

# تأثیر پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس بر روند کسب مقاومت فشاری و جذب آب حجمی در بتن‌های دارای مقاومت بالا

محمود نیلی<sup>۱\*</sup>، امیر مسعود صالحی<sup>۲</sup>

۱- استادیار، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه عمران

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی، گروه عمران

nili36@yahoo.co.uk

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۹/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۴/۰۲

**چکیده-** موضوع تحقیق حاضر، بررسی اثر جایگزینی پوزولان طبیعی، خاکستر بادی و میکروسیلیس با درصدی از وزن سیمان بر روی مقاومت فشاری و حجم منافذ داخلی بتن با مقاومت زیاد است. بدین منظور ۱۳ طرح اختلاط با دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۶ و ۰/۳ ساخته شد. در هر دو نسبت آب به سیمان، علاوه بر طرح شاهد، جایگزینی پوزولان طبیعی به مقدار ۱۵ و ۳۰ درصد و جایگزینی خاکستر بادی به میزان ۱۵ و ۲۵ درصد وزنی سیمان انجام شد. میکروسیلیس نیز تنها در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳ و به میزان ۵، ۸ و ۱۱ درصد جایگزین شد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که جایگزینی پوزولان طبیعی باعث کاهش مقاومت در سنین اولیه و نهایی می‌شود اما خاکستر بادی، با وجود کاهش مقاومت اولیه بتن، مقاومت فشاری دراز مدت بیش‌تری نسبت به نمونه شاهد دارد. هم‌چنین تأثیر عمده میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن بعد از سن ۲ روز آغاز می‌شود. حجم منافذ بتن با رده مقاومت پایین‌تر، با جایگزینی پوزولان‌ها کاهش می‌یابد. در حالی که پوزولان‌ها در بتن با مقاومت بیش‌تر، تا سن ۲۸ روز، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر منافذ بتن ندارند.

**کلیدواژگان:** بتن با مقاومت زیاد، پوزولان، مقاومت فشاری اولیه، مقاومت فشاری دراز مدت، جذب آب

## ۱- مقدمه

فیزیکی دانست که به اندازه ذرات پوزولان وابسته است. مقاومت و نفوذپذیری بتن سخت‌شده، مقاومت در مقابل بروز ترک خوردگی حرارتی، واکنش قلیایی دانه‌ها و خرابی سولفاتی از خواص مهمی است که از فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان با سیمان ناشی می‌شود [۱].

بسیاری از خواص بتن، یا بر اثر استفاده از مواد پوزولانی بهبود می‌یابد. بعضی از این آثار ناشی از خواص فیزیکی، شامل زبر بودن و شکل ذرات و بقیه ناشی از فعل و انفعالات شیمیایی پوزولان با سیمان است. رفتار بتن تازه و درجه هیدراسیون سیمان پرتلند را می‌توان از خواص

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

برای ساخت بتن، از سیمان پرتلند نوع دو با نرمی ۳۵۷۰ سانتی متر مربع بر گرم استفاده شده است. پوزولان طبیعی مورد استفاده (پومیس قروه) از گروه توف‌های آتشفشانی است که به میزان مناسبی آسیاب شده است. دوده سیلیسی مصرفی، محصول کارخانه فروسیلیس ایران و خاکستر بادی آفریقای جنوبی با کلسیم کم (نوع F) در این تحقیق استفاده شده است.

مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی مواد سیمانی در جدول ۱ آورده شده است.

سنگدانه‌های درشت مصرفی، دارای بیشینه‌ی اندازه ۱۹/۵ میلی متر نیمه شکسته و آهکی با چگالی ۲/۶ است. ریزدانه‌ها، ترکیبی از ماسه طبیعی و آهکی شکسته است که دارای چگالی ۲/۶۷ و مدول نرمی ۳/۶۱ است.

### ۲-۲- نسبت مخلوط‌ها

در این تحقیق ۱۳ طرح مخلوط با دو نسبت آب به سیمان ۰/۴۶ و ۰/۳۰ ساخته شده که در هر دو نسبت آب به سیمان، جایگزینی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی با مقادیر مشخص انجام شده است. علاوه بر این در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳، مقادیر مختلف میکروسیلیس به جای بخشی از وزن سیمان جایگزین شد. جزئیات طرح مخلوط‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

### ۲-۳- ساخت نمونه‌ها و آزمایش‌ها

پس از ساخت هر سری بتن، بلافاصله برای تعیین روانی بتن تازه، آزمایش اسلامپ طبق ASTM C 143 انجام شد (جدول ۲). در این تحقیق مقدار روان‌کننده به گونه‌ای انتخاب شد تا روانی دست کم معادل ۱۲ سانتی متر حاصل

در بتن‌های با مقاومت زیاد، معمولاً میکروسیلیس جزء جدایی ناپذیر است و به عنوان جایگزین درصدی از سیمان استفاده می‌شود. این ماده یک پوزولان خیلی فعال است که خاصیت پرکنندگی مؤثری از خود نشان داده است. میکروسیلیس علاوه بر افزایش مقاومت خمیر، از طریق بهبود کیفیت اتصال بین خمیر و سنگ‌دانه، باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود. برخی محققان دریافته‌اند که میکروسیلیس مقاومت بتن در سنین ۷، ۲۸ و ۹۱ روز را بهبود می‌بخشد و اثر عمده این ماده در مقاومت فشاری بتن، بین ۳ تا ۲۸ روز (در دمای عمل‌آوری معمول) اتفاق می‌افتد [۲-۴].

استفاده وسیع از پوزولان طبیعی به عنوان جایگزین سیمان در کاربردهای مختلف، به دلیل صرفه اقتصادی، کاهش حرارت‌زایی بتن، کاهش نفوذپذیری و افزایش مقاومت شیمیایی است. هر چند ممکن است کاهش مقاومت در سنین اولیه را در پی داشته باشد [۵].

از خاکستر بادی کم کلسیم (F)، به طور وسیع در بتن‌های معمولی و دارای مقاومت زیاد به عنوان جایگزین سیمان استفاده می‌شود. در بتن‌های معمولی، مقدار جایگزینی حتی به ۵۰٪ هم می‌رسد. در حالی که در بتن با مقاومت زیاد، سطح جایگزینی به ۱۵ تا ۲۵ درصد محدود می‌شود. دلیل استفاده از این ماده در بتن با مقاومت زیاد، کاهش تولید حرارت و کسب خواص دوامی بهتر است [۶-۷]. در صورت وجود شرایط مطلوب عمل‌آوری، بتن‌های حاوی خاکستر بادی دارای مقاومت فشاری درازمدت بیش‌تری نسبت به بتن با سیمان پرتلند است [۸].

هم‌چنین مواد پوزولانی مهم‌ترین عامل کاهش‌دهنده نفوذپذیری، از طریق کاهش حجم حفرات بزرگ است [۹].

