

## بررسی دوام بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش توسط آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار

امیرخانی<sup>۱</sup>، محمد ابراهیم کمکی<sup>۲</sup>، مهدی اسلامی<sup>۳</sup>، جمال حیدری<sup>۴</sup>

۱- دانشجو کارشناسی ارشد سازه دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- کارشناس مهندسی عمران- عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

۳- کارشناس مهندسی عمران- عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مشهد

۴- کارشناس مهندسی عمران- عمران، دانشگاه غیرانتفاعی خاوران، واحد مشهد

### چکیده

امروزه باتوجه به حجم ساخت و ساز در کشور و به دنبال زیان‌های جانی و مالی گسترده در اثر حوادث طبیعی همچون زلزله، استفاده از مصالح و روش‌های نوین جهت افزایش کیفیت، عمر مفید و دوام سازه‌ها و کاهش هزینه‌های ساخت ضرورتی انکار ناپذیر است. در مواردی مانند پایه پل‌ها، ستون‌های طبقات پایین ساختمان‌های بلند و... عملاً و بیره کردن بتن غیر ممکن است. برای رفع این مشکل باید از بتن خودتراکم استفاده شود که باعث تراکم کامل بتن شده و سرعت بتن‌ریزی افزایش می‌یابد. این نوع بتن با استفاده از فوق روان کننده‌ها و مواد افزودنی دیگر تولید می‌شود. در بتن خودتراکم به خاطر نیاز به حجم خمیر بیشتر در طرح مخلوط، استفاده از عیارهای زیاد سیمان مرسوم می‌باشد و گاهی این افزایش میزان سیمان؛ باعث عبور از مقدار بهینه مصرف سیمان می‌گردد که برخلاف تصور عموم، با افزایش هزینه و مصرف سیمان بیشتر، کاهش مقاومت فشاری را نیز به دنبال دارد. همچنین استفاده بیش از حد سیمان سبب افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای شده و باعث آلودگی محیط‌زیست می‌گردد. از آنجایی که میکروسیلیس و پوزولان خاش در کشور به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای تولید می‌گردد و استفاده از آن‌ها نیز از نظر اجرایی و همچنین اقتصادی قابل توجیه است؛ لذا در تحقیق حاضر از این نوع پوزولان‌ها استفاده نموده‌ایم. در تحقیق انجام شده ۲۱ طرح مخلوط بتن خودتراکم در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ با مصرف میکروسیلیس ۰/۷، ۰/۵ و ۰/۱۰ و پوزولان خاش ۰/۲۵، ۰/۱۵ و ۰/۳۵ و ۳ طرح مخلوط شاهد نیز جهت مقایسه نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش سبب کاهش عمق نفوذ آب گردیده است.

**کلمات کلیدی:** بتن خودتراکم، عمق نفوذ آب تحت فشار، میکروسیلیس، پوزولان خاش

## ۱. مقدمه

بتن خودتراکم امروزه در صنعت ساخت به دلیل سهولت در انتقال، کاهش نیروی انسانی، تراکم و پرداخت سطح آسان و کاهش هزینه‌های پروژه‌ها در طولانی مدت در مقایسه با بتن معمولی، استفاده روز افزونی داشته است [۱].

بتن به‌عنوان یکی از مصالح نسبتاً ارزان و پایا می‌باشد که می‌توان با قالب‌بندی آن را به هر شکل هندسی موردنظر درآورد. اما در بعضی موارد به دلایل طراحی ضعیف، ضعف در اجرا، کیفیت نامرغوب مصالح و شرایط محیطی لحاظ نشده در طراحی و یا ترکیبی از این عوامل، سازه بتن آرمه ساخته‌شده کارایی موردنظر را در دوره عمر مفید خود نخواهد داشت.

استفاده از انواع پوزولان به‌عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد. همچنین استفاده از مواد پوزولانی همراه با مواد افزودنی شیمیایی در سال‌های اخیر این امکان را برای دانشمندان علم تکنولوژی بتن فراهم نموده است که بتوانند بتن‌های خاصی را برای شرایط مختلف طراحی نمایند [۲].

تفاوت عمده بتن خودتراکم با بتن معمولی استفاده از مقادیر بالای مواد پودری و فوق روان‌کننده‌های قوی در بتن خودتراکم می‌باشد. درحالی‌که در بتن معمولی در بسیاری از اوقات نیازی بر استفاده از این مواد نیست. همچنین در بتن خودتراکم به دلیل روانی بالا احتمال جداشدگی مصالح سنگی درشت از بتن زیاد می‌باشد لذا غلظت مناسب بایستی تأمین گردد.

