



تأثیر میکروسیلیس و پودرسنگ بر خواص بتن خودتراکم

یاسر شریفی¹، ایمان افشون²، زینب فیروزجایی²، محمدامین مومنی³

1- استادیار گروه مهندسی عمران - دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

yasser_sharifi@yahoo.com (y.sharifi@vru.ac.ir)

2- دانشجویان کارشناسی ارشد سازه - دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

civil.afshoon@yahoo.com

eng.firooz@yahoo.com

3- دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران - دانشگاه ولی عصر رفسنجان، ایران

amin.momeni@att.net

چکیده

نظر به اینکه مقاومت بتن یکی از ویژگی‌های مهم آن است که سایر خواص از جمله مدول ارتجاعی، نفوذناپذیری، مقاومت در برابر خوردگی و میزان آب مصرفی، به طور مستقیم یا غیر مستقیم به آن مرتبط هستند، لازم است این خاصیت بادقت مورد بررسی قرار گیرد. بتن نیز مانند سایر مصالح مصرفی دارای نقاط ضعفی است. سعی در برطرف کردن این نقاط ضعف زمینه‌ساز بسیاری از تحقیقات در حوزه ی علوم مهندسی عمران گردیده است. برای رسیدن به خواص مطلوب می توان قسمتی از سیمان یا سنگدانه‌ها را با موادی مثل خاکستر پوسته برنج، زئولیت، پومیس، گرد زغال سنگ، پودر شیشه، میکروسیلیس سرباره مس، شیشه، سنگدانه‌های بازیافتی و ... جایگزین کرد. اکثر این مواد علاوه بر بهبود خواص رئولوژی، باعث بهتر شدن خواص مکانیکی نیز می‌شوند. علاوه بر اثرات مثبت بالا، کاهش هزینه‌ها (ناشی از دپو و تولید) و مصرف انرژی در تولید سیمان و سنگدانه‌ها از جمله دلایل اقتصادی و زیست‌محیطی کاربرد این مواد مکمل پوزلانی و مواد بازیافتی است. در این تحقیق با جایگزینی سیمان با پودرسنگ و میکروسیلیس در درصدهای 0، 4، 8، 12، 16 و 20 مشاهده شد که خواص بتن خودتراکم با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس بهبود یافته و در حالت‌های جایگزینی پودرسنگ این خواص دچار کاهش شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، میکروسیلیس، پودرسنگ، رئولوژی، مقاومت فشاری

1. مقدمه

در صنعت ساخت و ساز یکی از مهمترین و کاربردی‌ترین مصالح مورد استفاده بتن است. به دلایلی مثل مقاومت فشاری بالا و شکل پذیری خوب، که با ساختن قالب مناسب تقریباً هر نوع مقطعی را می توان به کمک این ماده تولید نمود، کاربرد این مصالح در صنعت ساخت و ساز دوچندان شده است. در دسترس بودن اجزاء و مقاومت در برابر آتش، آب، رطوبت و هزینه ساخت پایین (نسبت به سایر مصالح مورد استفاده در صنعت ساخت



و ساز) این ماده، باعث شده است که همواره در همه سطوح مورد توجه محققین و همچنین سرمایه گذاران قرار گیرد. همین مسئله باعث توجه روز افزون به انواع بتن و عملکرد آن در شرایط مختلف شده است.

