

## اثرات جایگزینی میکروسیلیس و مقدار آب به سیمان در نفوذ یون کلراید

محمد شکرچی زاده<sup>۱</sup>، سیامک ریاضی<sup>۲\*</sup>، خدیجه صبری رزم<sup>۳</sup>

۱- استاد دانشکده عمران دانشگاه تهران، مدیر انستیتو مصالح ساختمانی Email: shekarch@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه، دانشکده عمران دانشگاه تهران

Email: siariazi@ut.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده عمران دانشگاه تهران

Email: k.sabrirazm@ut.ac.ir

### چکیده:

محیط‌های دریایی یکی از اصلی‌ترین مکان‌هایی است که در آن از بتن در صنعت ساخت و ساز به طور گسترده استفاده می‌گردد. از طرفی شرایط رویارویی دریا به علت دارا بودن دما و رطوبت بالا و همچنین میزان زیاد یون و املاح، محیطی خورنده برای سازه‌های بتن‌آرمه ایجاد می‌کند. یکی از اصلی‌ترین راه‌کارهایی که به کمک آن می‌توان به بتنی مقاوم در برابر نفوذ یون کلراید دست یافت استفاده از میکروسیلیس است. در این تحقیق عملکرد پنج مقدار مختلف از این ماده در محیط‌های دریایی بررسی می‌شود که عبارت‌اند از: فاقد میکروسیلیس، ۵٪، ۷/۵٪، ۱۰٪ و ۱۲/۵٪. نمونه‌های بتنی با مقادیر ذکر شده به مدت هفت سال در شرایط رویارویی گوناگون در محیط خلیج فارس قرار داده شده‌اند. شرایط رویارویی شامل اتمسفر، مستغرق و جزرومد بوده و نمونه‌گیری در زمان‌های سه ماه، نه ماه، سه سال، پنج سال و هفت سال انجام شده و به کمک پروفیل نفوذ یون کلراید مقدار ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی در تمامی نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. بر اساس نتایج بدست‌آمده بهترین عملکرد از نظر مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید بسته به شرایط رویارویی متفاوت است. با این وجود مشاهده می‌شود که مقادیر میکروسیلیس با و نسبت‌های آب به سیمان پایین عملکرد مناسبی از نظر مقاومت ذکر شده در اکثر شرایط رویارویی و در زمان‌های متفاوت از خود نشان داده است.

عوامل مختلفی بر نرخ نفوذ یون کلر در بتن تأثیر می‌گذارند. یکی از مهم‌ترین عوامل مقدار دوده سیلیس در بتن و نسبت آب به مواد سیمانی می‌باشد. امروزه دوده سیلیس به عنوان یک پوزولان مصنوعی که دارای خواص پوزولانی می‌باشد، جایگاه خاصی در صنعت ساختمان در ایران و جهان پیدا کرده است و اغلب در مواردی که نیاز به کاربری خاصی از بتن باشد، از این ماده مصنوعی استفاده می‌گردد. نسبت آب به مواد سیمانی نیز همواره به عنوان عاملی تعیین‌کننده در کارایی و مقاومت بتن از گذشته‌ای دور مورد توجه قرار داشته است. در بسیاری از پروژه‌های عمرانی و ساختمانی به دلیل مناسب نبودن نسبت آب به مواد سیمانی سازه‌های نهایی دارای کاربری مطلوب نبوده است و پس از مدت زمانی کمتر از تصور دچار نقص و ضعف می‌گردد و نیاز به تعمیر و ترمیم پیدا می‌کند. بسیاری از خواص بتن بر اثر استفاده از مواد پوزولانی بهبود می‌یابد. بعضی آثار ناشی از خواص فیزیکی ذرات شامل ریز بودن و شکل ذرات، و بقیه ناشی از فعل‌وانفعال شیمیایی پوزولانها با سیمان است. یکی از مهم‌ترین خواص پوزولانها وقتی به عنوان جایگزین بخشی از سیمان پرتلند استفاده می‌شوند، توانایی فراوان آن‌ها در کاهش منافذ بزرگ و نفوذپذیری بتن است. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که پوزولانها موثرترین کاهنده نفوذپذیری در مخلوط‌های کم‌مایه‌اند. در یک بررسی بر روی مقاومت فشاری و نفوذپذیری (به روش آب) سیمان پرتلند به اضافه مواد پوزولانی، این نتیجه حاصل شده که در مراحل مختلف روند عمل آوردن بتن، حجم منافذ بزرگ با قطر بیشتر از ۱۰۰۰ آنگستروم به طور معکوس با مقاومت و نفوذپذیری بتن ارتباط دارد. نتایج برخی تحقیقات حاکی از آن است که افزودن پوزولان‌هایی چون خاکستر بادی و روباره کوره ذوب‌آهن دانه‌ای به سیمان پرتلند باعث ایجاد منافذ خیلی ریز یا تبدیل منافذ بزرگ به منافذ ریز می‌گردد. دوده سیلیس یک محصول مصنوعی و فرعی حاصل از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید فلز سیلیسیم یا آلیاژهای سیلیسیم به خصوص آلیاژهای فروسیلیس است. این ماده با داشتن بیش از ۸۰ درصد سیلیس با حالت غیر کریستالی و به شکل ذرات بینهایت ریز با قطر متوسط ۰/۱ میکرون یک ماده پوزولانی قوی است. بدیهی است که ترکیبات شیمیایی دوده سیلیس بستگی به ترکیب محصولات اصلی دارد که در کوره تولید می‌شود و آن هم در ارتباط با ترکیب شیمیایی مواد خاصی است که در کوره ریخته می‌شود. اغلب دوده سیلیس موجود دارای رنگی بین خاکستری روشن و تیره می‌باشند، به دلیل بی‌رنگی سیلیس، رنگ محصول را میزان کربن و اکسید آهن تعیین می‌کنند. به طور کلی با افزایش مقدار کربن در محصول، رنگ تیره‌تر می‌گردد. چگالی ذرات دوده سیلیس حدود ۲/۲ می‌باشد. وزن مخصوص فضایی با توجه به نوع دوده سیلیس متفاوت می‌باشد. در دوده سیلیس خام، بین ۴۳۰ تا ۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب، در دوده سیلیس لجنی این مقدار بین ۱۴۴۰ تا کیلوگرم بر متر مکعب ۱۳۲۰ (برای نسبت ۵۰٪ دوده سیلیس مخلوط شده در آب) و در دوده سیلیس مترکم شده بین ۵۰۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. البته در نمونه‌های صنعتی و تجاری این مقدار به ۷۲۰ کیلوگرم بر متر مکعب نیز می‌رسد. دوده سیلیس دارای ذرات بسیار ریز کروی می‌باشد که سطح ویژه آن حدود ۲۰۰۰۰ می‌باشد که از روش جذب سطحی نیتروژن به دست می‌آید.