طرح بتن خودتراکم بایستی به نحوی باشد که علاوه برداشتن مشخصات مناسب از لحاظ کارایی و رئولوژی، از نظر مقاومت و دوام نیز مشخصات فنی را برآورده سازد. به همین دلیل تاکنون روش استاندارد و مورد اجماع در دنیا برای طرح مخلوط بتن خودتراکم بیان‌نشده است [۳].

می‌دانیم که برای تولید بتن خود تراکم استفاده از فوق روان‌کننده‌ها برای رسیدن به خواسته‌های مورد انتظار نظیر کارایی نیز الزامی می‌باشد. همچنین استفاده از فوق روان‌کننده‌ها سبب کاهش مصرف آب گردیده که کاهش تخلخل بتن و بهبود رفتار ناحیه انتقال بتن را به دنبال دارد. انتخاب دانه‌بندی مناسب سنگ‌دانه‌ها و استفاده از مواد افزودنی معدنی سبب کنترل آب انداختگی و جداشدگی در بتن خودتراکم می‌گردد.

نسل‌های جدید فوق‌روان‌کننده‌ها و افزودنی‌های جایگزین سیمان به بهبود رفتار و دوام بتن کمک زیادی کرده است. اگرچه تولید بتن‌های با مقاومت و دوام بالا، در سطح قابل قبولی در دسترس می‌باشد، چالش‌های زیادی از جمله تعریف مشخصات بتن توسط مشاور، کنترل کیفیت در زمان تولید، شناخت نیازهای مقطع بتن‌ریزی و همچنین عمل‌آوری بتن باعث شده است که مشکلاتی در مراحل مختلف ایجاد شود [۴].

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۱.۲. مصالح مصرفی

#### ۱.۱.۲. مواد سیمانی

سیمان یکی از عوامل اصلی و تعیین‌کننده در طرح مخلوط بتن خودتراکم نیز می‌باشد. استاندارد ASTM C150، سیمان پرتلند را سیمانی هیدرولیکی تعریف می‌کند که از پودر کردن کلینکر، که اساساً حاوی سیلیکات‌های کلسیم هیدرولیکی می‌باشد، به‌دست‌آمده است و معمولاً دارای یک یا چند شکل از سولفات کلسیم است که باهم آسیاب شده و به آن افزوده شده است [۵]. کیفیت سیمان در مقاومت اولیه و نهایی، خواص بتن تازه و سخت شده تأثیر بسزایی خواهد داشت. سیمان مورد استفاده در این پژوهش از نوع پرتلند تیپ ۲ مطابق استاندارد ASTM C150 تولید کارخانه سیمان بجنورد می‌باشد.

میکروسیلیس عبارت است از سیلیس غیربلوری که در کوره‌های قوس الکتریکی به‌عنوان محصول جانبی تولید عنصر سیلیسیم، یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم تولید می‌شود. ذرات میکروسیلیس بسیار کوچک بوده و بیش از ۹۵٪ ذرات آن از یک میکرون کوچک‌تر است و از آنجاکه ذرات میکروسیلیس بسیار کوچک هستند، مساحت سطح بسیار بزرگ می‌باشد. مساحت سطح بالای ذرات میکروسیلیس عامل مهمی است که بر واکنش پذیری ذرات اثر می‌گذارد. میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق از محصولات تولیدی صنایع فروسیلیس سمنان بوده که به‌صورت بسته‌بندی از شرکت صنایع شیمیایی بتن ژیکواوا تهیه شده است. پوزولان تهیه شده از کارخانه سیمان خاش به‌عنوان یکی از مواد پودری معدنی فعالی است که در این سال‌ها شناخته می‌شود به‌گونه‌ای که در ساخت اولین سد بتن غلتکی در ایران واقع در جگین هرمزگان به‌عنوان تنها پوزولان مورد تأیید مهندسین مشاور طرح و در سال ۱۳۸۲ به‌عنوان محصول برتر کشور انتخاب گردیده است. مشخصات شیمیایی پوزولان خاش با توجه به اطلاعات دریافتی از کارخانه سیمان خاش مطابق شکل ۱ نیز می‌باشد. خواص فیزیکی مواد سیمانی مطابق جدول ۱ نیز می‌باشد. لازم به ذکر است به دلیل عدم امکانات کافی جهت محاسبه دقیق وزن مخصوص و سطح مخصوص مصالح و همچنین نداشتن مشخصات خواص فیزیکی پوزولان‌ها در کارخانه‌های تولیدکننده اعداد ذیل فرض گردیده‌اند.

