

عملکرد میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن

مصطفی ساکت کاشانی ، دانشجوی کارشناسی ساختمان ، دانشگاه شهید رجایی تهران

تلفن ۰۹۱۲-۱۴۷۰۲۰۶ ، پست الکترونیکی mossaket@yahoo.com

چکیده

در صنعت بتن ، سیلیس یکی از معروفترین موادی است که نقش مهمی در افزایش عمر مفید و بهبود خواص بتن ایفا می کند و در سالهای اخیر که پوزولانهای طبیعی و مصنوعی ، قسمت عمده ای از تحقیقات انجام شده در مورد بتن را به خود اختصاص داده اند در میان آنها ، میکروسیلیس و نانوسیلیس بدلیل ویژگی های خاص فیزیکی و شیمیایی خود واکنش پذیر ترین و فعال ترین پوزولانها محسوب می شود .

تولید نانوسیلیس به علت نیاز آن به تکنولوژی بالاتر از تواناییهای فعلی کشور ، در ایران صورت نمی گیرد و کاربرد آن در کشور فقط در پروژه های تحقیقاتی ممکن است ولی از آنجاییکه میکروسیلیس در کشورمان به مقدار زیاد و با کیفیت مناسب تولید می شود آشنایی مهندسان و دست اندرکاران با این ماده افزودنی لازم و ضروری می باشد .

تقریباً نتایج تمامی تحقیقاتی که بر روی بتن میکروسیلیسی و نانوسیلیسی انجام گرفته است ، نشان می دهند که این پوزولانها می توانند در بهبود خواص بتن نقش مهم و منحصر بفردی داشته باشد و ما نیز در این مقاله خواص بتن های ساخته شده با این پوزولانها را ارزیابی و خلاصه ای از کلیه تحقیقاتی که اخیراً در این زمینه توسط مولفین و محققین انجام گرفته است را مورد بررسی قرار می دهیم .

کلیدواژه ها : میکروسیلیس ، نانوسیلیس ، پوزولانی ، غیر بلوری ، واکنش پذیری ، بتن تازه ، فوق روان کننده

۱- مقدمه

در گذشته غبار حاصل از تولید فروسیلیسیم از دودکش های کارخانه های تولید مواد فوق ، خارج و وارد اتمسفر می شد که بلحاظ حفظ سلامت محیط زیست از یکسو و کشف کاربرد آن در صنایع از سوی دیگر ، طی مراحل خاصی جمع آوری و با نام تجاری میکروسیلیس عرضه گردید . میکروسیلیس به این علت در بتن استفاده می شود که خواص بتن تازه و بتن سخت شده را به مقدار زیادی بهبود می بخشد . قابلیت استفاده از میکروسیلیس در سال ۱۹۴۰ شناخته شد ، اما به علت اینکه این افزودنی چسبندگی زیادی به بتن می دهد برای اجرای آن می بایست تا مقدار آب به سیمان آن افزایش یابد و به این علت از آن بطور گسترده استفاده نشد تا اینکه روان کننده ها و فوق روان کننده ها به بازار عرضه شدند و با وجود آنها استفاده از میکروسیلیس در صنعت بتن سازی ممکن شد .

هدف اولیه از کاربرد میکروسیلیس در بتن جایگزین نمودن بخشی از سیمان با این محصول ، برای کاهش هزینه سیمان مصرفی بود که پس از کشف خواص آن در بتن قیمت آن افزایش یافت . تحقیقات اساسی پیرامون استفاده از آن در مخلوط بتن با سیمان پرتلند در اواخر دهه ۱۹۷۰ آغاز گردید و در کشور ما نیز در سال ۱۳۷۲ اولین کارخانه تولید فروسیلیسیم افتتاح گردید .

۲- میکروسیلیس چیست ؟

میکروسیلیس محصولی است فرعی ، حاصل از فرآیند تولید فروسیلیسیم در کوره الکترونیکی که این مواد تولیدی واکنش دهندهگی بالایی دارند و با اضافه کردن آن به نسبت کم ، قابلیت های بتن به نحو مطلوبی افزایش می یابد .

