

## تأثیر دوده سیلیس بر مشخصات فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت سیمانی

سید حسین قاسم زاده موسوی نژاد<sup>۱</sup>، هانی صمدی<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

### چکیده:

کامپوزیت سیمانی متشکل از ماسه، سیمان، آب و افزودنی های پوزولانی (میکروسیلیس در این پروژه) است که بر اساس نیازهای خاص سازه ای و یا معماری بهینه سازی میشود. در طول دهه های گذشته دوده سیلیسی به عنوان یک پوزولان موثر در بهبود خواص بتن بسیار مورد استفاده قرار گرفته و مطالعات گسترده ای بر تاثیر این پوزولان بر روی کامپوزیت های سیمانی (بتن، ملات و ...) صورت گرفته است. هدف از انجام این آزمایش بررسی حساسیت میکروسیلیس در درصدهای مختلف (0, 5, 10, 15, 20, 25 درصد) با اختلاف جزئی نسبت آب به مواد سیمانی ۰,۴ و ۰,۴۲ بررسی شود تغییرات خصوصیات مکانیکی و دوام ملات مورد مطالعه قرار گیرد. در این تحقیق جهت ارزیابی خصوصیات مهندسی نمونه های ساخته شده آزمون های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب و مقاومت الکتریکی بر روی نمونه های ۲۸ روزه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج آزمایش و تحلیل ها نشان می دهد که طرح اختلاط با ۲۵ درصد جایگزینی دوده سیلیس، بیشترین مقاومت فشاری، خمشی و الکتریکی را دارد و جذب آب به کمترین مقدار خود میرسد.

### کلید واژه:

کامپوزیت سیمانی، میکروسیلیس، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، جذب آب، مقاومت الکتریکی

## ۱. مقدمه :

بحران انرژی و نیاز به صرفه جویی در مواد انرژی زا در تهیه و تولید مواد مختلف نظیر سیمان باعث گردیده است که کوششی همه جانبه در اقتصادی کردن تولید این فراورده و بهبود بخشیدن به کیفیت آن در سطح جهان انجام پذیرد. یکی از قدم های موثر در حل این مشکل استفاده از مواد پوزولانی به صورت طبیعی و مصنوعی در سیمان است. استفاده از این مواد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، نه تنها بهای تمام شده بتن را تقلیل می دهد، بلکه باعث بهبود خواص بتن تازه و سخت شده می شود. در حال حاضر تحقیقات دامنه داری در سطح جهان بر روی انواع پوزولان ها انجام گرفته است. از جمله ی این پوزولان ها، می توان میکروسیلیس را نام برد که از خصوصیات پوزولانی مناسبی برخوردار می باشد و در کسب مقاومت و بهبود دوام بتن نقش موثری ایفا می کند. [۵-۱]

دوده سیلیسی  $SiO_2$  از مواد افزودنی صنعتی است که در واقع غبار گازهای خروجی از دودکش های کارخانجات تولید سلیکون و آلیاژهای سیلیس، نظیر فروسیلیس در کوره های قوس الکتریکی می باشد، که واکنش ذرات آن با کریستال های حجیم و پرتخلخل آهک و تبدیل آن ها به ژل هیدروسلیکات کلسیم  $C-S-H^x$  بهبود پیوند بین خمیر سیمان و سنگدانه را به همراه دارد که به عنوان ماده جایگزین سیمان در تولید بتن استفاده می شود [۸-۶]. مهدی مظلوم و همکاران، در تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که اضافه کردن میکروسیلیس به مخلوط سیمانی باعث کاهش نفوذپذیری و در نتیجه افزایش دوام بتن می شود [۹].

در مجموعه پژوهش هایی که توسط فامیلی و باقری با عنوان « بررسی کیفیت دوده سیلیسی تولید داخل کشور و تعیین میزان تأثیر آن روی خواص بتن تازه و سخت شده» انجام شده است به نتایج زیر رسیدند: کاربرد دوده سیلیسی افزایش قابل ملاحظه ای در مقدار آب مخلوط دارد. این افزایش را میتوان ۰٫۸ لیتر به ازاء هر یک کیلوگرم میکروسیلیس دانست. با افزایش میکروسیلیس در صورت ثابت نگه داشتن نسبت آب به سیمان ( $W/C+S$ ) مقاومت افزایش قابل ملاحظه ای می یابد [۱۰].