### آزمایشگاه سیمان خاش

مشخصات شیمیایی پودر پوزولان طبیعی

Blain(cm <sup>2</sup> /gr)	%Ins.Res	%SiO <sub>2</sub>	%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%CaO	%MgO	%Na <sub>2</sub> O	%K <sub>2</sub> O	%Cl	%SO <sub>3</sub>	%L.O.I
>4500	-	59.62	17.8-19	4.6-5.5	7.8.5	<2.7	<1.9	<2.2	<0.04	<0.4	<2.8

درصد باله‌بسته روی الته ۱۰ میکرون	شاخص فعالیت ۲۸ روزه	شاخص فعالیت ۷ روزه
15-20	>%90	>%85

شکل ۱: مشخصات شیمیایی پوزولان خاش

جدول ۱: خواص فیزیکی مواد سیمانی

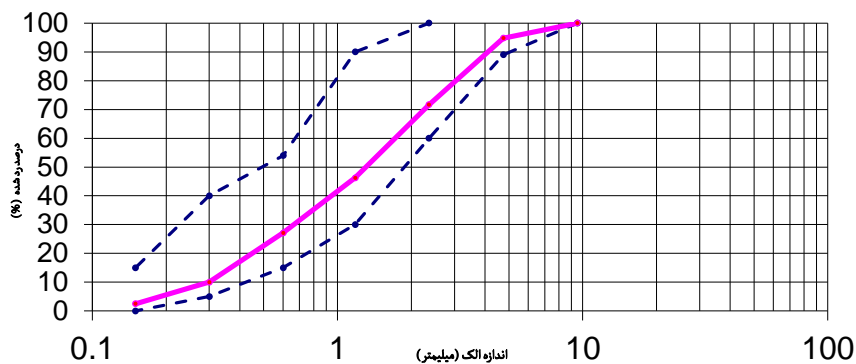
kg/m <sup>3</sup> وزن مخصوص	cm <sup>2</sup> /gr سطح مخصوص	
۳۱۵۰	۳۱۰۰	سیمان
۲۲۰۰	۶۵۰۰	میکروسیلیس
۲۶۰۰	۳۳۰۰	پوزولان خاش

## ۲.۱.۲. سنگ‌دانه‌ها

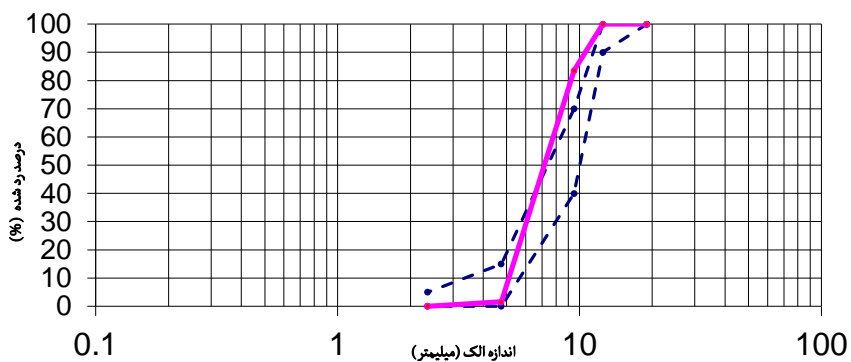
سنگ‌دانه‌ها نسبتاً ارزان‌اند و با آب واکنش‌های شیمیایی پیچیده‌ای برقرار نمی‌سازند؛ بنابراین مرسوم است که سنگ‌دانه‌ها به‌عنوان پرکننده خنثی در بتن تلقی گردند. سنگ‌دانه‌های معدنی طبیعی مهم‌ترین طبقه‌ی سنگ‌دانه‌ها را برای ساخت بتن سیمان پرتلندی تشکیل می‌دهند [۶].

درشت‌دانه مصرفی در این پژوهش از نوع شکسته با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر و وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه با وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ماسه‌بادی با وزن مخصوص ۲۶۸۵ استفاده شد. همچنین از پور سنگ آهکی با وزن مخصوص

۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب نیز استفاده گردید. در شکل ۲ و ۳ منحنی دانه‌بندی ماسه و شن نخودی و در شکل ۴ منحنی ترکیبی دانه‌بندی و همچنین در جدول ۲ سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی نیز آورده شده است.