آب اندازه‌گیری شده برای هر نمونه به‌عنوان افزایش جرم نمونه بر اثر غرق شدن در آب و بر حسب درصدی از وزن خشک نمونه ارائه می‌شود.

### ۳- نتایج و تحلیل آن‌ها

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

نتایج مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف در جدول ۳ آورده شده است.

#### ۳-۱-۱- جایگزینی پوزولان طبیعی

جایگزینی پوزولان طبیعی در بتن باعث کاهش کسب مقاومت در سنین اولیه و نهایی می‌شود و افزایش مقدار جایگزینی باعث تشدید این روند است.

در بتن ۵۰ حاوی ۱۵٪ پوزولان طبیعی، تا ۲۸ روز، حدود ۱۰٪ کاهش مقاومت نسبت به بتن شاهد وجود دارد. اما با افزایش سن بتن، از اختلاف مقاومت کاسته شده و در سن ۹۱ روز به حدود ۵٪ می‌رسد (شکل ۱ و ۳).

جایگزینی ۳۰٪ پوزولان طبیعی باعث کاهش بیش‌تر مقاومت نسبت به بتن شاهد می‌شود. به‌طوری‌که اختلاف مقاومت در سن ۱ روز به حدود ۴۵٪ می‌رسد. با افزایش سن بتن، افت مقاومت نسبت به نمونه شاهد تا حدودی کاسته می‌شود. اما با این وجود در سن ۲۸ و ۹۱ روز به ترتیب حدود ۳۰ و ۱۸ درصد کاهش مقاومت وجود دارد (شکل ۱ و ۳).

شود. میزان اسلامپ در بتن‌های حاوی درصد زیاد پوزولان (بجز دوده سیلیسی) افزایش یافته است. خصوصاً در بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/۳، خاکستر بادی منجر به پهن‌شدگی بتن بعد از آزمایش اسلامپ شده است. سپس بتن در قالب‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری ریخته شده و پس از تراکم مناسب (توسط میز لرزان)، به اتاق با شرایط استاندارد منتقل شدند.

نمونه‌ها پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش در آب با دمای  $20 \pm 2$  عمل‌آوری شدند.

آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه‌های عمل‌آوری شده در سنین ۱، ۲، ۳، ۷، ۲۸ و ۹۱ روز، به‌وسیله‌ی جک هیدرولیکی ADR 2000KN با سرعت ۳ کیلونیوتن بر ثانیه انجام شد. در نهایت مقاومت فشاری بتن در سن مقرر از میانگین مقاومت فشاری دو نمونه به‌دست آمد.

آزمایش جذب آب مطابق با دستورالعمل BS 1881-Part 122 انجام شد. روش آزمایش بدین شکل است که در سن ۲۸ روز، از هر طرح ۳ نمونه، درون گرم‌خانه با دمای تقریباً ۴۵ درجه سانتی‌گراد و به‌مدت ۱۴ روز خشک می‌شوند. پس از خروج نمونه‌ها از گرم‌خانه، جرم نمونه‌ها در وضعیت خشک توزین شده و سپس در ظرف آب قرار داده می‌شوند. این عمل به‌گونه‌ای انجام می‌شود که ارتفاع آب بالای نمونه‌ها  $25 \pm 5$  میلی‌متر باشد. نمونه‌ها به‌مدت ۰/۵، ۱، ۲، ۲۴، ۴۸، ۷۲ و ۱۶۸ ساعت درون آب باقی مانده و پس از آن، از آب خارج شده و در وضعیت اشباع با سطح خشک توزین می‌شوند. نتایج جذب

جدول (۱) مشخصات فیزیکی و شیمیایی مواد سیمانی مصرفی

SG(g/cm <sup>3</sup> )	SS(cm <sup>3</sup> /g)	LOI	ترکیبات شیمیایی (%)								خمیر
			K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
۳/۱	۳۵۷۰	-	۰/۷۲	۰/۵۲	۲/۲۶	۱/۴۸	۶۳/۵۴	۳/۶۹	۴/۵۲	۲۱/۴۴	سیمان
۲/۹۱	۴۵۰۰	۰/۴۸	۳/۰۵	-	۲/۵۲	۹/۰۲	۹/۴۳	۷/۰۴	۱۲/۱۳	۵۳/۶۸	پوزولان طبیعی
۲/۴۳	-	۱/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۳۵	۲/۵	۴-۱۰	۶/۵	۲۵/۷۶	۵۷/۹۵	خاکستر بادی
۲/۲۱	۱۴۰۰۰	۱	۰/۷۶	۰/۱۷	-	-	-	۰/۴-۲	۱/۱	۸۵-۹۵	میکروسیلیس

جدول (۲) مقادیر طرح اختلاط بتن

مشخصه بتن	W/C	آب	سیمان	پوزولان طبیعی	خاکستر بادی	میکرو سلیس	ماسه	نخودی	بادامی	فوق روان کننده	اسلامپ
							(kg/m <sup>3</sup> )			(%)	cm
50	۰/۴۶	۱۷۹/۵	۳۸۵	-	-	-	۹۱۱	۲۱۴	۶۶۱	۰/۲۵	۱۲
50P15	۰/۴۶	۱۷۹/۵	۳۲۷/۲	۵۷/۷	-	-	۹۰۹	۲۱۴	۶۶۰	۰/۲۵	۱۰
50P30	۰/۴۶	۱۷۹/۵	۲۶۹/۵	۱۱۵/۵	-	-	۹۰۸	۲۱۳	۶۵۸	۰/۲۵	۱۵/۵
50FA15	۰/۴۶	۱۷۹/۵	۳۲۷/۲	-	۵۷/۷	-	۹۰۴	۲۱۲	۶۵۶	۰/۲۵	۱۳/۵
50FA25	۰/۴۶	۱۷۹/۵	۲۸۸/۷	-	۹۶/۲	-	۸۹۹	۲۱۱	۶۵۲	۰/۲۵	۱۷/۵
80	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۵۴۰	-	-	-	۸۶۵	۲۰۳	۶۲۶	۰/۶	۱۵
80P15	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۴۵۹	۸۱	-	-	۸۶۱	۲۰۳	۶۲۵	۰/۶	۲۱
80P30	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۳۷۸	۱۶۲	-	-	۸۵۹	۲۰۲	۶۲۳	۰/۶	۲۲/۵
80FA15	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۴۵۹	-	۸۱	-	۸۵۴	۲۰۱	۶۱۹	۰/۶	-
80FA25	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۴۰۵	-	۱۳۵	-	۸۴۷	۱۹۹	۶۱۴	۰/۶	-
80SF5	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۵۱۳	-	-	۲۷	۸۵۹	۲۰۲	۶۲۳	۰/۶	۱۰/۵
80SF8	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۴۹۶/۸	-	-	۴۳/۲	۸۵۶	۲۰۱	۶۲۱	۰/۶	۱۶/۵
80SF11	۰/۳۰	۱۶۴/۷	۴۸۰/۶	-	-	۵۹/۴	۸۵۳	۲۰۱	۶۱۹	۰/۶	۱۲

