

مقاله کد (417-1S) D

مقایسه زمانی تأثیر میکروسیلیس و متاکائولن بر دوام بتن در شرایط خورنده خلیج فارس

هادی چیتگر^۱، مهدی شفیعی فر^۲، محمد شکرچی زاده^۳

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

Email: Hadi.5251@gmail.com

۲- استاد دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Email: Shafiee@modares.ac.ir

۳- دانشیار دانشکده فنی، دانشگاه تهران

Email: Shekarch@ut.ac.ir

چکیده

امروزه کاهش عمر مفید، هزینه‌های تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی آسیب دیده در اثر خوردگی و دیگر عوامل مخرب در مناطق خورنده مانند سواحل خلیج فارس، صدمات جبران ناپذیری بر اقتصاد کشور و توسعه پایدار در این مناطق وارد کرده است. بدیهی است که از جمله مهم‌ترین عوامل تخریب چنین سازه‌هایی، نفوذ کلرید و خوردگی ناشی از آن می‌باشد. عوامل مختلفی از جمله نسبت آب به مواد سیمانی و استفاده از مواد پوزولانی بر دوام بتن در محیط‌های دریایی اثرگذار هستند. بر این اساس مطالعات بیشتر در زمینه دوام بتن در محیط‌های دریایی امری ضروری می‌باشد. در پژوهش حاضر از نتایج بدست آمده از مطالعات میدانی روی نمونه‌های بتنی قرار گرفته در جزیره قشم در محیط خلیج فارس در دو بازه زمانی ۳ و ۹ ماهه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که متاکائولن با افزایش زمان رویارویی نمونه‌ها عملکرد پایایی بهتری نسبت به میکروسیلیس دارد و میکروسیلیس در بازه زمانی کوتاه‌تر و در عمر اولیه بتن عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. نتایج آنالیز حساسیت انجام شده نشان می‌دهد درصد جایگزینی متاکائولن تأثیر بیشتری روی نفوذ کلرید به بتن دارد. همچنین تأثیر زمان رویارویی بر ضریب انتشارپذیری بتن (پارامتر زمان یا ضریب زمان) مورد بررسی قرار گرفت و برای شرایط مختلف این پژوهش عدد مناسبی برای آن پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: میکروسیلیس، متاکائولن، کلرید، زمان رویارویی

Abstract

Nowadays reduce the useful lifetime and the cost of repairing and rebuilding of concrete structures damaged by corrosion and other damaging agents in corrosive areas like the Persian Gulf has created irreparable damage to the economy and sustainable development in these regions. Various factors including the ratio of water to cementitious materials and the use of pozzolanic materials are affecting the durability of concrete in marine environments. Accordingly, further studies on the durability of concrete in the marine environment are essential. In the present study the results of field studies on concrete specimens located in Qeshm Island in Persian Gulf environment in two periods of 3 and 9 months are used. The results indicate that with increased time of exposure, metakaolin has better durability performance than microsilica and microsilica shows better durability performance at early age of concrete. Sensitivity analysis results show that the percentage replacement of metacaolin has more effect on the chloride penetration into concrete. Also, the effect of exposure time on the diffusion coefficient of concrete (time parameter or coefficient of time) was investigated and for different conditions of this study an appropriate number was suggested.

Keywords: Microsilica, Metakaolin, Chloride, Time of Exposure

۱- مقدمه

مسئله عدم پایایی بتن در محیط‌های خورنده یکی از مشکلات اساسی در دنیا می‌باشد و خوردگی میلگرد در اثر نفوذ کلرید از رایج‌ترین عوامل خرابی‌های زودرس در سازه‌های بتن‌آرمه است. کم شدن عمر مفید سازه‌های اجرا شده در مناطق ساحلی سالیانه خسارات مالی زیادی را در پی تعمیر، بازسازی و نگهداری از این سازه‌ها در بر دارد و مطالعات بیشتر در این زمینه ضروری می‌باشد. در جهت بهبود عملکرد بتن در محیط‌های دریایی راهکارهای مختلفی چون کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از پوزولان‌های مختلف تأثیرگذار می‌باشد [۱].

همچنین با توجه به اینکه مناطق ساحلی خلیج فارس یکی از مستعدترین نواحی در جهان جهت خوردگی آرماتور و در نتیجه کاهش عمر سازه‌های بتنی به شمار می‌آیند، انجام تحقیقات بیشتر در زمینه پایایی بتن در این نواحی در جهت توسعه کشور امری ضروری می‌باشد. قابل ذکر است که بروز این استعداد در این مناطق نتیجه ترکیب عوامل زیر می‌باشد:

- غلظت بالای یون‌های کلراید و سولفات در محیط خلیج فارس.
- رطوبت و دمای بالا به همراه بادهای خشک و گرم.
- تغییرات زیاد دما و رطوبت در طول شبانه‌روز.
- کیفیت پایین مصالح به همراه تکنولوژی نامناسب اجرا [۱،۴].

تحقیقات گذشته نشان می‌دهد نفوذ کلرید با جایگزینی درصدی از سیمان با میکروسیلیس [۹-۱،۴] و متاکائولن [۱۶-۱،۱۰] و همچنین با افزایش مدت رویارویی کاهش می‌یابد [۲۰-۱۵،۱۷]. همچنین نفوذ کلرید با افزایش زمان رویارویی کاهش می‌یابد که این کاهش با افزایش زمان رویارویی به خاطر سه تأثیر اصلی زیر می‌باشد [۹]:

۱- هیدراتاسیون سیمان که منتهی می‌شود به کاهش تخلخل بتن و بر اساس آن ضریب انتشار، این تأثیر مخصوص سنین اولیه بتن می‌باشد.

