌ی شاهد گردیده است. همچنین با توجه به شکل ۶ این روند حرارت‌زایی برای نمونه‌های حاوی درصد مختلف سرباره همراه با ۱۰٪ دوده سیلیسی مشاهده می‌گردد. واضح است که نمونه‌های 20S10SF و 35S10SF حرارت‌زایی بیشتری نسبت به نمونه‌ی حاوی ۱۰٪ دوده سیلیسی تنها را دارا می‌باشند؛ اما با افزایش درصد سرباره، مانند حالت قبل، شاهد کاهش گرمای نهایی هیدراسیون هستیم.



شکل ۶- منحنی توسعه گرمای نمونه‌های حاوی سرباره و ۱۰٪ دوده سیلیسی

۴-۲- مقایسه پارامترهای منحنی تولید حرارت هیدراسیون

در جدول ۲ مشخصات مربوط به منحنی تولید حرارت هیدراسیون (پارامترهای هیدراسیون) نمونه‌های مختلف بتنی نشان داده شده است. پارامتر زمان هیدراسیون (τ)، متناظر با زمانی است که درجه هیدراسیون دارای ۳۷٪ پیشرفت است. مقادیر کمتر τ برای مواد سیمانی فعال‌تر همانند سیمان تپ ۳ و مقادیر بیشتر τ برای مواد سیمانی با فعالیت کمتر همچون سیمان‌های حاوی خاکستر بادی و سرباره مورد انتظار است. تغییر در پارامتر β باعث تغییر در شیب منحنی هیدراسیون می‌گردد. و افزایش در میزان β برای مواد سیمانی فعال‌تر قابل انتظار است [۱۲].

با توجه به جدول ۲ استفاده از سرباره سبب افزایش پارامتر زمان هیدراسیون (τ) شده است و با افزایش درصد جایگزینی و کاهش میزان سیمان مصرفی، این زمان افزایش یافته است. همچنین با افزایش درصد جایگزینی سرباره، شیب منحنی هیدراسیون سیمان

جدول ۳- مشخصات ستون‌های مدل شده

مدت ماندگاری قالب (hr)	محدوده تغییرات دمای محیط (سانتی‌گراد)	ابعاد (cm)	شکل	کد ستون
۲۴	۱۰ تا ۲۲	۸۰	مربعی	Sq80-C-24
۲۴	۳۰ تا ۴۵	۸۰	مربعی	Sq80-H-24
۲۴	۱۰ تا ۲۲	۱۲۰	مربعی	Sq120-C-24
۲۴	۳۰ تا ۴۵	۱۲۰	مربعی	Sq120-H-24

۴-۳-۱- بررسی اثر ابعاد ستون و شرایط آب و هوایی

بر ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی

در تحقیق حاضر ستون‌های مربعی با ۲ اندازه متفاوت ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متری مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

جدول ۴- پارامترهای بدست آمده از ستون‌ها مدل شده مربعی ۸۰ سانتی‌متری با درصد‌های مختلف سرباره در شرایط آب و

هوایی سرد

ریسک ترک خوردگی	تنش حداکثر		زمان حداکثر دما (hr)	حداکثر دما درجه سانتی‌گراد	کد ستون
	MPa	hr			
۰٫۷۵	۱٫۸۴	۴۲	۲۳	۳۸٫۵	0.44C418
۰٫۴۴	۱٫۶۳	۴۲	۲۴	۳۲	S20sq80
۰٫۷۸	۱٫۴۲	۴۲	۳۲	۴۳	S35sq80
۱٫۴۱	۱٫۲۹	۴۲	۳۶	۳۸	S50sq80
۱٫۳۵	۱٫۱	۴۲	۴۲	۳۰	S65sq80

جدول ۴ و ۵ بیانگر پارامترهای بدست آمده از مدل سازی ستون‌های بتنی با ابعاد مختلف در شرایط آب و هوایی یکسان (سرد) می‌باشند.

به‌طورکلی افزایش ابعاد مقطع باعث افزایش ریسک ترک خوردگی می‌گردد (شکل ۷). بر اساس جدول ۴، در ستون‌های بتنی با ابعاد ۸۰ سانتی‌متری در شرایط آب و هوای سرد، جایگزینی سرباره تا میزان ۳۵٪ وزنی سیمان سبب گردیده ریسک ترک خوردگی در محدوده مجاز (کمتر از ۰٫۸) قرار گیرد. بر اساس جدول ۵ در ستون‌های بتنی با ابعاد ۱۲۰ سانتی‌متر در شرایط