با ابداع بتن خود تراکم در ژاپن توسط آقای آکامورا تحولی شگرف در صنعت ساخت بتن ایجاد شد. این نوع بتن برای حل مشکلاتی همچون عدم تراکم و دوام سازه‌های بتنی مطرح گردید و در زمینه‌های مختلفی مورد استفاده قرار گرفت [1]. روان بودن بتن خودتراکم باعث می‌شود که تحت اثر نیروی وزن خود متراکم شده و نیازی به ویریه داخلی یا خارجی نداشته باشد. از معیارهای اساسی به منظور ایجاد خودتراکمی در این نوع بتن می‌توان به خصوصیات مثل شکل‌پذیری بالا، توانایی عبور یا قابلیت تغییر شکل و مقاومت زیاد در برابر جداسدگی اشاره کرد. برآورده شدن هر یک از این معیارها به منظور اطمینان از بتن‌ریزی صحیح و عملکرد موثر این نوع بتن، امری الزامی است. بتن خود تراکم، شامل بازه گسترده‌ای از طرح اختلاط‌ها می‌باشد که خود بستر انجام آزمایشات گوناگون برای بهینه ساختن آن، برای استفاده‌های مختلف است. یکی از بحرانی‌ترین مسائل دنیا دفع مواد ضایعاتی و استفاده مجدد از آنها بوده است. در اکثر کشورها سالانه میزان زیادی ضایعات تولید می‌شود و از طرفی اکثر ضایعات قابلیت بازیافت را نداشته و یا بازیافت آنها با صرف انرژی و آلودگی‌های ناشی از آن همراه است. این مسئله خطر این مواد را برای محیط زیست بیشتر می‌کند. از سوی دیگر یکی از جدی‌ترین مشکلات صنعت بتن این است که باعث انتشار مقدار زیادی دی‌اکسید کربن و اکسیدهای نیتروژن می‌شود، که هم باعث افزایش دمای کره زمین و هم آلودگی‌های زیست محیطی دیگر می‌گردد. با توجه به این که تولید سیمان همراه با آلودگی‌های زیست محیطی بوده و همچنین تولید این ماده هزینه‌های زیادی در پی دارد، می‌توان از پوزولان‌ها که اثرات مثبتی روی ساختار و خواص بتن دارند، استفاده کرد.

میکروسیلیس یک ماده فرعی است که در تولید سیلیسیم و آلیاژهای سیلیسیم، مخصوصاً آلیاژ فروسیلیس ایجاد و برای استفاده ماده سیمانی در بتن می‌رود. از سایر فواید استفاده از میکروسیلیس می‌توان به پایین آمدن جنبش یون‌های کلر و کاهش عمق نفوذ کلر در بتن مخصوصاً در مناطق ساحلی جنوب ایران اشاره کرد. مصرف میکروسیلیس باعث افزایش مقاومت های دینامیکی مثل فشاری، خمشی، کششی و برشی و همچنین افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری و جلوگیری از خوردگی بتن در مقابل عوامل خورنده می‌شود. همچنین از پودر سنگ آهک اخیراً، به عنوان یک پودر معدنی در جهت بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن استفاده شده است. پودرهای معدنی مثل پودر سنگ آهک در بتن، به عنوان پرکننده حفره‌ها عمل کرده و باعث کاهش تخلخل می‌شوند. از دیگر مزایای استفاده از پودر سنگ می‌توان به جلوگیری از جدایی مواد که باعث بهبود مقاومت فشاری بتن می‌شود اشاره کرد. با توجه به فراوانی پودر سنگ آهک در ایران، می‌توان با به کار گرفتن این ماده علاوه بر بهبود خواص بتن، از لحاظ اقتصادی نیز نهایت صرفه‌جویی را انجام داد.



Kobayashi و همکاران در سال 1997 اثرات پودر سنگ آهک بر هیدراسیون سیمان، در سنین پایین را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند با اضافه کردن پودر سنگ مقاومت 3، 7 و 28 افزایش می یابد ولی با جایگزینی قسمتی از سیمان با پودر سنگ، میزان مقاومت کم می شود [2]. مطالعاتی نیز در مورد تاثیرات تداخلی پودر سنگ آهک و نسبت آب به سیمان بر دوام، مقاومت فشاری و جذب آب 28 روزه بتن، در سال 1996 توسط Sawicz و Heng انجام شد. در این مطالعات، معادلاتی برای تعیین مقاومت فشاری و جذب آب 28 روزه بتن ساخته شده با پودر سنگ آهک، بر حسب نسبت های آب به سیمان و پودر به سیمان ارائه گردید [3]. بررسی های Norok Shchenov و Whit Comb نشان داد که با استفاده از سبکدانه های سیلیسی منبسط شده با مصرف سیمان تا 520 کیلوگرم بر مترمکعب و میکروسیلیس تا 20 درصد وزن سیمان می توان به مقاومتی معادل 70/5 مگاپاسکال با وزن مخصوص 1860 کیلوگرم بر متر مکعب دست یافت [4].