۲- ایجاد یک لایه از آراگونیت (کانی کربناته) و بروسیت $(Mg(OH)_2)$ روی سطح بتن که ضریب انتشار کلرید را کاهش می‌دهند. که در نواحی که بتن با آب دریا تماس دارد ایجاد می‌شوند مثل ناحیه جزرومدی و پاشش و مغروق.

۳- واکنش محصولات هیدراتاسیون سیمان با یون‌های موجود در دریا. یون‌های کلرید با تری کلسیم آلومینات واکنش می‌دهد تا کلروآلومینات‌ها را تشکیل دهد. یون‌های منیزیم و سولفات با اجزای سیمان واکنش می‌دهند تا بروسیت و اترینگایت را تشکیل دهند. که این واکنش‌ها تخلخل بتن را کاهش می‌دهند [۲۱].

میکروسیلیس یک محصول مصنوعی و فرعی حاصل از کوره‌های قوس الکتریکی در جریان تولید فلز سیلیسیم یا آلیاژهای سیلیسیم بخصوص آلیاژهای فروسیلیس نیز می‌باشد. 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 [۱،۷]. میکروسیلیس یک ماده پوزولانی و بسیار واکنش پذیر به دلیل نرمی زیاد و مقدار زیاد دی اکسید سیلیکون غیر متبلور موجود در آن است. مکانیسم میکروسیلیس در بتن می‌تواند اساساً تحت سه نقش توضیح داده می‌شود: (۱) ریز ساختن اندازه منافذ و متراکم سازی ماتریس، (۲) واکنش با آهک آزاد و (۳) ریز سازی سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه [۷].

در بتن ویژگی‌های فصل مشترک بین ذرات سنگدانه و خمیر سیمان نقش مهمی در پیوند خمیر سیمان و سنگدانه‌ها دارد. میکروسیلیس اضافه شده ضخامت فاز انتقال در ملات و درجه جهت گیری کریستال‌های CH در آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ضخامت در مقایسه با ملات فقط شامل سیمان پرتلند معمولی کاهش می‌یابد و درجه جهت گیری کریستال‌های CH در فاز انتقال با اضافه کردن میکروسیلیس کاهش می‌یابد. بنابراین خواص مکانیکی و دوام بتن به دلیل افزایش مقاومت سطحی یا باند بهبود می‌یابد [۷].

برخی از مزایای استفاده از میکروسیلیس عبارتند از: مقاومت فشاری بالا در اوایل عمر بتن، مقاومت کششی و خمشی و مدول الاستیسیته بالا، افزایش سختی، پیوستگی بالا، بالا بردن دوام بتن، نفوذپذیری بسیار کم در برابر نفوذ کلرید و آب، افزایش مقاومت در برابر سایش، مقاومت نسبت به حمله شیمیایی کلریدها، اسیدها، نیترات‌ها و سولفات‌ها و مقاومت الکتریکی بالا و نفوذ پذیری کم [۷].

همچنین در سالهای اخیر متاکائولن به دلیل خواص پوزولانی بالای آن مورد مطالعه قرار گرفته است. برخلاف سایر پوزولان‌ها، متاکائولن یک محصول اصلی است نه یک محصول فرعی و ثانویه. ماده خام برای تولید متاکائولن $(Al_2Si_2O_7)$ ، کائولین می‌باشد. کائولین یک ماده معدنی بسیار ریز سفید و رسی می‌باشد که بطور سنتی در تولید چینی استفاده می‌شود [۱،۱۴]. کائولن یک ماده معدنی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه، این مواد رسی بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهند. دمایی که در آن کائولینیت که اصلی‌ترین جزء تشکیل دهنده کائولن است بواسطه دی‌هیدراکسیونیزاسیون آب از دست

می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. به منظور تولید متاکائولن رس کائولن را تا محدوده دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه حرارت می‌دهند [۱،۲۲]. متاکائولن در واکنش با $Ca(OH)_2$ ، ژل C-S-H را در درجه حرارت محدود تشکیل می‌دهد و همچنین در واکنش با CH، فازهای اکسید الومینیوم (Alumina) شامل C_4AH_{13} ، C_2ASH_8 و C_3AH_6 را تشکیل می‌دهد [۱۴،۲۲].

متاکائولن موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه‌مدت و درازمدت می‌شود. بر اساس تحقیقات انجام شده، استفاده از متاکائولن ریزساختار، تخلخل، نفوذناپذیری، مقاومت فشاری، مقاومت در برابر حمله سولفات بتن و دیگر خصوصیات مکانیکی و پایایی بتن را بهبود می‌بخشد [۲۲، ۱۶، ۱۲، ۵-۲۴].

با توجه به مطالب بیان شده هدف از این مطالعه، مقایسه و بررسی میکروسلیس و متاکائولن در بازه‌ای از زمان رویارویی (سه و نه ماهه) در محیط دریایی خلیج فارس می‌باشد.

۲- برنامه آزمایش

در این تحقیق مجموعاً ده طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت که شامل چهار طرح با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵ و ۰/۵ و فاقد پوزولان و شش طرح دارای پوزولان شامل سه طرح با درصد جایگزینی میکروسلیس برابر ۵، ۷/۵ و ۱۰ و سه طرح دیگر با درصد جایگزینی متاکائولن برابر ۵، ۱۰، ۱۵ و با نسبت آب به سیمان ثابت ۰/۴ بودند. میزان عیار مواد سیمانی در تمام طرح اختلاطها ثابت و برابر ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. همچنین نمونه‌های منشوری غیر مسلح در ابعاد ۱۵×۱۵ سانتیمتر و به طول ۶۰ سانتیمتر به عنوان نمونه‌های بررسی میزان نفوذ کلرید در بتن ساخته شدند. سپس این نمونه‌ها در شرایط رویارویی واقعی پاشش در محیط خلیج فارس و در جزیره قشم قرار گرفتند.

