

## چه نوع پوزولان و به چه میزان در بتن‌های حجیم با مقاومت زیاد بکار ببریم؟

محمود نیلی<sup>1\*</sup> و امیر مسعود صالحی<sup>2</sup>

<sup>1</sup>استادیار گروه عمران دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا

<sup>2</sup>کارشناس ارشد گروه عمران دانشکده مهندسی - دانشگاه بوعلی سینا

(تاریخ دریافت 88/1/18، تاریخ تصویب 89/8/25)

### چکیده

موضوع تحقیق حاضر بررسی اثر نسبت آب به سیمان و جایگزینی پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس بجای درصدی از وزن سیمان بر حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون سیمان و روند کسب مقاومت اولیه در بتن است. بدین منظور 13 طرح اختلاط با دو نسبت آب به سیمان 0/3 و 0/46 ساخته شد. در هر دو نسبت آب به سیمان علاوه بر طرح شاهد، جایگزینی پوزولان طبیعی (15% و 30%) و خاکستر بادی (15% و 25%) انجام شد. جایگزینی میکروسیلیس نیز فقط در بتن با نسبت آب به سیمان 0/3 و به میزان 5%، 8% و 11% وزنی سیمان انجام شد. جهت تعیین رژیم حرارت هیدراسیون هر بتن، از کالریمتر نیمه آدیباتیک و نرم‌افزار 4C Heat استفاده شد. همچنین مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی در سنین اولیه، 1 تا 7 روز، تعیین گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با افزایش رده مقاومتی، حرارت‌زایی به ازای هر کیلوگرم مواد سیمانی بتن کاهش می‌یابد. همچنین از بین پوزولان‌های مختلف، خاکستر بادی مناسب‌ترین جایگزین سیمان در بتن با نسبت آب به سیمان زیادتر است.

**واژه‌های کلیدی:** بتن حجیم، بتن با مقاومت زیاد، حرارت‌زایی بتن، پوزولان‌ها، مقاومت فشاری اولیه

### مقدمه

می‌یابد که این مسأله رابطه مستقیم با درجه هیدراسیون نهایی بتن‌ها دارد.

پوزولان‌ها اگر چه باعث تقلیل حرارت‌زایی در بتن‌های حجیم پر سیمان می‌گردند ولی نتایج تحقیقات حاکی از این واقعیت است که این مواد معمولاً مقاومت بتن در کوتاه مدت و حتی دراز مدت را کاهش می‌دهند. لذا همواره یکی از دغدغه‌های سازندگان سازه‌های حجیم بتنی، انتخاب مناسب‌ترین پوزولان بوده است [7].

هیدراسیون این مواد آرام، همراه با تولید حرارت کم است که منجر به کسب مقاومت نسبتاً کم در سنین اولیه می‌شود. این اثر چنانچه نسبت پوزولان در مخلوط سیمان افزایش و دمای عمل‌آوری پایین باشد، محسوس‌تر خواهد بود. سرعت واکنش پوزولانی خیلی کمتر از هیدراسیون  $C_3S$  است و تقریباً مشابه  $C_2S$  می‌باشد [8].

حضور خاکستر بادی باعث به تأخیر افتادن هیدراسیون  $C_3S$  در مراحل اولیه می‌شود [9-10]. اما این واکنش در مراحل بعد سریع‌تر انجام خواهد شد. پوزولان طبیعی نیز باعث کاهش محسوس در حرارت تولید شده می‌شود. از سوی دیگر جایگزینی میکروسیلیس باعث تسریع هیدراسیون در همه مراحل می‌شود. این مسأله

پیشرفت تکنولوژی بتن در دهه‌های اخیر قابلیت استفاده و اجرای بتن‌هایی با مقاومت فشاری بیش از 50 مگاپاسکال در پروژه‌های مختلف را فراهم آورده است. مشخصه اصلی ترکیب بتن‌های با مقاومت زیاد، نسبت آب به سیمان کم، همراه با عیار سیمان زیاد است که باعث حرارت‌زایی ذاتی بالا می‌شود [1]. این مسئله زمانی مشکل‌ساز است که این بتن‌ها در ساخت عضوهایی با سطح مقطع بزرگ بکار رفته و باعث بروز ترک‌خوردگی حرارتی شوند. تعیین پتانسیل ترک‌خوردگی حرارتی نیازمند میزان حرارت تولید شده، نرخ تولید آن و مقاومت کسب شده در سنین اولیه است [2-4]. از جمله عوامل اثرگذار بر این پارامترها، نسبت آب به سیمان و مواد سیمانی جایگزین است که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است.

نسبت آب به مواد سیمانی، میزان آب موجود برای هیدراسیون مصالح سیمانی را تعیین می‌کند. این نسبت، کلید اصلی کسب مقاومت بتن و تعیین کننده مقدار مواد سیمانی که قادر به هیدراسیون هستند، می‌باشد [5]. طبق تحقیقی که توسط Schindler [6] انجام گرفته، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار حرارت‌زایی کاهش

بدان دلیل است که هیدراسیون  $C_3S$  و  $C_3A$  در حضور میکروسیلیس سریع تر انجام می شود [11-12].

## طراحی آزمایش

### مصالح مصرفی

برای ساخت بتن از سیمان پرتلند نوع دو با نرمی 3570 سانتیمتر مربع بر گرم استفاده شده است. پوزولان طبیعی (پومیس قروه) از گروه توفهای آتشفشانی بوده که به میزان مناسبی آسیاب شده است. دوده سیلیسی مصرفی، محصول کارخانه فروسیلیس ایران و خاکستر بادی آفریفای جنوبی با کلسیم کم (نوع F) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصات مواد سیمانی مصرفی در جدول (1) آورده شده است.