در پژوهش دیگر تأثیر میکروسیلیس بر روی زمان گیرش و مقاومت فشاری ملات های سیمانی بدون استفاده از روان کننده بررسی شده است. در پژوهش مذکور نتیجه شد، با افزایش میکروسیلیس در صورت عدم استفاده از روان کننده، مقاومت فشاری و کارایی ملات کاهش یافته و زمان گیرش و غلظت نرمال ملات افزایش می یابد و لذا استفاده از روان کننده برای ساخت ملات های حاوی میکروسیلیس امری اجتناب ناپذیر است [۱۱].

## ۲. برنامه آزمایشگاهی :

### ۲-۱- مصالح مصرفی :

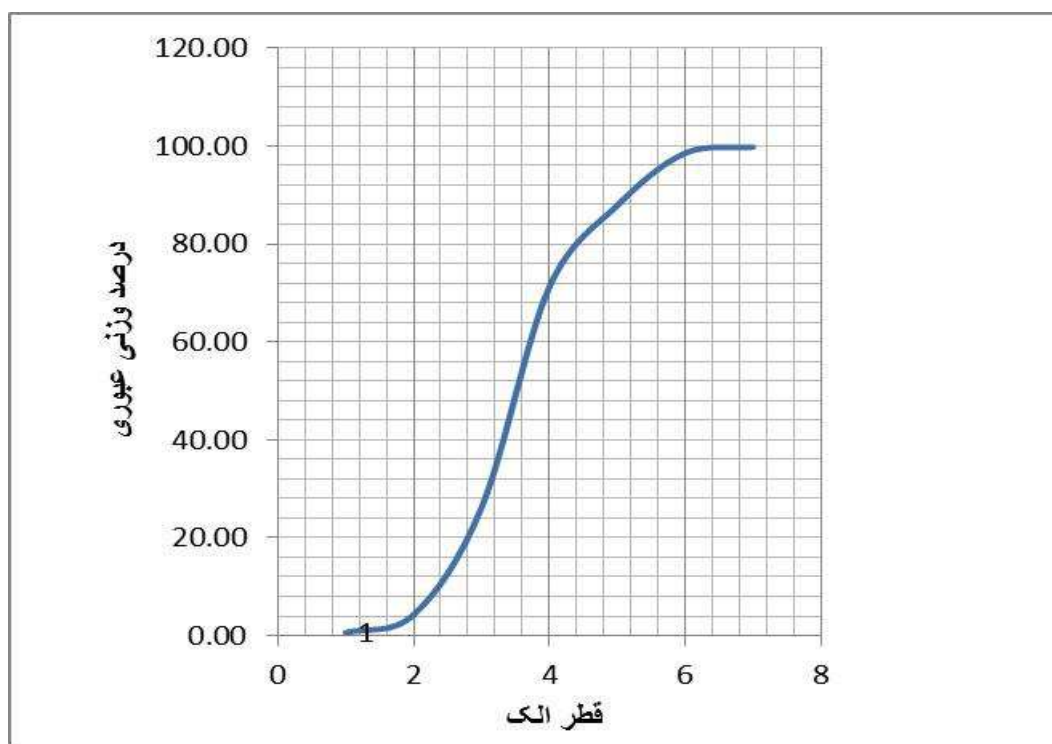
در این پژوهش از سیمان تیپ ۱-۴۲۵ خمسه زنجان مطابق با استاندارد ASTM C150، دوده سیلیسی شرکت فروسیلیس ایران مطابق با استاندارد ASTM C1240 در طرح مخلوط استفاده شده که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن ها به ترتیب در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. همچنین جهت دست یابی اسلامپ مناسب ( $70 \pm 20$ ) از فوق روان کننده با نام تجاری P10-3R تهیه شده از شرکت شیمی ساختمان، استفاده شد. ماسه مصرفی از نوع سیلیکاتی طبیعی و رودخانه ای ۰-۳ میلیمتر و وزن مخصوص  $2600 \text{ kg/m}^3$  و بر اساس استاندارد ASTM C 778 [۱۲] بود.