۲-۱ مصالح مصرفی

سیمان مصرف شده برای ساخت نمونه‌ها، سیمان پرتلند تیپ دو هرمزگان می‌باشد. میکروسلیس از کارخانه فرو آلیاژ ازنا و متاکائولن از شرکت آسان سرام تهیه شدند. مصالح سنگی درشت‌دانه مورد استفاده به صورت شکسته و آهکی و مصالح سنگی ریزدانه به صورت گرد گوشه و سیلیسی-آهکی می‌باشند. مصالح سنگی از سنگدانه‌های موجود در منطقه انتخاب شده و بزرگترین اندازه سنگدانه‌های مصرفی ۱۹ میلی‌متر است. همچنین به منظور دستیابی به کارائی یکنواخت و روانی مورد نظر بتن تازه از مواد فوق روان‌کننده پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شده است. آنالیز شیمیایی مصالح مصرفی در طرح‌های اختلاط در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی و پوزولان‌ها

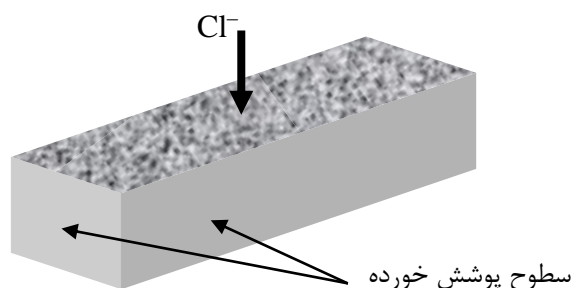
عنوان	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	L.O.I
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	۶۳	۱/۸	۱/۶	۰/۵	۰/۶	۲
میکروسلیس	۹۳/۱۶	۱/۱۳	۰/۷۲	-	۱/۶	۰/۰۵	-	-	۱/۵۸
متاکائولن	۵۱/۸۵	۴۳/۸۷	۰/۹۹	۰/۲	۰/۱۸	-	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۵۷

۲-۲ طرح اختلاطها و نحوه نگهداری نمونه‌ها

طرح‌های اختلاط مختلف با نسبت ۶۲ درصد درشت‌دانه به ۳۸ درصد ریزدانه در جدول ۲ مشاهده می‌شود. پس از پر کردن قالب‌ها از میز لرزان برای تراکم آنها استفاده شد و سپس قالب‌ها با گونی خیس و یک لایه محافظ برای جلوگیری از تبخیر، پوشانده و به مدت ۲۴ ساعت در شرایط محیطی نگهداری شدند. پس از باز کردن قالب‌ها، نمونه‌های بتنی به مدت ۲ روز دیگر در شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب جزیره قشم عمل‌آوری مرطوب شدند و پس از عمل‌آوری چهار سطح جانبی و سطح تحتانی نمونه‌های منشوری با پوشش سطحی با پایه پلی‌اورتان که در برابر شرایط حاد خلیج فارس مقاوم است، پوشانده شد تا نفوذ به صورت یک بعدی صورت گیرد (شکل ۱). این پوشش پس از دو روز کاملاً خشک شده و سپس در اردیبهشت ماه ۱۳۸۷ در شرایط رویارویی پاشش در محل اسکله کاوه واقع در جزیره قشم قرار داده شدند.

جدول ۲- مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد نمونه	نوع پوزولان	نسبت آب به مواد سیمانی	عیار سیمان (Kg/m^3)	پوزولان جایگزین (Kg/m^3)	مقدار آب (Kg/m^3)	فوق روان کننده (Kg/m^3)	اسلامپ (cm)
C1	بدون پوزولان	۰/۳۵	۴۰۰	-	۱۴۰	۰/۳۵	۸
C2	بدون پوزولان	۰/۴	۴۰۰	-	۱۶۰	۰/۲	۷
C2	بدون پوزولان	۰/۴۵	۴۰۰	-	۱۸۰	۰/۱	۱۵
C3	بدون پوزولان	۰/۵۰	۴۰۰	-	۲۰۰	۰	۱۸
SF5	میکروسیلیس	۰/۴	۳۸۰	۲۰	۱۶۰	۱/۲	۶
SF7.5	میکروسیلیس	۰/۴	۳۷۰	۳۰	۱۶۰	۱/۴	۵
SF10	میکروسیلیس	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۱/۶	۸
MK5	متاکائولن	۰/۴	۳۸۰	۲۰	۱۶۰	۰/۸	۵
MK10	متاکائولن	۰/۴	۳۶۰	۴۰	۱۶۰	۱/۴	۵/۵
MK15	متاکائولن	۰/۴	۳۴۰	۶۰	۱۶۰	۱/۶	۸



شکل ۱- شمای نمونه های منشوری پس از اجرای پوشش

۲-۳ شرایط فرار گرفتن نمونه ها

ارتفاع محل قرارگیری نمونه‌ها در ناحیه پاشش بالاتر از حداکثر ارتفاع مد منطقه و به گونه‌ای انتخاب شد که نمونه‌ها هیچ‌گاه در طول سال در آب دریا مستغرق نباشند. بطوری که تنها پاشش ذرات آب دریا را بر روی آنها داشته باشیم. بعد از انتخاب محل قرارگیری نمونه‌ها، سطح محل با بتن‌ریزی کاملاً هموار و مستحکم شد تا نمونه‌ها از هر گونه آسیب احتمالی در امان باشند (شکل ۲).