## ۲-آزمایش‌ها

آزمونه‌های منشوری در ابعاد  $15 \times 15 \times 60$  cm به عنوان آزمونه‌های اصلی برای قرارگیری در محیط خلیج فارس انتخاب شد. طرح اختلاط بتن بر اساس دستیابی به کارایی یکنواخت با اسلامپ ۵ تا ۸ سانتی‌متر برای تمامی حالات انجام شد. مقدار عیار مواد سیمانی با توجه به تجربیات مشابه در دیگر پروژه‌های تحقیقاتی که به منظور دستیابی به مقدار بهینه مواد سیمانی انجام گرفته بود و همچنین برای مقایسه نتایج با طرح‌های دیگر پژوهشی به میزان ثابت  $400 \text{ kg/m}^3$  در نظر گرفته شد. برای طرح اختلاط ابتدا شن و ماسه با حداکثر اندازه دانه  $12 \text{ mm}$ ، دانه‌بندی شد. مدول نرمی ریزدانه در حدود  $4/3$  بود، ولی به دلیل استفاده از ACI 211 [۱] در طراحی و همچنین وجود حدود  $37\%$  ریزدانه در مصالح درشت‌دانه، دانه‌بندی اصلاح گردید تا به حد مورد قبول در استاندارد برسد. به این ترتیب که ریزدانه را الک کرده و به دو قسمت زیر الک  $1 \text{ mm}$  و روی الک تقسیم گردید. سپس ریزدانه مصرفی را به نسبت ۵ به ۱ از مصالح زیر الک  $1 \text{ mm}$  و روی آن تهیه گردید تا مدول نرمی به  $3/2$  برسد. دانه‌بندی طرح‌ها ملزومات ASTM C33 را برآورده می‌کند [۲].

پس از آماده سازی سایت آزمون های منشوری که در آزمایشگاه ساخته شده بودند به محل منتقل شدند. در هر قسمت رویارویی تمهیدات لازم برای رویارویی کنترل شده و حفاظت آزمون ها انجام گرفته بود بطوریکه در قسمت جزر و مد، آزمون ها داخل سبدهای مشبک پلاستیکی قرار گرفتند و کلیه سبدها به هم بسته شدند، در ناحیه مغروق آزمون ها داخل وان های پلی اتیلن قرار گرفتند که همواره پر از آب باشند. این وان ها با میله های داربست محافظت می شد تا در مقابل نیروی موج دریا جابجا نشوند. برای شرایط رویارویی اتمسفر نیز سکویی ساخته شد تا آزمون ها بر روی آن قرار گیرند و زیر آزمون ها هم از نوارهای چوبی برای عبور هوا استفاده شد. برای شرایط مدفون در خاک با حفر گودالی در کنار سکوی حالت اتمسفر، آزمون های مربوطه داخل آن قرار گرفتند. کلیه آزمون های منشوری به صورتی قرار داده شدند که سطوح پوشیده نشده در بالا و پایین باشد. در حالت پاشش نیز آزمون ها داخل سبدهای مشبک پلاستیکی بر روی سکوی بتنی دیوار ساحل، که تراز آن حدود ۱ الی ۲ متر از حداکثر ارتفاع مد منطقه بالاتر می باشد، قرار داده شدند، بطوریکه بر اثر برخورد موج با دیواره ساحلی، آزمون ها در معرض پاشش آب دریا قرار گیرند.

پس از قرارگیری آزمون های منشوری در محل سایت پایایی بتن در بندرعباس در پنج دوره زمانی ۳ ماهه، ۹ ماهه، ۳ ساله، ۵ ساله و ۷ ساله عملیات نمونه برداری برای آزمایش تعیین میزان یون کلر انجام شد. آزمون های شرایط مختلف رویارویی توسط اهر برقی بریده و نام گذاری می شود، سطح بریده شده آزمون باقیمانده با پوشش پایه پلی اورتان پوشانده می شود تا آماده قرارگیری در محل برای آزمایش ها در دوره های زمانی بعد شود. پس از انتقال نمونه های بریده شده به تهران، کار پودرگیری از آزمون ها طبق استاندارد NTBuild 443 در آزمایشگاه مصالح ساختمانی آغاز شد. برای این منظور، از قبل دستگاه پروفیل گیری تهیه و گیره نگهداری متناسب با آزمون های منشوری طراحی و ساخته شده بود. در این دستگاه با دو نوع چرخش مته بر روی سطح پروفیل هایی با دقت عمق ۰/۵ میلی متر در مساحت های قابل تنظیم در سطوح دایروی از آزمون ها تهیه می شود. جنس این مته از آلیاژ خاصی بوده که احتیاج به سرد کردن با آب نداشت [۳]. روش های اسکپترو فتومتری از جمله روش های بسیار حساس و با حد تشخیص پایین، برای اندازه گیری آنالیت های گوناگون می باشند. اساس این روش بر مبنای برهمکنش نور با یک ماده قرار دارد. در این تحقیق روش مورد استفاده برای اندازه گیری یون کلراید روش اسکپترو فتومتری بوده است.

میزان نفوذ یون کلر بر حسب عمق از سطح بتن در زمان مشخص توسط قانون دوم انتشار پذیری فیک بیان می شود [۱۰]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1-2)$$

پس از حل، معادله دیفرانسیل فوق به صورت زیر درمی آید:

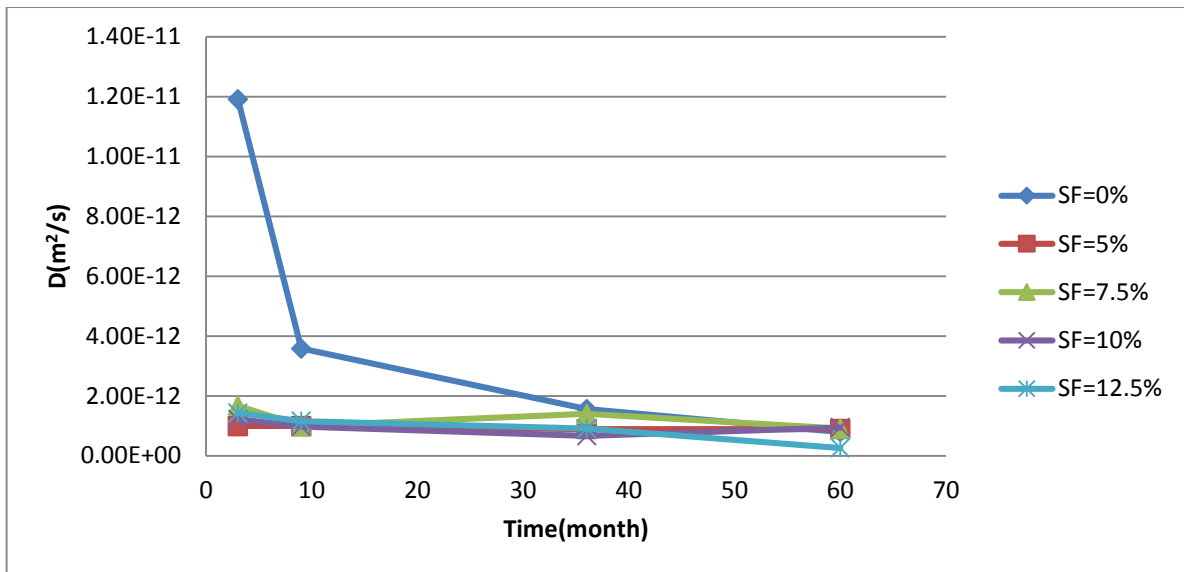
$$C(x, t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (2-2)$$

که در آن  $x$  فاصله از سطح بتن بر حسب متر،  $t$  مدت زمان رویارویی بر حسب ثانیه،  $D_c$  ضریب انتشار پذیری بتن بر حسب مترمربع بر ثانیه،  $C_0$  میزان درصد وزنی یون کلر در سطح بتن و  $C(x, t)$  میزان درصد وزنی یون کلر در عمق  $x$  نسبت به سطح و در زمان  $t$  است

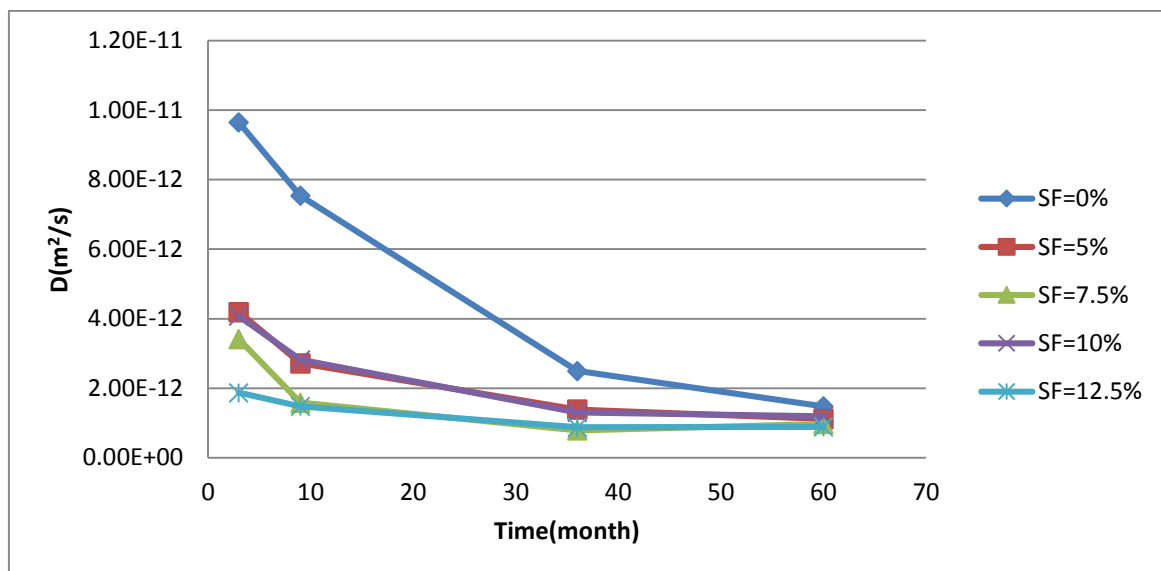
### ۳- بحث و نتیجه

#### ۳-۱ نتایج ضریب انتشار پذیری

مطابق شکل ۱، همان طور که مشاهده می شود تغییرات ضریب انتشار پذیری بر حسب زمان برای نمونه فاقد میکروسیلیس بسیار شدید است. این بدان معناست که در مقایسه با نمونه فاقد میکروسیلیس، در طرح اختلاط های دارای میکروسیلیس ضریب انتشار پذیری در طی زمان تغییر چندانی نمی کند و این امر در تمامی طرح های اختلاط با نسبت های آب به سیمان پایین تر از ۰/۵ مشهود است (شکل ۲). در واقع در نمونه با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۵، ریزساختار بتن به نحوی بهبود یافته است که تغییرات در مقدار میکروسیلیس دیگر تأثیر چندانی بر مقدار ضریب انتشار پذیری ندارد. این در حالی است که در نمونه با نسبت آب به سیمان ۰/۵، بتن دارای خلل و فرج بیش از اندازه ای است که هرچه مقدار میکروسیلیس در طرح اختلاط بیشتر باشد ریزساختار منسجم تری خواهیم داشت.

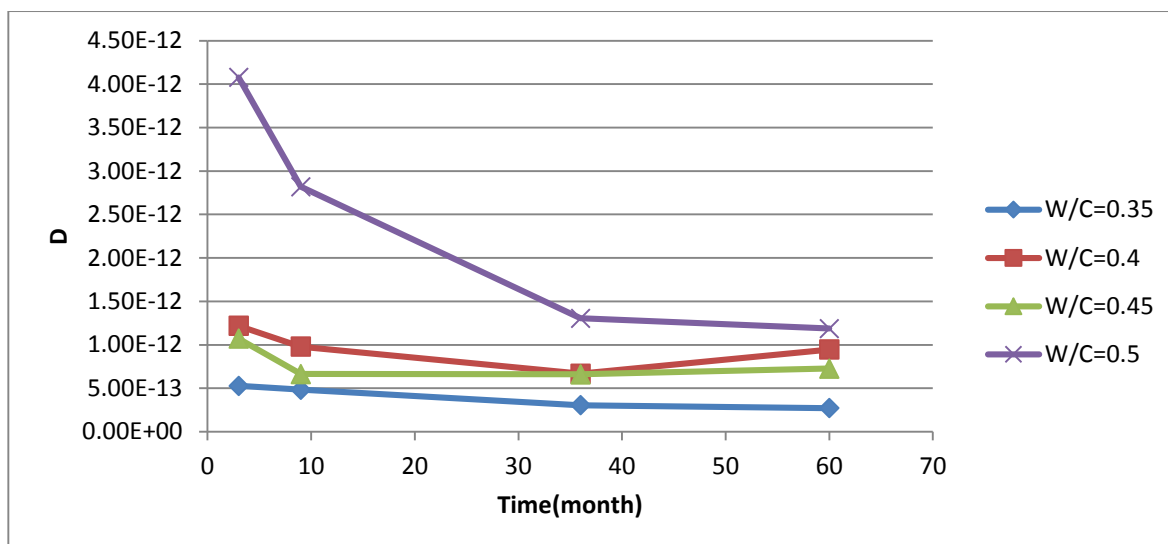


شکل ۱: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری برای طرح اختلاط با  $W/B$  برابر با  $0.4$  و دارای درصدهای مختلف میکروسیلیس در طی زمان