جدول (۳) نتایج مقاومت فشاری بتن‌های مختلف

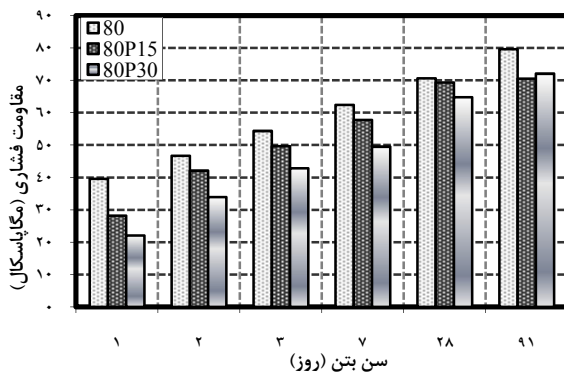
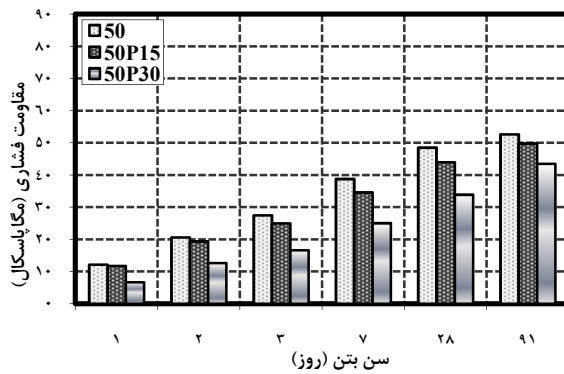
مشخصه بتن	مقاومت فشاری بتن (مگاپاسکال)					
	اروز	۲ روز	۳ روز	۷ روز	۲۸ روز	۹۱ روز
50	۱۲/۱۴	۲۰/۵۷	۲۷/۴۶	۳۸/۷۳	۴۸/۴۷	۵۲/۶
50P15	۱۱/۷۲	۱۹/۳۴	۲۴/۹۴	۳۴/۵۴	۴۳/۹۲	۴۹/۷۶
50P30	۶/۶۴	۱۲/۶۶	۱۶/۵۹	۲۵/۰۱	۳۳/۸۷	۴۳/۴۲
50FA15	۱۰/۲۸	۱۹/۱۹	۲۵/۰۵	۳۷/۴۹	۵۰/۶۴	۵۸/۳۵
50FA25	۱۱/۱۲	۱۶/۷۹	۲۱/۴۲	۳۰/۷۴	۴۴/۹۲	۵۳/۴۰
80	۳۹/۶۱	۴۴/۲۱	۵۴/۳۶	۶۲/۴۲	۷۰/۶۱	۷۹/۶۱
80P15	۲۸/۲۳	۴۲/۱۰	۴۹/۷۰	۵۷/۷۷	۶۹/۳۶	۷۰/۵۴
80P30	۲۲/۱۱	۳۳/۹۳	۴۲/۸۵	۴۹/۵۳	۶۴/۷۸	۷۲/۰۵
80FA15	۲۸/۱۸	۴۱/۳۳	۴۴/۴۲	۵۳/۷۷	۶۸/۰۲	۸۰/۰۵
80FA25	۱۹/۸۵	۳۱/۰۹	۴۰/۸۹	۵۶/۱۳	۷۲/۸۱	۸۳/۹۲
80SF5	۲۷/۵۲	۴۳/۹۰	۵۳/۳۲	۶۴/۰۵	۷۱/۶۷	۷۳/۰۲
80SF8	۲۹/۱۴	۴۲/۷۹	۵۰/۶۵	۶۲/۵۶	۷۲/۰۵	۷۹/۷۱
80SF11	۳۰/۸۱	۴۳/۴۸	۵۳/۱۱	۶۶/۰۱	۷۷/۹۴	۸۴/۹۰

روند کاهش کسب مقاومت، با جایگزینی پوزولان طبیعی در بتن ۸۰ نیز مشاهده می‌شود. البته با توجه به مقدار وزنی زیاد، شاهد کاهش بیش‌تر مقاومت هستیم.

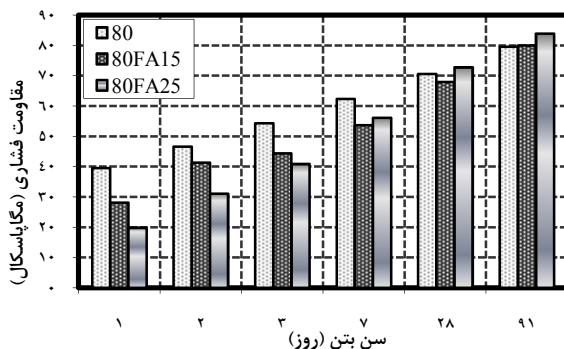
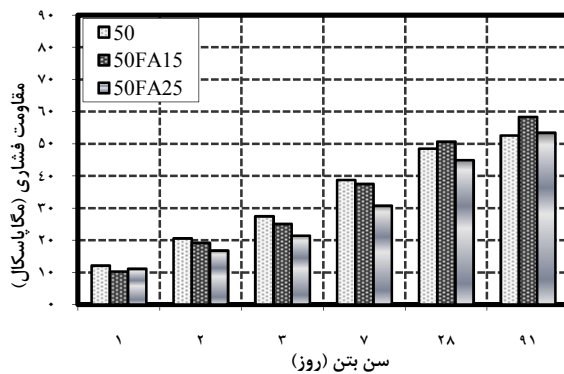
جایگزینی، به ترتیب حدود ۲۹ و ۴۵ درصد است. با افزایش سن، اختلاف مقاومت با نمونه شاهد کاهش یافته و در سن ۲۸ روز به کم‌ترین مقدار می‌رسد.

در سن ۱ روز، میزان کاهش به ازای ۱۵ و ۳۰ درصد

اما از سن ۲۸ تا ۹۱ روز، باز هم اختلاف مقاومت



شکل (۱) توسعه مقاومت فشاری بتن‌های ۵۰ و ۸۰ حاوی پوزولان طبیعی



شکل (۲) توسعه مقاومت فشاری بتن‌های ۵۰ و ۸۰ حاوی خاکستر بادی

افزایش می‌یابد. به عبارتی روند کسب مقاومت بتن حاوی پوزولان طبیعی، پس از ۲۸ روز، کم‌تر از بتن‌های شاهد است (شکل ۱ و ۳).

مقایسه جایگزینی پوزولان طبیعی در دو رده مقاومت نشان می‌دهد که در بتن با مقاومت زیادتر، روند کسب مقاومت مناسب‌تری نسبت به بتن شاهد وجود دارد (به‌ویژه در جایگزینی ۳۰٪).

