

## مروری بر مکانیزم رفتار بتن میکروسیلیسی در مقابل خوردگی

اردلان بافهم، دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان  
میثم مسندانی، دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان ×  
masandani@gmail.com

### چکیده

در سالهای اخیر تعداد زیادی از سازه های بتنی در کشور های مختلف دنیا و همچنین در ایران در اثر ضعف بتن دچار آسیب دیدگی و یا خرابی زودرس شده اند. به عبارت دیگر عمر مفید این سازه ها با مقدار پیش بینی شده تطابق نداشته و بسیار کمتر از آن بوده است. یکی از مهمترین دلایل بروز خسارت در سازه های مسلح بتنی، خوردگی آرماتور های فولادی می باشد. نفوذ یون های کلر در محیط بتن و کربناتاسیون از شایعترین عوامل خوردگی آرماتور های فولادی محسوب می شود. در این مقاله سعی شده با تشریح فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی دوده سیلیس در بتن و بررسی نظریه های مختلف درک صحیحی از عملکرد این بزو لای بوجود آید.

**کلیدواژه ها :** خوردگی، یون کلر، منافذ موئینه، دوده سیلیس، دوام، بتن

### ۱- مقدمه

طبیعت فوق العاده قلیایی محیط بتن با تشکیل یک لایه محافظ میکروسکوپی از جنس اکسید آهن روی سطح فلز، از خوردگی آرماتور های فولادی جلوگیری می کند. لایه محافظ شکل گرفته روی سطح فولاد ناپایدار و موقتی است. دو عامل عمده باعث از بین رفتن لایه محافظ فولاد موجود در بتن می شود عبارتند از : کاهش قلیائیت بتن و حمله یونهای مهاجم. کربناتاسیون بتن معمول ترین مکانیزم کاهش قلیائیت بتن می باشد. وقتی بتن در معرض هوا قرار می گیرد، مقداری از  $CO_2$  موجود در هوا به داخل آن نفوذ می کند. نفوذ گاز دی اکسید کربن در بتن و ایجاد واکنش با محصولات هیدراتاسیون باعث کاهش  $Ca(OH)_2$  محیط بتنی شده و در اثر این امر لایه محافظ از سطح فولاد حذف شده و خوردگی شروع می شود. همچنین یونهای مهاجم نظیر یون های کلر می توانند لایه محافظ را در خود حل کنند و به این ترتیب خوردگی میلگرد در بتن شروع می شود. یونهای کلر ممکن است در مرحله ساخت بتن وارد آن شوند. به عنوان مثال آب دریا و آبهای حاوی یونهای کلر با غلظت زیاد که به عنوان آب اختلاط مورد استفاده واقع می شوند و یا سنگدانه های حاوی کلر و مواد افزودنی نظیر کلرید کلسیم، همگی می توانند باعث حضور یونهای کلر در محیط بتن شوند. گاهی اوقات سنگدانه ها حاوی مقادیر قابل توجهی یونهای کلر می باشند. بخصوص سنگدانه های متخلخل می توانند حاوی مقادیر بیشتری یونهای کلر نسبت به سایر سنگدانه ها باشند. همچنین گاهی یونهای کلر از محیط اطراف به داخل بتن نفوذ می کنند. نمکهای ضد یخ، آب دریا، خاکهای حاوی یون کلر از جمله منابع کلری هستند که از محیط خارج بتن به داخل آن نفوذ می کنند. نفوذ یونهای کلر به داخل بتن، سبب خورده شدن آرماتور های فولادی می شود که به سرعت بتن را خراب می کنند. یونهای کلر پس از رسیدن به سطح فولاد، حالت انفعالی فولاد را از بین می برند و سبب خوردگی فعال و سریع آن می شوند.

آسیب دیدگی بتن در اثر خوردگی فولاد، ناشی از ایجاد زنگ آهن است که با افزایش حجم آهن و تولید تنشهای کششی در بتن اطراف همراه است. در اثر خورده شدن فولاد، از آنجا که محصولات خوردگی، حجمی بیش از فولاد سالم دارند، تنشهای-

کششی داخلی در ناحیه تماس فولاد با بتن ایجاد شده و توسعه می یابد. در نتیجه بتن اطراف ترک خورده و حتی بتن در مراحل پیشرفته تر خوردگی فولاد، به صورت لایه لایه فرو می ریزد (اصطلاحاً ورقه ورقه می شود). به علاوه در اثر تنشهای کششی ایجاد شده در طول دوران خوردگی، ترکهای ریز موجود در بتن، بزرگتر شده و با مرتبط شدن با یکدیگر، شبکه ای از ترکهای داخلی را به وجود می آورند و در نتیجه انتقال یونها از سطح بتن به سطح آرماتور با سرعت بیشتری انجام می شود. این مسأله باعث افزایش خوردگی خواهد شد.