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

$$f_t = 0.94\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

در روابط فوق E مدول الاستیسیته، f'_c و f_t به ترتیب مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌های بتنی برحسب مگا پاسکال می‌باشند. روش دیگر برای اعمال مقاومت‌های فشاری و کششی نمونه‌ها که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته‌است، ایجاد فایل اطلاعاتی حاوی مقاومت فشاری و کششی برحسب بلوغ است. از آنجایی که نمونه‌ها در شرایط استاندارد عمل‌آوری شده‌اند، می‌توان از سن نمونه‌ها به‌جای پارامتر بلوغ استفاده کرد. همچنین مدول الاستیسیته متناسب با مقاومت فشاری بتن است، بنابراین از رابطه ۵ می‌توان برای محاسبه مدول الاستیسیته استفاده نمود. این رابطه برای نرم‌افزار نیز شناخته شده است.

$$E_c(M) = E_\infty \exp\left[-\left(\frac{T_e}{M}\right)^\alpha\right] \quad (5)$$

در این حالت نیز با وارد کردن M و E برای هر سن مشخص، با تشکیل یک فایل اطلاعاتی پارامترهای مدول الاستیسیته نهایی (E_∞)، پارامتر زمان (t_e) و پارامتر شکل (α) توسط نرم‌افزار 4C-Heat از طریق رگرسیون نمودار بلوغ محاسبه می‌گردند [۱۰].

جهت تحلیل نرم‌افزار 4C-Temp&Stress، ستون‌ها به صورت دو بعدی مدل شده است. دمای اولیه، ۲۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت باد ۵ متر بر ثانیه (ثابت)، قالب‌ها چوبی و تغییرات دما در ۲۴ ساعت مطابق با شرایط واقعی در نظر گرفته شده است. شرایط تکیه گاهی ستون‌ها به نحوی در نظر گرفته شده است که در اثر تغییرات دمایی، محدودیتی در برابر انبساط و انقباض بتن وجود نداشته باشد. باید توجه شود که در انجام تحلیل‌ها از بارهای مرده و زنده و همچنین اثر خزش صرف‌نظر شده و تنها تنش‌های حرارتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

در این تحقیق چهار نوع ستون با کدگذاری به شرح ذیل و مطابق جدول ۳ انتخاب شده و تحلیل صورت گرفته است.

شکل مقطع ستون: مربعی (Sq)

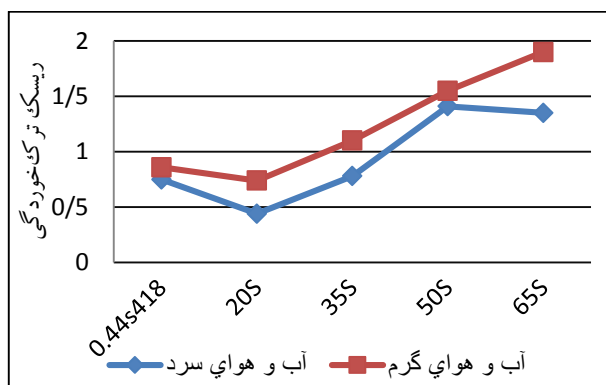
ابعاد ستون ۸۰ و ۱۲۰ سانتی‌متری

شرایط آب و هوایی:

سرد (تغییرات دما در طی شبانه‌روز از ۱۰ تا ۲۲ درجه سانتی‌گراد) گرم (تغییرات دما در طی شبانه‌روز از ۳۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد)

جدول ۶ - پارامترهای بدست آمده از ستون‌ها مدل شده مریعی ۸۰ سانتی متری با درصد‌های مختلف سرباره در شرایط آب و هوایی گرم

ریسک ترک خوردگی	تنش حداکثر		زمان حداکثر دما (hr)	حداکثر دما درجه سانتی گراد	کد ستون
	hr	MPa			
۰,۸۶	۴۲	۲,۷۴	۳۶	۵۰	0.44C418
۰,۷۴	۴۲	۱,۹۲	۴۰	۴۶	S20Sq80
۱,۱	۴۲	۱,۷	۲۶	۶۱	S35Sq80
۱,۵۵	۴۲	۱,۵۲	۳۰	۵۶	S50Sq80
۱,۹	۴۲	۱,۳۲	۴۰	۴۸	S65Sq80



شکل ۸ - مقایسه ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی با اندازه ۸۰ سانتی متری در شرایط آب و هوایی سرد و گرم

۴-۳-۲- تاثیر جایگزینی دوده سیلیسی بر ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی

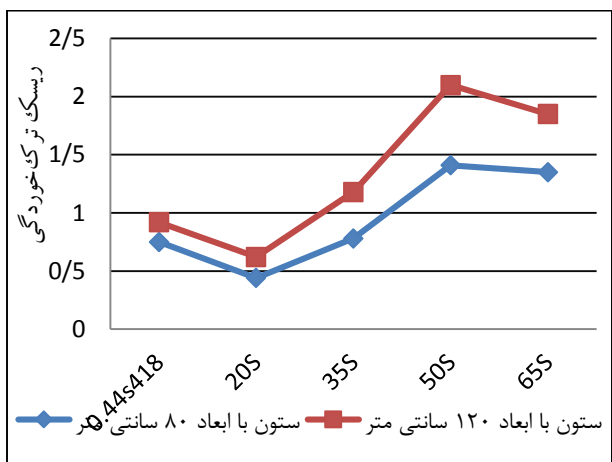
دوده سیلیسی (میکرو سیلیس) به دلیل دارا بودن میزان بالای سیلیس فعال، نمونه‌ای پر کاربرد از مواد مکمل سیمانی است. سیلیس فعال با هیدروکسید کلسیم موجود در محیط بتن واکنش داده و تولید کریستال سیلیکات کلسیم نامحلول می‌نماید. این ماده تولید شده باعث افزایش تراکم خمیر سیمانی و بهبود مقاومت‌های کوتاه مدت می‌گردد. بر اساس مطالعات پیشین [۱۴]، میزان جایگزینی دوده سیلیسی برابر ۱۰٪ وزنی سیمان انتخاب گردیده است. در جدول ۷ و ۸ پارامترهای بدست آمده از تحلیل ستون‌های بتنی حاوی ۱۰٪ دوده سیلیس در شرایط آب و هوایی سرد و گرم آورده شده است.

بر اساس شکل ۹ و ۱۰ جایگزینی دوده سیلیسی به نمونه‌های حاوی درصد‌های مختلف سرباره باعث بهبود ریسک ترک خوردگی شده است. به طور کلی افزایش دمای محیط باعث افزایش ریسک ترک خوردگی گردیده است.

هوایی سرد، جایگزینی ۲۰٪ سرباره باعث کاهش ۳۳ درصدی ریسک ترک خوردگی بتن گردیده، این در حالیست که جایگزینی بیش از ۲۰٪ سرباره ریسک ترک خوردگی را افزایش داده است.

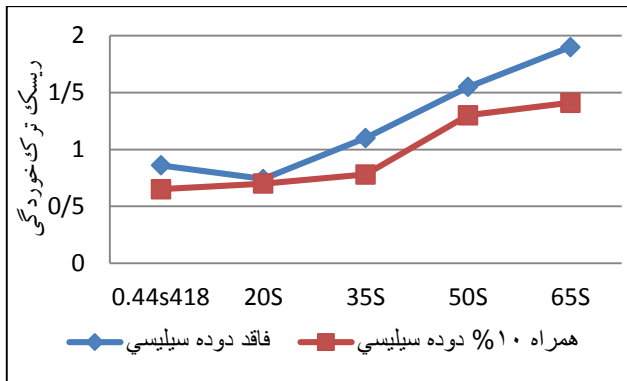
جدول ۵ - پارامترهای بدست آمده از ستون‌ها مدل شده مریعی ۱۲۰ سانتی متری با درصد‌های مختلف سرباره در شرایط آب و هوایی سرد

ریسک ترک خوردگی	تنش حداکثر		زمان حداکثر دما (hr)	حداکثر دما درجه سانتی گراد	کد ستون
	hr	MPa			
۰,۹۲	۴۲	۲,۱۵	۳۲	۴۴	0.44C418
۰,۶۲	۴۲	۱,۸۵	۳۴	۳۷	S20Sq120
۱,۱۸	۴۲	۱,۷۳	۳۶	۵۱	S35Sq120
۲,۱	۴۲	۱,۵۵	۴۰	۴۶	S50Sq120
۱,۸۵	۴۲	۱,۲۲	۴۴	۳۵	S65Sq120



شکل ۷ - مقایسه ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی با اندازه ۸۰ و ۱۲۰ سانتی متری در شرایط آب و هوایی سرد

در جدول ۶ نتایج به دست آمده از تحلیل ستون‌های بتنی با ابعاد ۸۰ سانتی متری حاوی درصد‌های مختلف سرباره در شرایط آب و هوایی گرم آورده شده است. بر اساس شکل ۸ ملاحظه می‌گردد که افزایش دمای محیط باعث افزایش ریسک ترک خوردگی در ستون‌های بتنی شده است. در شرایط اقلیم گرم جایگزینی ۲۰ درصد سرباره باعث کاهش ۱۳/۹۵ درصدی ریسک ترک خوردگی نسبت به بتن شاهد گردیده است. تنها در نمونه‌های حاوی ۲۰ درصد سرباره ریسک ترک خوردگی پایین تر از ۰,۸ است.