میکروسیلیس پودری خاکستری تا سفید رنگ است که جزو افزودنیهای با خواص سیمان دسته بندی می شود و در عمل با نسبتی از سیمان مقدار آن محاسبه می شود. گاهی اوقات نامهای دیگری نیز برای میکروسیلیس استفاده می شود که پرکاربردترین نام آن دوده سیلیس (Silica Fume) است که این نام توسط انجمن بتن امریکا (ACI) نیز پذیرفته شده است. ولی بعلاوه اینکه این افزودنی را در کشور ما با نام میکروسیلیس می شناسند، در این مقاله واژه میکروسیلیس را برای این افزودنی انتخاب کرده ایم.

انجمن بتن امریکا (ACI) میکروسیلیس را اینگونه تعریف می کند: ((دوده سیلیس محصولی است بسیار ظریف و غیر کریستالی، تولید شده از مواد سیلیکونی که در کوره های با قوس الکتریکی بصورت یک محصول فرعی تولید می شود که تولید اصلی این کوره عناصر سیلیکونی و یا آلیاژهای شامل سیلیکون است.)) (ACI ۱۱۶R)

کوره های الکتریکی که این ماده در آنها تولید می شود، اثر مهمی در کیفیت و رنگ تولیدات خود دارند، این کوره ها معمولا مجهز به سیستم بازیابی حرارتی و یا بدون آن هستند. اگر کوره مجهز به سیستم پاد شده باشد دمای گاز خروجی حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد و دوده حاصل دارای رنگ روشن خواهد بود و در غیر اینصورت دمای گاز خروجی حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد بوده و مقداری کربن سوخته در آن باقی می ماند و در نتیجه سیلیسی خاکستری رنگ تولید می شود.

البته مواد دیگری نیز وجود دارند که از نظر فیزیکی و شیمیایی شبیه میکروسیلیس می باشند ولی به علت اینکه این مواد فرم کریستالی سیلیس هستند و کارایی آنها در بتن شبیه میکروسیلیس نیست، استفاده از آنها توصیه نمی شود. این مواد عبارتند از: سیلیس رسوبی، سیلیس بخار شده، سیلیس کلونیدی، پودر و گرد سیلیس.

۳- نانوسیلیس چیست ؟

مواد نانو (Nanoparticulate) به موادی گفته می شود که حداقل یکی از ابعاد آن (طول، عرض، ضخامت) زیر ۱۰۰nm باشد. مواد نانو ساختار با توجه به رفتارهایی که از خود نشان داده اند مورد توجه بخش صنعت و دانشگاه در دهه های اخیر قرار گرفته اند. در این میان صنعت ساختمان با توجه به نیازهای خود چه از نظر استحکام، مقاومت و دوام و نیز کارایی بالا از استفاده کنندگان مهم مواد نانو ساختار (Nanostructure Materials) به شمار می رود. نانوسیلیس غیر بلوری (UFACS) محصول بسیار ریزدانه تر از میکروسیلیس می باشد و می توان گفت که میکروسیلیس محصولی است که در محدوده بالای اشل اندازه نانومتر که هر دوی این مواد جهت افزایش عملکرد کامپوزیت مواد سیمانی به کار برده می شود. این نکته لازم به ذکر است که ذرات نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس واکنش پذیری بالاتری دارند.

قیمت خرید میکروسیلیس در حال حاضر در ایران بین ۵۵۰۰ _ ۲۵۰۰ ریال در هر کیلوگرم و قیمت این محصول در اروپا بین ۰.۵ _ ۰.۲۵ یورو در هر کیلوگرم است که با توجه به قیمت های ارائه شده می توان گفت که بهای میکروسیلیس در ایران و اروپا تقریبا برابر است ولی همانطور که توضیح داده شده است نانوسیلیس در ایران موجود نیست و در صورت نیاز باید آن را از دیگر کشورها وارد کرد و این در حالی است که قیمت نانوسیلیس محلول، در اروپا بین ۰.۹ _ ۰.۴۵ یورو می باشد.

۴- مشخصات شیمیایی

غیر بلوری: در معنی ساده یعنی میکروسیلیس و نانوسیلیس موادی کریستالی نیستند. ماده کریستالی نمی تواند در بتن حل شود و از خود واکنش نشان دهد. میزان غیربلوری بودن دانه های میکروسیلیس بیش از ۹۰٪ است و بیش از ۹۹٪ دانه های نانوسیلیس غیر بلوری است و این تفاوت یکی از دلایل واکنش پذیرتر بودن نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس است.