2. هدف تحقیق

در این تحقیق سعی شده با جایگزینی قسمتی از سیمان با میکروسیلیس و پودر سنگ، خواص رئولوژی و مقاومت فشاری بتن خودتراکم تولید شده را مورد بررسی قرار دهیم. میزان جایگزینی در درصد های 0، 4، 8، 12، 16 و 20 صورت گرفته است. نام گذاری طرح ها به ترتیب بصورت mix-0، mix-4، mix-8، mix-12، mix-16 و mix-20 بوده است. آزمایشات رئولوژی شامل آزمایش حلقه J، آزمایش قیف V و آزمایش جعبه L جهت بررسی خواص رئولوژی انجام شده است. در این تحقیق سیمان، فوق روان کننده، میکروسیلیس و پودر سنگ به ترتیب با نمادهای C، S.P، SF و LS نشان داده شده اند. جزئیات طرح اختلاط ها در جدول 1 قابل مشاهده است. در جدول 1 واحد سنگدانه های ریز و درشت، سیمان، میکروسیلیس و پودر سنگ کیلوگرم بر متر مکعب است.

جدول 1- جزئیات طرح اختلاط ها

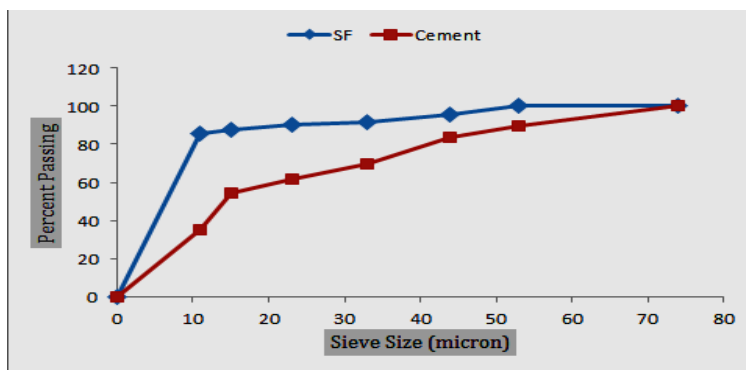
Mix	aggregates		Cementation Materials			
	Coarse	Fine	Cement	SF or LS	W/C	S.P(%)
mix-0	600	960	330	0	0.4	3
mix-4	600	960	316.8	13.2	0.4	3
mix-8	600	960	303.6	26.4	0.4	3
mix-12	600	960	290.4	39.6	0.4	3
mix-16	600	960	277.2	52.8	0.4	3
mix-20	600	960	264	66	0.4	3

3. مصالح مورد استفاده

برای تهیه بتن خودتراکم از سیمان ممتازان کرمان (تپ 2) استفاده شده است. برای کاهش میزان مصرف آب در بتن و همچنین افزایش روانگرایی بتن از فوق کاهنده آب استفاده می‌شود، که برای این ماده از Super Viscose 1 ساخت کارخانه نامیکاران استفاده شده است. آب مصرفی نیز آب شرب و آشامیدنی است. ترکیبات شیمیایی سیمان و میکروسیلیس در جدول 2 ارائه شده است. در شکل 1 دانه‌بندی سیمان و میکروسیلیس قابل مشاهده است.