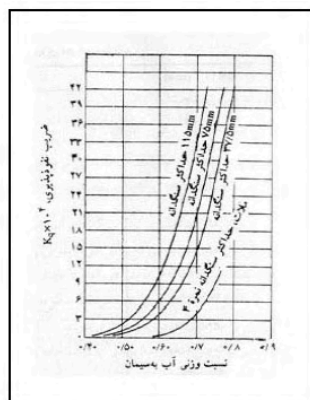
امروزه این مسأله به خوبی روشن شده است که نسبت  $Cl^- / OH^-$  در محیط بتن به عنوان پارامتر تعیین کننده خطر بروز خوردگی محسوب می شود. در کنار غلظت یونهای کلر، باید به ترکیب شیمیائی الکترولیت موجود در منافذ بتن بر خطر بروز خوردگی توجه داشت. [۱]

## ۱-۲- ساختار منفذی بتن

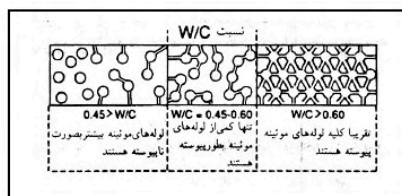
منافذ در همه اجزای تشکیل دهنده بتن وجود دارد. منافذ موجود در سنگ دانه ها تغییرات اندکی در طول زمان دارد ولی منافذ خمیر سیمان تحت تغییرات زیاد خصوصاً در سنین اولیه خمیر قرار می گیرند. در مخلوط تازه خمیر سیمان خالص فضای پر شده توسط آب برای تشکیل محصولات هیدراتاسیون در دسترس است. این فضا که تابعی از نسبت آب به سیمان خمیر است دائماً توسط حجم ژل هیدراته شده کاهش می یابد. منافذ مویینه در هر زمان بخشی از فضای پر شده توسط آب است که به وسیله ژل هیدراته شده اشغال نشده است، بنابر این واضح است که هیدراتاسیون اندازه و حجم منافذ مویینه را کاهش و حجم ژل را افزایش می دهد و این روند با پیشرفت هیدراتاسیون تداوم دارد. می توان گفت که اگر فضای مویینه اولیه کم باشد (نسبت وزنی آب به سیمان کمتر از ۰.۴)، بلاخره ژل کلیه فضای آب ابتدایی را پر کرده و خمیری بدون منافذ مویینه حاصل خواهد شد. با افزایش نسبت آب به سیمان و کاهش درجه هیدراتاسیون حجم منافذ مویینه افزایش می یابد. منافذ مویینه دارای اندازه میکروسکوپی بسیار ریز بوده باهم مرتبط و دارای توزیع اتفاقی هستند. (شکل ۱)

منافذ درون ژل بسیار زیاد بوده و خیلی کوچکتر از منافذ مویینه هستند. رفتار آب درون منافذ ژل به علت ابعاد بسیار کوچک منفذها مانند آب آزاد معمولی نیست. این واقعیت برای آب درون منافذ مویینه نیز وجود دارد ولی به علت ابعاد بزرگتر این منافذ شدت کمتری دارد. نفوذ پذیری خمیر دقیقاً بیشترین ارتباط و وابستگی را به منافذ مویینه دارد زیرا آب درون این منافذ بیشتر از آب درون منافذ ژل تحت تاثیر تغییرات فشار هیدرواستاتیکی است. (شکل ۲)

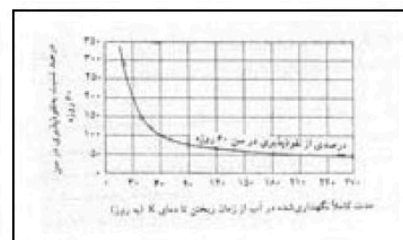
بعلاوه ساختار منفذی با تداوم هیدراتاسیون تغییر کرده موجب کاهش منافذ مویینه و افزایش منافذ ژلی می گردد. از آنجا که منافذ مویینه مستقیماً با نفوذپذیری رابطه دارد پیشرفت هیدراتاسیون کاهش نفوذپذیری را به دنبال خواهد داشت. (شکل ۳)