دی اکسید سیلیسیم (SiO₂): دی اکسید سیلیسیم به علت ظرفیت فوق العاده ذرات آن ماده واکنش دار میکروسیلیس و نانوسیلیس هستند که در بتن از خود واکنش نشان می دهد (Silicon dioxide > ۸۵٪).

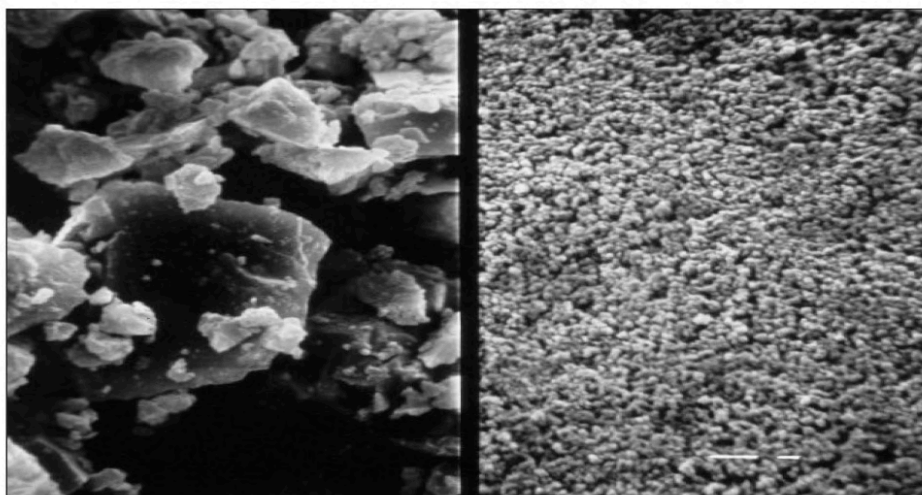
عناصر کم یاب: در کوره ها عناصری در میکروسیلیس بوجود می آیند که پایه فلزی دارند و معمولا این مواد هیچ تاثیری در کارایی بتن حاوی میکروسیلیس ندارند. استاندارد های مختلف برای وجود این مواد محدودیت هایی تعیین نموده اند.

جدول ۱: مشخصات ارائه شده توسط برخی توزیع کنندگان داخلی میکروسیلیس

	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O+K ₂ O	Particle Size	Surface area
شرکت فروسیلیس	۸۵ - ۹۵	۰,۴ - ۲	۰,۵ - ۱,۷	۰,۱ - ۰,۹	۲ - ۲,۳	۱ - ۱,۹	۰,۲ - ۰,۳ micron	۲۰ m ² /g
وند شیمی	۹۳,۶	۰,۸۷	۱,۳۲	۰,۹۷	۰,۴۹	۱,۳۲		۲۰ m ² /g

۵- مشخصات فیزیکی میکروسیلیس

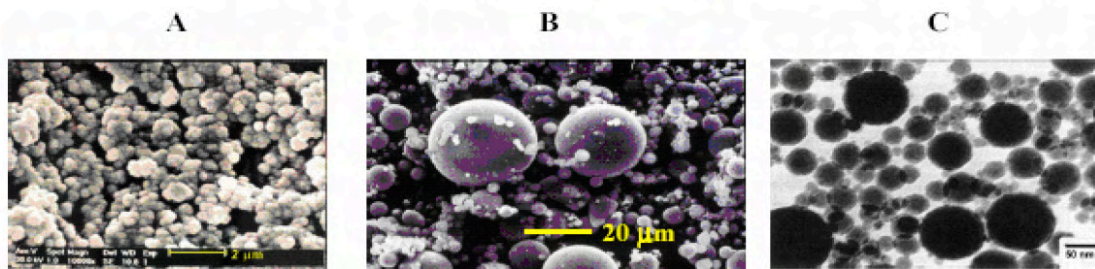
اندازه دانه :	$1\mu m >$
چگالی حجمی :	$130 - 430 \text{ kg/m}^3$
جرم مخصوص :	۲,۲
سطح مخصوص :	$15 - 30 \text{ m}^2/\text{g}$



شکل ۱: در شکل بالا تصویر دانه سیمان پرتلند در سمت چپ و دانه های میکروسیلیس در سمت راست است و مقیاس هر دو عکس برابر است (طول خط در تصویر میکروسیلیس یک میکرومتر است)

۶- مشخصات فیزیکی نانوسیلیس (UFACS)

محصول نانوسیلیس متشکل است از ذرات سیلیس کلونیدی فوق العاده غیربلوری و با قطر کمتر از 100nm که بصورت ذرات خشک پودر یا بصورت معلق در مایع محلول قابل دسترسی می باشند ، که مایع آن معمول ترین نوع محلول نانوسیلیس می باشد . ریزتر بودن ذرات نانوسیلیس نسبت به میکروسیلیس دلیل دیگر واکنش پذیری زیاد نانوسیلیس ها است .