جدول 2- مشخصات سیمان و میکروسیلیس

ترکیبات میکروسیلیس	ترکیبات سیمان ممتازان	ترکیبات شیمیایی
0.13	1.4 ± 0.1	(MgO) %
97.59	21.2 ± 0.4	(SiO ₂) %
0.37	4.6 ± 0.2	(Al ₂ O ₃) %
0.73	3.8 ± 0.1	(Fe ₂ O ₃) %
-	6.0 ± 0.5	(C ₃ A) %
-	2.45 ± 0.2	(SO ₃) %
0.6	1 ± 0.2	(L.O.I) %



شکل 1- دانه‌بندی سیمان و میکروسیلیس

4. آزمایشات بتن تازه

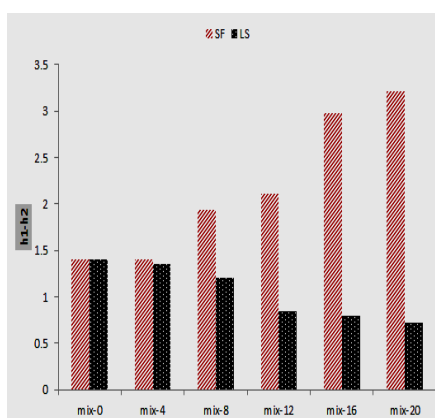
1.4. آزمایش حلقه J

بطور کلی در این آزمایش به کمک مخروط ناقص مشابه آنچه در آزمایش اسلامپ استفاده می‌شود و حلقه‌ای به قطر 30 سانتیمتر که آرماتورهای به قطر 14 میلیمتر و ارتفاع 10 سانتیمتر به آن متصل است، به طوریکه فواصل این میلگردها تقریباً سه برابر اندازه حداکثر درشت‌دانه‌ها است، میزان قابلیت عبور بتن تازه را اندازه‌گیری

می‌کنیم. با اندازه‌گیری اختلاف ارتفاع بتن در 4 نقطه از حلقه در داخل و بیرون آن و سپس میانگین گرفتن از این مقادیر، می‌توان توانایی عبور بتن را مورد بررسی قرار داد. قطعا هرچه میزان اختلاف ارتفاع بیشتر باشد توانایی عبور کمتر است. در شکل 2 نتایج آزمایش حلقه را مشاهده می‌کنید. در شکل 3 نیز نمونه‌ای از انجام آزمایش حلقه را مشاهده می‌کنید. با توجه به نتایج به علت جذب آب کمتر پودر سنگ، میزان آب در بتن زیادتر شده، که این عامل باعث روانی بیشتر بتن شده است. به همین علت قابلیت عبور بیشتر و در نتیجه میزان اختلاف ارتفاع بتن کمتر شده است. از طرفی با توجه به جذب آب بالای میکروسیلیس، و همچنین چسبندگی ایجاد شده در بتن، میزان لزجت بتن زیاد شده و قابلیت عبور کمتر شده است. (h_2 و h_1 به ترتیب ارتفاع بتن در خارج حلقه و داخل آن است).



شکل 3- نتایج قطر بتن پخش شده



شکل 2- نتایج تفاوت ارتفاع داخل و خارج حلقه J

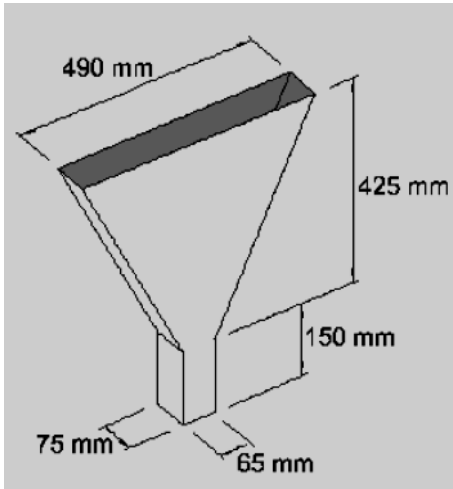
3.4. آزمایش قیف V

در این آزمایش مدت زمان خروج بتن از قیف V شکل ملاک آزمایش بوده و می‌توان به طور شهودی با توجه به نحوه خروج بتن از قیف همگنی بتن را مورد ارزیابی قرار داد. در شکل 4 نتایج این آزمایش را مشاهده می‌کنید. در شکل 5 وسیله انجام آزمایش نشان داده شده است. به علت افزایش میزان لزجت، با افزایش میزان میکروسیلیس زمان خروج بتن از قیف افزایش یافته است. در مورد افزایش پودر سنگ نیز به علت افزایش روانی زمان خروج بتن کاهش یافته است.