۳- نتایج آزمایش‌ها و تحلیل نتایج

۳-۱ مقایسه زمانی میکروسیلیس و متاکائولن

با توجه به جدول ۳ و ۴ مشاهده می‌شود که میکروسیلیس و متاکائولن با ۵ درصد جایگزینی دارای میزان کاهش برابری بین ۳ و ۹ ماه می‌باشند و عملکرد تقریباً برابری با هم دارند. ولی در درصد جایگزینی ۱۰ درصد متاکائولن در طول زمان عملکرد بهتری دارد و نسبت به میکروسیلیس کاهش بیشتری (حدوداً ۱۰ درصد بیشتر) در ضریب انتشار ایجاد کرده است. علاوه بر این همانطور که مشاهده می‌شود مقدار کلر سطحی برای درصدهای جایگزینی برابر میکروسیلیس و متاکائولن در بازه زمانی ۳ و ۹ ماهه تقریباً برابر می‌باشند بجز برای درصد جایگزینی برابر ۵ درصد در بازه زمانی ۹ ماهه.



شکل ۲- نمونه های قرارگرفته در ناحیه پاشش در جزیره قشم

جدول ۳- مقدار ضریب انتشار و کلر سطحی برای درصدهای جایگزینی برابر برای متاکائولن و میکروسیلیس در بازه زمانی ۳ و ۹ ماهه

کد نمونه	ضریب انتشار کلرید 10^{-12} (متر مربع بر ثانیه)	مقدار کلر سطحی (درصد وزنی بتن)
مدت رویارویی ۳ ماهه	SF5	1.03
	MK5	1.07
	SF10	0.98
	MK10	1.08
مدت رویارویی ۹ ماهه	SF5	0.65
	MK5	0.8
	SF10	0.88
	MK10	0.86

جدول ۴- درصد کاهش ضریب انتشار کلرید برای درصدهای جایگزینی برابر بین بازه زمانی ۳ و ۹ ماه

کد نمونه	درصد کاهش ضریب انتشار کلرید بین ۳ و ۹ ماه
SF5	31.31
MK5	30.69
SF10	34.27
MK10	44.08

همچنین با توجه به جدول ۵ مشاهده می شود که برای درصد جایگزینی ۵ درصد، متاکائولن در هر دو بازه زمانی ۳ و ۹ ماهه مقدار ضریب انتشار کمتری نسبت به میکروسیلیس دارد ولی در ۱۰ درصد جایگزینی در بازه زمانی ۳ ماهه ضریب انتشار میکروسیلیس کمتر می باشد ولی با افزایش زمان رویارویی و در بازه زمانی ۹ ماهه متاکائولن عملکرد بهتری از خود نشان می دهد

و ضریب انتشار آن از میکروسیلیس کمتر می شود که باز هم گواه به عملکرد بهتر متاکائولن در مدت طولانی تر و عملکرد بهتر میکروسیلیس در بازه زمانی کوتاه تر و عمر اولیه بتن دارد.

جدول ۵- نسبت ضریب انتشار کلرید برای درصد های جایگزینی برابر در بازه زمانی ۳ و ۹ ماهه

درصد جایگزینی	D _{SF} / D _{MK}	
	سه ماهه	۹ ماهه
5%	1.24	1.23
10%	0.94	1.11

۲-۳ بررسی اثر زمان بر ضریب انتشار کلرید (بررسی پارامتر α یا ضریب زمان)

Thomas و همکارش Stanish (۲۰۰۲) [۲۵] در دانشگاه تورنتو به بررسی اثر زمان بر روی کاهش ضریب انتشار پذیری بتن پرداختند. در این بررسی بر اساس مطالعات و آزمایش های انجام شده توسط محققان پیشین رابطه ۱ را به عنوان مدل حاکم بر کاهش ضریب انتشار پذیری با زمان فرض نمودند.

$$D = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad (1)$$

که در آن D_0 ضریب انتشارپذیری بتن در زمان مرجع t_0 ، α متغیر مربوط به آهنگ تغییرات ضریب انتشارپذیری بتن و t زمان مورد نظر می باشد.

برای مقایسه، ضرایب α پیشنهاد شده توسط محققان مختلف در جدول ۶ ذکر شده است.