شکل ۱۰ - مقایسه ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی با اندازه ۸۰ سانتی متری در شرایط آب و هوایی گرم

۴-۴- نتایج کسب مقاومت فشاری نمونه‌های عمل آوری شده در شرایط استاندارد

در جدول ۹ نتایج کسب مقاومت نمونه‌های حاوی درصد مختلف سرباره نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که افزودن سرباره باعث کاهش مقاومت نمونه‌ها می‌شود. روند کسب مقاومت نمونه‌های حاوی سرباره به‌ویژه در سنین اولیه که میزان هیدروکسید کلسیم موجود در مخلوط بتنی کاهش می‌یابد، کند می‌گردد. تنها در جایگزینی ۲۰٪ سرباره، مشاهده می‌شود که مقاومت نمونه در سن ۹۱ روز به میزان ۲/۷۶٪ بیشتر از نمونه شاهد است.

جدول ۹ - مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره

مقاومت فشاری (MPa)					سن (روز)
65% Slag	50% Slag	35% Slag	20% Slag	0.44C418	
۴۵	۶۹	۱۱،۲	۱۲،۸	۱۷،۷۵	۳
۸،۵	۱۰،۵	۱۸،۲	۲۲،۱	۳۰،۶	۷
۱۳،۸	۱۷،۸	۲۳،۶	۳۰،۲	۳۵،۲۲	۱۴
۱۶،۲	۱۹،۷۶	۳۱،۸	۳۴،۵	۴۰،۷	۲۸
۲۸،۱۴	۳۰،۹۴	۳۹،۵۲	۴۵،۴۲	۴۴،۲	۹۱

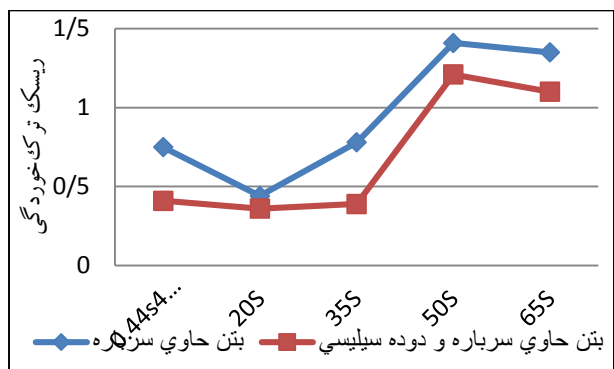
جهت بررسی اثر جایگزینی دوده سیلیسی در طرح‌های حاوی سرباره، درصد کاهش مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های فاقد دوده سیلیسی در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

بر اساس این جدول، در اکثر موارد استفاده از دوده سیلیسی در طرح‌های حاوی سرباره، باعث افزایش مقاومت نسبت به حالت بدون دوده سیلیسی گردیده است. در طرح شاهد، جایگزینی ۱۰٪ دوده سیلیسی در سنین ۳ تا ۷ روز تأثیر چندانی ندارد؛ اما از ۷ روز

جدول ۷ - پارامترهای بدست آمده از ستون‌ها مدل شده مریعی ۸۰ سانتی متری با درصد‌های مختلف سرباره و ۱۰ درصد دوده

سیلیسی در شرایط آب و هوایی سرد

ریسک ترک خوردگی	تنش حداکثر		زمان حداکثر دما (hr)	حداکثر دما درجه سانتی‌گراد	کد ستون
	hr	MPa			
۰،۴۱	۴۰	۱،۷۱	۲۴	۳۶	SF10Sq80
۰،۳۶	۴۰	۱،۶	۲۴	۳۲	SF10S20 Sq80
۰،۳۹	۴۰	۱،۲۹	۲۴	۳۴	SF10S35 Sq80
۱،۲۱	۴۰	۱،۲	۳۶	۳۴	SF10S50 Sq80
۱،۱	۴۰	۱،۱	۴۰	۲۹	SF10S65 Sq80



شکل ۹ - مقایسه ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی با اندازه ۸۰ سانتی متری در شرایط آب و هوایی سرد

جدول ۸ - پارامترهای بدست آمده از ستون‌های مدل شده با درصد مختلف سرباره همراه با ۱۰ درصد دوده سیلیسی در شرایط هوایی گرم

ریسک ترک خوردگی	تنش حداکثر		زمان حداکثر دما (hr)	حداکثر دما درجه سانتی‌گراد	کد ستون
	hr	MPa			
۰،۶۵	۴۰	۲،۳۵	۳۸	۴۹	SF10Sq80
۰،۷	۴۰	۱،۹۴	۴۰	۴۸	SF10S20 Sq80
۰،۷۸	۴۰	۱،۶۳	۴۰	۴۷	SF10S35 Sq80
۱،۳	۴۰	۱،۴۷	۳۰	۵۰	SF10S50 Sq80
۱،۴۱	۴۰	۱،۲۱	۴۰	۴۷	SF10S65 Sq80

به بعد، جایگزینی دوده سیلیسی باعث افزایش مقاومت فشاری به نسبت به نمونه فاقد دوده سیلیسی شده است. مشاهده می‌گردد مقاومت ۲۸ روزه نمونه حاوی ۱۰٪ دوده سیلیسی نسبت به نمونه فاقد دوده سیلیسی به میزان ۲۴/۵۷٪ افزایش می‌یابد. باید توجه شود مقاومت می‌باشند.