شکل ۲: رابطه بین ضریب نفوذپذیری و نسبت آب به سیمان



شکل ۳: اثر W/C بر ماهیت ساختار منفذ و نفوذپذیری بتن



شکل ۴: تاثیر طول دوره عمل آوری بر روی نفوذپذیری

تاثیر اندازه سنگدانه ها بر روی نفوذپذیری در شکل ۲ مشهود است. با افزایش حداکثر اندازه سنگ دانه ها باضای نسبت آب به سیمان مشخص نفوذپذیری بیشتر می شود. احتمالاً علت آن است، که حفره های آب موجود در زیر سنگدانه های درشت با افزایش حداکثر اندازه دانه ها افزایش می یابد. سنگدانه های متراکم سالم با تخلخل کم و دانه بندی صحیح نقش اساسی در

کاهش نفوذپذیری بتن دارد به جهت حصول اطمینان از جا دادن بتن بدون کرمو شدگی باید به مقدار کافی سنگدانه ریز در مخلوط استفاده نمود.

هوای عمدی در بتن عموماً به دلیل افزایش کارایی، کاهش آب انداختن و تاثیر حفرات مجزا در تغییر ساختار لوله های مویینه موجب کاهش نفوذپذیری می گردد.

افزایش دما بر روی توزیع اندازه منافذ داخل بتن اثر می گذارد و همین طور با افزایش دما باعث درشت تر شدن منافذ در سیمان هیدراته می شود. اصولاً نفوذپذیری از طریق منافذ درشت تر تعیین می شود. شکل اثر دما را بر نفوذ پذیری خمیر سیمان نشان می دهد. [۲]

## ۲-۲- دوده سیلیس SF

پودر سیلیس یا میکروسیلیس، ذرات فوق العاده ریزی هستند که از فرآورده های جانبی صنایع فلز سیلیسی و آلیاژ فروسیلیسی می باشند که عمدتاً از ذرات سیلیسی بی شکل ( $\text{SiO}_2$ ) تشکیل یافته است.

مهم ترین خاصیت میکروسیلیس، اندازه فوق العاده ریز ذرات و مقدار زیاد سیلیس آن می باشد. قطر میانگین ذرات SF حدود  $0.1 \mu\text{m}$  است که در نتیجه مساحت سطح ویژه آن بسیار زیاد و حدود  $20000 \text{ m}^2/\text{Kg}$  می باشد (میانگین اندازه ذرات سیمان معمولی  $10 \mu\text{m}$  است). مقدار سیلیس در SF بستگی به نوع فلز تولید شده دارد و معمولاً بین ۸۴ تا ۹۸ درصد است.

مساحت زیاد سطح ویژه ذرات همراه با مقدار زیاد سیلیس باعث می شود که واکنش پوزولانی SF تسریع گردد. به علاوه، ذرات بسیار ریز SF اثر پرکننده در خمیر سیمان دارد. به عبارت دیگر، ذرات SF بین ذرات درشت سیمان معمولی قرار گرفته و بر اثر هیدراتاسیون، فضای بین ذرات سیمان پر می گردد. این فرآیند باعث می شود که اندازه منافذ مویین در خمیر میکروسیلیس بسیار کوچکتر از خمیر سیمان معمولی باشد و نفوذپذیری تا حد قابل توجهی کاهش یابد.

دوده سیلیس با  $\text{Ca(OH)}_2$  حاصل از هیدراتاسیون سیمان، وارد واکنش شده و سیلیکات کلسیم و آلومینات هیدراته شده تولید می گردد و در نتیجه سبب افزایش مقاومت و کاهش نفوذپذیری می شود. ظاهراً دوده سیلیس فرآیند هیدراتاسیون  $\text{C}_3\text{S}$  را نیز تسریع می کند و تولید  $\text{Ca(OH)}_2$  در سنین اولیه را افزایش می دهد. پس از مدت ۲ روز عمل آوری بتن حاوی دوده سیلیس، آهک آزاد ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد، و این پدیده نشان می دهد که دوده سیلیس سریعاً با  $\text{Ca(OH)}_2$  ترکیب می شود و فعالیت پوزولانی آن در سنین اولیه بیشتر از پوزولانهای دیگر است.

به طور کلی مقدار افزایش آب برای بتن حاوی S.F حدود ۱٪ به ازای هر ۱٪ جایگزینی دوده سیلیس با سیمان پرتلند است. در نتیجه با وجود یکسان بودن اسلامپ بتن حاوی دوده سیلیس و بتن معمولی، تراکم بتن سیلیسی بیشتر است.