جدول ۶- مقایسه مقدار عددی α

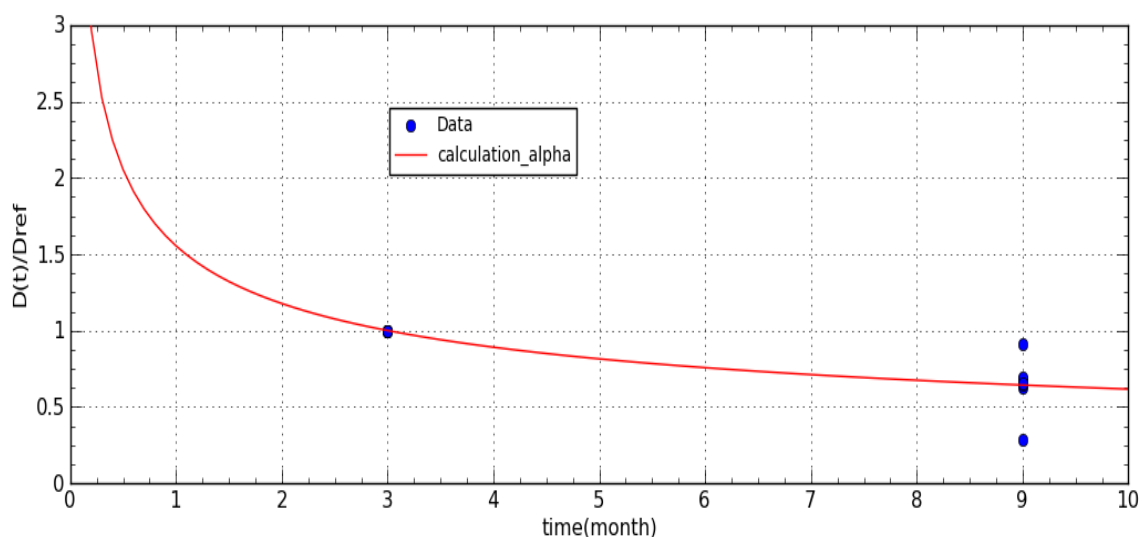
	مقدار عددی α			
	سیمان پرتلند	سیمان با دوده سیلیس	سیمان با خاکستر بادی	سیمان با روباره
نتایج Thomas و Stanish [۲۵]	۰/۳۲	-	۰/۷۹ و ۰/۶۶	-
نتایج Thomas و Bentz [۲۶]	۰/۲۶۴	-	۰/۷۰	۰/۶۲
نرم افزار Duracon [۲۷]	۰/۳۷	۰/۴۰	۰/۶۰	-
Di Maio و همکاران [۲۸]	-	-	-	۰/۵۶
Cheng و همکاران [۱۹]	۰/۱۳۱	۰/۳۸۸ تا ۰/۲۵۵ برای درصد های جایگزینی و نسبت های آب به سیمان مختلف		
عزیزی مقدم و همکاران [۵]	۰/۲۴	۰/۲۴	-	-
رفیعی و همکاران [۱۵]	-	۰/۳۰۷	-	-

مقادیر α برای تمام نمونه ها محاسبه شده است. با بررسی نتایج جدول ۷ می توان به این نتیجه رسید که به طور کلی ضریب α با افزایش درصد دوده سیلیس در بتن افزایش می یابد (البته در میکروسیلیس برابر ۷/۵ درصد کاهش کمی داریم که احتمالاً به دلیل خطا در ضریب انتشار بدست آمده می باشد)، این بدان معنا است که تغییرات ضریب انتشارپذیری در طول زمان در بتن هایی که در آن ها از دوده سیلیس استفاده شده است بیشتر از بتنی می باشد که از دوده سیلیس استفاده نشده است. همچنین مشاهده می شود که مقدار ضریب α برای متاکائولن با افزایش درصد متاکائولن به شدت افزایش می یابد و این بدان معنا است که تغییرات ضریب انتشارپذیری در طول زمان در بتن هایی که در آن ها از متاکائولن استفاده شده است بیشتر از بتنی می باشد که از متاکائولن استفاده نشده است. همچنین برای نسبت های مختلف آب به سیمان، رابطه ای برای ضریب زمان مشاهده نمی شود.

جدول ۷- نتایج ضریب زمان (α) برای بررسی اثر زمان بر کاهش ضریب انتشارپذیری بتن

کد نمونه	ضریب زمان (α)
C1	0.4307
C2	0.3949
C3	0.0828
C4	1.1457
SF5	0.3417
SF7.5	0.3377
SF10	0.3824
MK5	0.3338
MK10	0.5294
MK15	0.6512

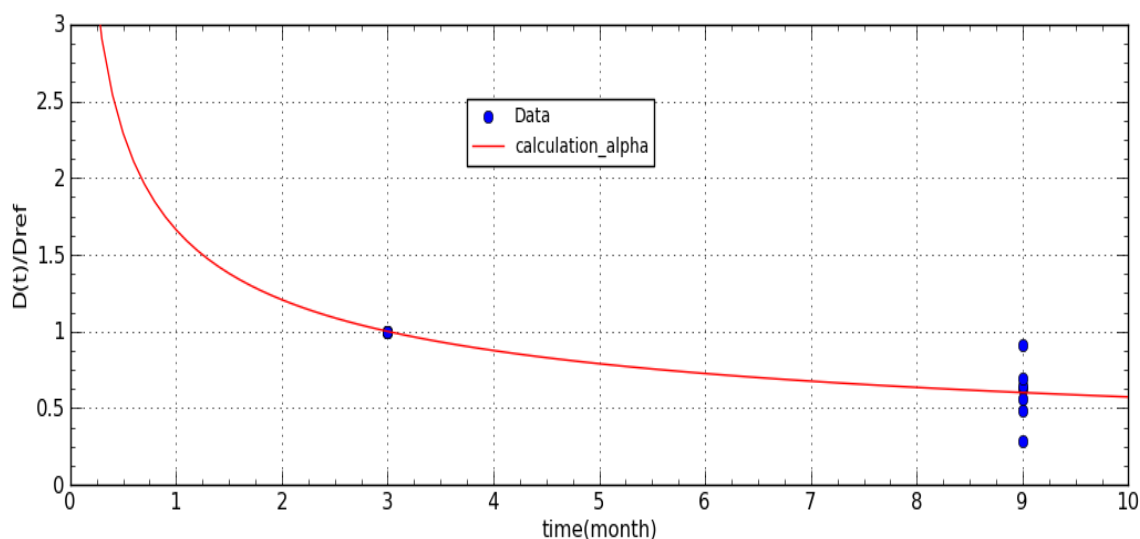
برای آن که بتوان به یک دید کلی نسبت به مقدار ضریب زمان (α) بدون توجه به نسبت آب به سیمان و درصد دوده سیلیس دست یافت یک برازش کلی از تمام نتایج (نتایج شامل نمونه‌های بدون پوزولان و نمونه‌های با میکروسیلیس) به دست آمده صورت پذیرفت که نتیجه آن را می‌توان در شکل ۳ مشاهده نمود.