جدول ۱۰ - درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی نسبت به نمونه‌های فاقد دوده سیلیسی

درصد کاهش مقاومت					سن (روز)
<i>10SF65S</i>	<i>10SF50S</i>	<i>10SF35S</i>	<i>10SF20S</i>	<i>10SF</i>	
۵,۳۳	-۲,۹	۰,۷۱۴	-۰,۳۱۲	۰,۱۱	۳
-۸,۳۵	-۳۰,۹۵	۱۷,۳	-۱۹,۹۵	۳,۷۶	۷
-۲۳,۹	-۲۱,۶۳	-۱۲,۱	-۱۲,۷	-۱۵	۱۴
-۴۳,۳۳	-۶۴,۴	-۷,۹	-۲۳,۵	-۲۴,۵۷	۲۸

سرباره وضعیت مناسب‌تری را نسبت به نمونه‌های حاوی سرباره تنها، دارا می‌باشند. این بدان معناست که این نمونه‌ها دارای افت دمایی بیشتر و افت مقاومتی کمتری هستند. در نمونه حاوی ۲۰ درصد سرباره و ۱۰ درصد دوده سیلیسی علاوه بر افزایش مقاومت، شاهد کاهش پیک دمایی هستیم. این وضعیت ایده‌آل‌ترین حالت در استفاده از مواد پوزولانی در بتن حجیم است.

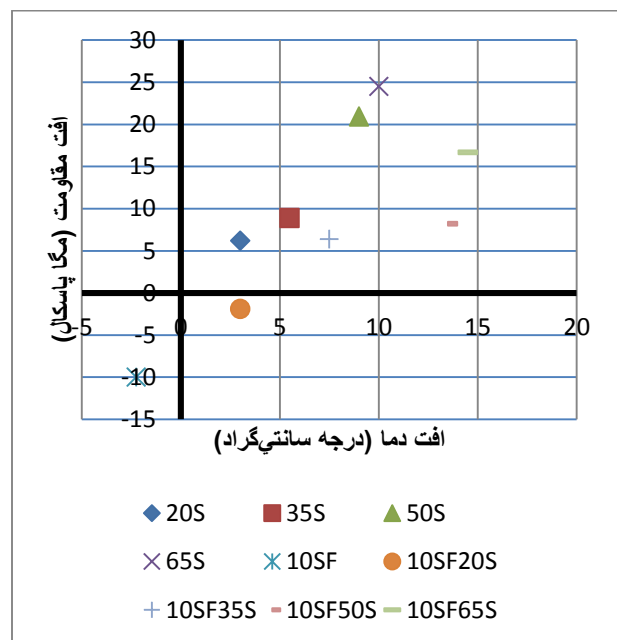
۴-۵- نتایج آزمایش نفوذپذیری

به منظور بررسی اثر مواد مکمل سیمانی (سرباره و دوده سیلیسی) بر میزان نفوذپذیری و میزان تخلخل نمونه‌ها، آزمایش نفوذپذیری بر اساس استاندارد *BS 1881* انجام گرفته است. در جدول ۱۱ و جدول ۱۲ میزان نفوذ آب در زمان‌ها ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت نشان داده شده است.

جدول ۱۱- بررسی نفوذپذیری نمونه‌های حاوی درصد مختلف سرباره

کد طرح	میزان نفوذ آب (ml)		
	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت
<i>0.44C418</i>	۶۵	۷۵	۹۰
<i>20S</i>	۳۵	۴۰	۵۰
<i>35S</i>	۴۵	۶۵	۷۰
<i>50S</i>	۴۰	۵۰	۶۵
<i>65S</i>	۳۰	۶۵	۹۰

شکل ۱۱ نشان دهنده رابطه مابین شرایط مقاومتی و دمایی نمونه‌های حاوی سرباره و دوده سیلیسی است. منظور از افت مقاومت، میزان کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد است. در طرف مقابل، افت دمایی مشخص کننده میزان کاهش در پیک دمایی نمونه‌ها نسبت به نمونه شاهد خواهد بود.