شکل ۲: شکل A میکروسیلیس ، شکل B خاکستر بادی ، شکل C نانوسیلیس (طول خط موجود در شکل A ، $2\mu m$ ، در شکل B ، $20\mu m$ و طول خط در شکل C ، 50nm است)

۷- واکنش های میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن

مزایایی که از اضافه کردن میکروسیلیس به بتن بدست می آید، حاصل دو سری تغییرات ذره بینی در بتن است. اول تغییرات ناشی از شکل فیزیکی میکروسیلیس و دومی در اثر تغییرات شیمیایی ای است که میکروسیلیس در بتن ایجاد می کند. در این قسمت این دو نوع تغییرات را به اختصار توضیح می دهیم.

چون واکنش ها و عملکرد میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن با تفاوت در مقادیر آن شبیه یکدیگر است، از این قسمت به اثرات میکروسیلیس در بتن می پردازیم و در صورت برخورد با تفاوت در عملکرد این دو ماده پوزولانی در قسمتی از متن به آن اشاره کرده و تفاوت موجود را بررسی می کنیم.

۷-۱- واکنش های فیزیکی

اضافه کردن میکروسیلیس و یا نانوسیلیس به بتن میلیونها ذره بسیار کوچک را به مخلوط بتن اضافه می کند و درست مثل ریزدانه ها که فضای بین درشت دانه ها را پر میکنند، آنها هم فضای بین دانه های سیمان را از بین می برند و با وجود آمدن این حالت اگر میکروسیلیس و نانوسیلیس فرآیند شیمیایی ای هم از خود نشان نمی دادند این میکروپرکننده ها می توانستند نقش مهمی را در بهتر کردن خصوصیات بتن ایفا کنند.

جدول ۲: اندازه دانه های نانوسیلیس و میکروسیلیس در بین دیگر ذرات موجود در بتن

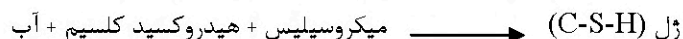
مقایسه اندازه ذرات میکروسیلیس و دیگر عناصر سازنده بتن	
ذرات نانوسیلیس	۱-۵۰ nm
ذرات میکروسیلیس	۰.۱-۱ μm
دانه سیمان	۴۵ μm
دانه ماسه	۴.۷ mm
دانه شن	۷۵ mm

۷-۲- واکنش های شیمیایی

در اثر فرآیند هیدراسیون سیمان پرتلند، ژل (C-S-H) تولید می شود که این ژل محصول اصلی هیدراسیون سیمان یعنی هیدرات سیلیکات کلسیم غیر بلوری است که حالت چسبندگی دارد و سنگدانه ها را به یکدیگر می چسباند و در کنار این ژل در حدود ۲۵-۲۰ درصد از مواد نیز هیدراته شده و هیدروکسید کلسیم Ca(OH)_2 تولید می گردد که جزء ضعیف بتن محسوب میشود و عمده خسارت های وارد بر ساختار بتن در این قسمت است و در مقایسه با ژل (C-S-H)، کریستالهای هیدروکسید کلسیم بزرگتر هستند.



میکروسیلیس در اثر واکنش با هیدروکسید کلسیم تولید سیلیکات کلسیم و هیدراتهای آلومینات می کند که این تغییرات به خصوصیات بتن کمک فراوانی می کند.



می توان ادعا نمود که افزایش ۲۰ درصد میکروسیلیس تقریباً تمام هیدروکسید کلسیم سیمان را از بین خواهد برد.

منظور از واکنش پذیری مقدار هیدروکسید کلسیم ترکیب شده با ماده پوزولانی است.