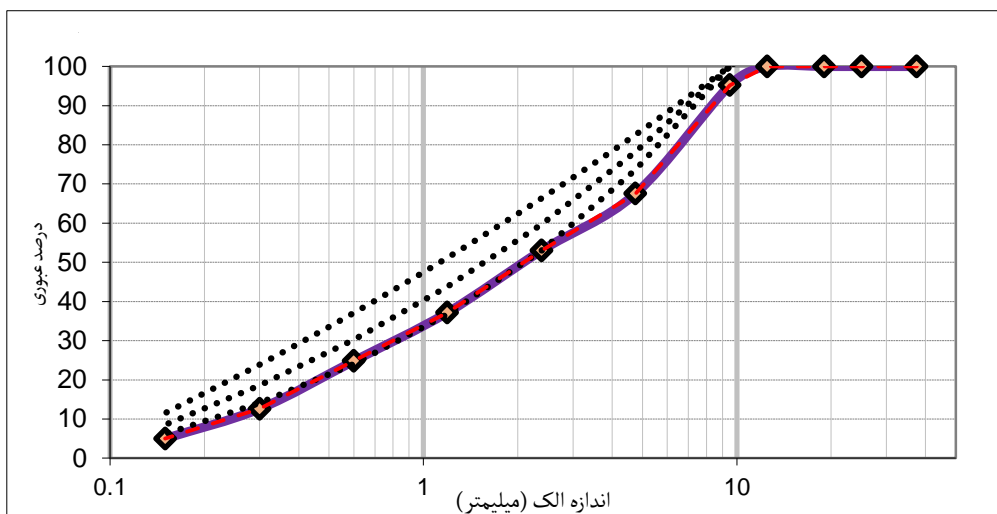
شکل ۲: منحنی دانه‌بندی ماسه



شکل ۳: منحنی دانه‌بندی شن نخودی

جدول ۲: سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی مصالح

مدول نرمی FM	سهم	مصالح
۶/۱۳	۳۰	شن ریز (نخودی)
۳/۴۸	۶۰	ماسه
۱/۳۹	۴	ماسه‌بادی
۱/۰۷	۶	پودر سنگ
۴/۰۵	۱۰۰	ترکیب سنگ‌دانه‌ها



شکل ۴: منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح

### ۳.۱.۲ آب

آب مصرفی جهت ساخت بتن از آب آشامیدنی شهر چناران با  $PH=7/5$  استفاده گردید.

### ۴.۱.۲ افزودنی فوق روان کننده

به منظور رسیدن به خواص رئولوژیکی مناسب در بتن خودتراکم از فوق روان کننده با پایه پلی کربکسیلات با وزن مخصوص ۱۰۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد مواد جامد ۴۹٪ استفاده گردید.

### ۲.۲ طرح مخلوط و نحوه ساخت و عمل آوری

طرح مخلوط بتن باید به گونه‌ای طراحی گردد که بتواند تمامی ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را برآورده نماید. در ابتدای هر روز درصد رطوبت مصالح گرفته شده و پس از توزین مصالح، ابتدا سنگ‌دانه‌ها و پودر سنگ آهکی درون مخلوط‌کن ریخته شد و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط‌کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزولان و در انتها آب نیز به طرح اضافه گردید. فوق روان کننده به عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها با توجه به رسیدن جریان اسلامپ در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتیمتر به طرح‌ها اضافه می‌گردید. سپس آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، حلقه J و جعبه L نیز صورت گرفتند. همچنین جداسدگی دانه‌ها و آب‌انداختگی بتن به صورت چشمی کنترل گردید. نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری در قالب و با یک‌لایه روکش پلاستیکی بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند. طرح‌های اختلاط در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: طرح‌های اختلاط