شکل ۱۱ - رابطه افت مقاومت و افت دمایی نمونه‌ها نسبت به بتن شاهد

جایگزینی درصدهای مختلف سرباره سبب کاهش هم‌زمان مقاومت و پیک دمایی نمونه‌ها می‌گردد. از این رو جهت جبران افت مقاومتی، از دوده سیلیسی در نمونه‌های حاوی سرباره استفاده شده است. مشاهده می‌گردد که نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی و

در شکل شماره ۱۲ رابطه مابین نفوذپذیری و ریسک ترک خوردگی را به عنوان شاخصی از دوام نمایش داده شده است. در این شکل ستون‌های مربعی با ابعاد ۱۲۰ سانتی‌متر و در شرایط آب و هوایی سرد به عنوان نمونه آورده شده است. همان‌گونه که در شکل فوق مشخص است، نمونه‌های حاوی ۲۰٪ سرباره و ۱۰٪ دوده سیلیسی تنها و همچنین نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی به همراه ۲۰ و ۳۵ درصد سرباره شرایط مناسب‌تری نسبت به بتن شاهد از حیث دوامی خواهند داشت. در واقع در این نمونه‌ها میزان ریسک ترک خوردگی در محدوده مجاز می‌باشد و میزان نفوذپذیری آن‌ها نسبت به بتن شاهد کاهش یافته است.

۵- نتیجه‌گیری

در پروژه حاضر، تأثیر جایگزینی سرباره کوره بلند ذوب آهن و دوده سیلیسی بجای درصدی از وزن سیمان بر روی مقدار حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون مواد سیمانی و روند کسب مقاومت سنین کوتاه و بلند مدت در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ و سیمان نوع ۲ مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج به دست آمده شامل موارد زیر می‌باشد.

- جایگزینی سرباره تا میزان ۳۵ درصد در ستون‌های بتنی در شرایط مختلف آب و هوایی سبب کاهش ریسک ترک خوردگی گردیده است. اما زمانی که میزان جایگزینی از ۳۵ درصد فراتر می‌رود، شاهد افزایش ریسک ترک خوردگی ستون‌های حجیم بتنی خواهیم بود. دلیل این پدیده کاهش شدید در مقاومت‌های کششی سنین اولیه است.

- استفاده از دوده سیلیسی در نمونه‌های حاوی سرباره سبب کاهش ریسک ترک خوردگی نسبت به ستون‌های حاوی سرباره تنها شده است. علت این پدیده بهبود شرایط مقاومتی سنین اولیه نمونه‌های بتنی با استفاده از دوده سیلیسی می‌باشد.

- در تمامی موارد میزان ریسک ترک خوردگی ستون‌های بتنی در شرایط آب و هوایی گرم نسبت به شرایط آب و هوایی سرد افزایش یافته است.

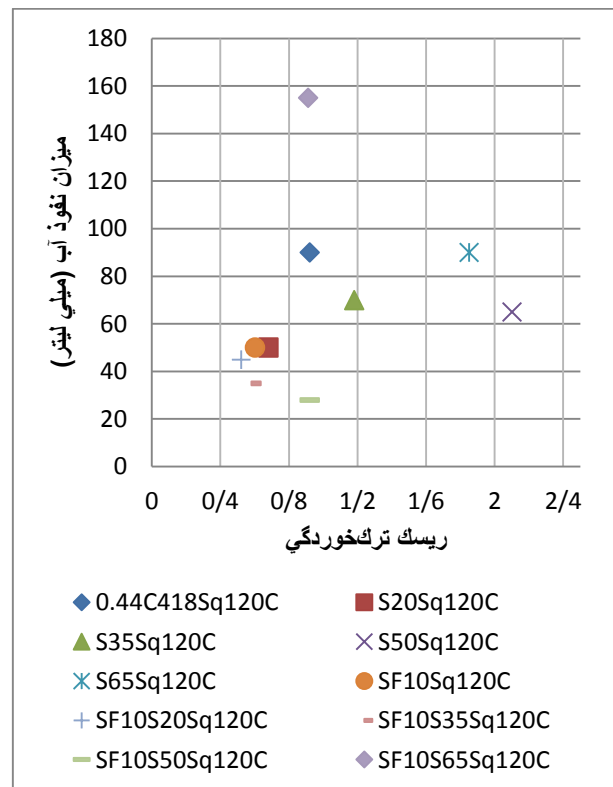
- نتایج عددی تحلیل ستون‌های بتنی حاکی از آن است که پیک دمایی و تنش حداکثر هسته مرکزی مدل، با افزایش دمای محیط افزایش پیدا می‌کند. به طور مثال در این مطالعه دمای حداکثر مدل $0.44C418Sq80$ (ستون مربعی با ابعاد ۸۰ سانتی‌متر حاوی بتن شاهد) به میزان ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد در شرایط آب و هوایی گرم نسبت به شرایط آب و هوایی سرد بیشتر است.