جدول 1 - خواص فیزیکی سیمان و دوده سیلیس

گیرش نهایی (min)	گیرش اولیه (min)	وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup>	سطح مخصوص cm <sup>2</sup> /gr	
۱۷۰	۱۱۰	۳,۱۵	۳۱۰۰	سیمان
-	-	۲,۲	۶۵۰۰	دوده سیلیسی

جدول 2- خواص شیمیایی سیمان و دوده سیلیس

L.O.I <sup>r</sup>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	ترکیبات
۰,۹	۲,۱	۰,۵	۰,۸۲	۲	۳,۶۴	۵,۳۶	۲۱,۰۸	۶۳,۳۷	سیمان %
۳,۵	۰	۰	۰	۲	۲	۱	۹۰	۱,۵	دوده سیلیسی %



شکل 1 - نمودار دانه بندی ماسه

## ۲-۲- روش ساخت و عمل آوری طرح های مخلوط :

برای این کار ابتدا مصالح مورد نیاز توزین گردیده و سپس وارد مرحله ساخت شده اند. برای ساخت ابتدا ماسه و میکروسیلیس (در صورت وجود) باهم مخلوط می شوند سپس آب به همراه فوق روان کننده به مخلوط اضافه شده و چند دقیقه همه مواد باهم مخلوط می شوند تا به حالت مناسب برسد. پس از رسیدن به حالت مناسب، مخلوط در قالب های مورد نظر ریخته شده و بعد از ۲۴ ساعت نمونه ها از قالب بیرون آورده شده و در دمای اتاق به مدت مورد نظر در حوضچه های آب نگهداری شده تا در روز مورد نظر آزمایش از حوض ها خارج شوند. برای هر طرح ۳ نمونه مکعبی  $5 \times 5 \times 5$  سانتیمتر برای آزمایش فشاری و ۳ نمونه منشوری  $16 \times 4 \times 4$  سانتیمتر برای آزمایش خمشی ساخته شده است. در تمامی طرح ها نمونه های مکعبی به منظور اندازه گیری جذب آب پس از خشک شدن در فضای باز (آزمایشگاه) توزین می شوند. نمونه های ۲۸ روزه فشاری پس از خارج کردن از حوضچه، آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی آن انجام می گیرد و سپس برای آزمایش فشاری در فضای باز قرار داده می شوند. نمونه خمشی ۲۸ روزه نیز پس از خارج کردن از حوضچه و خشک شدن در محیط باز آماده آزمایش خمشی هستند.

## ۳- بحث و بررسی نتایج :

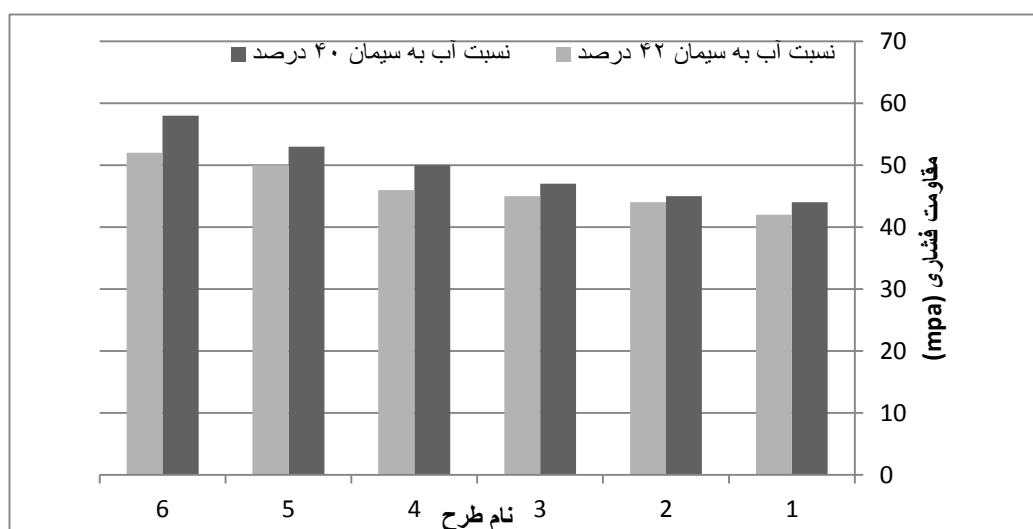
### ۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری :

این آزمایش در سن ۲۸ روز بر روی نمونه های مکعبی با بُعد ۵ سانتی متر انجام شد، که نتایج آن در اشکال ۳ آمده است. با مطالعه و تأمل در داده های فوق، چنین نتیجه گیری می شود که با جایگزینی ۰ تا ۲۵ درصد میکروسیلیس با مواد سیمانی در همه درصدها رشد مقاومت مشاهده می شود. با توجه به نتایج، در هر دو نسبت آب به سیمان (۰,۴ و ۰,۴۲) مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد افزایش داشته است، به طوریکه بیشترین مقدار این افزایش به ترتیب ۳۱٪ و ۲۴٪ میباشد که مربوط به بیشترین نسبت دوده به سیمان است.