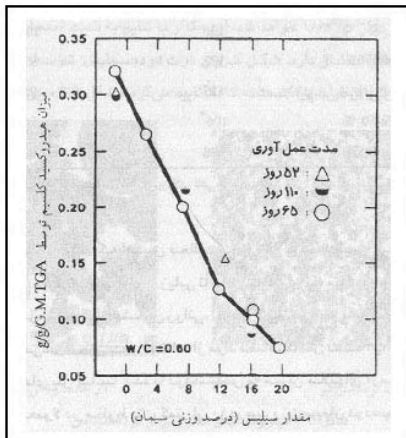
## ۲-۲-۱- واکنش شیمیایی دوده سیلیس

بین مواد پوزولانی، دوده سیلیس یکی از فعالترین آنهاست. رفتار پوزولانی دوده سیلیس در بتن، مهمترین خاصیتی است که باعث می شود بتن سخت شده دارای خواص قابل ملاحظه ای گردد. تفاوت اساسی بین دوده سیلیس و پوزولانهای معمولی مانند خاکستر آتشفشانی، خاکستر بادی و رس کلسینه شده این است که فعالیت پوزولانی دوده سیلیس زودتر از پوزولانهای فوق قابل حصول است. دوده سیلیس بواسطه شکل و اندازه ذراتش یک پوزولان خیلی فعال و پرکننده بسیار موثری در بتن است. اگرچه در مخلوط های ساخته شده با سیمان و دوده سیلیس، طبیعت هیدراتاسیون اجزای دوده سیلیس و تأثیر آنها بر روی هیدراتاسیون سیمان بخوبی مشخص نیست.

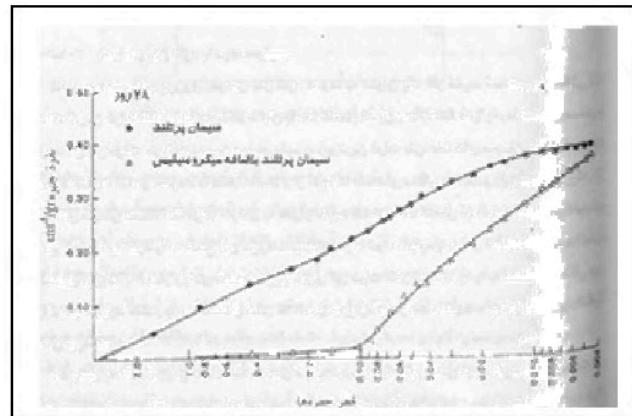
در جریان هیدراتاسیون سیمان پرتلند، بخش زیادی از فعالیت پوزولانی دوده سیلیس باعث تبدیل کریستالهای هیدروکسید کلسیم غیرمفید به ژل می شود. این ژل (CSH) دارای C/S کمتری نسبت به ژل های معمولی است و ظرفیت بالایی در ترکیب با یونهای خارجی خصوصاً یونهای آزاد دارد. (شکل ۴)

خاصیت پراکندگی دوده سیلیس نیز باعث توزیع یکنواخت و هموژن محصولات به دست آمده از هیدراتاسیون در مخلوط می گردد. نهایتاً، ترکیب دو خاصیت پرکنندگی و پوزولانی دوده سیلیس در ایجاد یک جسم بسیار متراکم و کم تخلخل، خود را نشان می دهد. بنابراین، فعالیت پوزولانی باعث کاهش نفوذپذیری بتن و کاهش درجه قلیایی بتن (مقدار هیدروکسید کلسیم)

شده و کاهش نفوذپذیری نیز باعث تغییر توزیع اندازه‌های منافذ می‌گردد. بسیاری از تحقیقات نشان داده است که در مقایسه با خمیر سیمان پرتلند، خمیر هیدراته شده سیمان پرتلند به اضافه پوزولان دارای منافذ خیلی ریزتری هستند که به آسانی قابل نفوذ نیستند. (شکل ۵)