آزمایشات نشان داده اند که واکنش مواد نانوسیلیس (Colloidal Silica) با هیدروکسید کلسیم در مقایسه با میکروسیلیس بسیار سریع تر انجام گرفته و مقدار بسیار کم این مواد همان تاثیر پوزولانی مقادیر بالای میکروسیلیس را در سنین اولیه دارا می باشد.

۸- اثرات میکروسیلیس بر روی بتن تازه

عملکرد میکروسیلیس در بتن تازه را می توان به دو واکنش کلی تفکیک کرد ، اول اینکه بتن چسبندگی بیشتری دارد و دوم اینکه دچار آب انداختگی نمی شود و یا اگر اتفاق بیافتند مقدار آن خیلی کم می باشد .

۸-۱- بتن تازه _ افزایش چسبندگی

بتن ساخته شده با میکروسیلیس چسبندگی بیشتری نسبت به بتن های معمول دارد و به این علت جداشدگی دانه ها در آنها کمتر اتفاق می افتد . در اجرا برای آنکه چسبندگی ای بیشتر از مقدار مورد نظر بوجود نیاید، باید بتن میکروسیلیس را با اسلامپی در حدود ۵۰_۴۰ بیشتر از اسلامپ مورد نیاز برای بتن معمولی تهیه کنیم . یکی از اصلی ترین فایده های بالا رفتن چسبندگی را می توان در شاتکریت دید . استفاده از بتن میکروسیلیس در شاتکریت به ما این امکان را میدهد که بتوانیم از بتن ضخیم تری در هر لایه استفاده کنیم و همچنین اگر شاتکریت روی سقف باشد با استفاده از بتن میکروسیلیس برگشت و منعکس شدن بتن را کاهش میدهیم . همچنین میکروسیلیس با تمامی زودگیر کننده هایی که معمولاً در شاتکریت استفاده می شوند سازگاری کامل دارد .

فایده دیگر استفاده از بتن میکروسیلیس در شاتکریت ، چسبندگی بهتر بین بتن و لایه زیرین آن و همچنین چسبندگی بیشتر بین لایه های بتن ریزی در زمانی که بتن در چند لایه انجام می شود، است . در کل استفاده از بتن میکروسیلیس در شاتکریت، به ما این امکان را میدهد که بتن پاشی هایی را انجام دهیم که بدون استفاده از بتن میکروسیلیسی امکان آن وجود نداشت و یا غیر اقتصادی بود .

۸-۲- بتن تازه _ کاهش آب انداختگی

در بتن های معمولی تا قبل از اینکه آب انداختگی بصورت کامل قطع نشود و تمام آب آن از سطح بتن بخار نشده باشند، نمی توان عملیات پرداخت سطحی را انجام داد و این عادی است که پس از عملیات بتن ریزی با بتن معمولی باید چند ساعت انتظار کشید تا آب انداختگی بصورت کامل صورت گیرد ولی در بتن هایی که حداقل ۵٪ به آنها میکروسیلیس اضافه شده باشد به خاطر سطح زیاد میکروسیلیس و همچنین به علت اینکه معمولاً مقدار آب کمی در بتن میکروسیلیسی است ، آب انداختگی بوجود نمی آید و عملیات پرداخت سطحی می تواند بصورت پیوسته با عمل آوری (one pass) انجام گیرد .

۹- اثرات میکروسیلیس بر روی بتن سخت شده

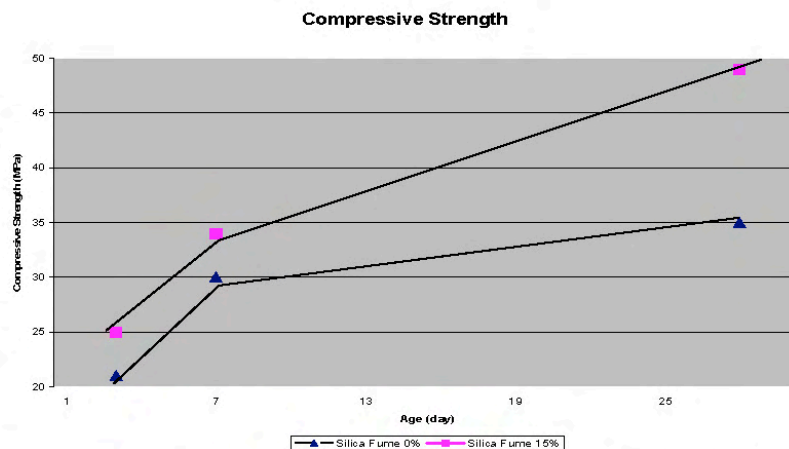
میکروسیلیس در بتن سخت شده دو اثر مشخص دارد :اول بهبود بخشیدن مشخصات مکانیکی از قبیل مقاومت و مدول الاستیسیت و دوم کاهش نفوذپذیری بتن که مستقیماً دوام بتن را بهبود می بخشد .