نام طرح	مجموع مواد سیمانی	درصد مصرف پوزولان	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	میکروسیلیس	پوزولان خاش	شن	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ	فوق روان کننده
N1	۴۵۰	%۵	۰/۴۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵۰	-	۵۱۷	۱۰۳۵	۶۹	۱۰۴	۱/۴۳
N2	۴۵۰	%۵	۰/۴۵	۴۲۷/۵	۲۲/۵۰	-	۴۹۹	۹۹۸	۶۷	۱۰۱	۰/۶۶
N3	۴۵۰	%۵	۰/۵۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵۰	-	۴۸۱	۹۶۱	۶۴	۹۷	۰/۳۱
N4	۴۵۰	%۷/۵	۰/۴۰	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	-	۵۱۳	۱۰۲۶	۶۸	۱۰۳	۰/۷۳
N5	۴۵۰	%۷/۵	۰/۴۵	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	-	۴۹۴	۹۸۷	۶۶	۹۹	۱/۰۳
N6	۴۵۰	%۷/۵	۰/۵۰	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	-	۴۷۵	۹۴۹	۶۳	۹۶	۰/۴۷
N7	۴۵۰	%۱۰	۰/۴۰	۴۰۵	۴۵	-	۵۰۷	۱۰۱۵	۶۸	۱۰۲	۱/۸۷
N8	۴۵۰	%۱۰	۰/۴۵	۴۰۵	۴۵	-	۴۸۸	۹۷۶	۶۵	۹۸	۱/۰۹
N9	۴۵۰	%۱۰	۰/۵۰	۴۰۵	۴۵	-	۴۶۹	۹۳۷	۶۲	۹۴	۰/۶۹
N10	۴۵۰	%۱۵	۰/۴۰	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۳۴	۱۰۶۷	۷۱	۱۰۸	۲/۱۸
N11	۴۵۰	%۱۵	۰/۴۵	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۱۸	۱۰۳۵	۶۹	۱۰۴	۱/۵۶
N12	۴۵۰	%۱۵	۰/۵۰	۳۸۲/۵	-	۶۷/۵	۵۰۱	۱۰۰۲	۶۷	۱۰۱	۱/۳۱
N13	۴۵۰	%۲۵	۰/۴۰	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۳۸	۱۰۷۶	۷۲	۱۰۸	۲/۸۰
N14	۴۵۰	%۲۵	۰/۴۵	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۲۳	۱۰۴۶	۷۰	۱۰۵	۲/۰۲
N15	۴۵۰	%۲۵	۰/۵۰	۳۳۷/۵	-	۱۱۲/۵	۵۰۷	۱۰۱۵	۶۸	۱۰۲	۱/۷۱
N16	۴۵۰	%۳۵	۰/۴۰	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۴۰	۱۰۸۱	۷۲	۱۰۹	۵/۵۸
N17	۴۵۰	%۳۵	۰/۴۵	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۲۸	۱۰۵۵	۷۰	۱۰۶	۳/۱۱
N18	۴۵۰	%۳۵	۰/۵۰	۲۹۲/۵	-	۱۵۷/۵	۵۱۴	۱۰۲۸	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
N19	۴۵۰	%۰	۰/۴۰	۴۵۰	-	-	۵۲۷	۱۰۵۴	۷۰	۱۰۶	۱/۵۶
N20	۴۵۰	%۰	۰/۴۵	۴۵۰	-	-	۵۰۹	۱۰۱۹	۶۸	۱۰۳	۱/۲۵
N21	۴۵۰	%۰	۰/۵۰	۴۵۰	-	-	۴۹۲	۹۸۳	۶۶	۹۹	۰/۵۶

### ۳.۲. نمونه‌های آزمایشگاهی

جهت سنجش عمق نفوذ آب تحت فشار از ۲ نمونه مکعبی  $15 \times 15 \times 15$  سانتی متری در سن ۲۸ روزه استفاده گردید.

### ۳. بحث و بررسی

#### ۱.۳. خواص بتن تازه

به منظور بررسی ویژگی‌های رئولوژی بتن خودتراکم؛ آزمایش‌های جریان اسلامپ، T50، حلقه J و جعبه L نیز انجام پذیرفت که در شکل ۵ مشخص می باشد. همچنین نتایج آن در جدول ۴ ارائه گردیده است.



شکل ۵: عکس رئولوژی بتن خودتراکم، نمونه ها، شکستن نمونه‌ها



جدول ۴: خواص بتن تازه خودتراکم

نام طرح	جریان اسلامپ (cm)	T50(sec)	حلقه L (cm)	جعبه L
N1	۵۷	۳	۴۸	۰/۸۰
N2	۶۱	۲/۷۰	۵۲	۰/۸۴
N3	۶۲	۲/۳۰	۵۰	۰/۸۶
N4	۶۷/۵۰	۳/۲۰	۵۵	۰/۹۲
N5	۶۰	۲/۶۰	۵۱	۰/۸۸
N6	۵۸/۵۰	۲/۱۰	۵۰/۵۰	۰/۸۲
N7	۶۷	۲/۴۰	۵۹	۰/۹۴
N8	۵۹	۲/۱۵	۵۰	۰/۸۰
N9	۶۳	۲	۵۵	۰/۸۴
N10	۷۶	۴/۷۰	۶۹	۰/۹۴
N11	۶۰/۵۰	۳/۷۰	۵۳	۰/۸۹
N12	۵۸	۳/۳۰	۵۲/۵۰	۰/۸۸
N13	۷۴/۵۰	۴/۴۰	۶۸/۵۰	۰/۹۵
N14	۷۴	۳/۷۰	۶۵	۰/۹۱
N15	۷۲/۵۰	۳/۱۰	۶۱	۰/۸۹
N16	۷۰	۳/۸۰	۶۳	۰/۹۷
N17	۷۰/۵۰	۳/۲۰	۶۱	۱
N18	۶۷	۳/۱۰	۵۸	۰/۸۴
N19	۶۶	۳/۲۰	۵۵	۰/۹۲
N20	۵۷	۳/۵۰	۴۸	۰/۸۴
N21	۵۶	۳/۸۰	۴۷/۵۰	۰/۸۲