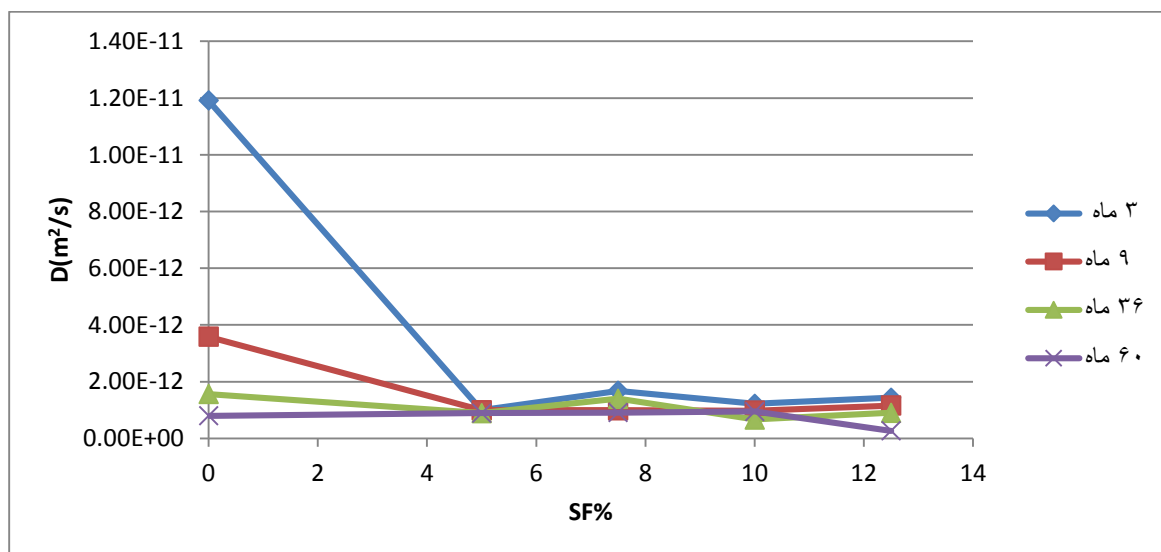
شکل ۲: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری برای طرح اختلاط با  $W/B$  برابر با  $0.5$  و دارای درصدهای مختلف میکروسیلیس در طی زمان

این مشاهده را می‌توان در نمودار شکل ۳ به گونه‌ای دیگر بررسی نمود که در آن کاملاً مشخص است که برای نمونه‌های با درصد میکروسیلیس یکسان، تغییرات ضریب انتشارپذیری در نسبت آب به مواد سیمانی  $0.5$  بسیار بیشتر از سایر نمونه‌هاست و این ضریب در سایر نمونه‌ها به نسبت نمونه با  $W/C$  برابر  $0.5$  تغییر چندانی ندارد.



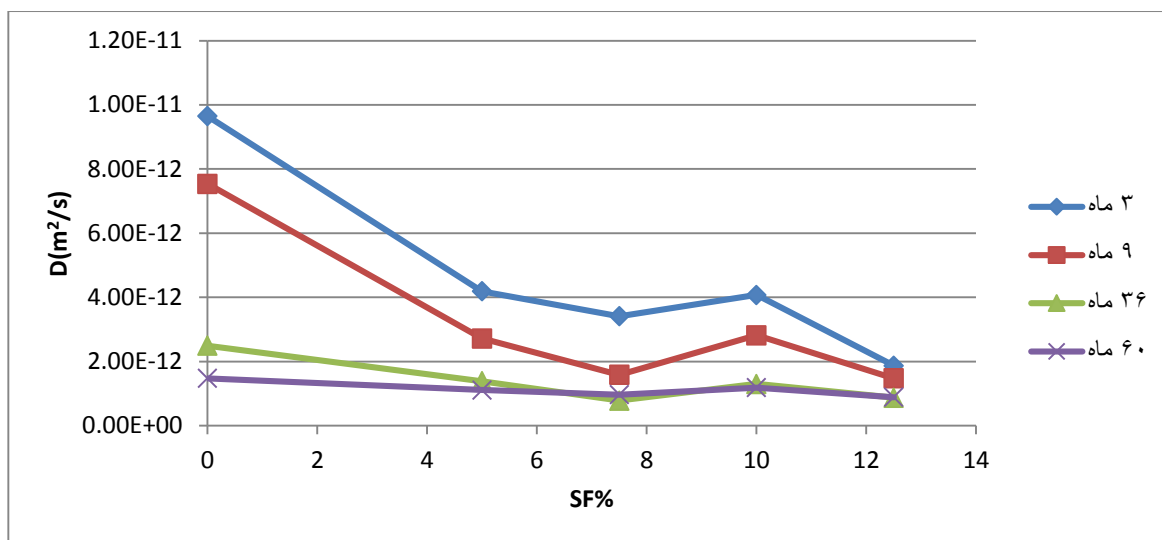
شکل ۳: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری برای طرح اختلاط با W/C مختلف و دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس

مطابق شکل ۴ و ۵، همان طور که گفته شد و از نمودار ضریب انتشارپذیری بر حسب درصد میکروسیلیس در سنین متفاوت مشهود است در تمامی نمونه‌ها به جز نمونه با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵، در درازمدت تغییر در مقدار میکروسیلیس تأثیر چندانی بر روی ضریب انتشارپذیری ندارد و تفاوت تنها در حضور و عدم حضور این ماده در بتن است. پس مقدار حداقل ۵ درصد نیز برای مقاوم تر کردن بتن در مقابل نفوذ یون کلر می‌تواند درصد مناسبی از این ماده باشد.