۹-۱- بتن سخت شده _ بهبود دادن مشخصات مکانیکی

در رابطه با بتن میکروسیلیسی اولین علتی که نظر مهندسين را به خود جلب می کند، توانایی بالای آن در مقابل بارهای فشاری بالاست که علاوه بر آن استفاده از میکروسیلیس باعث بهبود مدول الاستیسیت و مقاومت خمشی بتن نیز می شود . افزایش مقاومت در تمام سنین بتن میکروسیلیسی نسبی است پس نسبت مقاومت بتن سه روزه یا هفت روزه به مقاومت بتن ۲۸ روزه، تقریباً ثابت است . مقاومت بتن ۳ روزه در حدود ۵۰٪ مقاومت بتن ۲۸ روزه و مقاومت بتن ۷ روزه در حدود ۷۰٪ مقاومت بتن ۲۸ روزه است .

اضافه کردن میکروسیلیس بیشتر معمولاً مقاومت فشاری را افزایش می دهد ولی اضافه کردن میکروسیلیس به میزان بیشتر از زن سیمان توصیه نمی شود . چون در دوام بتن تأثیر منفی می گذارد .

نمودار زیر مقاومت فشاری دو طرح مخلوط بتن که مقدار سیمان و اسلامپ برابر دارند را با هم مقایسه می کند ، تنها تفاوت دو طرح زیر در وجود ۱۵٪ میکروسیلیس و عدم وجود آن است (میکروسیلیس درصدي از کل مواد سیمانی بر حسب جرم است) .

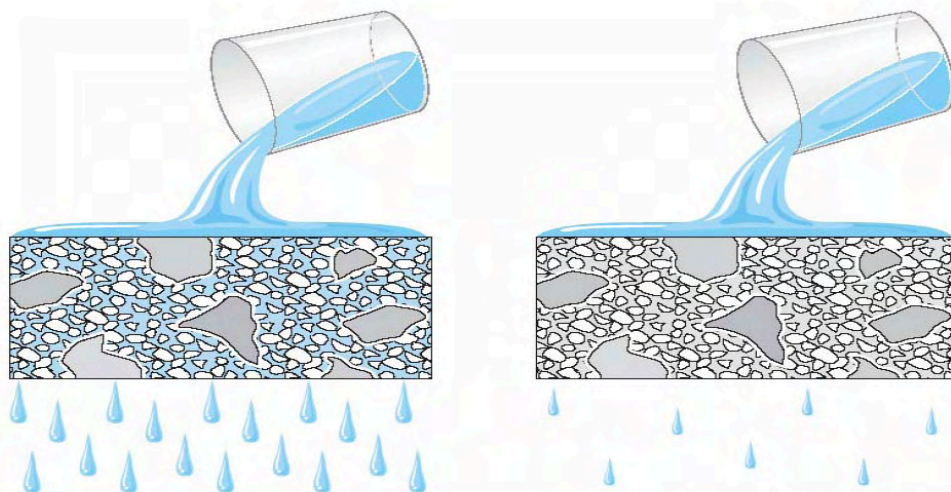


شکل ۳: مقایسه مقاومت فشاری بتن معمولی و بتن میکروسیلیسی

یکی از پارامترهای دیگری که در مطالعه بتن باید مورد بررسی قرار گیرد تعیین میزان جمع شدگی آن می باشد. با توجه به آزمایشات انجام شده این نتیجه بدست آمده است که در بتن دارای میکروسیلیس با فوق روان کننده، جمع شدگی به میزان قابل ملاحظه ای نسبت به بتن معمولی با اسلامپ ثابت، کم می شود و این در حالی است که اگر به مخلوط بتن میکروسیلیسی فوق روان کننده اضافه نشده باشد جمع شدگی بتن از جمع شدگی بتن بدون میکروسیلیس هم بیشتر خواهد شد که علت جمع شدگی زیاد بتن میکروسیلیسی فاقد فوق روان کننده، مصرف زیاد آب در این نوع بتن ها برای دستیابی به کارایی ثابت است.