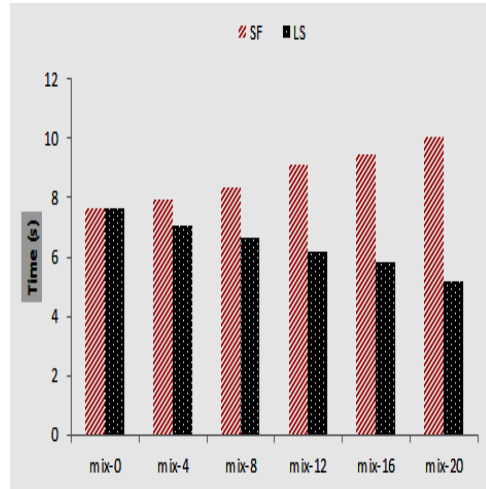
4.4. آزمایش جعبه L

این آزمایش به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها طراحی شده است. برای انجام این آزمایش حدود 14 لیتر بتن لازم است. پس از ریختن بتن در جعبه به آرامی دریاچه را به سمت بالا می‌کشیم. نسبت ارتفاع بتن بعد از دریاچه به ارتفاع بتن قبل از دریاچه معیار اصلی این آزمایش است که

هر چه به عدد یک نزدیکتر باشد نشان دهنده‌ی قابلیت عبور و پرکنندگی بیشتر بتن مورد آزمایش است. در شکل 6 نتایج این آزمایش ارائه شده است. در شکل 7 نحوه انجام آزمایش ارائه شده است. h_1 و h_2 به ترتیب ارتفاع بتن قبل و بعد از درجه‌بندی است. میزان افزایش عبور و بهبود معیار این آزمایش با افزایش پودرسنگ قابل ملاحظه است. در درصد 4 و 8 جایگزینی میکروسیلیس تغییر چشمگیری در معیار آزمایش جعبه مشاهده نمی‌شود. جایگزینی 16 و 20 درصد میکروسیلیس باعث خارج شدن معیار آزمایش از حد مجاز می‌شود.