جدول ۱۲ - بررسی نفوذپذیری نمونه‌های حاوی درصد مختلف

سرباره و دوده سیلیسی

کد طرح	میزان نفوذ آب (ml)		
	۲۴ ساعت	۴۸ ساعت	۷۲ ساعت
10SF	۲۵	۳۵	۵۰
20S10SF	۲۰	۲۵	۴۵
35S10SF	۲۰	۲۵	۳۵
50S10SF	۲۰	۲۵	۲۷/۵
65S10SF	۱۲۰	۱۳۵	۱۵۵

به‌طور کلی جایگزینی سرباره تا میزان ۵۰ درصد سبب کاهش چشمگیری در نفوذپذیری می‌گردد؛ اما در نمونه‌ی حاوی ۱۰ درصد دوده سیلیسی و ۶۵ درصد سرباره به دلیل کاهش شدید خاصیت قلیایی در بتن و کاهش سرعت واکنش‌های پوزولانی، هیدرات‌های سیلیکات کلسیم با سرعت پایینی شکل می‌گیرند و ژل حاصل دارای تخلخل زیادی است. جایگزینی دوده سیلیسی در طرح‌های حاوی سرباره به نظر می‌رسد باعث بهبود ریزساختار بتن گردیده است و ساختار خمیری متراکم‌تری را ایجاد می‌کند.



شکل ۱۲- رابطه میزان نفوذ آب در نمونه‌ها و ریسک

ترک خوردگی

۶- مراجع

[۱] مهتا. مونته‌تیرو. "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)." ترجمه رمضیانپور، ع.، قدوسی، پ. و گنجیان، الف. انتشارات دانشگاه امیرکبیر. ۱۳۸۵.

[۲] آئین‌نامه بتن ایران (بخش اول)، نشریه سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، شماره ۱۲۰، ۱۳۶۹.

[3] Detwiler, R. J., Bhatti, J. I. and Bhattacharja, S. "Supplementary Cementing Materials for Use in Blended

[4] Gebregziabihier, B., Thomas, R., Peethamparan, S. "Very early-age reaction kinetics and microstructural development in alkali-activated slag," Cement and Concrete composite., Vol. 55: 91-102. 2014.

[5] M. Nili; A. M. Salehi, Effect of Heat Curing in Core and Surface of Massive Concrete Structures on long term Strength of High Strength Concrete, construction and bulding materials, 2010, Vol. 37, pp. 406-424 .

[6] Y. Ballim, P.C. Graham, The effects of supplementary cementing materials in modifying the heat of hydration of concrete, Mater. Struct. 42 (2009) 803-811

[7] E. Gruyaert, N. Robeyst, N. De Belie, Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry, J. Therm. Anal. Calorim. 102 (2010) 941-951.

[8] Poole, P. "Revision of Test Methods and Specification for Controlling Heat of Hydration in Hydraulic Cement," Portland Cement Association. 2007

[9] HETEK. "Control of Early Age Cracking in Concrete Guidelines," Report No.120, Road Directorate, Copenhagen Denmark. 1997.

[10] NT BUILD 388. "Concrete: Heat Development," Nordtest Method. 2003.

[11] Spang, H., "Hay Box Measurement User Manual," Taastrup, 23 March 2000, Building Technology.

[12] Schindler, A. k., Dossey, D., and McCullough ,B. F. 2002. " Temperature Control During Construction to Improve the Long Term Performance of Portland Cement Concrete Pavements," TEXAS DEPARTMENT OF TRANSPORTATION.

[13] ACI Committee 363. 1997. "High-Strength Concrete (ACI 363R-92)," American Concrete Institute.

[14] Nili, M., Salehi, A.M. "Assessing the effectiveness of pozzolans in massive high-strength concrete," Construction and Building Materials, Vol. 24:2108-2116. 2010.

- با افزایش ابعاد ستون‌ها در مدل‌سازی، دمای هسته مقطع افزایش و زمان رسیدن به حداکثر دما نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه تنش‌های حرارتی در این نوع ستون‌ها افزایش یافته و باعث افزایش ریسک ترک خوردگی مقطع می‌شود.

- استفاده از سرباره در نمونه‌های بتنی سبب کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در مخلوط بتنی می‌گردد. این پدیده باعث کاهش مقاومت نمونه‌های حاوی سرباره به‌ویژه در سنین اولیه می‌گردد. مقاومت ۹۱ روزه نمونه حاوی ۲۰ درصد سرباره به میزان ناچیز از نمونه شاهد بیشتر است؛ اما در درصد‌های جایگزینی بیش از ۲۰ درصد، به دلیل کاهش میزان سیمان مصرفی و در نتیجه کاهش میزان هیدروکسید کلسیم در مخلوط‌های بتنی، مقاومت ۹۱ روزه نسبت به بتن شاهد کاهش یافته است.