۹-۲- بتن سخت شده _ کاهش نفوذپذیری

در اکثر مواقع دوام بتن بستگی مستقیم به نفوذپذیری آن دارد و بوسیله کاهش نفوذپذیری زمان هر حمله شیمیایی به بتن طولانی تر می شود. بتن با نفوذپذیری زیاد (شکل سمت چپ در تصویر پائین) به آب اجازه می دهد که به آسانی داخل بتن می شود که با کم کردن نسبت آب به سیمان و اضافه کردن میکروسیلیس می توان مقدار نفوذپذیری را کم کرد و یا آن را حتی به صفر رساند (شکل سمت راست در تصویر پائین). در بتن میکروسیلیسی نفوذ آب و دیگر عوامل شیمیایی از قبیل کلراید ها و سولفات ها به داخل بتن سخت است.



شکل ۴: شکل شماتیک نفوذ آب در بتن

۹-۲-۱- حمله کلراید به فولاد مسلح کننده بتن

خوردگی فولاد تقویت کننده بتن ، مهمترین و پرخرج ترین دلیل ازمحلال بتن است . در بتنهایی که در معرض وجود نمک از هر منشائی هستند می توان از میکروسیلیس استفاده کرد و باعث کاهش نفوذپذیری در بتن شد و با این کار رسیدن کلرایدها به فولاد و در نتیجه خوردگی فولاد را به تأخیر انداخت .

۹-۲-۲- حمله سولفاتی

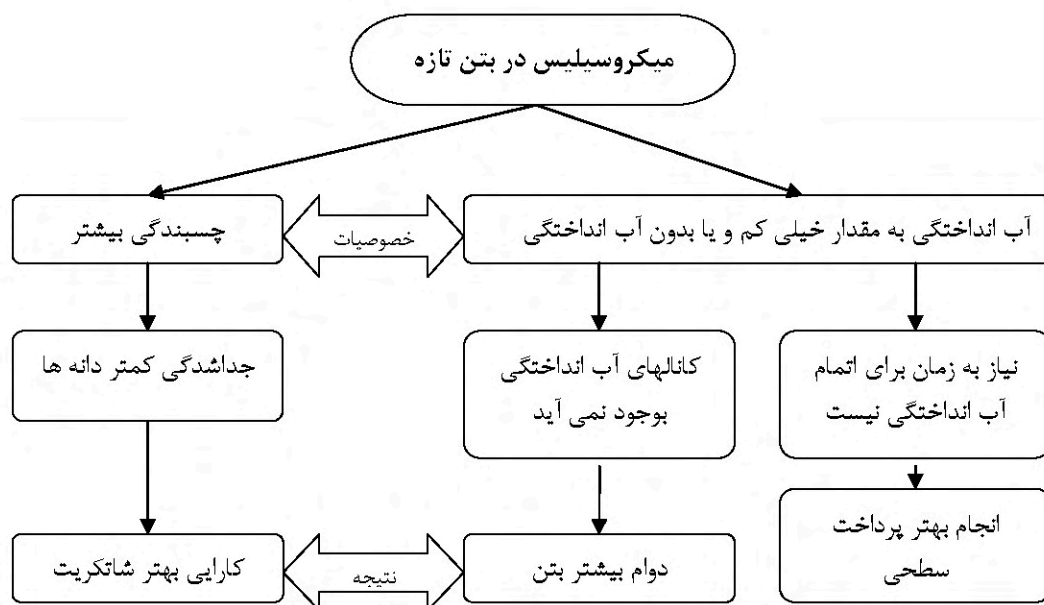
در حمله سولفاتی شیمی سیمان پرتلند نقش دارد که می توان با کم کردن نسبت آب به سیمان و اضافه کردن میکروسیلیس نفوذپذیری بتن را به مقدار زیادی کاهش داد و هرگونه عکس العمل مضر را به تأخیر انداخت.