### جدول 1: مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی مصرفی.

Properties	Cement	Natural Pozzolan	Fly Ash	Silica Fume
SiO <sub>2</sub>	21.44	53.68	56.95	85-95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.52	12.13	25.76	0.5-1.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.69	7.04	6.5	0.4-2
CaO	63.54	9.43	4-10	-
MgO	1.48	9.02	2.5	-
SO <sub>3</sub>	2.26	2.52	<0.35	-
Na <sub>2</sub> O	0.52	-	.14	0.15-0.2
K <sub>2</sub> O	0.72	3.05	.14	.15-1.02
LOI (%)	-	0.48	1.28	1.5-2.5
SS (cm <sup>2</sup> /g)	3570	4500	-	14000
SG(g/cm <sup>3</sup> )	3.1	2.91	2.43	2.21

LOI: Loss on ignition.

SS: Specific surface.

SG: Specific gravity.

سنگدانه‌های درشت مصرفی در این تحقیق دارای حداکثر اندازه 19/5mm، نیمه شکسته و آهکی با چگالی 2/6 است. همچنین سنگدانه های ریز (ماسه) مصرفی ترکیبی از ماسه طبیعی و ماسه آهکی شکسته است که دارای چگالی 2/67 و مدول نرمی 2/63 می باشند (در همه طرح‌ها، نسبت وزنی درشت‌دانه به ریزدانه یکسان در نظر گرفته شده است).

همچنین جهت حصول کارایی مطلوب و همگنی مخلوط، از یک نوع فوق روان کننده با نام تجاری GLENIUM(110M) و محصول شرکت BASF (دگوسا)

استفاده گردیده است.

### طرح اختلاط

13 طرح مخلوط با دو نسبت آب به سیمان 0/46 و 0/30 ساخته شده است. در هر دو نسبت آب به سیمان، پوزولان طبیعی و خاکستر بادی با مقادیر مشخص جایگزین بخشی از سیمان گردیده است. علاوه بر این در بتن با نسبت آب به سیمان 0/3، جایگزینی میکروسیلیس نیز انجام شده است.

همچنین از آنجا که ممکن است فوق روان کننده‌ها باعث تأخیر در شروع حرارت‌زایی شوند، در هر رده مقاومتی، میزان فوق روان کننده بکار رفته یکسان می باشد. جزئیات طرح مخلوط‌ها و نسبت‌های مواد و مصالح به کار رفته در ساخت بتن‌ها در جدول (2) آورده شده است.

### نمونه‌گیری حرارتی و مقاومتی

جهت تعیین میزان حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون سیمان، از یک کالریمتر نیمه آدیاباتیک استفاده شده است.

انواع کالریمتر نیمه آدیاباتیک، شامل یک مخزن ایزوله مناسب است که نمونه بتن در آن قرار می گیرد. در این روش اجازه عبور مقدار کمی گرما از بدنه عایق وجود دارد. حداکثر کاهش گرما باید کمتر از 100J/(h.K) باشد.

رژیم حرارت هیدراسیون از مجموع گرمای ناشی از افزایش دمای نمونه داخل محفظه ایزوله با مقدار حرارت خارج شده از مخزن، قابل حصول است.

در انجام محاسبات، خواص حرارتی شامل ضریب هدایت حرارتی، گرمای ویژه و همچنین انرژی فعال سازی<sup>1</sup> سیمان لحاظ شده است.

پس از ساخت هر سری بتن، نمونه استوانه‌ای 15×30 سانتی‌متری مطابق استاندارد تهیه و درون محفظه نیمه آدیاباتیک (Hay box) قرار داده می شود. قبل از بسته شدن درب محفظه، سنسور حرارتی<sup>2</sup> داخل نمونه بتنی قرار می گیرد.

دمای توسعه یافته بتن ناشی از حرارت هیدراسیون سیمان در هر دقیقه توسط یک دستگاه ثابت<sup>3</sup> مدل CR10X و نرم افزارهای Guardian و PC200W ثبت می شود (شکل 1).

جدول 2: مقادیر طرح اختلاط بتن (وزن مصالح سنگی در حالت اشباع با سطح خشک می باشد).

Concrete	W/C	Water	Cement	Natural Pozzolan	Fly Ash	Silica Fume	Fine Aggregate	Coarse Aggregate	Super plasticizer	Slump
									(%)	cm
50	046	179.5	385	-	-	-	911	875	0.25	12
50P15	046	179.5	327.5	57.7	-	-	909	874	0.25	10
50P30	046	179.5	269.5	115.5	-	-	908	871	0.25	15.5
50FA15	046	179.5	327.2	-	57.7	-	904	868	0.25	13.3
50FA25	046	179.5	288.7	-	96.2	-	899	863	0.25	17.5
80	0.3	164.7	540	-	-	-	865	829	0.6	15
80P15	0.3	164.7	459	81	-	-	861	828	0.6	21
80P30	0.3	164.7	378	162	-	-	859	825	0.6	22.5
80FA15	0.3	164.7	459	-	81	-	854	820	0.6	-
80FA25	0.3	164.7	405	-	135	-	847	813	0.6	-
80SF5	0.3	164.7	513	-	-	27	859	825	0.6	10.5
80SF8	0.3	164.7	496.8	-	-	43.2	856	822	0.6	16.5
80SF11	0.3	164.7	480.6	-	-	59.4	853	820	0.6	12

حرارت تولید شده به ازای هر کیلوگرم سیمان در مقابل مقدار معادل بلوغ بتن ارائه می شود. جهت تعیین بلوغ در هر لحظه از رابطه آرنیوس [12] استفاده شده است:

$$M = \sum_{i=1}^n H(T_i) \cdot \Delta t_i \quad (1)$$

$$H(T) = \exp \left[ \frac{E(T)}{R} \cdot \left( \frac{1}{293} + \frac{1}{273+T} \right) \right] \quad (2)$$

$$\begin{cases} E(T) = Act_1 & \text{If } T > 20^\circ C \\ E(T) = Act_1 + Act_2 \cdot (20 - T) & \text{If } T < 20^\circ C \end{cases} \quad (3)$$

که در سری روابط فوق داریم:

$\Delta t_i$ : فاصله زمانی بین دو سری قرائت دما

$T_i$ : متوسط دما در یک فاصله زمانی (درجه سلسیوس)

$H(T)$ : فاکتور نرخ

$R$ : ثابت گازها برابر  $8/314 \text{ J/mol/K}$

$E(T)$ : انرژی فعال سازی بتن ( $\text{J/gr - molecule}$ )

$Act_1$ : فاکتور اول انرژی فعال سازی بتن  $33500 \text{ J/mol}$

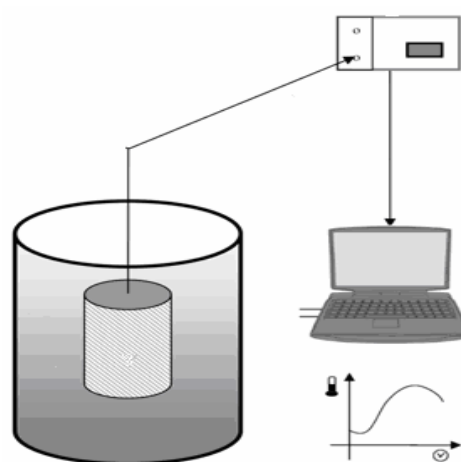
$Act_2$ : فاکتور دوم انرژی فعال سازی بتن  $1470 \text{ J/mol}$

برای مقایسه حرارت زایی بتن ها، از مقادیر حرارت تولید شده در بلوغ 24، 48، 72 و 200 ساعت - درجه سلسیوس استفاده شده است. بدین ترتیب از  $Q(200hr^\circ C)$  بعنوان مقدار حرارت زایی کل در سنین اولیه و از تقسیم  $Q(24hr^\circ C)$ ،  $Q(48hr^\circ C)$  و  $Q(72hr^\circ C)$  بر  $Q(200hr^\circ C)$ ، تخمینی از نرخ تولید حرارت در بتن زده می شود.

## نتایج و تحلیل آنها

### توسعه حرارت بتن ها

پارامترهای حرارتی در جدول (3) آورده شده است.



شکل 1: محفظه نیمه آدیاباتیک متصل به دیتالوگر.

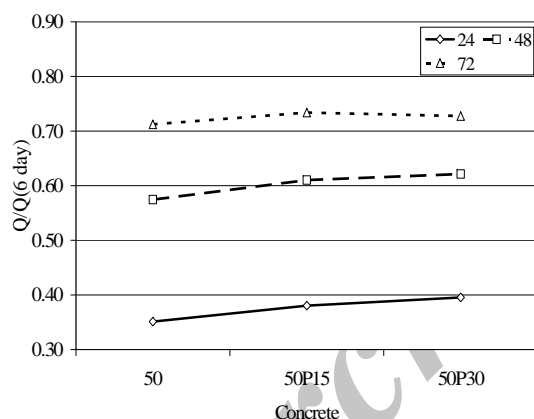
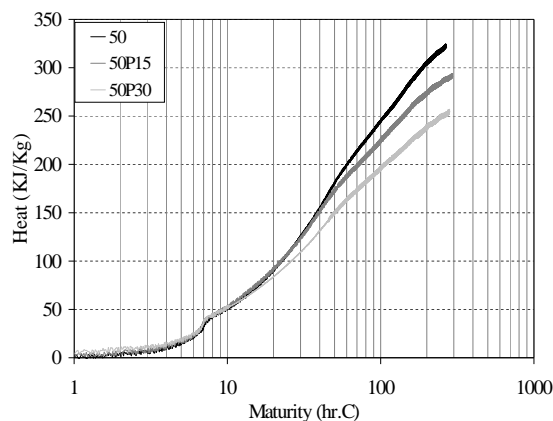
اندازه گیری دمای بتن به مدت 6 روز و تا رسیدن به دمای محیط صورت می گیرد. سپس با استفاده از اطلاعات دمای ثبت شده و لحاظ نمودن میزان هدر روی محفظه (که قبلاً از طریق نگهداری آب با دمای 40 درجه سلسیوس تعیین شده است)، توسط نرم افزار 4C-Heat حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون محاسبه می گردد. جهت تعیین مقاومت فشاری، از نمونه های مکعبی 100 میلی متری استفاده شده است. نمونه ها پس از مراقبت در شرایط استاندارد در سنین 1، 2، 3 و 7 روز توسط جک هیدرولیکی ADR 2000KN با سرعت 3 کیلو نیوتن بر ثانیه تعیین مقاومت شده و میانگین دو نمونه به عنوان مقاومت فشاری گزارش گردیده است.

### نحوه شرح نتایج و مقایسه حرارت زایی بتن های مختلف

حرارت زایی ناشی از هیدراسیون، به صورت منحنی

می‌گردد. افزایش مقدار جایگزینی باعث کاهش حرارت‌زایی به میزان 21% گردیده است.

اما این ماده نه تنها باعث کاهش نرخ تولید حرارت نشده، بلکه کمی آن را افزایش داده است. روند صعودی نرخ تولید حرارت با افزایش مقدار جایگزینی تشدید شده است (در حالی که مدت زمان تأخیر در شروع حرارت‌زایی بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی مساوی است).



شکل 3: حرارت‌زایی بتن رده 50 حاوی پوزولان طبیعی.

جایگزینی پوزولان طبیعی در بتن 80 علاوه بر کاهش مقدار حرارت‌زایی، باعث کاهش نرخ تولید حرارت شده است (شکل 4).