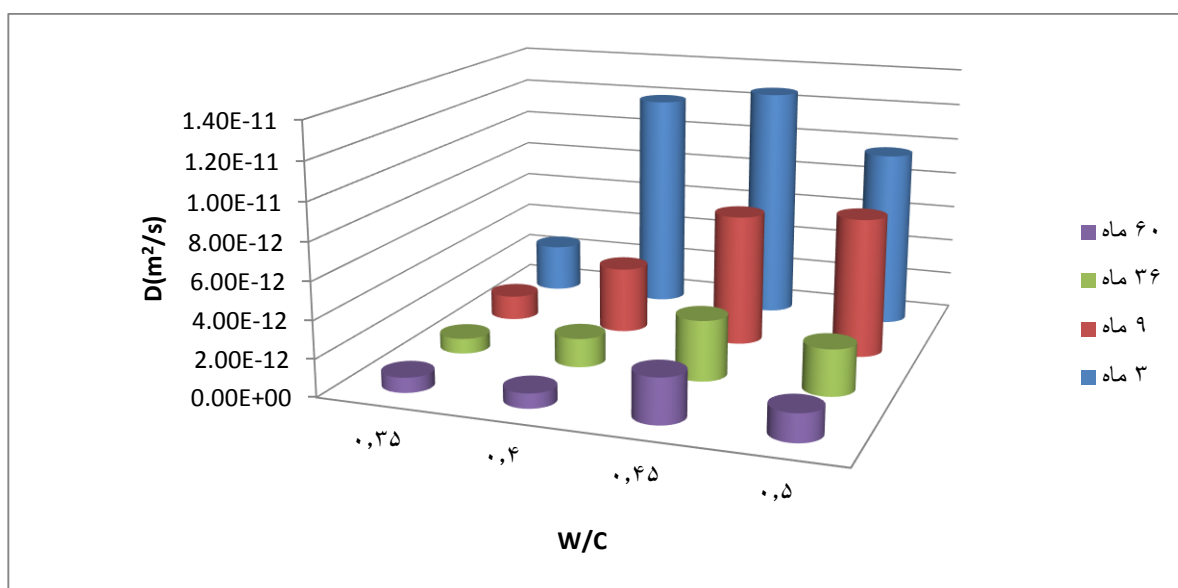
شکل ۴: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری بر حسب درصدهای مختلف میکروسیلیس برای زمان‌های متفاوت برای طرح اختلاط با W/C برابر با ۰/۴

تنها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ با گذشت زمان ضریب انتشارپذیری نیز تغییر می‌کند. در واقع در نمونه‌ها با سایر نسبت‌های آب به مواد سیمانی مقدار بالای میکروسیلیس تأثیر خود را سریع (قبل از ۳ ماه) روی بتن می‌گذارد و دیگر گذشت زمان نمی‌تواند تغییر محسوسی در ضریب ذکرشده ایجاد کند.

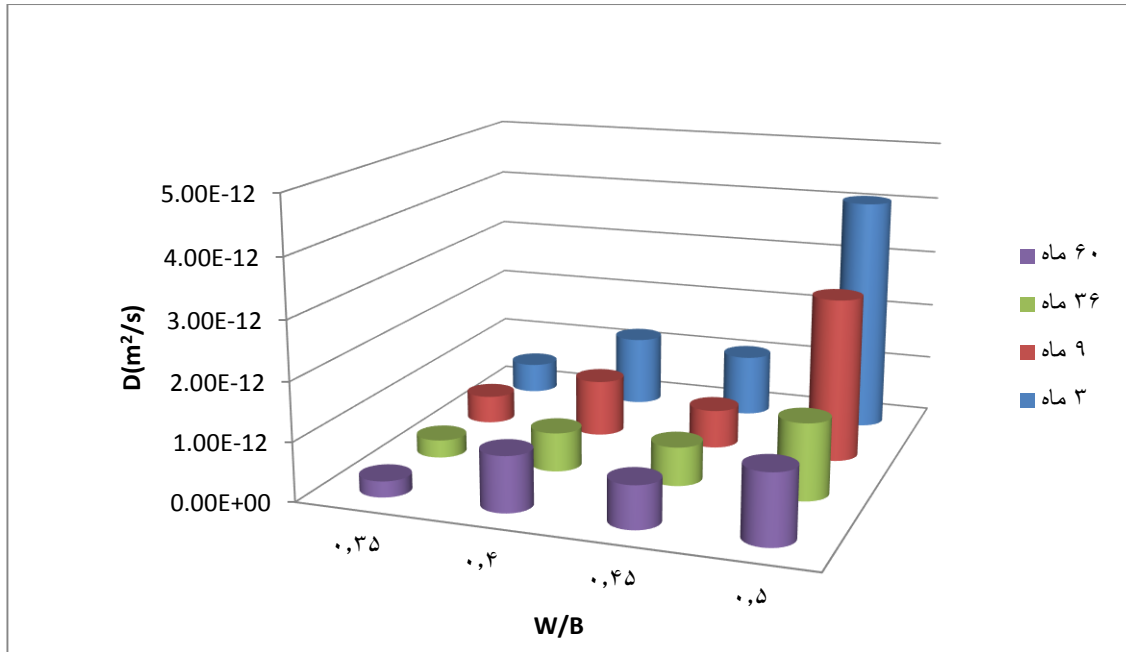


شکل ۵: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری بر حسب درصدهای مختلف میکروسیلیس برای زمان‌های متفاوت برای طرح اختلاط با W/C برابر با ۰/۵

مطابق نمودار شکل ۶، در نمونه‌های فاقد میکروسیلیس غیر از نمونه دارای نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، در بقیه نسبت‌های آب به سیمان گذشت زمان تأثیر قابل توجهی روی ضریب انتشارپذیری دارد. به عبارت دیگر در بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، از همان ابتدا بتن حاصل مقاومت خوبی در برابر نفوذ کلر از خود نشان می‌دهد و این خاصیت با گذشت زمان تغییری نمی‌کند. پس در واقع می‌توان این چنین نتیجه گرفت که کم کردن نسبت آب به سیمان تا ۰/۳۵، می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از میکروسیلیس باشد. همچنین تغییرات ضریب انتشارپذیری در تمامی نسبت‌های آب به مواد سیمانی به جز نسبت ۰/۳۵ با گذشت زمان برای نمونه بدون میکروسیلیس قابل توجه است و همان طور که از نمودار شکل ۷ پیداست در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس این تغییرات تنها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ مشاهده می‌شود که بدان معناست که در حضور میکروسیلیس می‌توان با نگاه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی در مقدار کمتر از ۰/۴۵ بتنی با شرایط مطلوب طراحی کرد که تفاوت چندانی بین نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ در نفوذ یون کلر مشاهده نمی‌شود.