$\alpha_{SF} =$	0.4018
$R^2 =$	0.6833

شکل ۳- برازش از تمام نتایج نسبت آب به سیمان و میکروسیلیس برای یافتن یک ضریب کاهش کلی زمان برای میکروسیلیس

همچنین برای آن که بتوان به یک دید کلی نسبت به مقدار ضریب کاهش زمان (α) بدون توجه به نسبت آب به سیمان و درصد متاکائولن دست یافت یک برازش کلی از تمام نتایج (نتایج شامل نمونه‌های بدون پوزولان و نمونه‌های با متاکائولن) به دست آمده صورت پذیرفت که نتیجه آن را می‌توان در شکل ۳ مشاهده نمود.



$\alpha_{MK} =$	0.463
$R^2 =$	0.7136

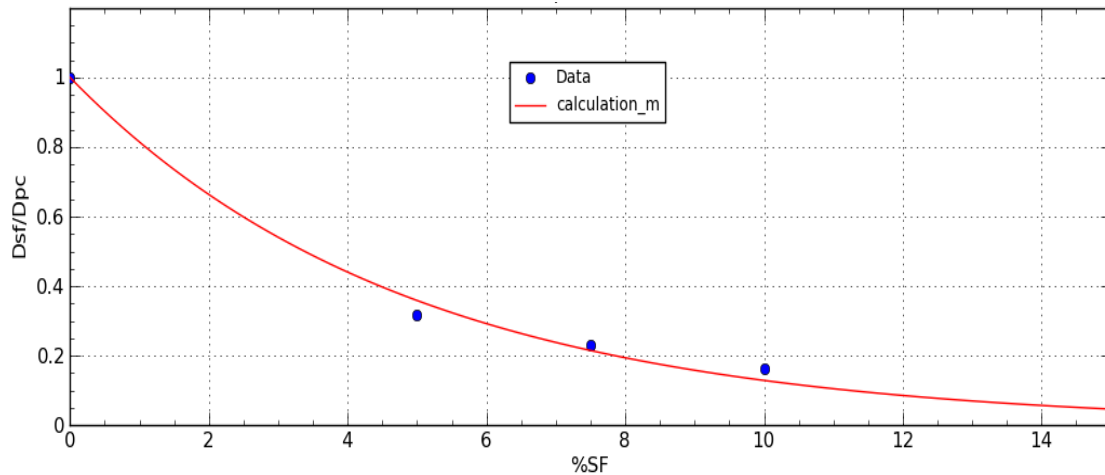
شکل ۳- برازش از تمام نتایج نسبت آب به سیمان و متاکائولن برای یافتن یک ضریب کاهش کلی زمان برای متاکائولن

همانطور که از مقادیر عددی بدست آمده برای ضریب زمان (α) مشاهده می‌شود اعداد نزدیک به اعداد ارائه شده توسط نرم افزار Duracon ($\alpha=0.4$) می‌باشد (جدول ۶). البته اعداد بدست آمده در این تحقیق فقط برای شرایط قرارگیری پاشش می‌باشد.

۳-۳ بررسی پارامتر m برای میکروسیلیس (پارامتر بکار رفته در رابطه تعیین ضریب انتشار کلرید در بتن حاوی میکروسیلیس از ضریب انتشار بتن شاهد)

طبق رابطه ارائه شده توسط Thomas در نرم‌افزار Life 365 [۲۹]، با بررسی عددی نتایج D و درصد جایگزینی دوده سیلیس در $\frac{w}{cm}$ های ثابت، یک رابطه ریاضی با ضریب همگرایی نسبتاً خوب بدست می‌آید. رابطه ارائه شده توسط Thomas یک رابطه نمایی بصورت $D_{sf} = D_{pc} \times e^{-m(sf\%)}$ می‌باشد که در $\frac{w}{cm}$ های مختلف، ضریب m متفاوت است. در این رابطه، D_{sf} ، ضریب انتشارپذیری یون کلر در بتن حاوی دوده سیلیس و D_{pc} ضریب انتشارپذیری در بتن شاهد می‌باشد. در ادامه با برازش نتایج بدست آمده در دو بازه زمانی ۳ و ۹ ماهه مقدار پارامتر m بدست می‌آید (شکل ۴ و شکل ۵). با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که ضریب m با افزایش زمان کاهش می‌یابد که البته این نتیجه دور از انتظار نمی‌باشد زیرا می‌دانیم که با گذشت زمان اثر مثبت دوده سیلیس بر بتن کاهش می‌یابد. برای مقایسه و بررسی رابطه بدست آمده، می‌توان m بدست آمده را با اعداد پیشنهادی سایر تحقیقات که در جدول ۸ آمده مقایسه کرد.