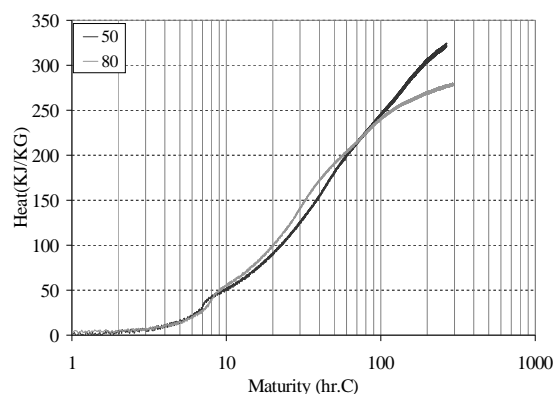
جایگزینی 15% و 30% از این ماده باعث کاهش حرارت‌زایی به میزان 3% و 15% می‌گردد. همچنین این ماده باعث کاهش نرخ تولید حرارت می‌شود. این روند در نمودار نرخ تولید حرارت (شکل 4) قابل مشاهده است. با این وجود افزایش مقدار جایگزینی، تأثیر ناچیزی در نرخ تولید حرارت دارد و به مقدار کمی باعث کاهش این شاخص می‌گردد.

جدول 3: پارامترهای حرارتی بتن‌های مختلف.

Concrete	Induction period hr	Q	Q	Q	Q
		(24)	(48)	(72)	(200)
50	7.5	106	174	216	303
50P15	7.25	104	167	200	273
50P30	7.25	94	148	174	239
50FA15	8	92	153	188	263
50FA25	7.78	85	131	162	233
80	7.75	117	187	217	268
80P15	10.25	93	168	202	259
80P30	10.75	84	142	172	227
80FA15	12	66	139	177	247
80FA25	14.5	63	122	162	224
80SF5	7.5	104	177	207	264
80SF8	8.5	98	165	196	257
80SF11	8.5	108	172	204	255

### تأثیر نسبت آب به سیمان

میزان حرارت‌زایی بتن‌های 50 و 80 در شکل (2) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، افزایش رده مقاومتی (کاهش نسبت آب به سیمان) باعث کاهش حرارت‌زایی به میزان 11% می‌شود. دلیل اصلی این مسأله، کاهش مقدار آب جهت هیدراسیون سیمان (درجه هیدراسیون نهایی کمتر) است. اما با توجه به نمودار نرخ تولید حرارت در شکل‌های (3) و (4)، بتن با نسبت آب به سیمان کم، دارای نرخ تولید حرارت بیشتری است.

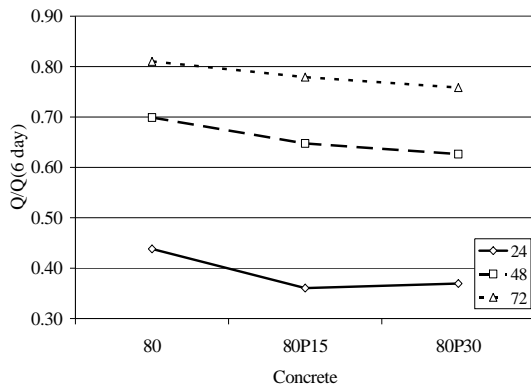


شکل 2: منحنی توسعه حرارت بتن شاهد 50 و 80.

### تأثیر جایگزینی پوزولان طبیعی

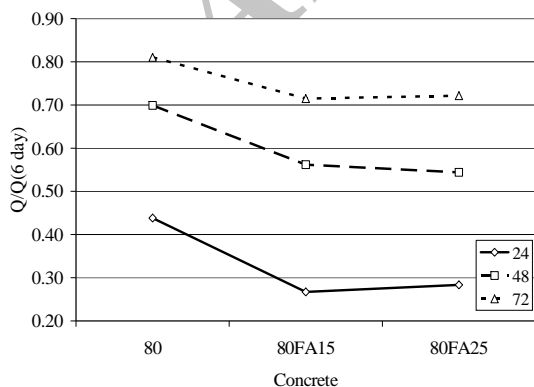
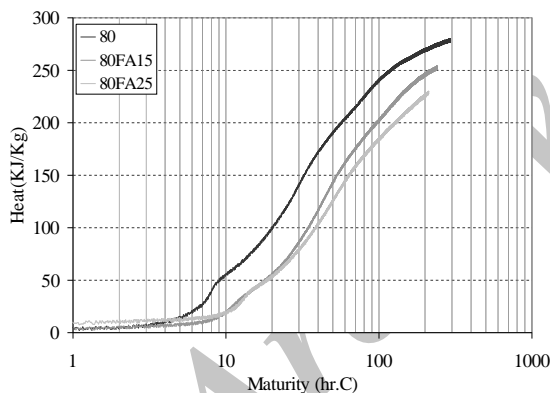
جایگزینی پوزولان طبیعی در بتن 50 باعث کاهش حرارت‌زایی شده است (شکل 3). این روند با افزایش مقدار جایگزینی، تشدید می‌شود.

با توجه به مقادیر حرارت تولید شده در بلوغ 200 ساعت - درجه سلسیوس، جایگزینی 15% پوزولان طبیعی باعث کاهش 10% حرارت‌زایی (نسبت به بتن شاهد)



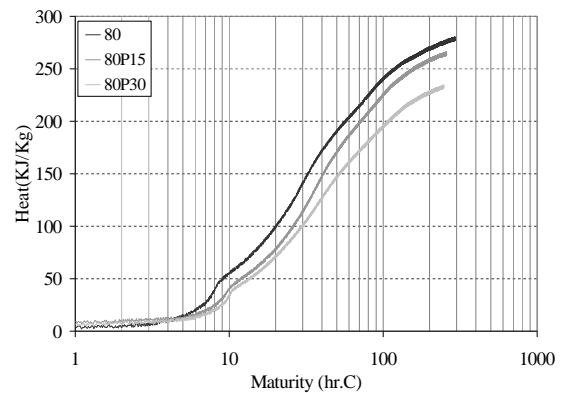
شکل 4: حرارت‌زایی بتن رده 80 حاوی پوزولان طبیعی .