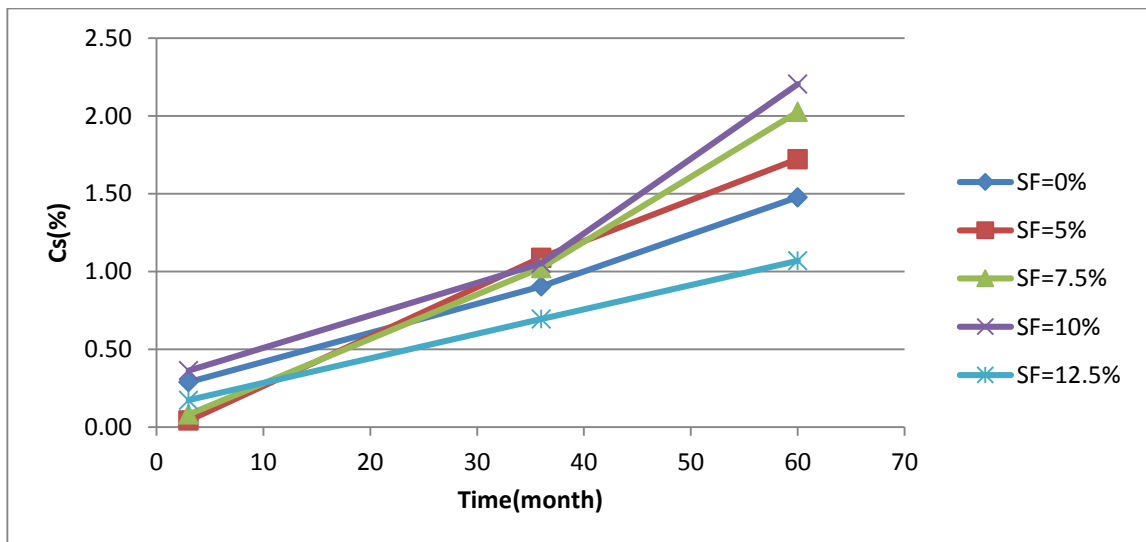
شکل ۶: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری در زمان‌های متفاوت برای طرح اختلاط با W/C مختلف و فاقد میکروسیلیس



شکل ۷: نمودار مقدار ضریب انتشارپذیری در زمان‌های متفاوت برای طرح اختلاط با  $W/B$  مختلف و دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس

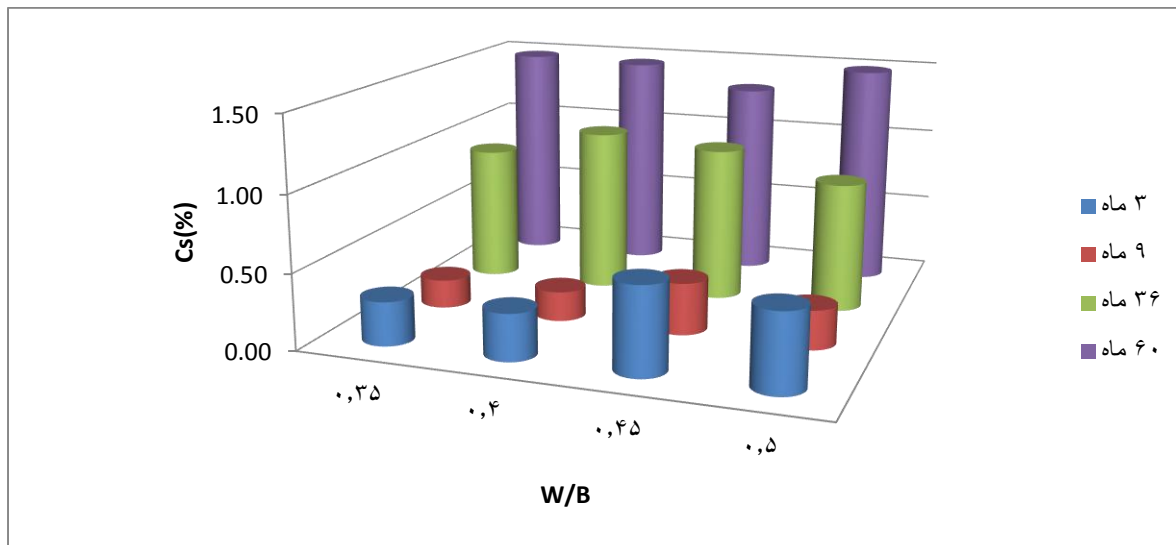
### ۲-۳ نتایج میزان کلر سطحی

مطابق شکل ۸ در اغلب نمونه‌ها با افزایش مقدار میکروسیلیس، میزان افزایش کلر سطحی در طی زمان کاهش یافته است. بدان معنا که شیب نمودار کلر سطحی بر حسب زمان برای نمونه‌های با درصد میکروسیلیس بیشتر، از شیب نمودار مربوط به نمونه‌های حاوی درصد کمتر میکروسیلیس، کمتر است. همچنین همان طور که از این نمودار مشهود است، نمودار کلر سطحی بر حسب زمان تابعی کاملاً خطی است که موید این مطلب است که انباشت کلر بر سطح بتن در طی زمان نرخ افزایشی ثابتی دارد.



شکل ۸: نمودار مقدار کلر سطحی بر حسب زمان برای طرح اختلاط با  $W/B$  برابر با ۰/۳۵ و دارای درصدهای مختلف میکروسیلیس

همچنین همان طور که از نمودار شکل ۹ مشهود است میزان کلر سطحی با تغییرات نسبت آب به مواد سیمانی تغییر چندانی نمی‌کند بلکه همان طور که قبلاً هم اشاره شده میزان کلر سطحی به شدت تابع زمان است.



شکل ۹: نمودار مقدار کلر سطحی بر حسب زمان‌های متفاوت برای طرح اختلاط با W/B مختلف و دارای ۵ درصد میکروسیلیس

۳-۳ روابط تجربی به دست آمده برای مقدار ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی

با بررسی عددی نتایج  $D$  و درصد جایگزینی میکروسیلیس در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ثابت، توانستیم یک رابطه ریاضی مناسب (با همگرایی بیش از ۰/۹۴) به دست آوریم. البته رابطه اولیه به دست آمده یک رابطه نمایی به صورت  $ae^{bx}$  بود که در نسبت‌های آب به مواد سیمانی مختلف، ضریب  $b$  تقریباً ثابت بود ولی مقدار  $a$  به شدت تغییر می‌کرد. بعد از بررسی مجدد نتایج و نیز استفاده از تحقیقات مشابه کمیته ۳۶۵ انجمن بتن آمریکا، با نرمالیزه کردن نتایج می‌توان نتایج را واقعی و دقیق تر کرد. برای نرمالیزه