با توجه به نتایج جریان اسلامپ مشخص گردید کلیه طرح‌ها در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متری می‌باشند که بیشترین و کمترین مقادیر اسلامپ به ترتیب مربوط به طرح‌های N13 و N21 نیز می‌باشد. طبق آزمایش T50 ملاحظه گردید که بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس زمان بیشتری را صرف رسیدن به قطر ۵۰ سانتی‌متری می‌کند که این به دلیل لزجت ظاهری بالاتر بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس می‌باشد. در کلیه طرح‌ها در آزمایش جعبه L عدم



جداشدگی بتن در پشت میلگردها نیز مشاهده گردید و در بتن‌های حاوی پوزولان خاش سرعت حرکت بتن نسبت به بتن‌های شاهد و بتن‌های حاوی میکروسیلیس کمتر بود. به‌طور کلی می‌توان گفت که بتن‌های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن‌های حاوی میکروسیلیس از نظر رئولوژی رفتار و عملکرد مطلوب‌تری داشتند. البته شایان ذکر است که میزان مصرف میکروسیلیس با پوزولان خاش تفاوت چشمگیری دارد و برای مقایسه رئولوژی این دو نوع پوزولان بهتر است در درصد‌های مصرف یکسان مورد مقایسه قرار گیرند.

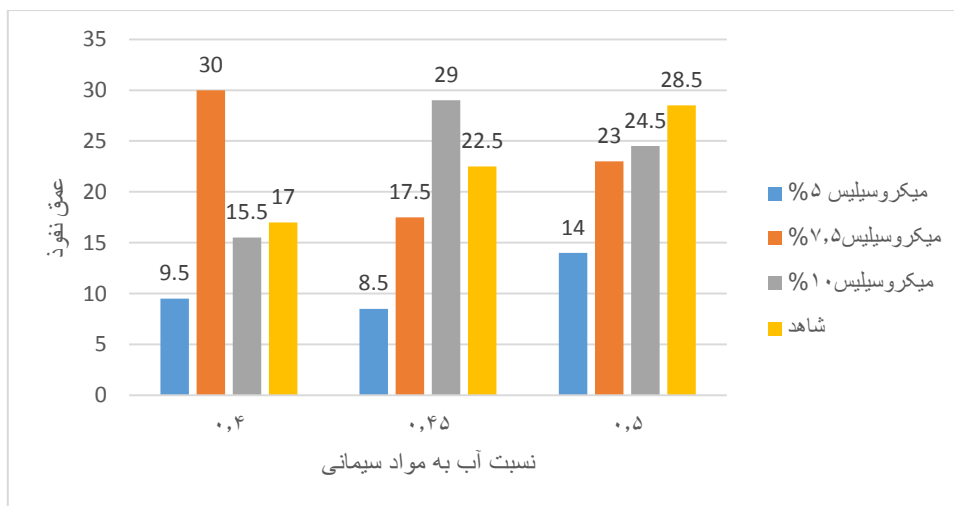
### ۲.۳. آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار

هدف از انجام این آزمایش تعیین میزان نفوذ آب تحت فشار در بتن سخت شده می‌باشد که در آب عمل‌آوری شده است بدین ترتیب که آب با فشار به سطح بتن سخت شده اعمال می‌شود و سپس آزمون به دو نیم تقسیم شده و عمق نفوذپذیری مربوط به پیشروی آب اندازه‌گیری می‌شود. ۲ عدد آزمون مکعبی  $15 \times 15$  برای انجام این آزمایش در نظر گرفته شد که آزمون‌ها باید حداقل در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گیرد. روش آزمایش بدین گونه است که آزمون را درون دستگاه قرار داده و فشار آبی برابر ۴۵۰ الی ۵۵۰ کیلو پاسکال در مدت ۷۲ ساعت اعمال گردد. در طول آزمون به‌طور پیوسته سطوحی از آزمون را که در معرض فشار آب قرار ندارد کنترل تا آب نشت و تراوش نداشته باشد. پس از اعمال فشار در مدت زمان مشخص، آزمون را از درون دستگاه خارج کرده و قطرات آب اضافی سطحی از آزمون که فشار آب بر روی آن اعمال شده را پاک و سپس آزمون را از جهت عمود بر سطحی که در معرض فشار آب قرار گرفته به دو نیم شکاف می‌دهیم. هنگامی که آزمون دو نیم شد، سطحی از آزمون دو نیم شده را که در معرض فشار آب قرار گرفته بود را به سمت پایین قرار داده و به محض شکستن آزمون پیشروی آب روی آزمون را علامت‌گذاری کرده به‌طوری‌که پیشرفت نفوذ آب به‌وضوح در سطح قابل مشاهده باشد و آزمون دو نیم شده خشک نشود، سپس بیشترین عمق نفوذ اندازه‌گیری و به میلی‌متر ثبت می‌گردد. نتیجه آزمون بیشترین عمق نفوذ آب است که به میلی‌متر بیان گردیده است [۷]. شکل ۶ آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار نیز می‌باشد.