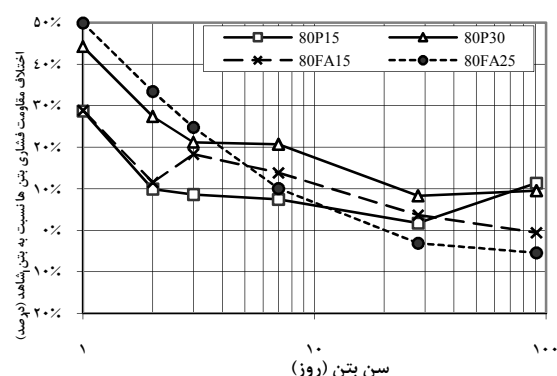
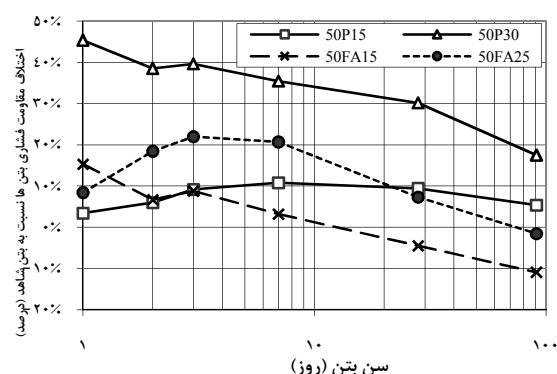
### ۳-۱-۲- جایگزینی خاکستر بادی

جایگزینی خاکستر بادی در بتن ۵۰ باعث کاهش ناچیز مقاومت اولیه نسبت به نمونه شاهد می‌شود ولی در دراز مدت، مقاومت این بتن‌ها حتی بیش‌تر از نمونه شاهد می‌شود (شکل ۲).

جایگزینی ۱۵٪ خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت به میزان ۱۵٪، در سن ۱ روز، می‌شود. افزایش سن بتن، باعث توسعه بیش‌تر واکنش‌های پوزولانی شده و مقاومت دراز مدت این بتن، بیش‌تر از مقاومت نمونه‌های شاهد می‌شود. مقدار افزایش مقاومت در سنین ۲۸ و ۹۱ روز نسبت به نمونه‌های بتن شاهد به ترتیب حدود ۴/۵ و ۱۱ درصد است (شکل ۳ را ملاحظه کنید).

افزایش مقدار جایگزینی به ۲۵٪، باعث کاهش مقاومت بین ۸ تا ۲۰ درصد در سنین اولیه (تا ۷ روز) می‌شود. افزایش سن نمونه‌ها، باعث کاهش اختلاف مقاومت با نمونه شاهد شده به طوری که مقاومت ۲۸ روزه این بتن، فقط ۸٪ کم‌تر از مقاومت نمونه شاهد است (در سن ۹۱ روز دارای مقاومتی حدود ۱/۵٪ بیش‌تر از بتن شاهد است).

در بتن ۸۰ نیز جایگزینی خاکستر بادی در سن ۱ روز باعث کاهش مقاومت اولیه به میزان قابل توجهی شده است (شکل ۲). به‌گونه‌ای که بتن‌های ۸۰FA۱۵ و ۸۰FA۲۵ به ترتیب حدود ۲۹ و ۵۰ درصد کاهش مقاومت نسبت به بتن شاهد داشته‌اند.



شکل (۳) روند کسب مقاومت فشاری بتن‌های ۵۰ و ۸۰ حاوی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی نسبت به بتن شاهد

همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، جایگزینی میکروسیلیس در بتن باعث کاهش مقاومت ۱ روزه نسبت به بتن شاهد شده است. این کاهش حدود ۲۷، ۳۰ و ۲۲ درصد به‌ازای جایگزینی ۵، ۸ و ۱۱ درصد است. افزایش سن نمونه‌ها باعث کاهش از اختلاف مقاومت با بتن شاهد می‌شود و در سنین ۷ و ۲۸ روز این نمونه‌ها دارای مقاومتی بیش از نمونه شاهد است.

در دراز مدت بتن حاوی ۵٪ میکروسیلیس مقاومت کم‌تری نسبت به بتن شاهد دارد (۹٪-) اما بتن‌های 80SF11 و 80SF8 به‌ترتیب مقاومتی مساوی و حدود ۶٪ بیش‌تر از نمونه‌های شاهد دارند. هم‌چنین پراکندگی نتایج این بتن‌ها بسیار کم است.

این اختلاف با افزایش سن بتن کاهش یافته و در سن ۲۸ روز، مقاومت این نمونه‌ها با مقاومت نمونه‌های شاهد تقریباً برابر می‌شود. از نتایج جالب می‌توان به افزایش مقاومت نمونه‌های حاوی خاکستر بادی نسبت به نمونه‌های شاهد در سن ۹۱ روز اشاره کرد.

مقایسه بین جایگزینی خاکستر بادی در بتن ۵۰ و ۸۰ نشان می‌دهد که در سنین اولیه، افزایش رده مقاومتی باعث اختلاف مقاومتی بیش‌تری می‌شود. در حالی‌که در دراز مدت، نقش خاکستر بادی در هر دو رده مقاومتی مناسب و چشم‌گیر است.

در شکل ۳ نتایج به‌دست آمده برای بتن‌های حاوی مقادیر مختلف پوزولان طبیعی و خاکستر بادی (هر دو رده مقاومتی) به‌صورت درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد نشان داده شده است.

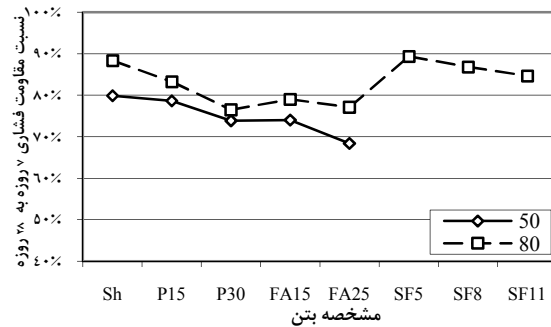
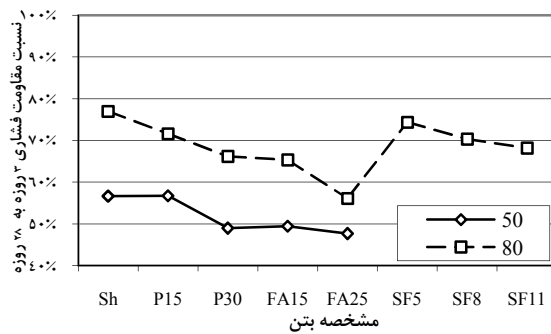
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در نمودارهای بتن ۸۰، می‌توان یک محدوده فرضی ترسیم کرد، به‌طوری‌که روند کسب مقاومت نمونه‌ها در این محدوده قرار گیرد. در حالی‌که در بتن ۵۰ این محدوده قابل ترسیم نیست و نمونه‌های حاوی ۳۰٪ پوزولان طبیعی و ۲۵٪ خاکستر بادی، روند کسب مقاومت کاملاً متفاوتی نسبت به دیگر نمونه‌ها دارند. به عبارتی پراکندگی نتایج در بتن ۸۰ کم‌تر از بتن ۵۰ است.

