

## عملکرد بلندمدت نفوذ یون کلرید در بتن حاوی دوده سیلیسی در شرایط جزر و مدی خلیج فارس

محمدحسین تدین<sup>۱</sup>، محمد شکرچی زاده<sup>۲</sup>، محسن تدین<sup>۳</sup>، مهدی ولی پور<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکترای سازه‌های دریایی، مهندسی عمران، پردیس دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- رییس مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۳- رییس هیات مدیره انجمن بتن ایران

۴- دانشجوی دکترا، مرکز مطالعات مهندسی زیرساخت (CIES)، دانشگاه علم و فناوری Missouri، آمریکا

### چکیده

یکی از مخرب‌ترین عوامل در سازه‌های بتنی مسلح در محیط‌های دریایی، نفوذ یون کلرید در بتن می‌باشد. یون کلرید می‌تواند باعث تخریب لایه محافظ روی میلگرد داخل بتن گردد و منجر به شروع خوردگی فولاد در بتن شود. برای بهبود دوام و شرایط بهره‌برداری از سازه‌های بتنی مسلح در شرایط مهاجم با دما، رطوبت و غلظت زیاد یون کلرید محیط مانند خلیج فارس، استفاده از پوزولان و بویژه دوده سیلیسی توسط محققان مختلفی پیشنهاد شده است.

در این تحقیق، انتشار یون کلرید و مقاومت فشاری بتن حاوی دوده سیلیسی با درصد جایگزینی ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد و نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و همچنین بتن بدون دوده سیلیسی و با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ بررسی شده است. همه بتن‌ها در دو شرایط آزمایشگاهی و شرایط جزر و مدی در سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران واقع در جزیره قشم قرار گرفتند. آزمون‌های آزمایشگاهی پس از ۳ ماه در معرض آب نمک طبق روش استاندارد، و آزمون‌های در محل پس از ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در شرایط رویارویی جزر و مدی سایت تحقیقاتی مورد آزمایش نفوذ یون کلرید قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از دوده سیلیسی علاوه بر افزایش مقاومت فشاری، به شدت نفوذپذیری بتن در برابر یون کلرید را بهبود می‌دهد. بنظر می‌رسد استفاده از ۷/۵ درصد دوده سیلیسی حالت بهینه مصرف این پوزولان چه از لحاظ مقاومتی و چه از نظر نفوذ یون کلرید می‌باشد. در طولانی مدت نیز، ضریب انتشار و غلظت یون کلرید سطحی طرح‌های مختلف اختلاف بسیار کمی با یکدیگر پیدا کرده‌اند.

### واژه‌های کلیدی

بتن، ضریب انتشار یون کلرید، غلظت کلرید سطحی، دوام در محیط خلیج فارس، ناحیه جزر و مدی، دوده سیلیسی، محیط دریایی

## مقدمه

نفوذ یون کلرید در سازه‌های بتنی مسلح در معرض محیط‌های دریایی یکی از مخرب‌ترین عوامل در بحث دوام سازه‌های بتنی می‌باشد. پدیده نفوذ یون کلرید باعث فعال شدن میلگرد داخل بتن می‌گردد و منجر به شروع خوردگی فولاد داخل بتن می‌شود. نفوذ یون کلرید در بتن تحت تاثیر عواملی نظیر آب و هوای گرم و همچنین غلظت زیاد نمک در آب دریا همانند شرایط خلیج فارس، تشدید می‌گردد. بر عمین اساس سرعت نفوذ و حتی تخریب در شرایط دمایی و محیطی خلیج فارس حدود ۸ برابر شرایط محیطی دریای حوزه اسکاندیناوی و اقیانوس اطلس (منطقه نوردیک) می‌باشد. اختلاف دمای متوسط سالیانه این دو منطقه حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد [۱].