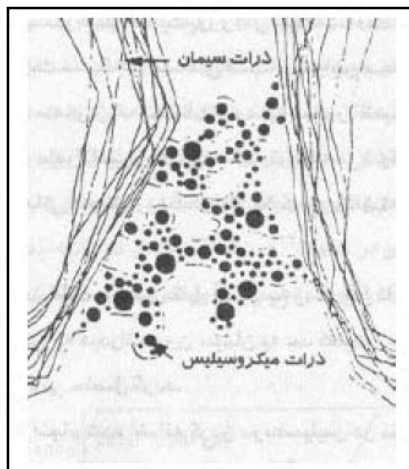


شکل ۴: مقدار هیدروکسید کلسیم در خمیر هیدراته شده با مقادیر مختلف دوده سیلیس

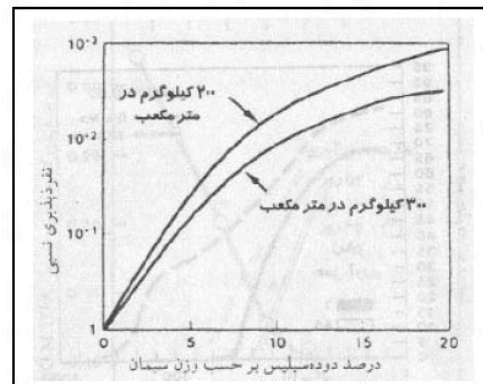


شکل ۵: تاثیر افزودن دوده سیلیس بر روی توزیع منافذ خمیرهای هیدراته شده

ذرات سیمان به عنوان تثبیت‌کننده باعث کاهش ابعاد لوله‌هایی می‌شود که از میان آنها آب، خود را به سطح بتن می‌رساند. وقتی ذرات دوده سیلیس به بتن اضافه می‌شود، اندازه لوله‌های مویینه به مقدار زیادی کاهش می‌یابد، زیرا این ذرات قادرند راه خود را به فضاهای خالی بین ذرات سیمان پیدا کنند و باعث منفصل شدن کانالهای جریان آب گردند. (شکل ۶) [۳]



شکل ۶: مکانیزم کاهش آب انداختن در خمیر سیمان با دوده سیلیس



شکل ۷: نفوذپذیری نسبی بتن های با دوده سیلیس

## ۲-۲-۲- دوام بتن حاوی دوده سیلیس

به طور کلی، تقریباً عموم تحقیقات نشان می‌دهد که مقاومت بتن حاوی دوده سیلیس نسبت به بتن معمولی در مقابل تهاجم عوامل مخرب بیشتر است. هرچند درباره نوع مکانیزم اختلاف نظر وجود دارد. نکته قابل توجه این است که تحقیقات درباره مکانیزم رفتار بتن حاوی دوده سیلیس ادامه دارد و در حال حاضر تأیید و یا تکذیب نظریه‌های مختلف بسیار مشکل است. به طور کلی نفوذپذیری بتن تابع مقدار تخلخل و توزیع اندازه منافذ است. بخصوص مقدار منافذ بزرگ (بزرگتر از  $0.1\mu\text{m}$ ) در میزان نفوذپذیری تأثیر بسزایی دارد. درباره اثر میکروسیلیس در ساختار منافذ دو نظریه کاملاً متضاد وجود دارد: Mehta و Gjorv معتقد هستند که با افزودن میکروسیلیس به بتن، منافذ بزرگتر به اندازه کوچکتر تغییر می‌یابند. ولی نتایج تحقیقات دیگران نشان می‌دهد که مقدار منافذ بزرگ (بزرگتر از  $0.1\mu\text{m}$ ) در بتن میکروسیلیسی در مقایسه با بتن معمولی (ساخته شده با سیمان معمولی پرتلند) بیشتر است. Molloy و Mangat بر روی مقدار منافذ بتن معمولی و میکروسیلیسی تحقیق کردند، این تحقیق با استفاده از روش تخلخل سنج جیوه‌ای انجام شده است. (جدول ۱)

جدول ۱: مقایسه حجم و درصد منافذ در سیمان معمولی حاوی میکرو سیلیس

نوع خمیر سیمان	حجم منافذ (سانتیمتر مکعب بر گرم)	درصد منافذ بزرگ (بزرگتر از $0.1\mu\text{m}$ میکرومتر)	درصد منافذ کوچک (کوچکتر از $0.1\mu\text{m}$ میکرومتر)
سیمان پرتلند	۰.۱۴۶	۵۲.۴	۴۷.۶
۹٪ میکرو سیلیس	۰.۲۰۳	۷۰.۶	۲۹.۴