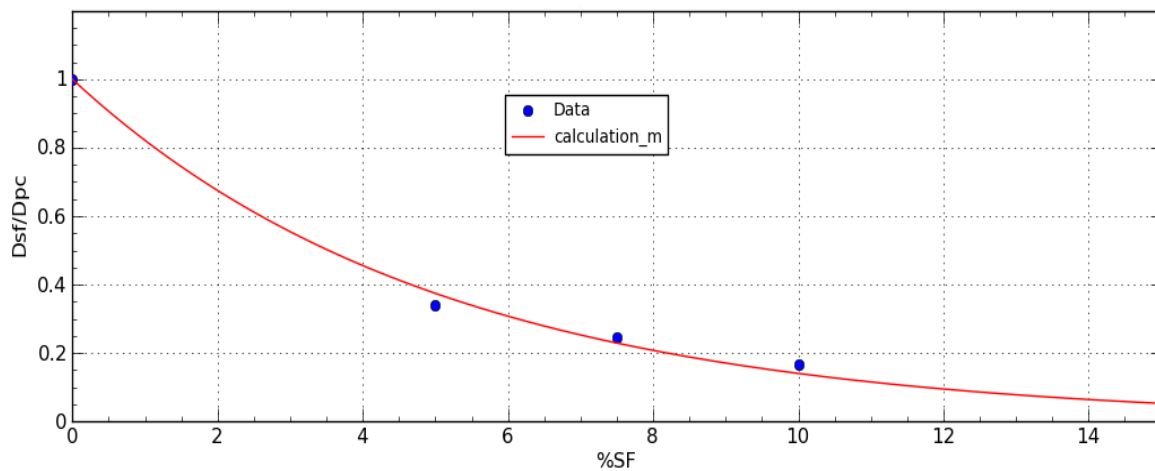
مدت رویارویی ۳ ماهه



m 3 month exposure =	-0.2051
R ² =	0.9932

شکل ۴- ضریب m برای دو دوره زمانی ۳ ماهه

مدت رویارویی ۹ ماهه



m 9 month exposure =	-0.1965
R ² =	0.9949

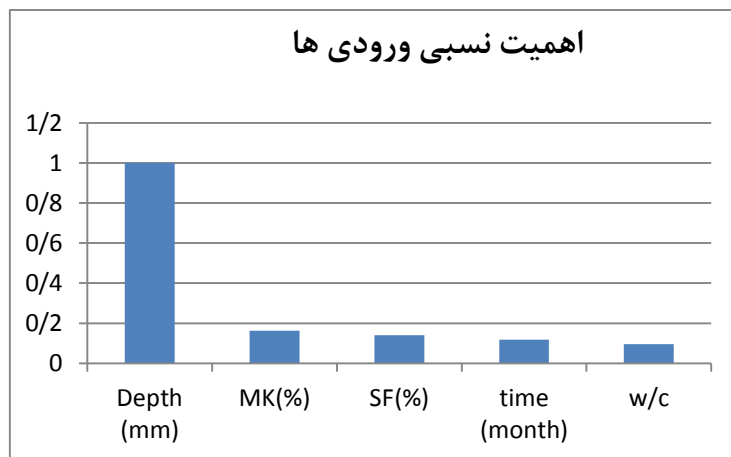
شکل ۵- ضریب m برای دو دوره زمانی ۹ ماهه

جدول ۸- مقادیر m طبق تحقیقات انجام شده قبلی

Life 365 [۲۹]	m = -۰/۱۶۵		
[۱۵] رفیعی و همکاران	m 3 month = -۰/۲۱۸	m 9 month = -۰/۱۶۲	m 36 month = -۰/۰۷۹

۳-۴ آنالیز حساسیت

طبق خروجی آنالیز حساسیت توسط نرم افزار Tiberius Data Mining Version 7.0.3 [۳۰]، درصد کلرید به ترتیب به عمق از سطح بتن، درصد جایگزینی متاکائولن، درصد جایگزینی میکروسیلیس، زمان رویارویی و نسبت آب به سیمان وابسته می باشد (شکل ۶).



شکل ۶- حساسیت درصد کلرید نسبت به پارامترهای ورودی شبکه در ناحیه پاشش

بر این اساس می توان نتیجه گرفت تا سن نه ماهه بتن، متاکائولن تأثیر بیشتر و در واقع عملکرد بهتری نسبت به میکروسیلیس بر پایایی بتن در محیط خلیج فارس دارد.

۴- نتیجه گیری

با توجه به مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل داده های بدست آمده در ناحیه پاشش، نتایج زیر قابل برداشت است:

- نتایج نشان دهنده عملکرد بهتر متاکائولن در مدت طولانی تر و عملکرد بهتر میکروسیلیس در بازه زمانی کوتاه تر و عمر اولیه بتن می باشد.
- میکروسیلیس و متاکائولن با ۵ درصد جایگزینی دارای میزان کاهش برابری برای ضریب انتشار بین دو بازه زمانی ۳ و ۹ ماه می باشند و عملکرد تقریباً برابری با هم دارند. ولی در درصد جایگزینی ۱۰ درصد متاکائولن در طول زمان عملکرد بهتری دارد و نسبت به میکروسیلیس کاهش بیشتری (حدوداً ۱۰ درصد بیشتر) در ضریب انتشار ایجاد می کند.
- ضریب زمان (α) در رابطه $D = D_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^\alpha$ با افزایش درصد میکروسیلیس در بتن کاهش می یابد و با افزایش درصد متاکائولن افزایش می یابد و همچنین به طور کلی با افزایش نسبت آب به سیمان ضریب زمان افزایش می یابد. مقدار ضریب زمان برای بتن حاوی میکروسیلیس برابر ۰/۴۰۲ و برای بتن حاوی متاکائولن برابر ۰/۴۶۳ بدست آمد.
- مقدار پارامتر m در رابطه $D_{sf} = D_{pc} \times e^{-m(sf\%)}$ برای ناحیه پاشش، در بازه زمانی ۳ ماهه برابر ۰/۲۰۵- و در بازه زمانی ۹ ماهه برابر ۰/۱۹۷- بدست آمد که نشان دهنده آن است که ضریب m با افزایش زمان رویارویی کاهش ناچیزی می یابد.
- درصد کلرید به ترتیب به عمق از سطح بتن، درصد جایگزینی متاکائولن، درصد جایگزینی میکروسیلیس، زمان رویارویی و نسبت آب به سیمان وابسته می باشد.