### ۳-۱-۳- جایگزینی میکروسیلیس

از آن‌جاکه میکروسیلیس بیش‌تر در بتن‌های با مقاومت زیاد توصیه می‌شود، در این تحقیق جایگزینی میکروسیلیس فقط در بتن ۸۰ انجام گرفته است. روند کسب مقاومت این نمونه‌ها متفاوت از روند کسب مقاومت بتن حاوی پوزولان‌های دیگر است (شکل ۴).

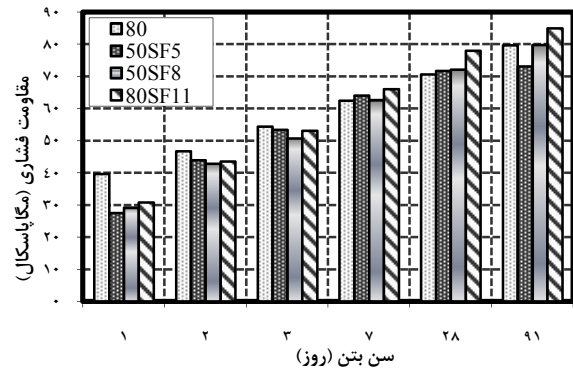
مقاومت ۲۸ روزه را کسب کرده‌اند.

در بتن شاهد ۸۰، در سنین ۳ و ۷ روز، حدود ۷۷ و ۸۸ درصد مقاومت ۲۸ روزه کسب شده است. این مقادیر در مقایسه با بتن شاهد ۵۰ سیر صعودی نشان داده است و حاکی از آن است که در بتن با مقاومت زیادت، فعالیت هیدراسیونی بیش تری طی ۷ روز اول انجام شده و در نتیجه در سنین اولیه، سهم بیش تری از مقاومت ۲۸ روزه خود را کسب می‌کنند.



شکل (۵) نسبت مقاومت فشاری بتن‌های مختلف در سنین ۳ و ۷ روز به مقاومت ۲۸ روزه

جایگزینی پوزولان طبیعی باعث کاهش محسوس نسبت‌های بالا می‌شود و افزایش مقدار جایگزینی، باعث کاهش بیش تر روند کسب مقاومت در سنین اولیه می‌شود. این مسئله در بتن‌های حاوی خاکستر بادی نیز مشاهده می‌شود. با این تفاوت که مقاومت کسب شده در سنین اولیه در این بتن‌ها بسیار کم است. به طوری که ملاحظه



شکل (۴) توسعه مقاومت فشاری بتن ۸۰ حاوی میکروسیلیس

### ۳-۱-۴- تأثیر مواد پوزولانی بر مقاومت فشاری

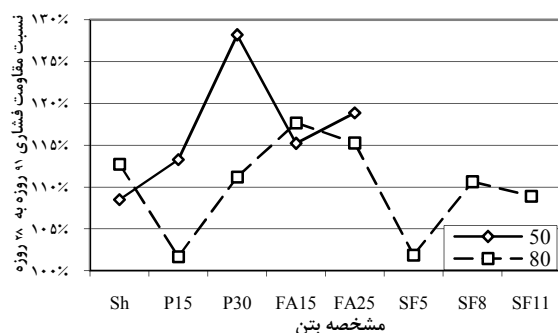
برای بررسی نرخ افزایش مقاومت فشاری بتن‌های مختلف، نسبت مقاومت هر بتن در سنین ۳، ۷ و ۹۱ روز به مقاومت ۲۸ روزه، در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.

#### مقاومت کسب شده در سنین اولیه

در بتن شاهد ۵۰، در سنین ۳ و ۷ روز به ترتیب حدود ۵۶ و ۸۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه کسب شده است. اما جایگزینی پوزولان طبیعی باعث کاهش این نسبت‌ها می‌شود. به ویژه در بتن حاوی ۳۰٪ پوزولان طبیعی که مقادیر بالا به حدود ۴۹ و ۷۴ درصد تقلیل می‌یابند. جایگزینی خاکستر بادی نیز باعث کاهش بیش تر نسبت‌ها می‌شود. به طوری که در سن ۷ روز بتن‌های حاوی ۱۵ و ۲۵ درصد از این ماده، به ترتیب حدود ۷۴ و ۶۸ درصد

طبیعی تأثیر به سزایی در کسب مقاومت بعد از ۲۸ روز نداشته است. همان‌طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود، بتن شاهد در سن ۹۱ روز حدود ۱۲٪ افزایش مقاومت نسبت به مقاومت ۲۸ روزه داشته است. این در حالی است که جایگزینی پوزولان طبیعی به مقدار ۱۵ و ۳۰ درصد باعث افزایش مقاومت به میزان ۲ و ۱۱ درصد شده است (بتن 80P15 در فاصله بین ۲۸ تا ۹۱ روز کم‌تر ۱ مگاپاسکال مقاومت کسب کرده است). اما جایگزینی خاکستر بادی به مقدار ۱۵ و ۲۵ درصد باعث افزایش ۱۵ و ۱۷ درصد مقاومت، نسبت به مقاومت ۲۸ روزه شده است.

در بتن‌های حاوی میکروسیلیس، مقاومت نسبتاً کمی بعد از ۲۸ روز کسب می‌شود. به طوری که بیشینه‌ی افزایش مقاومت مربوط به بتن 80SF8 است که دارای افزایش مقاومت حدود ۱۰٪ نسبت به بتن ۲۸ روزه است.



شکل (۶) نسبت مقاومت فشاری بتن‌های مختلف در سن ۹۱ روز به مقاومت ۲۸ روزه

### ۳-۱-۵- انتخاب مناسب‌ترین جایگزین سیمان در

#### بتن، بر اساس کسب مقاومت فشاری مقاومت اولیه

در شکل ۷ مقادیر مقاومت بتن‌ها در سنین اولیه (۱، ۲، ۳ و ۷ روز) برای بتن در دو رده مقاومتی و جایگزینی مقادیر مختلف پوزولان‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در رده مقاومتی ۵۰، در صورت نیاز به

می‌شود، بتن حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی دارای نسبت‌هایی حدود ۵۶ و ۷۷ درصد در سنین ۳ و ۷ روز است (این مقادیر مشابه مقادیر بتن شاهد ۵۰ است).