محققین مورد اشاره همچنین مقدار تبخیر نمونه‌های بتن معمولی و بتن میکروسیلیسی را پس از خشک کردن نمونه‌ها در  $105^{\circ}\text{C}$  بدست آوردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مقدار تبخیر آب در بتن معمولی ۷٪ و در بتن میکروسیلیسی ۹٪ است. به عبارت دیگر مقدار تخلخل در بتن میکروسیلیسی بیشتر از بتن معمولی می‌باشد. Bamforth و Pocock و Gjorv معتقد هستند که نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقایسه با بتن معمولی کمتر است. براساس تحقیقاتی که توسط Khatib و Magnat انجام شده است، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار جذب آب بتن با افزودن میکروسیلیس تغییر نمی‌کند. هرچند مکانیزم نفوذپذیری در دو تحقیق مورد اشاره متفاوت است (نفوذ و جذب)، ولی به هر حال نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که درباره نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی نظریه‌های متضاد وجود دارد. درباره نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقابل اکسیژن نیز یافته‌های محدود وجود دارد. ولی با در نظر گرفتن یافته‌های محدود می‌توان نتیجه گرفت که افزودن میکروسیلیس در بتن، تغییر چندانی در مقدار نفوذ اکسیژن ایجاد نمی‌کند. ولی درباره نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقابل کلر تقریباً نظریه واحد بین محققین وجود دارد. براساس این نظریه، نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقایسه با بتن معمولی به مراتب کمتر است. Roy و Li نشان دادند که نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقابل کلر (با نسبت آب به سیمان ۰.۳۵)  $7.6 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  و نفوذپذیری بتن معمولی برابر  $156 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$  است. به عبارت دیگر نفوذپذیری بتن معمولی در مقابل کلر حدود ۲۰ برابر بتن میکروسیلیسی است. Gjorv نیز مشاهده کرد که نفوذپذیری خمیر میکروسیلیسی در مقابل کلر کمتر از خمیر معمولی می‌باشد. همانطور اشاره شد منافذ بزرگ در بتن میکروسیلیسی بیشتر از بتن معمولی است. به عبارت دیگر کاهش نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقابل آب و اکسیژن کاملاً محرز نیست ولی به طور مسلم نفوذپذیری بتن میکروسیلیسی در مقابل کلر کمتر از بتن معمولی است. این پدیده نشان می‌دهد که باید مکانیزم نفوذپذیری را در قابلیت تحرک یونها جستجو کرد. به عبارت

دیگر ساختار شیمیایی بتن میکروسیلیسی مهمتر از ساختار فیزیکی (منافذ) است و کاهش نفوذپذیری کلر بیشتر با ساختار شیمیایی بتن میکروسیلیسی ارتباط دارد.

در محلول موجود در منافذ بتن، یونهای از قبیل  $Al^{+3}$ ،  $Ca^{+2}$ ،  $Si^{+4}$  و  $K^{+}$  وجود دارد که یون  $K^{+}$  سبب تحرک بیشتر  $Cl^{-}$  در منافذ می‌گردد ولی یونهای  $Al^{+3}$ ،  $Ca^{+2}$ ،  $Si^{+4}$  از تحرک کلر می‌کاهد. مقدار یونهای  $K^{+}$  در خمیر سیمان میکروسیلیسی کمتر از خمیر سیمان معمولی است.

از طرف دیگر مقدار  $Si^{+4}$  نیز در بتن میکروسیلیسی بیشتر از بتن معمولی می‌باشد. در نتیجه تحرک یونهای  $Cl^{-}$  در بتن میکروسیلیسی کمتر از بتن معمولی است.

از طرف دیگر تحرک  $Cl^{-}$  فقط تابع یونهای موجود در منافذ نیست بلکه شکل منافذ نیز در این فرآیند نقش دارد. ظاهراً منافذ در بتن پوزولانی دارای خم بیشتری نسبت به بتن معمولی است. وجود خم در منافذ باعث می‌شود که حرکت یونهای کلر در داخل بتن با کندی صورت پذیرد، هرچند مقدار منافذ در بتن میکروسیلیسی بیشتر از بتن معمولی است ولی خمیدگی منافذ نقش مهمی در نفوذپذیری کلر دارد.

### ۲-۲-۳- اثر میکروسیلیس در پیوند دادن کلر

به طور کلی وقتی که یونهای کلر به داخل بتن نفوذ می‌کنند به صورت مختلف به شرح زیر در بتن باقی می‌مانند:

۱- قسمتی از یونهای کلر با  $C_3A$  پیوند شیمیایی برقرار می‌کنند که محصول این واکنش، نمک فریدل ( $3CaO-Al_2O_3-CaCl_2-10H_2O$ ) است. این یونهای پیوندیافته در فرآیند خوردگی نقش ندارند.

۲- بخشی دیگر از یونهای کلر با محصولات هیدراتاسیون، پیوند ضعیف فیزیکی برقرار می‌کنند. این یونها نیز در فرآیند خوردگی سهمی ندارند.