مطابق مطالعات انجام شده توسط برخی پژوهشگران [۱۳ و ۱۴] حضور دوده سیلیسی به دلیل انجام واکنش پوزولانی با هیدروکسید کلسیم موجود در خمیر سیمان و تشکیل ژل هیدروسیلیکات کلسیم<sup>۴</sup> موجب افزایش مقاومت می شود. دوده سیلیسی می تواند موجب بهبود ریزساختار و افزایش مقاومت مکانیکی بتن شود. ذرات بسیار ریز دوده با پر کردن حفرات در خمیر سیمان و نیز واکنش با هیدرات های کلسیم موجود در خمیر، بهبود تراکم و خواص فیزیکی و شیمیایی بتن می شوند [۱۵]

جدول 3 - طرح های مخلوط

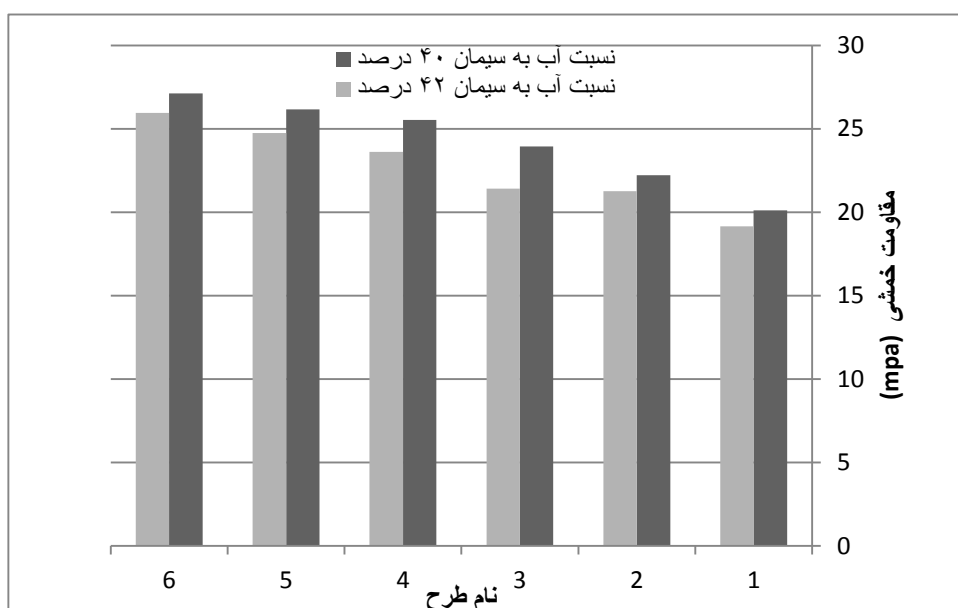
Kg/m <sup>3</sup>					نسبت دوده به سیمان	نسبت آب به مواد سیمانی	نسبت آب به مواد سیمانی	مجموع مواد سیمانی kg/m <sup>3</sup>	نام طرح
سیمان	دوده سیلیسی	ماسه طبیعی	فوق روان کننده برای نسبت ۰,۴	فوق روان کننده برای نسبت ۰,۴۲					
۸۶۰	۰	۱۶۸۸,۴	۱۳,۹	۱۱,۱	۰	۰,۴۲	۰,۴	۸۶۰	۱
۸۱۹	۴۱	۱۶۶۵	۱۳,۹	۱۱,۱	۰,۰۵	۰,۴۲	۰,۴	۸۶۰	۲
۷۸۱,۸	۷۸,۲	۱۶۴۳,۷	۱۳,۹	۱۱,۱	۰,۱	۰,۴۲	۰,۴	۸۶۰	۳
۷۴۷,۸	۱۱۲,۲	۱۶۲۴,۳	۱۳,۹	۱۱,۱	۰,۱۵	۰,۴۲	۰,۴	۸۶۰	۴
۷۱۶,۷	۱۴۳,۳	۱۶۰۶,۴	۱۳,۹	۱۱,۱	۰,۲	۰,۴۲	۰,۴	۸۶۰	۵
۶۸۸	۱۷۲	۱۵۹۰,۱	۱۳,۹	۱۱,۱	۰,۲۵	۰,۴۲	۰,۴	۸۶۰	۶