کردن اعداد، از نسبت  $\frac{D_{sf}}{D_c}$  استفاده شد که  $D_{sf}$ ، ضریب انتشار یون کلر در بتن حاوی دوده سیلیس و  $D_c$  ضریب انتشار در بتن شاهد می‌باشد. در نهایت روابط زیر برای سنین مختلف بتن و مستقل از نسبت آب به مواد سیمانی به دست آمد (شکل ۱۰):

$$D_{sf} = D_c \times e^{-0.1544(SF\%)} \quad (m^2/s) \quad (R^2 = 0.94) \quad \text{۹ ماهه} \quad (1-3)$$

$$D_{sf} = D_c \times e^{-0.0917(SF\%)} \quad (m^2/s) \quad (R^2 = 0.88) \quad \text{۳۶ ماهه} \quad (2-3)$$

$$D_{sf} = D_c \times e^{-0.071(SF\%)} \quad (m^2/s) \quad (R^2 = 0.88) \quad \text{۶۰ ماهه} \quad (3-3)$$



برای مقایسه و بررسی روابط به دست آمده، رابطه Thomas که در Life-365 مبنای محاسبات ضریب انتشارپذیری بتن‌های حاوی میکروسیلیس و در زمان‌های متفاوت می‌باشد [۴]، در ادامه ارائه می‌شود.

$$(R^2 = 0.69) \quad (۴-۳) \\ D_{sf} = D_c \times e^{-0.165(SF\%)} \quad (m^2 / s)$$

همان طور که مشاهده می‌شود رابطه Thomas و روابط به دست آمده، از نزدیکی و تشابه خوبی برخوردار هستند.

همچنین با بررسی عددی نتایج D و نسبت آب به مواد سیمانی در درصدهای ثابت میکروسیلیس، سعی به یافتن رابطه‌ای برای مدل کردن رفتار شد. در نهایت توانستیم روابطی شبیه رابطه Thomas به دست آوریم (شکل ۱۱).

$$(R^2 = 0.85) \quad \text{فاقد میکروسیلیس} \quad (۵-۳) \\ D_o = 10^{(-12.85+3.09 \times (\frac{w}{cm}))} \quad (m^2 / s)$$

$$(R^2 = 0.88) \quad \text{دارای ۵ درصد میکروسیلیس} \quad (۶-۳) \\ D_o = 10^{(-13.50+3.66 \times (\frac{w}{cm}))} \quad (m^2 / s)$$

$$(R^2 = 0.93) \quad \text{دارای ۷/۵ درصد میکروسیلیس} \quad (۷-۳) \\ D_o = 10^{(-13.70+4.21 \times (\frac{w}{cm}))} \quad (m^2 / s)$$

$$(R^2 = 0.82) \quad \text{دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس} \quad (۸-۳) \\ D_o = 10^{(-14.07+5.25 \times (\frac{w}{cm}))} \quad (m^2 / s)$$

این در حالی است که رابطه Thomas که در Life-365 مبنای محاسبات ضریب انتشارپذیری بتن با نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی و در زمان ۲۸ روز است به صورت زیر می‌باشد [۴]:

$$(R^2 = 0.71) \quad (۹-۳) \\ D_o = 10^{(-12.06+2.4 \times (\frac{w}{cm}))} \quad (m^2 / s)$$

علت تقسیم‌بندی بر حسب درصدهای مختلف میکروسیلیس این بود که در بررسی دقیق‌تر منحنی‌ها، مشاهده شد که در هر درصد مشخص از این ماده، ضرایب مقدار مشخص و متفاوتی نسبت به سایر درصدها دارند. در نتیجه نتایج به چهار دسته تقسیم شدند. ولی به علت پراکندگی داده‌ها در مقدار ۱۲/۵ درصد میکروسیلیس نتوانستیم به همگرایی مناسب و در نتیجه به رابطه‌ای دست یابیم.

همچنین با بررسی عددی نتایج CS و زمان، سعی به یافتن رابطه‌ای برای مدل کردن رفتار شد که در نهایت توانستیم دو رابطه ریاضی مناسب (با همگرایی بیش از ۰/۹) به دست آوریم. در این روابط t بر حسب ماه و CS بر حسب درصد وزنی بتن می‌باشد. این روابط که اهمیتشان توسط Ann و سایرین (۲۰۰۹) مورد بررسی قرار گرفته است نشان‌دهنده وابستگی مقدار کلر سطحی به زمان و انباشت کلر اولیه است [۵]. اگرچه این روابط برای زمان‌های بیشتر از ۳ ماه ارائه شده، در مراجع به این موضوع اشاره شده است که در نواحی رویارویی شدید مانند جزرومد، انباشت کلراید روی سطح بتن تقریباً آبی می‌باشد [۶].

(درصد وزن بتن)

$$(R^2 = 0.94)$$

(۱۰-۳)