اما روند کسب مقاومت بتن حاوی میکروسیلیس با پوزولان‌های دیگر کمی متفاوت است و روندی شبیه به بتن شاهد دارد. در سن ۳ روز، نسبت مقاومت این بتن‌ها کمی کم‌تر از بتن شاهد است. که این کاهش با افزایش مقدار جایگزینی، تشدید می‌شود. با افزایش سن بتن (۷ روز)، مقادیر به دست آمده مشابه بتن شاهد است. هم‌چنین ملاحظه می‌شود در این سن نیز، افزایش مقدار جایگزینی، باعث کاهش نسبت‌ها می‌شود.

#### مقاومت کسب شده در سنین نهایی

از میان ترکیبات مختلف، سیمان  $C_3S$  و  $C_2S$  نقش اصلی را در افزایش مقاومت دارند.  $C_3S$  در مقاومت تا ۴ هفته اول و  $C_2S$  در مقاومت طولانی مدت تأثیر می‌گذارد [۹]. هم‌چنین واکنش مواد پوزولانی نیز کند است و مانند  $C_2S$ ، قسمت عمده آن‌ها، بعد از ۴ هفته اول توسعه می‌یابد. بنابراین در بتن‌های حاوی پوزولان، انتظار می‌رود که بعد از ۲۸ روز مقاومت نسبتاً خوبی ناشی از واکنش پوزولانی کسب شود [۳].

روند بالا در بتن ۵۰ دیده می‌شود. به طوری که بتن شاهد بعد از ۲۸ روز دارای افزایش مقاومتی حدود ۸٪ (نسبت به مقاومت فشاری ۲۸ روزه) بوده است اما جایگزینی پوزولان طبیعی به مقدار ۱۵ و ۳۰ درصد باعث شده بعد از ۲۸ روز، بتن ۱۳ و ۲۸ درصد افزایش مقاومت داشته باشد. هم‌چنین جایگزینی خاکستر بادی تأثیر مناسبی داشته است. این ماده در سن ۹۱ روز باعث کسب مقاومتی حدود ۱۵ و ۱۸ درصد مقاومت ۲۸ روزه به ازای مقادیر جایگزینی ۱۵ و ۲۵ درصد شده است (شکل ۶).

در بتن ۸۰، بر خلاف بتن ۵۰، جایگزینی پوزولان



روز) برای بتن‌های مختلف نشان داده شده است. با توجه به منحنی‌های مربوط به بتن ۵۰، مشاهده می‌شود نمونه‌های حاوی خاکستر بادی بیش‌ترین مقاومت فشاری دراز مدت را کسب کرده‌اند. به طوری‌که در سن ۹۱ روز، جایگزینی خاکستر بادی باعث کسب مقاومت بیش‌تر از نمونه شاهد شده است. هم‌چنین از بین دو درصد جایگزینی خاکستر بادی، جایگزینی ۱۵٪ از این ماده باعث کسب مقاومت دراز مدت بیش‌تری شده است. با توجه به مقاومت فشاری دراز مدت بتن‌های ۸۰ ملاحظه می‌شود که جایگزینی مقادیر مختلف میکروسیلیس و هم‌چنین ۲۵٪ خاکستر بادی، باعث مقاومت ۲۸ روزه بیش از نمونه شاهد شده است. نکته جالب توجه، کسب مقاومت بسیار کم نمونه‌های حاوی ۱۵٪ خاکستر بادی در این سن است.

در سن ۹۱ روز، جایگزینی خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت بتن نسبت به بتن شاهد می‌شود. هم‌چنین جایگزینی بیش از ۸٪ میکروسیلیس منجر به مقاومت برابر و بیش از نمونه شاهد می‌شود. اما نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی در این سن مقاومت نسبتاً کمی را کسب کرده‌اند و مقدار جایگزینی در مقاومت کسب شده تأثیر چندانی ندارد.

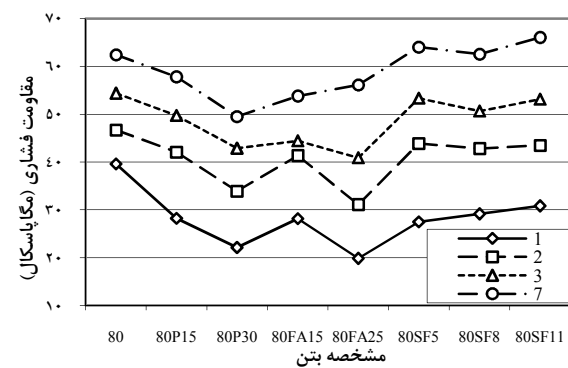
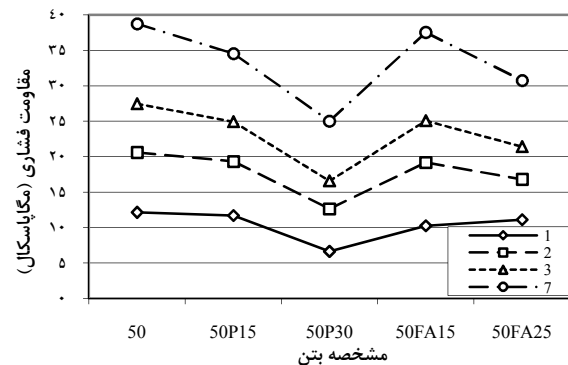
### ۲-۳- جذب آب

نتایج جذب آب نمونه‌های ۲۸ روزه، در مدت زمان‌های مختلف غوطه‌وری در جدول ۴ آورده شده است.

### ۱-۲-۳- جایگزینی پوزولان طبیعی

در شکل ۹، نسبت جذب آب بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی به جذب آب بتن شاهد نشان داده شده است.

جایگزینی پوزولان و مقاومت فشاری اولیه مناسب، استفاده از هر دو نوع پوزولان طبیعی و خاکستر بادی با مقدار محدود جایگزینی (حدود ۱۵٪) پیشنهاد می‌شود. هم‌چنین توسعه مقاومت بتن حاوی ۲۵٪ خاکستر بادی بیش‌تر از بتن حاوی ۳۰٪ پوزولان طبیعی است.



شکل (۷) توسعه مقاومت اولیه بتن در رده مقاومتی ۵۰ و ۸۰

با توجه به منحنی‌های مربوط به مقادیر مقاومت فشاری اولیه بتن‌های ۸۰ (شکل ۷) ملاحظه می‌شود که در این رده مقاومتی، در صورت نیاز به جایگزینی پوزولان و کسب مقاومت فشاری اولیه مناسب، به‌ترتیب استفاده از میکروسیلیس، پوزولان طبیعی و خاکستر بادی با مقادیر محدود (تا حدود ۱۵٪) پیشنهاد می‌شود.