شکل 2 - نمودار مقاومت فشاری

### ۳-۲- آزمایش مقاومت خمشی :

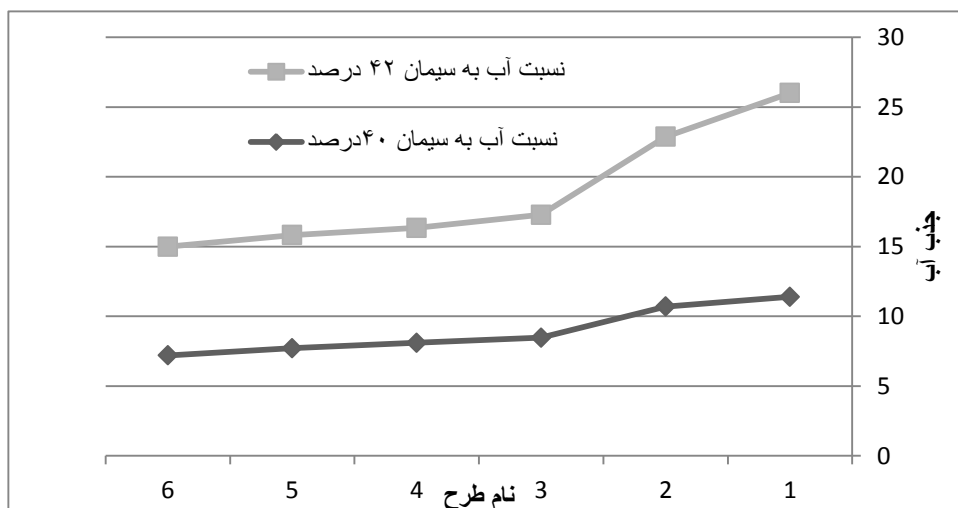
این آزمون بر اساس استاندارد ASTM C348 [۱۶] به صورت سه نقطه ای انجام می گیرد. آزمایش های مقاومت خمشی بر روی نمونه های مکعب مستطیلی به ابعاد  $160 \times 40 \times 40$  میلیمتر انجام می شود. نتایج آزمون مقاومت خمشی نمونه های بتنی، در شکل ۳ آورده شده است. همان گونه که از نتایج ملاحظه می گردد با افزایش جایگزینی دوده سیلیس در تمامی نمونه ها مقادیر مقاومت خمشی افزایش یافته است.



شکل ۳ - تغییرات مقاومت خمشی در برابر تغییرات میزان دوده سیلیس

### ۳-۳- جذب آب :

میزان جذب آب یک کامپوزیت سیمانی بصورت غیر مستقیم بیانگر تخلخل و بازگو کننده حجم و گستردگی حفرات مویینه موجود در آن می باشد [۱۷]. آزمایش جذب آب بر روی نمونه های مکعبی به ضلع ۵ سانتیمتر انجام می شود و این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM C948 صورت می گیرد [۱۸]. نتایج آزمایش جذب آب براساس متوسط نتایج ۳ نمونه تعیین شد که در شکل ۴ به نمایش درآمده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش مقدار جایگزینی سیمان با مواد پوزولانی، کاهش جذب آب نمونه های بتنی محسوس است. به طوری که با افزایش جایگزینی دوده سیلیسی تا ۲۵٪، مقدار جذب آب روندی نزولی داشته، طوری که این مقدار برای نسبت آب به سیمان ۰,۴ تا ۰,۳۶٪ و برای نسبت آب به سیمان ۰,۴۲ تا ۰,۴۶٪ کاهش داشته است.