جایگزینی 15% خاکستر بادی، 13% حرارت‌زایی اولیه را کاهش داده است (نسبت به بتن شاهد). افزایش مقدار جایگزینی باعث کاهش 23 درصدی حرارت‌زایی می‌شود. همچنین جایگزینی این ماده در این رده مقاومتی باعث کاهش بسیار کم نرخ تولید حرارت بتن گردیده است. از جمله دلایل کاهش نرخ تولید حرارت، تأثیر خاکستر بادی بر هیدراسیون اجزاء سیمان، بویژه تأخیر در هیدراسیون  $C_3S$  می‌باشد.

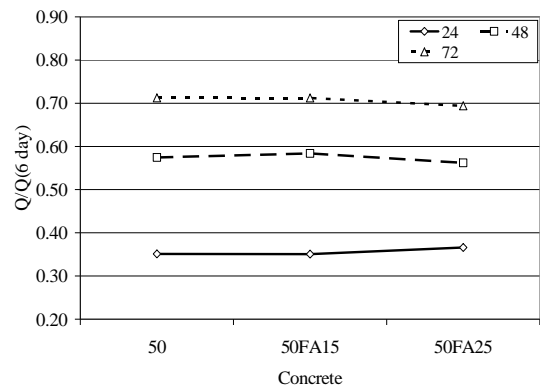
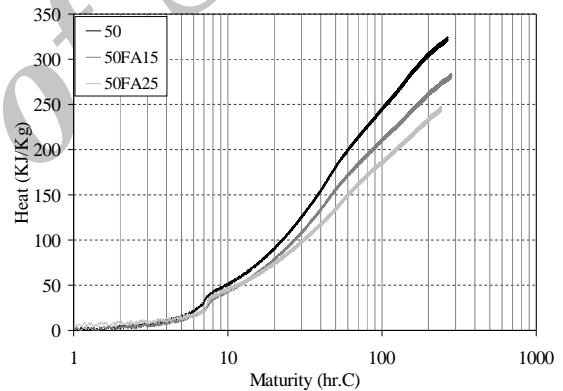


شکل 6: حرارت‌زایی بتن رده 80 حاوی خاکستر بادی.

جایگزینی خاکستر بادی در بتن رده 80 با توجه به مقدار وزنی زیاد، تأثیر بیشتری داشته است. جایگزینی



مقایسه جایگزینی پوزولان طبیعی در بتن 50 و 80 نشان می‌دهد که در رده مقاومتی 50، تأثیر عمده بر کاهش مقدار حرارت‌زایی اولیه ( $Q_{(200hr^{\circ}C)}$ ) است. اما در بتن 80 علاوه بر کاهش حرارت‌زایی اولیه، نرخ تولید آن نیز بطور محسوس کاهش یافته است.



شکل 5: حرارت‌زایی بتن رده 50 حاوی خاکستر بادی.

### تأثیر جایگزینی خاکستر بادی

جایگزینی خاکستر بادی در بتن 50 علاوه بر کاهش مقدار حرارت‌زایی، باعث کاهش ناچیز نرخ تولید حرارت شده است. با توجه به شکل (5) مشاهده می‌شود که

می‌شود. مقادیر کاهش به ازای جایگزینی 5، 8 و 11 درصد جایگزینی میکروسیلیس به ترتیب حدود 1/5%، 4% و 5% است (نسبت به بتن شاهد).

این ماده بر نرخ تولید حرارت نیز تأثیرگذار است. همانطور که در نمودار نرخ تولید حرارت (شکل 7) ملاحظه می‌شود، جایگزینی 5% و 8% میکروسیلیس باعث کاهش نرخ تولید حرارت می‌گردد. در حالی که بتن حاوی 11% میکروسیلیس، دارای نرخ تولید حرارت بیشتر و در حدود بتن شاهد است.

### انتخاب مناسب‌ترین جایگزین سیمان در بتن بر اساس حرارت‌زایی

جهت تعیین بتن مناسب از نظر حرارت‌زایی، از مقدار  $Q_{(200hr,0C)}$  هر بتن و مقادیر نرخ صعود منحنی در بلوغ‌های 24، 48 و 72 ساعت - درجه سلسیوس استفاده می‌شود. مقادیر فوق در شکل (8) برای بتن 50 نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد جایگزینی هر دو نوع پوزولان باعث کاهش مقدار حرارت‌زایی می‌گردد. اما مقدار کاهش برای بتن‌های حاوی خاکستر بادی بیشتر از بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی است. همچنین خاکستر بادی باعث کاهش نرخ تولید حرارت می‌شود. در حالی که پوزولان طبیعی باعث افزایش شاخص فوق شده است.

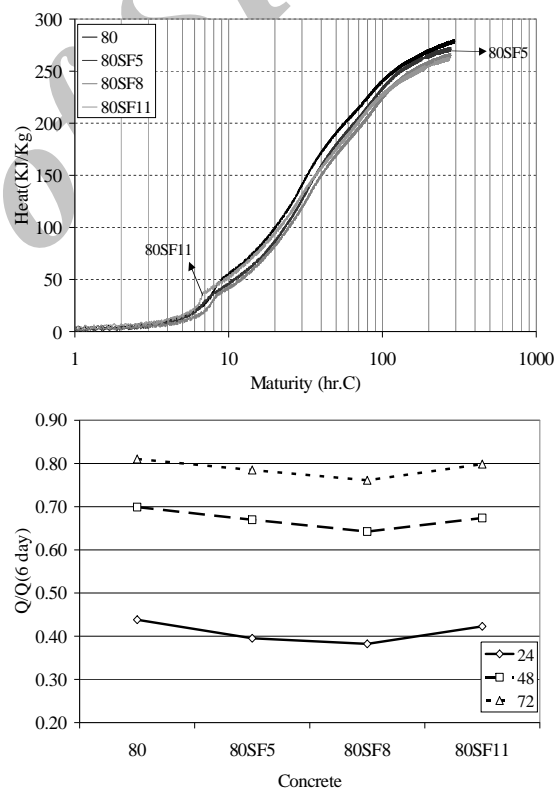
در شکل (9) مقدار حرارت‌زایی و نرخ تولید آن برای بتن 80 نشان شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود جایگزینی خاکستر بادی و پوزولان طبیعی باعث کاهش نسبتاً زیاد مقدار حرارت‌زایی می‌گردد. البته کاهش مقدار حرارت در بتن‌های حاوی خاکستر بادی بیشتر است (این اختلاف در جایگزینی 15% خاکستر بادی و پوزولان طبیعی کاملاً مشهود است).