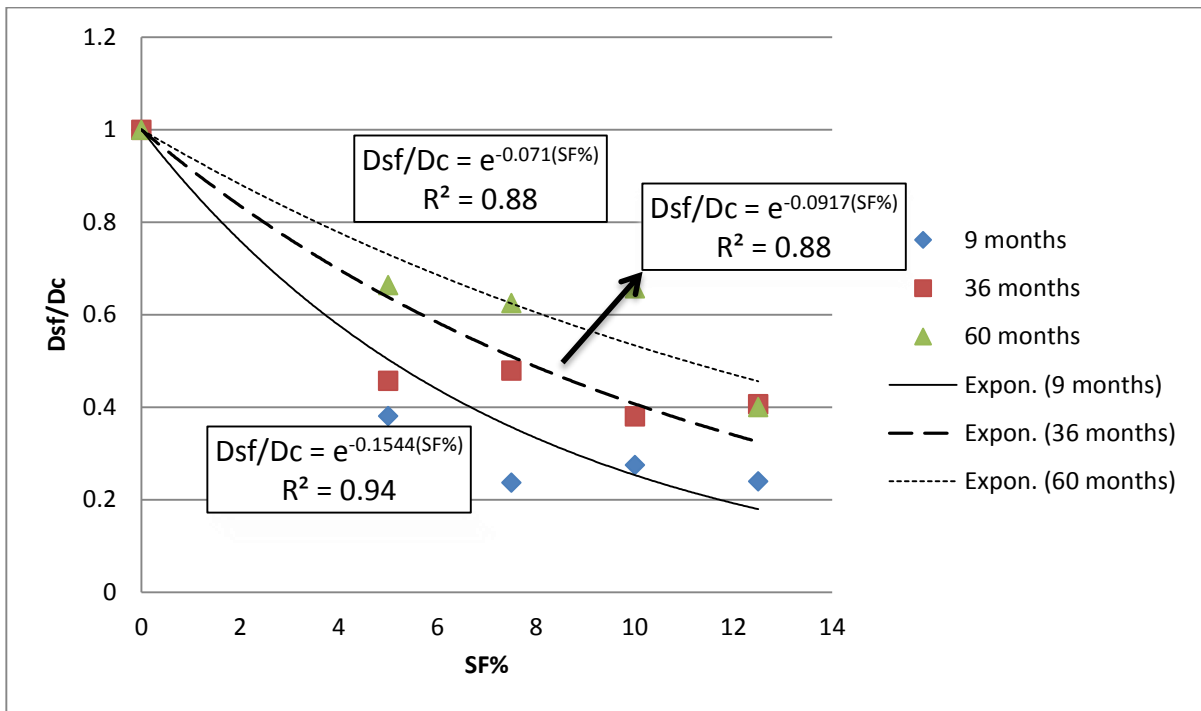
$$C_s = 0.192 \times t + 0.33$$

(درصد وزن بتن)

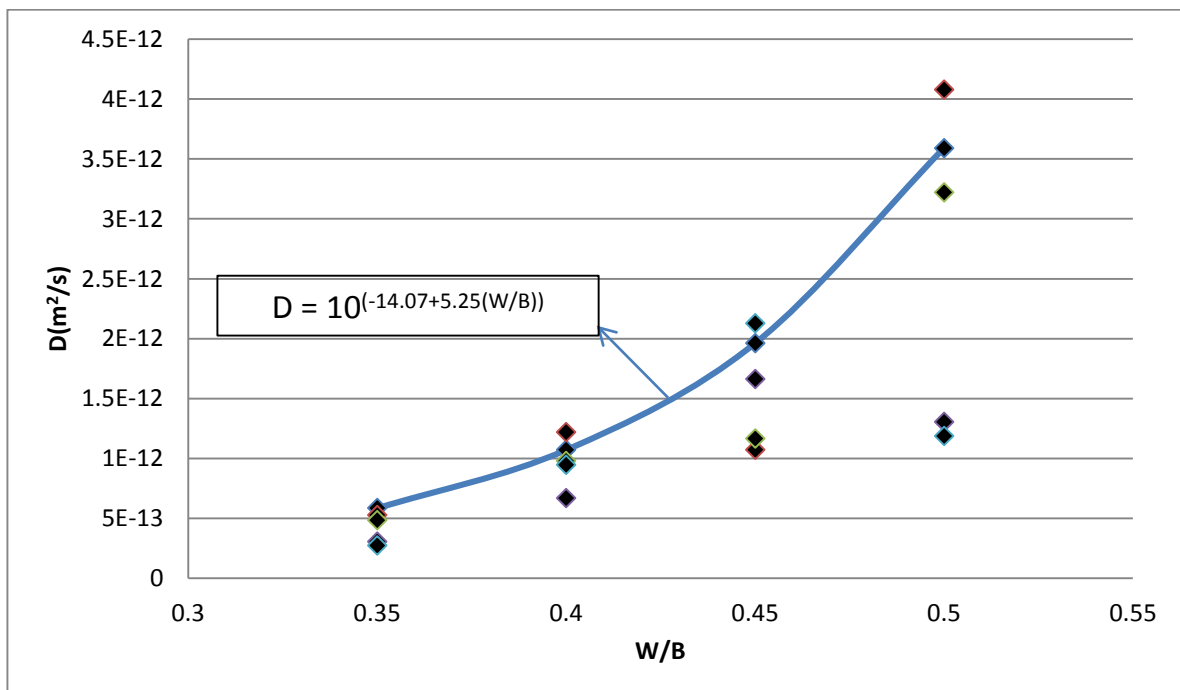
$$(R^2 = 0.91)$$

(۱۱-۳)

$$C_s = 0.171 \times \sqrt{t} + 0.054$$



شکل ۵-۲۲: رابطه برقرار شده بین  $D$  و درصد میکروسیلیس در زمان‌ها متفاوت



#### ۴- نتیجه گیری

۱- افزودن میکروسیلیس به بتن می‌تواند حدود ۴۰ درصد تا ۷۸ درصد ضریب انتشارپذیری را کاهش دهد. به کار بردن حداقل ۵ درصد میکروسیلیس در طرح اختلاط مقدار ضریب انتشارپذیری را به طور متوسط در حدود ۶۰ درصد کاهش می‌دهد.

۲- استفاده از ۵ درصد میکروسیلیس در طرح اختلاط بتن در نهایت عملکرد تقریباً یکسانی با طرح‌های اختلاط حاوی ۷/۵ درصد، ۱۰ درصد و ۱۲/۵ درصد میکروسیلیس دارد که در نتیجه با در نظر گرفتن ملاحظات اقتصادی در پروژه می‌توان از همین مقدار حداقل استفاده کرد.

۳- در طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ می‌توان از به کار بردن میکروسیلیس صرف‌نظر کرد ولی در سایر نسبت‌های آب به سیمان برای داشتن بتن مقاوم باید از ۵ درصد میکروسیلیس استفاده شود.

۴- در صورت استفاده از میکروسیلیس با حداقل مقدار (۵ درصد) و بیشتر، می‌توان از کاهش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۵ به ۰/۴ و ۰/۳۵ صرف‌نظر کرده و به بتن با مقاومت مناسب دست یافت. به عبارت دیگر در صورت استفاده از میکروسیلیس، تفاوت چندانی در مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلر در نسبت‌های آب به مواد سیمانی ۰/۴۵، ۰/۴ و ۰/۳۵ وجود ندارد.

۵- با کاهش نسبت آب به سیمان در هنگام ارائه طرح اختلاط از ۰/۵ به ۰/۴۵، مقدار ضریب انتشارپذیری در حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد. در صورت طراحی نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴ و ۰/۳۵ به جای ۰/۵، به ترتیب ۳۵ درصد و ۷۵ درصد کاهش را در مقدار ضریب انتشارپذیری شاهد خواهیم بود.

۵-مراجع

[1]. ACI 211.1R, Guide for Selecting Proportions for Trial Mixture of Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

[2]. ASTM C33-99a, Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02.

[3]. Thomas. Michael, Bent. Evan. Life365 program-Service life and life cycle cost analysis of reinforced concrete exposed to chlorides. Version 1.0.0. 2001.

[4] Ann K.Y., Ahn J.H., Ryou J.S., The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. *Construction and Building Materials*; 23(1): 239–45, 2009.

[5]. Weyers, R.E, Service life model for concrete structures in chloride laden environments. *ACI Material Journal*, 95(4):445-453, 1998.