۳- بقیه یونهای کلر در محلول منافذ بتن به صورت آزاد باقی می‌مانند. این یونها مسئول شروع و شدت خوردگی هستند. براساس نظریه بعضی از محققین، میکروسیلیس سبب افزایش مقدار کلر آزاد در بتن می‌شود. هرچند درمقابل این نظریه تعداد دیگری از محققین معتقد هستند، مقدار کلر پیوندیافته در بتن میکروسیلیسی افزایش می‌یابد. نتایج تحقیقات Page و Vennesland در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار میکروسیلیس در بتن، به مقدار کلر آزاد در محلول منافذ افزوده می‌شود.

جدول ۲: مقدار کل آزاد در محلول منافذ

درصد میکرو سیلیس	۰	۱۰	۲۰	۳۰
$Cl^{-}$ در محلول منافذ بر حسب درصد کل $Cl^{-}$	۴۲	۷۳	۸۱	۹۰

### ۲-۲-۴- مکانیزم آزاد شدن کلر در بتن میکروسیلیسی

طبق نظریه Page و Vennesland افزودن میکروسیلیس در بتن سبب کاهش PH بتن می‌شود و مقدار PH از ۱۳٫۵ به ۱۲٫۵ تقلیل می‌یابد و در نتیجه قابلیت بتن میکروسیلیسی در پیوند با  $Cl^{-}$  کم می‌گردد. زیرا کاهش قلیائیت باعث افزایش حلالیت کلرور آلومینات کلسیم (نمک فریدل) می‌شود. ولی تحقیقاتی که توسط دیگران انجام شده است نشان می‌دهد که با کاهش PH قابلیت پیوند  $C_3A$  با کلر افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر هنوز دلیل افزایش یونهای آزاد در بتن میکروسیلیسی به درستی روشن نیست. ولی به هر حال نکته‌ای که اهمیت دارد مقدار نفوذ یونهای کلر به داخل بتن است که در بتن میکروسیلیسی کمتر از بتن معمولی است و وجود یونهای آزاد در بتن اهمیت ثانوی دارد. به عبارت دیگر وقتی مقدار یونهای



کلر نفوذ کرده در بتن کم باشد، آزاد بودن قسمتی از یونها چندان اهمیت ندارد. این نظریه با مشاهدات Page و همکارانش منطبق است که از نقطه نظر خوردگی آرماتور در بتن جنبش انتشار کلر مهم است و تشکیل نمک فریدل اثر ثانویه دارد.

#### ۲-۲-۵- شدت خوردگی بتن میکروسیلیسی

بطور کلی اکثر تحقیقات نشان می دهد که شروع خوردگی بتن میکروسیلیسی در زمانی طولانی تر از بتن معمولی صورت می گیرد و شدت خوردگی آن نیز به مراتب کمتر از بتن معمولی می باشد.

Maskhuddin و همکارانش نمونه های بتن را در داخل محلول سولفات- کلر قرار دادند و مشاهده کردند که شروع خوردگی برای بتن میکروسیلیسی و بتن معمولی به ترتیب ۴۵ و ۱۰۸ روز می باشد، همچنین شدت خوردگی بتن میکروسیلیسی ۰.۰۳ در مقابل  $3.56 \mu A/cm^2$  در بتن معمولی است.

#### ۲-۲-۶- مکانیزم کاهش شدت خوردگی در بتن میکروسیلیسی

بدر نظر گرفتن تمام موارد اشاره شده، به نظر می آید که کاهش شدت خوردگی در بتن میکروسیلیسی تابع ساختار فیزیکی (مقدار و اندازه منافذ) نیست (هرچند شکل و خم منافذ مهم است) بلکه ساختار شیمیایی (وجود یونهای مختلف) از اهمیت بیشتری برخوردار است. به طور کلی در فرآیند خوردگی، بتن در نقش الکترولیت عمل می کند که انتقال را به 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 در بتن) و مقدار کلر آزاد در بتن از مقاومت الکتریکی کاسته می شود. عوامل دیگری که مقاومت الکتریکی را تحت تأثیر قرار می دهند عبارتند از:

۱- مقدار و توزیع اندازه منافذ

۲- نوع یونهای موجود در منافذ و در ژل سیمان

۳- قدرت تحرک یونها

۴- مقدار یونها

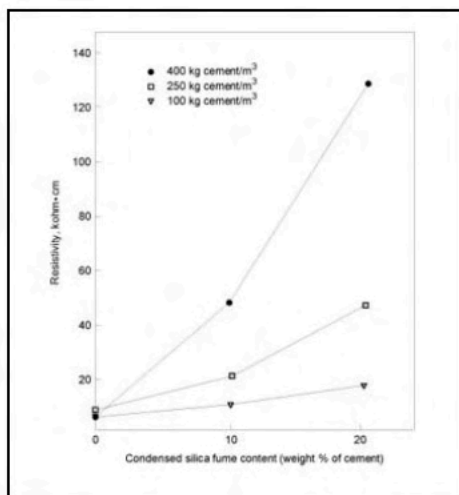
به طور کلی مقاومت الکتریکی تنها خاصیت بتن است که با تمام عوامل کنترل کننده شدت خوردگی، ارتباط دارد. ممکن است در بتن معمولی مقدار و توزیع اندازه منافذ عامل مهم کنترل شدت خوردگی باشد ولی ظاهراً نوع و مقدار یونها و قدرت تحرک آنها در بتن میکروسیلیسی کنترل کننده اصلی در شدت خوردگی می باشد. به هر حال تمام این عوامل متغیر سبب تغییر در

مقاومت الکتریکی می شوند. [۴] [۵]

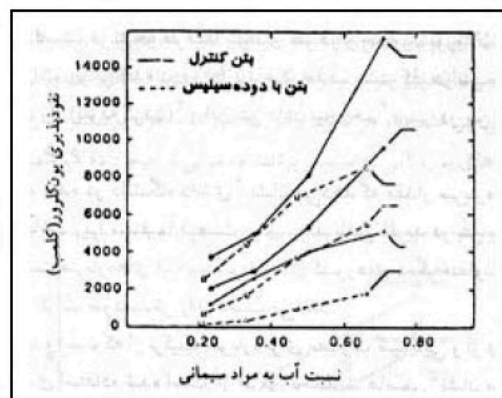
مهمترین یونها در ژل سیمان  $Ca^{2+}$ ،  $Si^{4+}$ ،  $Fe^{3+}$  و  $Al^{3+}$  است و یونهای داخل منافذ  $K^+$ ،  $Na^+$  و  $Ca^{2+}$  و  $OH^-$  می باشد. سرعت یونهای  $OH^-$ ،  $Ca^{2+}$ ،  $Na^+$  و  $K^+$  در داخل آب به ترتیب  $20.6 \times 10^{-6}$ ،  $6.2 \times 10^{-6}$  و  $5.2 \times 10^{-6} m^2/vs$

$10 \times 10^{-6}$  است. به عبارت دیگر سرعت یونهای  $OH^-$  و  $K^+$  نسبتاً بیشتر است و این یونها در بتن میکروسیلیسی کمتر از بتن معمولی است، 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. مقدار افزایش مقاومت الکتریکی در بتن میکروسیلیسی توسط Gjorv

ارائه شده است. (شکل ۸) [۶]



شکل ۸: مقاومت الکتریکی ویژه بتن های حاوی دوده سیلیس



شکل ۹: تاثیر دوده سیلیس بر روی نفوذ پذیری یون کلرور در بتن

## ۲-۲-۷- نتیجه گیری

با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه آشکار می گردد که استفاده بهینه از دوده سیلیس به عنوان یک پزولان موثر در مقابل حملات یون کلرور، و به دنبال آن جلوگیری از فرآیند خوردگی نقش بسزایی ایفا می کند، و آگاهی از مکانیزم رفتار میکرو سیلیس در بتن زمینه را برای شناخت موادی نو با خواص مفید میکرو سیلیس مهیا می کند.

## ۳- مراجع

- [۱] مستوفی نژاد، دلوود، "بررسی تجربی خوردگی فولاد در بتن حاوی سرباره و میکروسیلیس"، امیر کبیر / سال چهاردهم/شماره پنجاه و سوم/ زمستان هشتاد و یک
- [۲] دوبروولسکی، جوزف، "دستنامه اجرای بتن"، ترجمه: منصور پیدایش، ناشر: علم و ادب، چاپ دوم، ۱۳۸۲
- [۳] رمضان پور، علی اکبر / پیدایش، منصور، "نوام بتن و نقش سیمان های پزولانی"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۲۷۴
- [۴] قنوسی، پرویز/ گنجیان، اسماعیل، "فن لوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۲۸۳
- [۵] رمضان پور، علی اکبر، "نوام بتن با سیمان های پزولانی در شرایط آزمایشگاهی مشابه خلیج فارس"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۳۴۸
- [۶] David A. Whiting and Mohamad A. Nagi , ( 2003)  
Electrical Resistivity of Concrete  
PCA R&D Serial No. 2457.