میکروسیلیس نیز باعث کاهش مقدار حرارت‌زایی می‌شود. اما در مقایسه با پوزولان‌های دیگر، این مقدار کاهش ناچیز است.

نکته جالب در این مورد، حرارت تولید شده کمتر بتن‌های حاوی 8% و 11% میکروسیلیس نسبت به بتن حاوی 15% پوزولان طبیعی است. همچنین جایگزینی هر سه نوع پوزولان در بتن 80، باعث کاهش نرخ تولید حرارت می‌شود. که بیشترین کاهش متعلق به بتن‌های حاوی خاکستر بادی و کمترین کاهش متعلق به بتن‌های حاوی میکروسیلیس است.

15% از این ماده، باعث کاهش 8% و جایگزینی 25%، باعث کاهش 16 درصدی مقدار حرارت‌زایی می‌گردد. علاوه بر این، جایگزینی خاکستر بادی در بتن 80 باعث کاهش نرخ تولید حرارت می‌شود. اما مقدار جایگزینی تأثیر ناچیزی روی نرخ تولید حرارت داشته است (شکل 6).

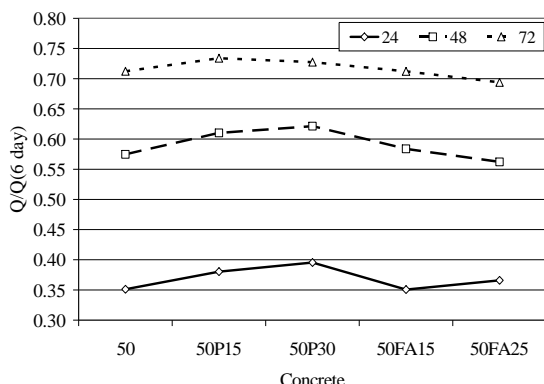
مقایسه جایگزینی خاکستر بادی در بتن 50 و 80 نشان می‌دهد که اثر عمده این ماده در بتن 50، بر روی مقدار حرارت‌زایی است. اما در بتن 80 علاوه بر کاهش مقدار، نرخ تولید حرارت نیز به طور محسوس کاهش یافته است. از جمله عوامل کاهش نرخ تولید حرارت، زمان‌های تأخیر نسبتاً زیاد این بتن‌ها است. به طوری که بتن‌های 50، دارای مدت زمان تأخیر حدود 8 ساعت می‌باشند، در حالی که در بتن‌های 80، بعد از حدود 12 ساعت از تماس سیمان با آب، واکنش‌های اصلی حرارت‌زا آغاز می‌شوند.



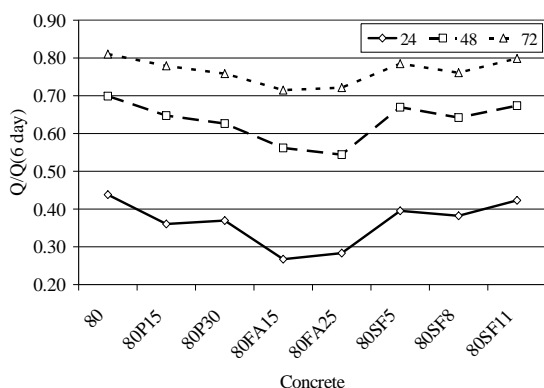
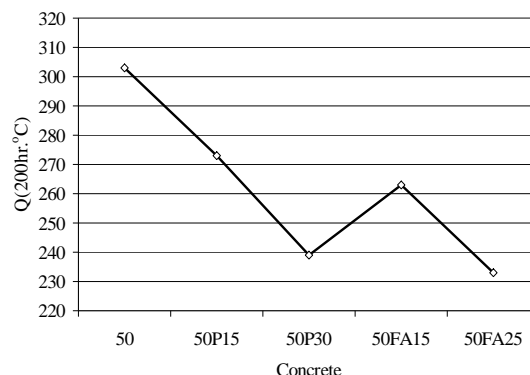
شکل 7: حرارت‌زایی بتن رده 80 حاوی میکروسیلیس.

### تأثیر جایگزینی میکروسیلیس

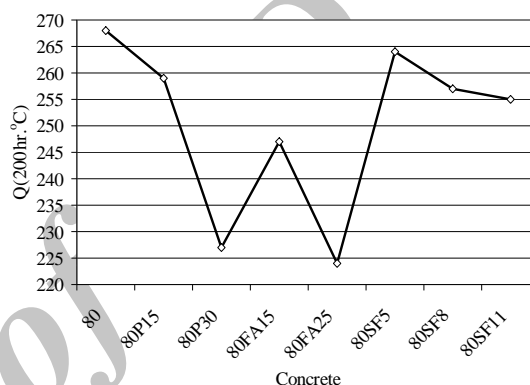
از آنجایی که جایگزینی میکروسیلیس در بتن‌های مقاومت خیلی زیاد مورد استفاده قرار می‌گیرد، بنابراین در این تحقیق از این ماده فقط در بتن رده 80 استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (7) مشاهده می‌شود، جایگزینی میکروسیلیس باعث کاهش ناچیز حرارت‌زایی می‌گردد. این کاهش با افزایش درصد جایگزینی بیشتر



شکل 8: مقدار حرارت و نرخ تولید آن در بتن رده 50.



شکل 9: مقدار حرارت و نرخ تولید آن در بتن رده 80.



3 و 7 روز آورده شده است.

جدول 4: نتایج مقاومت فشاری بتن‌های مختلف.