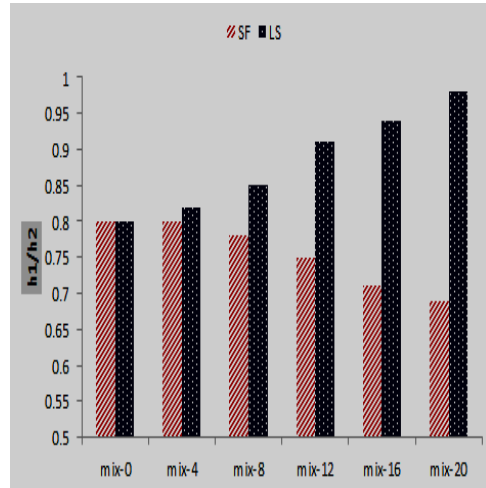
شکل 5- قیف V



شکل 4- نتایج آزمایش قیف V شکل



شکل 7- جعبه L



شکل 6- نتایج آزمایش جعبه L

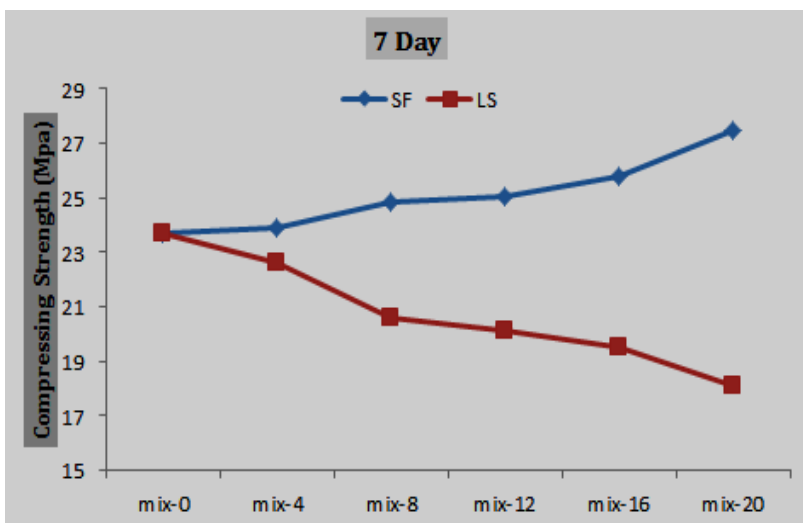
5. آزمایشات بتن سخت شده

1.5 مقاومت فشاری

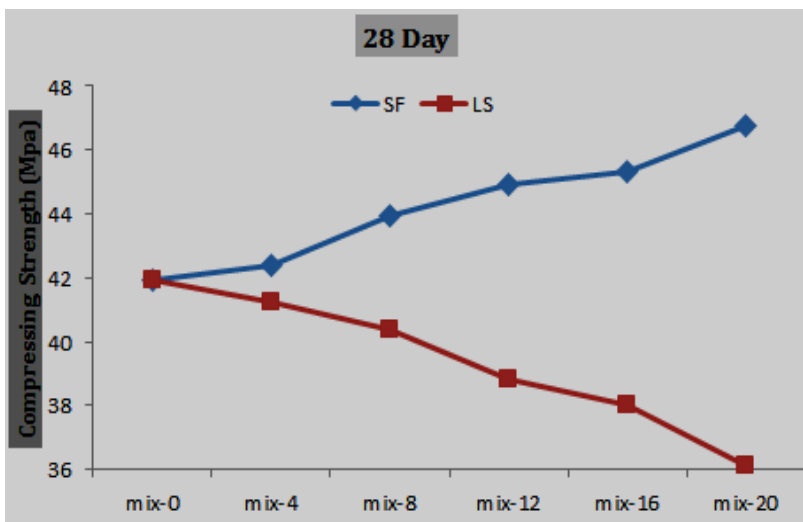
در انجام این آزمایش از نمونه‌های مکعبی $10*10*10$ سانتیمتری استفاده شده است. برای هر طرح اختلاط سه نمونه که پس از 24 ساعت از درون قالب بیرون آورده شده‌اند و سپس در مخزن نگهداری، در آب با دمای 23-25 درجه نگهداری و در سنین 7 و 28 روزه مورد آزمایش قرار گرفتند، استفاده شد. نمونه‌ها در سنین مورد نظر به کمک جک هیدرولیکی با نرخ $2/5$ کیلونیوتن بر ثانیه مورد آزمایش قرار گرفتند. با توجه به رابطه عکس میزان آب موجود در بتن و مقاومت فشاری، می‌توان گفت که میکروسیلیس میزان آب موجود در بتن را جذب و آب آزاد در بتن را کاهش می‌دهد و مقاومت بتن با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس افزایش می‌یابد. در این نمونه‌ها میکروسیلیس با کریستال‌های هیدروکسید کلسیم ترکیب می‌شود و آن را به ترکیبات سیلیکات کلسیم پایدار تبدیل می‌کند. همچنین میکروسیلیس چسبندگی مخلوط بتن و در نتیجه چسبندگی بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها را افزایش می‌دهد که این چسبندگی باعث همگن شدن و پایداری بتن می‌شود. بخشی از کسب مقاومت در سنین اولیه، ناشی از مقدار تسریع در هیدراتاسیون سیمان پرتلند است و کسب مقاومت در سنین بعدی بیشتر به دلیل واکنش پوزلانی است که باعث بهبود ساختار منافذ با حذف جزء ضعیف هیدروکسید کلسیم و جایگزینی آن با جزء قوی‌تر سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود. از طرفی پودرسنگ میزان آب آزاد در بتن را زیاد می‌کند که این خود باعث ایجاد حفره بعد از تبخیر شدن آب اضافی بتن و نقطه‌ی ضعیفی برای نمونه‌ها می‌شود. روند افزایش مقاومت فشاری در سن 7 روزه با افزایش میزان میکروسیلیس نسبت به افزایش آن در سن 28 روزه کمتر است. برای سن 7 روزه نمونه‌های ساخته شده از طرح‌های حاوی پودرسنگ روند کاهش مقاومت کمتر از روند کاهش مقاومت در سن 28 روزه است. در شکل 8 جک هیدرولیک و نحوه شکستن نمونه‌ها را مشاهده می‌کنید. در شکل 9 نتایج مقاومت فشاری در سن 7 روزه ارائه شده است. در شکل 10 نتایج مقاومت فشاری در سن 28 روزه ارائه شده است.