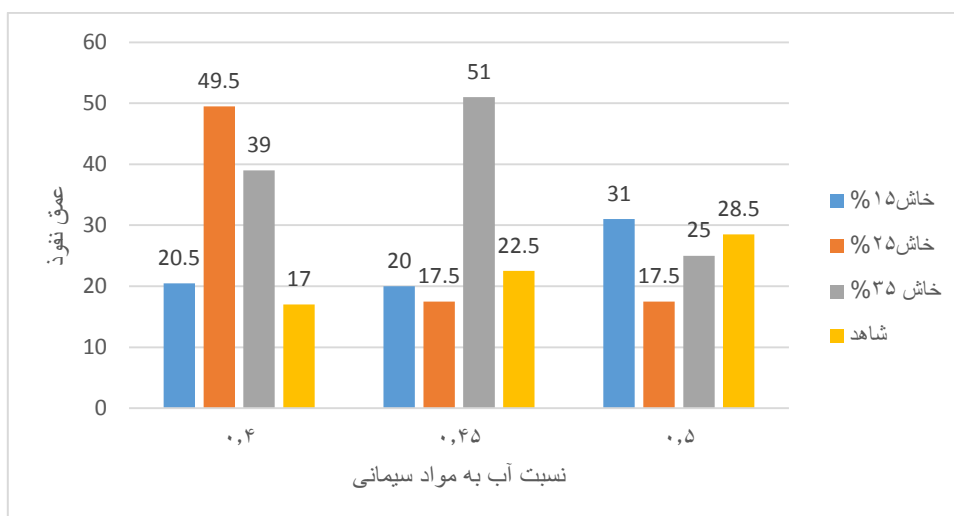


شکل ۶: آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار

نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد مطابق شکل‌های ۷ الی ۸ نیز می‌باشد.



شکل ۷: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با نمونه شاهد



شکل ۸: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های حاوی پوزولان خاش با نمونه شاهد

از مقایسه نمودارهای عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح‌های حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش با نمونه شاهد نتیجه می‌شود که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش سبب کاهش عمق نفوذ آب نیز می‌گردد. همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف پوزولان-ها برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد. کمترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح N۲ به مقدار ۸/۵ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح N۱۷ به مقدار ۵۱ میلی‌متر نیز گزارش می‌شود. از بررسی کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار و مقایسه با نمونه‌های شاهد ملاحظه می‌گردد که بهترین نتایج آزمایش مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵٪ نیز می‌باشد. ذکر این نکته حائز اهمیت است که خطای ناشی از انجام آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار به دلیل مصرف افزودنی فوق روان کننده جهت رسیدن به الزامات حالت خمیری غیرقابل اجتناب بوده و مصرف این ماده سبب افزایش هوازایی در بتن نیز می‌گردد که در نتیجه موجب افزایش خلل و فرج در نمونه‌ها شده و افزایش عمق نفوذ را در بردارد، لذا توصیه می‌گردد برای افزایش دقت در انجام آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار، میزان مصرف افزودنی فوق روان کننده نیز مدنظر قرار گیرد. در نمودارهای فوق ملاحظه می‌گردد که در نسبت آب به مواد

سیمانی ۰/۴۰ در بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش به دلیل افزایش مصرف فوق روان کننده و در نتیجه امکان هوازایی بیشتر نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار نیز دارای دقت کافی و مطلوبی نمی باشد و نسبت به نمونه های شاهد ساخته شده عمق نفوذ بیشتری را گزارش می کند.