Concrete	Compressive Strength (MPa)			
	1 day	2 day	3 day	7 day
50	12.14	20.57	27.46	38.73
50P15	11.72	19.34	24.94	34.54
50P30	6.64	12.66	16.59	25.01
50FA15	10.28	19.19	25.05	37.49
50FA25	11.12	16.79	21.42	30.74
80	39.61	44.21	54.36	62.42
80P15	28.23	42.1	49.70	57.77
80P30	22.11	33.93	42.85	49.53
80FA15	28.18	41.33	44.89	53.77
80FA25	19.85	31.09	40.89	56.12
80SF5	27.52	43.9	53.22	64.05
80SF8	29.14	42.79	50.65	62.56
80SF11	30.81	43.48	53.11	66.01

در شکل (10) مقاومت کسب شده بتن‌های رده 50 در سنین اولیه نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، از بین بتن‌های رده 50، بتن بدون پوزولان (شاهد) بیشترین مقاومت را کسب کرده است. اما در بتن‌های حاوی پوزولان، نمونه‌های حاوی 15% پوزولان طبیعی و خاکستر بادی دارای بیشترین مقاومت (بویژه در

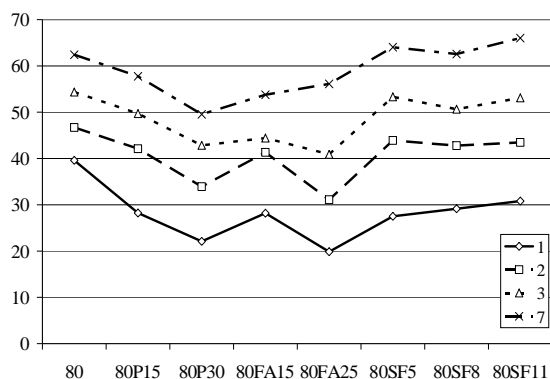
### کسب مقاومت اولیه بتن‌ها حاوی پوزولان‌های مختلف

جهت تعیین ریسک ترک‌خوردگی مقاطع حجیم بتنی، علاوه بر مقدار تنش کششی تولید شده (ناشی از گرادبان حرارتی)، مقاومت کششی بتن در هر قسمت از مقطع سازه نیاز است. با توجه به وقوع حداکثر دمای هسته مقاطع حجیم در زمانی کمتر از 48 ساعت، ممکن است سطوح این اعضا در بلوغ‌های نسبتاً پایینی تحت تنش کششی قرار گیرند. بنابراین روند کسب مقاومت بتن در سنین اولیه بسیار مهم است.

این مسأله در سازه‌های ساخته شده با بتن مقاومت زیاد که معمولاً در سنین اولیه حرارت زیادی تولید می‌کنند، اهمیت دو چندان می‌یابد. واضح است، بتنی که در سنین اولیه مقاومت زیادتری کسب کند، تحمل تنش کششی بیشتری داشته و در نتیجه مقطع بتنی ریسک ترک‌خوردگی کمتری خواهد داشت.

بدین منظور، در این بخش به بررسی روند کسب مقاومت بتن‌های مختلف در سنین اولیه خواهیم پرداخت. در جدول (4) نتایج مقاومت فشاری بتن‌ها در سنین 1، 2،

بترتیب استفاده از میکروسیلیس، پوزولان طبیعی و خاکستر بادی حداکثر تا 15% وزنی سیمان پیشنهاد می‌گردد.



شکل 11: توسعه مقاومت فشاری اولیه در بتن 80.

### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر جایگزینی پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس بجای درصدی از وزن سیمان بر روی مقدار حرارت تولید شده ناشی از هیدراسیون سیمان و روند کسب مقاومت اولیه در بتن‌های با نسبت آب به سیمان 0/46 و 0/3 و سیمان نوع 2 مورد مطالعه قرار گرفت که نتایج به دست آمده شامل موارد زیر است:

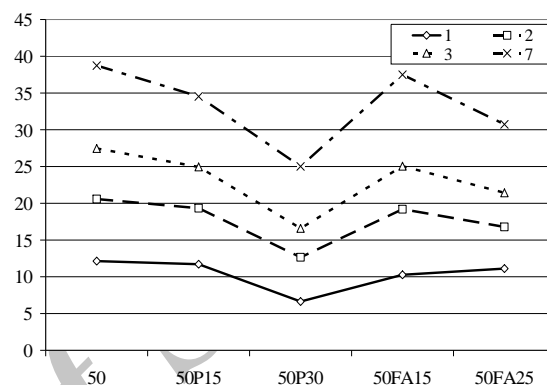
1- افزایش رده مقاومت بتن (کاهش نسبت آب به سیمان) باعث کاهش مقدار حرارت‌زایی به ازای هر کیلوگرم مواد سیمانی می‌شود. اما نرخ تولید حرارت، افزایش می‌یابد.

2- جایگزینی پوزولان طبیعی در بتن 50 باعث کاهش مقدار حرارت‌زایی می‌شود. این روند با افزایش درصد جایگزینی تشدید می‌گردد. اما این ماده باعث بیشتر شدن نرخ تولید حرارت شده است. اما جایگزینی این ماده در بتن با رده مقاومتی بالاتر، علاوه بر کاهش مقدار حرارت‌زایی، باعث کاهش نرخ تولید حرارت نیز می‌شود.

3- جایگزینی خاکستر بادی علاوه بر کاهش میزان حرارت تولید شده در بتن، باعث کاهش نرخ تولید آن نیز می‌شود. این روند با افزایش درصد جایگزینی و همچنین بالاتر رفتن رده مقاومتی (با توجه مقدار وزنی زیادتر خاکستر بادی) تشدید می‌شود.

3 روز اول) می‌باشند. همچنین از بین بتن‌های حاوی مقادیر بیشتر پوزولان، جایگزینی 25% خاکستر بادی باعث کسب مقاومت بیشتری نسبت به بتن حاوی 30% پوزولان طبیعی می‌شود.