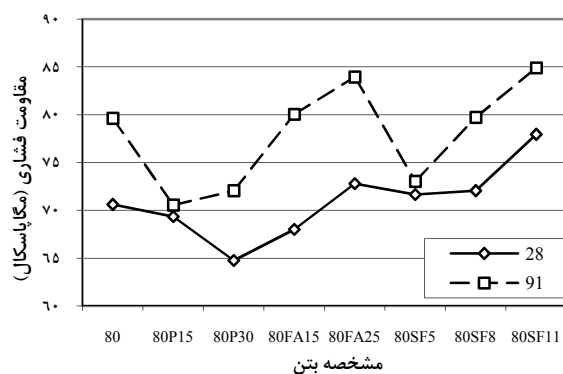
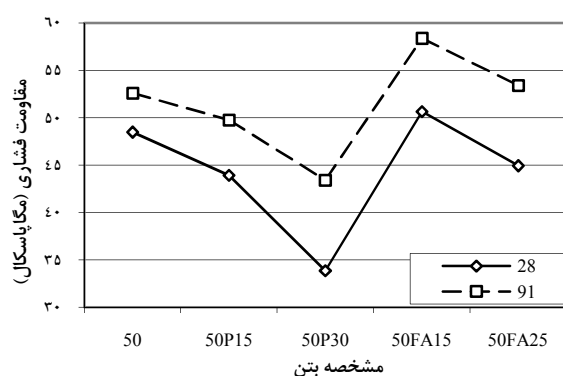
### مقاومت نهایی

در شکل ۸ مقادیر مقاومت بتن‌ها در دراز مدت (۲۸ و ۹۱

۱/۱۸ برابر نتایج بتن شاهد می شود.

جدول (۴) جذب آب بتن‌ها در زمان‌های غوطه‌وری مختلف

مشخصه بتن	جذب آب در ساعات مختلف غوطه‌وری (%)					
	۱۶۸	۷۲	۴۸	۲۴	۲	۱
50	۳/۱۴	۲/۹۷	۲/۹۲	۲/۶۲	۱/۹۸	۱/۸۱
50P15	۲/۵۸	۲/۴۳	۲/۳۹	۲/۱۵	۱/۷۲	۱/۵۳
50P30	۳/۲۱	۳/۰۴	۲/۸۹	۲/۸۱	۲/۲۵	۲/۰۰
50FA15	۲/۵۶	۲/۴۱	۲/۳۳	۲/۱۶	۱/۷۷	۱/۶۰
50FA25	۲/۹۸	۲/۶۷	۲/۶۴	۲/۴۸	۲/۰۵	۱/۷۸
80	۱/۵۳	۱/۲۸	۱/۱۸	۱/۰۵	۰/۹۴	۰/۸۴
80P15	۱/۷۹	۱/۶۲	۱/۵۰	۱/۴۴	۱/۳۱	۱/۱۷
80P30	۱/۵۴	۱/۳۹	۱/۲۸	۱/۲۳	۱/۱۴	۰/۹۸
80FA15	۱/۳۸	۱/۲۶	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۰۳	۰/۹۰
80FA25	۱/۷۱	۱/۵۶	۱/۵۱	۱/۴۲	۱/۲۲	۰/۹۷
80SF5	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۸	۱/۰۵	۰/۸۹	۰/۷۸
80SF8	۱/۲۵	۱/۲۵	۱/۲۰	۱/۲۰	۱/۰۹	۰/۹۷
80SF11	۱/۴۱	۱/۳۶	۱/۳۲	۱/۲۹	۱/۱۱	۰/۹۳



شکل (۸) توسعه مقاومت نهایی بتن در دو رده مقاومتی ۵۰ و ۸۰ مگاپاسکال

در بتن ۵۰، جایگزینی ۱۵٪ پوزولان طبیعی باعث کاهش جذب آب نسبت به بتن شاهد می شود. نسبت جذب آب از ۰/۸۲ تا حدود ۰/۹ متغیر است. (با افزایش زمان غوطه‌وری، نسبت جذب آب کاهش می یابد). افزایش مقدار جایگزینی پوزولان طبیعی باعث افزایش جذب آب بتن می شود. به طوری که جذب آب اولیه این بتن (۳۰ دقیقه اول) حدود ۱/۲ برابر بیش تر از جذب آب بتن شاهد است. این نسبت با افزایش زمان غوطه‌وری، کاهش می یابد. ولی هم چنان جذب آب آن بیش از نمونه شاهد است. به طوری که جذب آب نهایی این بتن حدود ۵٪ بیش از جذب آب بتن شاهد است.

در رده مقاومتی ۸۰، جایگزینی پوزولان طبیعی (۱۵ و ۳۰ درصد) موجب افزایش جذب آب بتن نسبت به بتن شاهد می شود. اما بر خلاف بتن ۵۰، جایگزینی مقدار کم تر پوزولان طبیعی باعث افزایش جذب آب می شود. هم چنین با افزایش زمان غوطه‌وری، نسبت جذب آب کاهش می یابد.

### ۳-۲-۲- جایگزینی خاکستر بادی

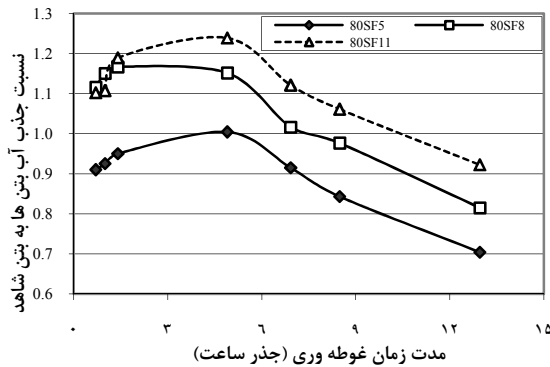
در شکل ۹ تأثیر جایگزینی خاکستر بادی در بتن های ۵۰ و ۸۰ نسبت به بتن شاهد نیز مشاهده می شود.

در بتن ۵۰، جایگزینی ۱۵٪ خاکستر بادی باعث کاهش جذب آب نسبت به بتن شاهد شده است (هم گام با جذب آب 50P15). افزایش مقدار جایگزینی باعث افزایش جذب آب بتن می شود. اما جذب آب اولیه و نهایی آن حدوداً برابر جذب آب بتن شاهد است.

جایگزینی خاکستر بادی در بتن ۸۰، باعث افزایش جذب آب نمونه ها نسبت به بتن شاهد می شود. هم چنین افزایش مقدار جایگزینی نیز سبب جذب آب بیش تر می شود؛ به طوری که جایگزینی ۲۵٪ خاکستر بادی باعث افزایش جذب آب اولیه و نهایی به ترتیب به مقدار ۱/۴۵ و

جذب آب نهایی همه نمونه‌های حاوی میکروسیلیس کم‌تر از نمونه شاهد است (شکل ۱۰).

این مسئله می‌تواند به دو دلیل باشد؛ اولاً فعالیت پوزولانی میکروسیلیس بسیار بالاست. ثانیاً مقدار جایگزینی این ماده نسبت به مواد پوزولانی دیگر کم‌تر است. مؤید دلیل دوم این است که با افزایش مقدار جایگزینی میکروسیلیس در بتن، جذب آب آن نیز افزایش می‌یابد.