#### ۴. نتیجه گیری

استفاده از بتن های ویژه نظیر بتن خودتراکم روزه روز در حال گسترش و توسعه می باشد. همچنین ضرورت تدوین روش طرح ملی مخلوط بتن خودتراکم احساس می شود، همچنین مطالعات اولیه کافی در خصوص آن وجود ندارد لذا نتایج زیر قابل استخراج می باشد:

- ۱- با توجه به نتایج جریان اسلامپ مشخص گردید کلیه طرح ها در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی متری می باشند که بیشترین و کمترین مقادیر اسلامپ به ترتیب مربوط به طرح مخلوط حاوی ۲۵ درصد پوزولان خاش در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ و طرح مخلوط شاهد در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰ می باشد.
- ۲- در آزمایش جعبه L عدم جداشدگی بتن در پشت میلگردها نیز مشاهده گردید و در بتن های حاوی پوزولان خاش سرعت حرکت بتن نسبت به بتن های شاهد و بتن های حاوی میکروسیلیس کمتر بود. به طور کلی می توان گفت که بتن های حاوی پوزولان خاش نسبت به بتن های حاوی میکروسیلیس از نظر رئولوژی رفتار و عملکرد مطلوب تری داشتند. البته شایان ذکر است که میزان مصرف میکروسیلیس با پوزولان خاش تفاوت چشمگیری دارد و برای مقایسه رئولوژی این دو نوع پوزولان بهتر است در درصد های مصرف یکسان مورد مقایسه قرار گیرند.
- ۳- از مقایسه نمودار های عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح های حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش با نمونه شاهد نتیجه می شود که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش سبب کاهش عمق نفوذ آب نیز می گردد. همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف پوزولان ها برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد.
- ۴- کمترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح مخلوط حاوی ۵ درصد میکروسیلیس به مقدار ۸/۵ میلی متر می باشد و بیشترین عمق نفوذ آب تحت فشار در طرح مخلوط حاوی ۳۵ درصد پوزولان خاش به مقدار ۵۱ میلی متر نیز گزارش می شود.
- ۵- از بررسی کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار و مقایسه با نمونه های شاهد ملاحظه می گردد که بهترین نتایج آزمایش مربوط به بتن های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۰/۵ می باشد.

#### تشکر و قدردانی

از جناب آقایان مهندس محمدجواد طاهباز و مهندس مسعود عطاریان به خاطر راهنمایی هایشان سپاس گذاری می شود. همچنین از شرکت صنایع شیمیایی ژیکاوا و تمامی کارکنان این شرکت به دلیل در اختیار گذاشتن تمامی امکانات آزمایشگاهی و انجام آزمایش ها کمال تشکر و قدردانی را داریم.

#### مراجع

- [۱] قدوسی، پ.، شیرزادی جاوید، ع.، مهری رویندزق، ب.، حسینی رستمی، ح.، (۱۳۹۶). " بررسی تاثیر دمای مخلوط های بتن خودتراکم حاوی مواد جایگزین سیمان بر خواص رئولوژی ". پنجمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم ایران، ۱۴ تا ۱۵ خرداد.
- [۲] رمضانپور، ع.، پیدایش، م.، میرولد، س.، آرامون، ا.، مهدیخانی، ا.، (۱۳۸۸). " اثر انواع پوزولان طبیعی بر دوام بتن در برابر حمله کلرایدی ". اولین کنفرانس ملی بتن.
- [۳] قدوسی، پ.، شیرزادی جاوید، ع.، رحمتی، ب.، (۱۳۹۳) " روش نوین طرح مخلوط بتن خودتراکم بر پایه مقاومت فشاری ". تحقیقات بتن، سال ششم، شماره اول، ص ۸۷-۱۰۲.
- [۴] ثابت دیوشلی، ب.، (۱۳۹۶). " طراحی و اجرای بتن های بادوام و کارایی بالا برای سازه های دریایی ". پنجمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم ایران، ۱۴ تا ۱۵ خرداد.
- [۵] رمضانپور، ع.، پیدایش، م.، (۱۳۹۲). " تکنولوژی بتن (مصالح، خواص، اجرا) ". جلد اول، چاپ اول، تهران، انتشارات جهاد



نهمین کنفرانس ملی بتن ایران  
۱۵ و ۱۶ مهرماه ۱۳۹۶  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ص ۶۹-۱۱.

[۶] رمضانپور، ع.، قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، (۱۳۹۵). "ریزساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)"، تألیف کومار، پ.، مهتا، پ.، مونته ئیرو، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ص ۳۴۱-۲۹۹

[7] BS EN12390-8. (2000). "Depth of penetration of water under pressure".