شکل ۴- نمودار جذب آب نمونه های ۲۸ روزه

### ۴-۳- مقاومت الکتریکی :

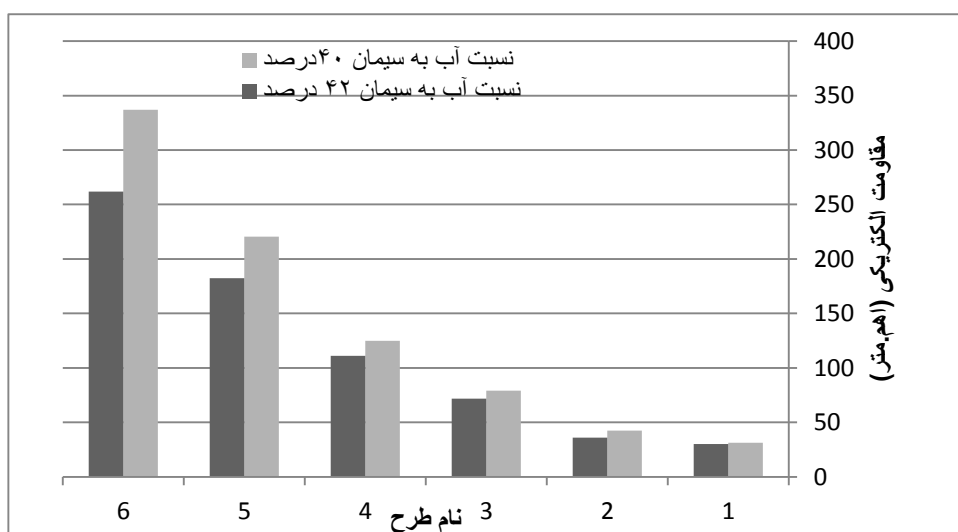
آزمایش مقاومت الکتریکی براساس استاندارد ASTM C642 بر روی نمونه های مکعبی  $5 \times 5 \times 5$  سانتیمتر در سن 28 روز انجام شد. نتایج آزمون مقاومت الکتریکی ، در شکل ۵ آورده شده است. نمونه های مکعبی را پس از ۲۸ روز که در حوضچه های آب بودند ، خارج کرده و بین دو صفحه مسی قرار داده و قرائت انجام میگیرد. برای اینکه صفحات مسی هیچ گونه اتصالی با زمین و میز کار نداشته باشند به صفحات پلاستیکی چسبانده شدند. از یک وزنه برروی صفحه فوقانی استفاده شده است تا از اتصال کامل مطمئن شویم. به طور کلی در فرآیند خوردگی، بتن در نقش الکترولیت عمل می کند که انتقال یونها را بر عهده دارد. بنابراین با افزایش مقاومت الکتریکی بتن از تحرک و انتقال یونها کاسته می شود و در نتیجه شدت خوردگی کاهش می یابد. با افزایش مقدار آب (رطوبت بتن) و مقدار کلر آزاد در بتن از مقاومت الکتریکی کاسته می شود.

مهمترین یونها در ژل سیمان Ca, Si, Fe, Al, OH است و یونهای داخل منافذ Na, K, Ca, OH می باشد. سرعت یونهای OH, Ca, Na, K در داخل آب به ترتیب  $10 \times 20/6$  ,  $10 \times 6/2$  ,  $10 \times 5/2$  ,  $10 \times 7/6$   $m^2/Vs$  است.

به عبارت دیگر سرعت یونهای OH, K نسبتاً بیشتر است و این یونها در بتن میکروسیلیسی کمتر از بتن معمولی است و در نتیجه کاهش این یونها از تحرک یونهای کلر کاسته می شود.

وجود یون Si نیز باعث کاهش تحرک کلر می شود که به وفور در بتن میکروسیلیسی یافت می شود. [۱۹]





شکل ۵- نمودار مقاومت الکتریکی نمونه های ۲۸ روزه

#### ۴. نتایج :

- ۱- با افزایش درصد دوده سیلیس در یک نسبت ثابت آب به مواد سیمانی، مقادیر مقاومت های فشاری و خمشی و الکتریکی افزایش یافته است.
- ۲- با افزایش درصد دوده سیلیس در تمامی طرح ها میزان جذب آب روند نزولی از خود نشان داد اند.
- ۳- به طور کلی نتایج نشان میدهد که افزایش درصد جایگزینی دوده سیلیس سبب بهبود خصوصیات مکانیکی کامپوزیت سیمانی خواهد شد

۵. مراجع :