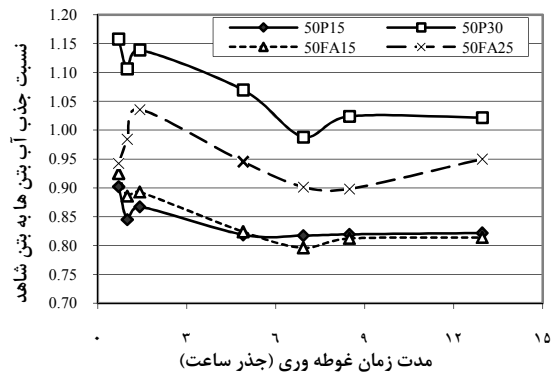
شکل (۱۰) نسبت جذب آب بتن‌های ۸۰ حاوی میکروسیلیس به بتن شاهد

#### ۴- نتیجه‌گیری

۱- جایگزینی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی در بتن با مقاومت زیاد سبب کاهش مقاومت اولیه می‌شود. این روند کاهش مقاومت، با افزایش مقدار جایگزینی بیش‌تر شده است.  
 ۲- جایگزینی خاکستر بادی در دراز مدت سبب افزایش مقاومت نسبت به نمونه شاهد شده است. در حالی که بتن‌های حاوی پوزولان طبیعی در دراز مدت نیز دارای مقاومت کم‌تری نسبت به بتن شاهد است.

۳- میکروسیلیس در هر سه رده مصرف باعث کاهش مقاومت ۱ روزه می‌شود. در سن ۷ و ۲۸ روز، مقاومت نمونه‌های حاوی میکروسیلیس از نمونه شاهد بیش‌تر است. ولی در دراز مدت فقط مقادیر جایگزینی ۸ و ۱۱ درصد باعث کسب مقاومت بیش‌تر می‌شود و نمونه حاوی ۵٪

دلیل نتایج نامطلوب جذب آب بتن‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی و خاکستر بادی را می‌توان در مطالب ارائه شده در بخش ۳-۱-۴ جست. همان‌طور که در این بخش ذکر شد، سرعت انجام واکنش‌های پوزولانی کند است و سهم بزرگی از این واکنش‌ها بعد از ۲۸ روز آغاز می‌شود. این در حالی است که آزمایش جذب آب روی نمونه‌های ۲۸ روزه انجام شده است. بنابراین سن ۲۸ روز زمان مناسبی برای تخمین کاهش خلل و فرج بتن ناشی از واکنش پوزولانی نیست. به‌ویژه در بتن‌های رده مقاومتی ۸۰ که مقدار وزنی پوزولان‌ها بسیار زیاد است.



شکل (۹) نسبت جذب آب بتن‌های ۵۰ و ۸۰ حاوی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی به بتن شاهد

#### ۳-۲-۳- جایگزینی میکروسیلیس

در مقایسه با پوزولان طبیعی و خاکستر بادی، جایگزینی میکروسیلیس نتایج بهتری در کاهش منافذ بتن نشان داده و

سپاسگزاری کنم.

## ۶- منابع

[۱] رمضانپور، ع.؛ پیدایش، م.؛ دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی؛ ۱۳۷۵؛ نشریه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، شماره نشریه: ۲۷۴.

[۲] احمد، اس. اچ.؛ شاه، اس. پی.؛ بتن‌های توانمند و کاربرد آن‌ها؛ ترجمه مظلوم، م.؛ رمضانپور، ع.؛ ۱۳۸۳؛ دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

[3] Detwiler R. J., Bhatti J. I., Bhattacharja S.; *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements*; Portland Cement Association, Research and development bulletin RD112T, 1998.

[4] Kjellsen K. O., Wallevik O. H., Hallgren M.; "On the compressive strength development of high performance concrete and paste - effect of silica fume", *Materials and Structures*; Vol. 32, 1999, pp. 63-69.

[5] Ghrici M., Kenai S., Said-Mansour M.; "Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements", *Cement & Concrete Composites*; Vol. 29 Issue 7, 2007, pp. 542-549.

[6] Oner A., Akyuz S., Yildiz R.; "An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete", *Cement and Concrete Research*; Vol. 35, 2005, pp. 1165-1171.

[7] Poon C. S., Lam L.; Wong Y.L.; "A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, PP.447-455.

[8] ACI Committee 232.2R-03; "Use of Fly Ash in Concrete", American Concrete Institute, 1993.

[۹] نویل، الف.؛ بتن‌شناسی (خواص بتن)؛ ترجمه فامیلی، ه.؛ انتشارات ابوریحان بیرونی، ۱۳۷۸.

میکروسیلیس از نمونه شاهد عقب می‌افتد. به عبارتی برای تضمین اثر میکروسیلیس در کسب مقاومت دراز مدت، مصرف دست کم ۸٪ میکروسیلیس لازم به نظر می‌رسد.

۴- جایگزینی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی باعث کاهش روند (سرعت) کسب مقاومت می‌شود. این تأخیر در روند هیدراسیون با افزایش مقدار جایگزینی بیش‌تر می‌شود. نمونه‌های حاوی میکروسیلیس دارای روند کسب مقاومتی مشابه نمونه‌های بدون افزودنی هستند.

۵- نتایج آزمایش جذب آب به شرح زیر قابل دسته‌بندی است:

- در بتن‌های ۵۰، اگر چه درصد کم جایگزینی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی (۱۵٪) باعث کاهش ظرفیت جذب آب شده با افزایش مصرف پوزولان طبیعی از ۱۵ به ۳۰ درصد و خاکستر بادی از ۱۵ به ۲۵ درصد، میزان جذب آب افزایش یافته است. در بتن‌های ۸۰، به‌طور کلی پوزولان طبیعی و خاکستر بادی در هر دو رده مصرف، باعث افزایش ظرفیت جذب آب می‌شود. این بدان معناست که در سن تعیین شده ۲۸ روز، مصرف بیش از حد پوزولان‌های طبیعی و خاکستر بادی هنوز قادر به تغییر ساختار داخلی بتن نشده و فعالیت هنوز پوزولانی کامل نیست.

- جذب آب نمونه‌های حاوی میکروسیلیس، اختلاف کم‌تری با جذب آب نمونه شاهد دارد و حتی مقدار نهایی جذب آب این نمونه‌ها کم‌تر از نمونه شاهد است.

- به نظر می‌رسد که سن ۲۸ روز، سن مناسب برای تعیین حجم منافذ داخلی بتن (به‌ویژه حاوی پوزولان) نیست و این به دلیل کندی واکنش‌های پوزولانی است.

## ۵- تقدیر و تشکر

در نهایت وظیفه خود می‌دانم که از کمک‌های آقایان مهدی سلیمانی راد، احمد معظمی گودرزی و حسان صالحی