۹-۲-۳- حمله اسیدی و یا حملات شیمیایی دیگر

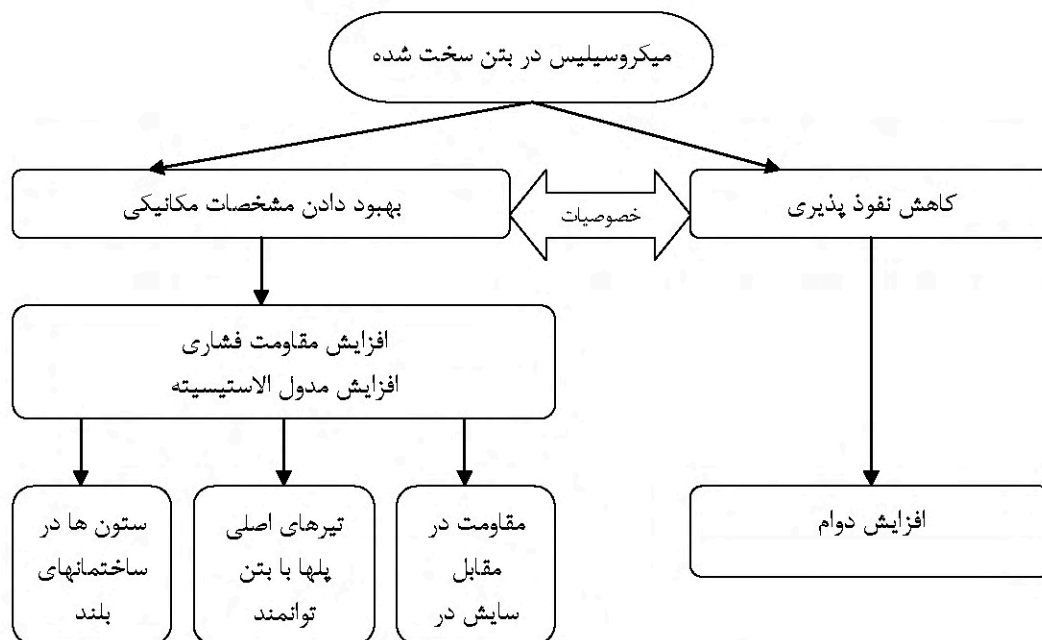
بتن میکروسیلیسی با کاهش نفوذپذیری باعث کم شدن آهنگ حملات می شود و عمر سازه را بلندتر و زمان بین تعمیرات را طولانی تر می کند.

۱۰- نتیجه گیری

منظور از مقاله ارائه شده نشان دادن مصالح جدید ساختمانی و بیان مزایای استفاده از این نوع مواد در صنعت ساختمان می باشد ، البته به دلیل نو بودن و در دسترس نبودن نانو سیلیس استفاده از آن صرفاً در کارهای تحقیقاتی خلاصه می شود ولی با توجه به تولید انبوه میکروسیلیس در ایران و آگاهی نسبت به خواص منحصر بفرد آن امید است که شاهد استفاده روزافزون از این ماده پوزولانی و دیگر مواد افزودنی در کارهای اجرایی کشورمان باشیم تا سطح کیفیت بتن مصرفی به حد مطلوبی افزایش یابد .



شکل ۵: عملکرد میکروسیلیس در بتن تازه



شکل ۶: عملکرد میکروسیلیس در بتن سخت شده

۱۱- مراجع

[۱] www.silicafume.com

[۲] Collepardi.M, Collepardi.S, Skarp.U and Troli.R

Optimization of Silica Fume , Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-Performance Concretes

[۳] صادقی ارژنگ ، هاشم زاده رحیم ، کاربرد مواد نانو ساختار در صنعت ساختمان ، دفتر همکاری فناوری ریاست جمهوری _ کمیته مطالعات سیاست نانو تکنولوژی

[۴] www.silicafume.org

[۵] Meyer .Christian (۲۰۰۰)

Concrete Materials Research at Columbia University , New York

[۶] رمضانیان پور علی اکبر ، مظلوم موسی ، اثر میکروسیلیس در جمع شدگی ناشی از خشک شدن

[۷] فامیلی هرمز ، جهانفر شادمان ، دست یابی به مقاومت زیاد در بتن سیک با استفاده از میکروسیلیس

[۸] گنجیان اسماعیل ، پرهیزکار طیبیه ، طاهری افشین ، قدوسی پرویز ، خصوصیات مکانیکی بتن حاوی میکروسیلیس

[۹] تاجیک نصرت ا... ، تأثیر دوده سیلیسی بر خواص بتنهای پرمقاومت