۵- قدردانی

در انتها نویسندگان این مقاله بر خود لازم می دانند از کارشناسان انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران بخصوص آقایان ولی پور، لیثی و پرگر برای همکاری در این تحقیق کمال تشکر و قدردانی را مبذول دارند.

۶- مراجع

- ولی پور، مهدی، "بررسی انتشار یون کلر بر خوردگی بتن مسلح در شرایط اقلیمی جزیره قشم با در نظر گرفتن شرایط قرارگیری و کاربرد مواد پوزولانی مختلف"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.

2. Ghods, P. and Chini, M. and Alizade, R. and Hoseini, M., "The effect of different exposure conditions on the chloride diffusion into concrete in the Persian Gulf region", ConMAT Conference. Vancouver, CD proceeding (International conference), 2005.
۳. محمودی، امین و افشین، حسن و حکیم زاده، حبیب و جلالی وحید، داود، " بررسی دوام بتن مسلح در ناحیه پاششی (Splash Zone) و ناحیه اتمسفری (Atmospheric Zone) محیط دریایی خورنده شدید"، هشتمین کنگره ملی عمران، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸.
4. Ashrafi, H.R. and Ramezaniapour, A.A., "Service Life Prediction of Silica Fume Concretes", International Journal of Civil Engineering. Vol. 5, No. 3., p. 182-197, 2007.
۵. عزیزی مقدم، برمک، " بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن با توجه به شرایط قرارگیری و پوشش سطحی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۴.
6. Song, H.-W., Jang, J.-CH., Saraswathy, V., Byun, K.-J., "An estimation of the diffusivity of silica fume concrete", Building and Environment 42, p. 1358-1367, 2007.
7. Iqbal Khana, M., Siddique, R., "Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties", Conservation and Recycling 57, p. 30-35, 2011.
8. Gesoglu, M., Guneyisi, E., "Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume", Materials and Structures 40, p. 953-964, 2007.
9. Costa, A., Appleton, J., "Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I Main parameters affecting chloride penetration", Materials and Structures/Materiaux et Constructions 32, p. 252-259, May 1999.
10. Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, S., Moradian, M., "In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment" Construction and Building Materials 46, p. 63-70, 2013.
11. Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L., "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete", Construction and Building Materials 20, pp. 858-865, 2006.
12. Badogiannis, E., Tsvivilis, S., "Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete", Cement & Concrete Composites 31, pp. 128-133, 2009.
13. Ferreira, M., Costa, P.M., "The effect of metakaolin on chloride penetration into concrete", Nordic Concrete Research, pp. 127-130, Finland, 2011.
14. Ramezaniapour, A.A., Bahrami, J.H., "Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes", Construction and Building Materials 30, pp. 470-479, 2012.
15. Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., "Long-term chloride diffusion in silica fume concrete in harsh marine climates", Cement & Concrete Composites 31, pp. 769-775, 2009.
16. Guneyisi, E., Mermerdas, K., "Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin" Materials and Structures 40, pp. 1161-1171, 2007.
۱۷. رفیعی، علیرضا، " بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس با رویکرد احتمال اندیشانه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۶.
18. Nokken, M., Boddy, A., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A., "Time dependent diffusion in concrete-three laboratory studies", Cement and Concrete Research 36, p. 200-207, 2006.
19. Cheng, U.K., Karmiadji, W.Z., Huang, W.H., "The Effect of Time Dependent Chloride Diffusion Coefficient on the Chloride Ingress in Concrete", International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE), p. 7098-7101, 2011.
20. Comite Euro-International Du Beton (CEB), "Durable Concrete Structure (Design Guide)", 1992.
21. Igarashi, SI., Watanabe, A., Kawamura, M., "Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages", Cement and Concrete Research.
22. Guneyisi, E., Gesoglu, M., Mermerdas, K., "Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin", Materials and Structures 41, pp. 937-949, 2008.
23. Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., Mobasher, B., "Transport properties in metakaolin blended concrete", Construction and Building Materials 24, pp. 2217-2223, 2010.

24. Dr.Vaishali., Ghorpade, G., Sudarsana Rao, H., “Chloride ion permeability studies of metakaolin based high performance concrete”, International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 3 No. 2, pp. 1617-1623, Feb 2011.
25. Stanish, K., Thomas, M., “The use of bulk diffusion tests to establish time-dependent concrete chloride diffusion coefficients”, Cement and Concrete Research 33, pp. 55-62, 2003.
26. NT Build 492: NordTest, “Method for Accelerated Chloride Penetration into Hardened Concrete”, 1995.
27. Ferreira, M., Jalali, S., “Software for Probability-Based Durability Analysis of Concrete Structures” In CONSEC’04 Int. Conf. on Concrete under Severe Conditions, Seoul, Korea, 2004.
28. Yury A. Villagran-Zaccardi., Valeria L. Taus., Angel A. Di Maio., “Time Evolution of Chloride Penetration in Blended Cement Concrete”, ACI Materials Journal, V. 107, No. 6, pp. 593-601, November-December 2010.
29. Thomas, MDA., Bentz, EC., Life 365: Computer Program for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides, American Concrete Institute, Committee 365, Service Life Prediction, Detroit, Michigan, 2001.
30. Tiberius Data Mining Version 7.0.3., Released 8th, “Predictive Modelling Software and Services,” Melbourne, Australia, 2011, Available from: <http://www.tiberius.biz/>.