بنابراین در رده مقاومتی 50، در صورت نیاز به جایگزینی پوزولان و کسب مقاومت فشاری اولیه مناسب، استفاده از هر دو نوع پوزولان طبیعی و خاکستر بادی با مقدار محدود جایگزینی (زیر 15%) پیشنهاد می‌گردد.



شکل 10: توسعه مقاومت فشاری اولیه در بتن 50.

در شکل (11)، مقادیر مقاومت فشاری در سنین اولیه برای بتن‌های 80 نشان داده شده است. از بین کلیه بتن‌ها، نمونه‌های بتن شاهد، در سن 1 و 2 روز، دارای بیشترین مقاومت فشاری است. اما با افزایش سن (3 و 7 روز)، بتن‌های حاوی مقادیر مختلف میکروسیلیس، مقاومتی برابر و حتی بیشتر از مقاومت بتن شاهد را کسب کرده‌اند.

از بین جایگزینی مقادیر مختلف پوزولان طبیعی و خاکستر بادی، بتن‌های حاوی 15% از این مواد، دارای مقاومت فشاری اولیه مناسبی تری است. مقاومت نمونه‌های این دو بتن در سنین 1 و 2 روز، تقریباً مساوی است. اما از سن 3 روز به بعد، مقاومت نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی افزایش یافته است.

همچنین روند کسب مقاومت فشاری در مقادیر بیشتر جایگزینی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی نشان می‌دهد که مقاومت بتن حاوی 30% پوزولان طبیعی تا 3 روز اول بیشتر از بتن 80FA25 است. اما در سن 7 روز، بتن حاوی خاکستر بادی مقاومت بیشتری را کسب کرده است.

بنابراین در رده مقاومتی 80، در صورت نیاز به جایگزینی پوزولان و کسب مقاومت فشاری اولیه مناسب،



آن در سنین اولیه مناسب باشد. نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر حاکی از آن است که:

- در بتن رده 50 مگاپاسکال، خاکستر بادی هم از حیث حرارتزایی در پایینترین سطح می باشد و هم به لحاظ مقاومتی از میزان قابل قبولی برخوردار است.
- در رده مقاومتی 80 مگاپاسکال، بطور کامل نمی توان جایگزینی پوزولان خاصی را توصیه کرد. اما در مقدار جایگزینی کم (تا حداکثر 15%) جایگزینی خاکستر بادی نسبت به دیگر پوزولانها مؤثرتر عمل کرده است.

### تقدیر و تشکر

در نهایت وظیفه خود می دانم که از کمک های آقایان مهدی سلیمانی راد، احمد معظمی گودرزی و حسان صالحی سپاسگزاری نمایم.

- 4- جایگزینی خاکستر بادی باعث افت بیشتر حرارتزایی نسبت به پوزولان طبیعی شده است. جایگزینی خاکستر بادی هم از نظر کاهش میزان حرارتزایی و هم از نظر کاهش نرخ تولید آن، مؤثرتر از پوزولان طبیعی عمل کرده است.
- 5- میکروسیلیس باعث کاهش مقدار حرارتزایی در بتن می شود. این روند با افزایش مقدار جایگزینی بیشتر می شود. همچنین این ماده باعث کاهش نرخ تولید حرارت به مقدار اندک می شود.
- 6- پیشنهاد می گردد که در ساخت بتن های حجیم با مقاومت زیاد هر دو عامل حرارتزایی و کسب مقاومت اولیه مورد توجه قرار گیرد. به عبارتی از بین گزینه های مورد انتظار در بتن های حجیم، بتنی مناسب برای مقاطع حجیم خواهد بود که مقدار و نرخ تولید حرارت آن در 3 روز اول کم و کسب مقاومت

### مراجع

- 1 - Yuan, R. L., Ragab, M. and Hill, R. E. and Cook, J. E. (1991). "Evaluation of core strength in high strength concrete." *ACI material journal*, Vol.13, Issue 5, PP. 30-34.
- 2 - Sioulas, B. and Sanjayan, J. G. (2000). "Hydration temperatures in large high-strength concrete columns incorporating slag." *Cement and Concrete Research*, Vol 30, Issue 11, PP. 1791-1799.
- 3 - Kaszynska, M. (2002). "Early Age Properties of High-Strength/High-Performance Concrete." *Cement and Concrete Composite*, Vol. 24, PP. 253-361.
- 4 - Thurston, S.J., Priestly, N. and Cooke, N. (1980). "Thermal analysis of thick concrete sections." *ACI Journal Proceedings*, Vol. 77, Issue 5, PP. 347-357.
- 5 - Robbins, M. E. (2007). "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.
- 6 - Schindler, A. K. (2002). *Concrete Hydration, Temperature Development and Setting at Early Ages*, PhD dissertation, University of Texas at Austin.
- 7 - Detwiler, R. J., Bhatta, J. I. and Bhattacharja, S. (1998). "Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements." *Portland Cement Association, Research and development bulletin RD112T*.
- 8 - Wang, K. G. Z., Grove, J., Ruiz, J. M. and Rasmussen, R. (2006) "Developing a Simple and Rapid Test for Monitoring the Heat Evolution of Concrete Mixtures for Both Laboratory and Field Applications." *Center for Transportation Research and Education Iowa State University*, Report No. FHWA DTF61-01-00042 (Project 17, Phase I).
- 9 - Jawed, I. and Skalny, J. (1981). *Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete*. MRS Symposium Proceedings.
- 10 - Uchikawa, H. and Uchida, S. (1980), "Influence of pozzolana on the hydration of C<sub>3</sub>A." *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress on the Cement Chemistry*.

- 11 - Kurdowski, W. and Nocun-Wczelik, W. (1983). "The tricalcium silicate hydration in the presence of active silica." *Cement and Concrete Research*, Vol. 13, PP. 34143.
- 12 - HETEK. (1997). *Control of Early Age Cracking in Concrete Guidelines*, Report No. 120, Road Directorate, Copenhagen Denmark.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Activation energy
- 2 - Thermometer
- 3 - Data logger

Archive of SID