- استفاده از دوده سیلیسی در طرح‌های حاوی سرباره سبب افزایش مقاومت نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های حاوی سرباره تنها شده است.

- جایگزینی سرباره تا ۵۰ درصد وزنی سیمان در بتن باعث کاهش میزان نفوذ آب به داخل نمونه‌های بتنی گردیده است. به همین دلیل به نظر می‌رسد استفاده از سرباره به‌عنوان بخشی از سیمان مصرفی سبب بهبود ساختار داخلی بتن می‌گردد.

- استفاده از ۱۰ درصد دوده سیلیسی در نمونه‌های حاوی سرباره سبب بهبود شرایط نفوذپذیری گردیده است. در واقع استفاده از دوده سیلیسی سبب تسریع در انجام واکنش‌ها و بهبود ساختار داخلی بتن شده است. تنها در نمونه حاوی ۶۵ درصد سرباره، استفاده از دوده سیلیسی نتایج خوبی را در پی نداشته است. دلیل این اتفاق در واقع کاهش میزان سیمان مصرفی و در نتیجه کاهش خاصیت قلیایی در مخلوط سیمانی است که جهت انجام واکنش‌های پوزولانی لازم و ضروری است.

- در نهایت با بررسی رابطه مابین شرایط مقاومتی، دمایی و دوامی نمونه‌های ساخته شده، می‌توان بیان کرد که استفاده از دوده سیلیسی همراه با سرباره در تمامی موارد نتایج بهبود یافته‌تری را نسبت به نمونه‌های حاوی سرباره تنها دربر داشته است. در واقع استفاده از دوده سیلیسی در نمونه‌های حاوی سرباره سبب افت بیشتر در پیک دمایی، بهبود مقاومت‌های اولیه و بلند مدت و همچنین سبب بهبود ساختار داخلی و شرایط دوامی نمونه‌ها گردیده است.

- [15] Kishi, T. and K. Maekawa. 1995. "Thermal and Mechanical Modeling of Young Concrete Based on Hydration Process of Multi-Component Cement Materials. Proceedings of the International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Age," ed. R. Springenschmid, E & FN Spon, London.
- [16] Robbins, M. E. "Predicting the Early Age Temperature Response of Concrete Using Isothermal Calorimetry," the degree of Master of Applied Science, Department of Civil Engineering, University of Toronto. 2007.
- [17] Ekolu, S. O. "Role of Heat Curing in Concrete Durability Effect of Lithium Salts and Chloride Ingress on Delay Ettringite Formation," the Degree Of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering, University of Toronto. 2004.
- [18] Scrivener, K. L. and Kirkpatrick, R. J. "Innovation in use and research on cementitious materials," Cement and Concrete Research, Vol.38, pp. 128-136. 2008.
- [19] Wang, K. G. Z., Grove, J., Ruiz, J. M. and Rasmussen, R. "Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field Application." Center for Transportation Research and Education Iowa State University, Report No. FHWA DTF61-01-00042 (Project 17, Phase 1). 2006.

Thermal Modeling of Mass Concrete Volumes Exposed to Cold and Hot Climates

M. Nili

Associate Professor, Civil Eng., Dept., Bu-Ali Sina University, Hamedan, I.R.Iran

A.R. Yazdandoost *

Msc, Civil Eng., Dept., Bu-Ali Sina University, Hamedan, I.R.Iran

Abstract

Utilization of the high strength massive structures has recently increased. This naturally may lead to considerable thermal stresses which in turn create thermal cracks and reduce service life of the structures. Although many attempts, numerically and experimentally, have been to prepare a convenient solution for this problem however no agreement was obtained until now. In the present research, slag and silica fume were used as a partial replacement for cement in the massive mixtures. Temperature history of the 10 concrete mixtures, with 0.44 water cement ratio, was determined via a semi adiabatic system. Concrete columns with 800 and 1200 mm dimension were modeled and a finite elements analysis was carried out to predict thermal stresses and risk of cracking during early stage. Furthermore, the concrete mixtures were examined under water-penetration test. The results declare that using slag as partial replacement for cement diminished hydration peak temperature whereas, silica fume have no serious effect on this parameter. The lowest thermal gradient related to samples containing 50 and 65 percent slag with or without silica fume. The minimum risks of cracking were corresponded to the silica fume specimens. Generally using slag up to 50% with or without silica fume had good impact effect on reducing concrete permeability. In conclusion using silica fume in concrete containing slag improve behavior of fresh and hardened concrete. The results of the present study showed that simultaneous usage of 20% slag is considered as the best proportion in strength, permeability and thermal properties.

Keywords: Mass concrete; Slag; cracking Risk; Heat Generation; Compression Test; Penetration Test.

* Corresponding Author: alirezayazdandost@yahoo.com