شکل 8- جک هیدرولیکی و نحوه شکستن نمونه‌ها



شکل 9- نتایج مقاومت 7 روزه



شکل 10- نتایج مقاومت 28 روزه

6. نتیجه گیری

نتایج تحقیق نشان دهندهی بهبود توانایی عبور و قابلیت پرکنندگی بتن های حاوی پودرسنگ است که این به علت افزایش میزان آب در بتن است. این بتن ها مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه ی شاهد دارند که دلیل آن حفره های ایجاد

شده در بتن بعد از تبخیر آب آزاد بتن خواهد بود. میزان کاهش مقاومت در سن 28 روزه در درصد های 16 و 20 نسبت به نمونه‌ی شاهد قابل ملاحظه است. روند کاهش مقاومت در سنین بالاتر نسبت به سنین اولیه بیشتر است. نتایج نشان دهنده‌ی این است که افزایش میکروسیلیس باعث چسبندگی و لزجت بیشتر بتن می‌شود که این خود باعث کاهش توانایی عبور و قابلیت پرکنندگی بتن شده و خواص رئولوژی بتن‌های حاوی میکروسیلیس را کاهش می‌دهد. در درصد 20 جایگزینی سیمان با میکروسیلیس، نحوه خروج بتن از قیف V شکل و همچنین جعبه L به سختی صورت می‌گرفت. می‌توان گفت بخشی از کسب مقاومت در سنین اولیه، ناشی از مقدار تسریع در هیدراتاسیون سیمان پرتلند بوده و کسب مقاومت در سنین بعدی بیشتر به دلیل واکنش پوزلانی است که باعث بهبود ساختار منافذ با حذف جزء ضعیف هیدروکسید کلسیم جایگزینی آن با جزء قوی تر سیلیکات کلسیم هیدراته می‌شود. ایجاد این ترکیبات باعث ساختار متراکم‌تر با منافذ کوچکتر می‌شود.

7. تقدیر و تشکر

از کمک و حمایت اداره محترم راه و شهرسازی استان کرمان و همچنین دانشگاه ولی عصر رفسنجان قدردانی می‌شود.

8. مراجع

- [1] Okamura H, Ouchi M. Self-compacting concrete Development, present use and future, *First International RILEM symposium on self-compacting concrete, Rilem Publications, Stockholm*, 3–14, 1999.
- [2] Kobayashi K, Hattori A, Miyagawa T, Fujii M. Effects of Limestone Powder as Additive on Hydration of Cement in Early Age, *Internal Conference on Engineering Materials*, 811-815, 1997.
- [3] Sawicz Z, Heng S.S. Durability of Concrete with Addition of Limestone Powder, *Magazine of Concrete Research*, V. 48, No. 175, 131-137, 1996.
- [5] Norok Shchenov V, Whit Comb W. How to obtain – strength concrete using Density Aggregate, *ACI. SP 121-33*, 683, 1990.