1. Mostafa Jalal, Alireza Pouladkhan, Omid Fasihi Harandi, Davoud Jafari. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete. *Construction and Building Materials* 94 (2015) 90–104.
2. Erhan Güneysi, Mehmet Gesog˘lu, Seda Karaog˘lu, Kasım Mermerdas Strength, permeability and shrinkage cracking of silica fume and metakaolin concretes. *Construction and Building Materials* 34 (2012) 120–130.
3. Navneet Chahal, Rafat Siddique. Permeation properties of concrete made with fly ash and silica fume: Influence of ureolytic bacteria. *Construction and Building Materials* 49 (2013) 161–174.
4. David O. Koteng, Chun-Tao Chen. Strength development of lime–pozzolana pastes with silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials* 84 (2015) 294–300.
5. Chul-Woo Chung, Chang-Seon Shon, Young-Su Kim. Chloride ion diffusivity of fly ash and silica fume concretes exposed to freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials* 24 (2010) 1739–1745.
6. Alexander MG, Magee BJ. Durability performance of concrete containing condensed silica fume. *Cem Concr Res* 1999;29:917–22.
7. Khatri RP, Sirivivatnanon V, Yu LK. Effect of curing on water permeability of concretes prepared with normal Portland cement and with slag and silica fume. *Mag Concr Res* 1997;49:167–72.
۸. علی صدر ممتازی، جلیل باران دوست، بهزاد طهمورسی، محمد صادق طهمورسی، ۱۳۹۴. ارزیابی مکانیکی ملات های سیمانی حاوی خاکستر بادی و دوده سیلیسی با درونیاب اسپلاین هموار شونده. هفتمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران.
9. M. Mazloom, A. Ramezani pour, and J. J. Brooks, "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 26, pp. 347-357, (2004)
۱۰. مصطفی خانزادی، محمود حبیبیان، " بررسی خواص مکانیکی و شیمیایی ملات سیمان حاوی نانوسیلیس در مقایسه با ملات حاوی میکروسیلیس"، دومین همایش دانشجویی فناوری نانو (۱۳۸۶)
۱۱. الیار ظفر خواه، سید فرزاد کاظمی و محمدرضا توکلی زاده، "تأثیر میکروسیلیس بر گیرش و مقاومت فشاری ملات های سیمانی"، چهاردهمین کنفرانس دانشجویان عمران کشور، (۱۳۸۸)
12. ASTM C-778, "Standard specification for standard sand", *Annual book of ASTM standards*, 4.01, 360-362; (2000).

13. Katri RP, Sirivivatnanon V, Gross W. Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performance concrete. *Cem Concr Res* 1995;25:209–20.
14. Mohamed Abd Elrahman, Bernd Hillemeier. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. *Construction and Building Materials* 58 (2014) 225–233.
15. Sarıdemir M. Effect of silica fume and ground pumice on compressive strength and modulus of elasticity of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 49 (2013) 484–489.
16. ASTM C348, "Standard test method for flexural strength of hydraulic cement.
17. K.G. Babu and D.S. Babu, "Performance of fly ash concrete containing lightweight EPS aggregates", *Cement and Concrete Composites*, 26, 605-611; (2004)
18. ASTM C-948, "Standard Test Method for Dry and Wet Bulk Density, Water Absorption, and Apparent Porosity of Thin Sections of Glass-Fiber Reinforced Concrete" C 948-81; (Reapproved 2001).
19. [www.arvinpadir.com/wp-content/uploads/2013/12/microsilica.doc](http://www.arvinpadir.com/wp-content/uploads/2013/12/microsilica.doc)

## **Silica fume impact on the physical and mechanical properties of cementitious composite**

Cement composite that is consisted of sand, cement, water and pozzolonic additives (silica fume in the project) is optimized on the basis of specific needs of structure or architecture. During the past decade , micro silica as an effective pozzolan has been used in improving concrete properties and extensive studies on the impact of the pozzolan on the cementitious composite (concrete, mortar, etc.) has been made. The purpose of this test is study the effect of different ratios of silica fume to cement (25,20,15,10,5,0%) in the ratio of water to cementitious materials, 0.4 and 0.42 on the mechanical behavior and physical characteristics of cementitious composite at different ages. In this study, to evaluate the engineering properties of test samples made compressive strength, flexural strength, water absorption and electrical resistance of the samples were evaluated at 28 days. The results and analysis show that the mix design with 25% cement replacement with silica, higher compressive strength, flexural and electrical and water is lowest

### **Keywords:**

Composite cement, silica fume, compressive strength, flexural strength, water absorption, electrical resistance