نفوذ یون کلرید در بتن اشباع در شرایط غیر پایدار از قانون دوم فیک یا انتشار تبعیت می‌کند که در رابطه ۱ مشاهده می‌شود.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right)}{\partial x} \quad (1)$$

که در آن  $C$  غلظت یون کلرید در عمق  $x$  از سطح بتن و در زمان  $t$ ، و  $D$  ضریب انتشار یون کلرید در بتن می‌باشد. با فرض ثابت بودن  $D$ ، حل تحلیلی رابطه ۱ برای شرایط مرزی  $C=c_s$  (در حالت  $x=0$  و  $t \geq 0$ ) و شرایط اولیه  $C=c_i$  (در حالت  $x > 0$  و  $t=0$ ) در رابطه ۲ مشاهده می‌شود [۲].

$$C(x,t) = c_s - (c_s - c_i) \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \quad (2\text{-الف})$$

$$C(x,t) = c_i + (c_s - c_i) \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4Dt}} \right) \quad (2\text{-ب})$$

که در آن  $\operatorname{erf}()$  تابع خطا مطابق رابطه ۳، و  $\operatorname{erfc}()$  متمم تابع خطا مطابق رابطه ۴ می‌باشد.

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du \quad (3)$$

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) \quad (4)$$

با توجه به رابطه ۲ مشاهده می‌شود که کاهش ضریب انتشار یون کلرید می‌تواند نفوذ یون کلرید را کنترل نماید. پژوهش‌های مختلف نشان داده‌اند که نسبت آب به سیمان و همچنین استفاده از مواد جایگزین سیمان نظیر پوزولان‌ها می‌تواند تاثیر زیادی بر مقاومت‌های مکانیکی، نفوذپذیری و پارامترهای دوام بتن داشته باشد. کاهش نسبت آب به سیمان منجر به کاهش تخلخل بتن می‌شود و این کاهش می‌تواند باعث افزایش مقاومت فشاری و همچنین کاهش نفوذپذیری بتن گردد [۳-۵]. بطور کلی، استفاده از پوزولان‌ها نظیر دوده سیلیسی باعث بهبود نفوذپذیری و دوام بتن می‌شود [۶]. این بهبود ناشی از استفاده از پوزولان بخاطر بهبود توزیع ابعاد و ساختار حفرات مویینه خمیر سیمان داخل بتن، بهبود ناحیه انتقالی بین سنگدانه و خمیر سیمان، کاهش نفوذ یون کلرید، و همچنین افزایش مقیدسازی یون کلرید می‌باشد [۳، ۴، ۷-۹].

دوده سیلیسی یک پوزولان رایج در پروژه‌های عمرانی می‌باشد که مطابق مطالعات انجام شده می‌تواند منجر به افزایش زیاد مقاومت فشاری و کاهش شدید نفوذپذیری آن گردد [۳، ۶، ۱۰].

شرایط روبرویی بتن در محیط بهره‌برداری می‌تواند تاثیر زیادی بر پارامترهای نفوذ یون کلرید نظیر ضریب انتشار و حتی غلظت یون کلرید سطحی داشته باشد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که دو شرایط روبرویی جزر و مدی و پاشش جزو شدیدترین شرایط نسبت به شرایط قرارگیری در هوا و یا مغروق در آب، در زمینه نفوذ یون کلرید و خوردگی میلگرد در بتن می‌باشند [۳، ۱۱].

در این تحقیق، نتایج بررسی بلندمدت نفوذ یون کلرید در بتن برای بررسی اثرات نسبت آب به سیمان و همچنین استفاده از دوده سیلیسی در شرایط آزمایشگاهی و همچنین در شرایط جزر و مدی در محیط دریایی خلیج فارس در سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در جزیره قشم ارائه می‌شود. به همین منظور، ۴ طرح بدون پوزولان و با نسبت‌های آب به سیمان مختلف (۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵) و ۳ طرح حاوی دوده سیلیسی جایگزین سیمان با درصد جایگزینی ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد و با نسبت آب به سیمان

۰/۴۰ ساخته شد و آزمایش‌های مقاومت فشاری و نفوذ یون کلرید در بتن در شرایط آزمایشگاهی و در محل، بر روی آن‌ها انجام گرفت.

### برنامه آزمایشگاهی

#### مواد و مصالح

سیمان مصرفی در این تحقیق سیمان پرتلند نوع ۲ محصول کارخانه سیمان هرمزگان، و دوده سیلیسی محصول کارخانه قزوآلیاژ ازنا می‌باشد. مشخصات سیمان و دوده سیلیسی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات سیمان و دوده سیلیسی مصرفی

مشخصات (%)									نام
LOI	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
۲	۰/۶	۰/۵	۱/۶	۱/۸	۶۳	۳/۵	۵	۲۱	سیمان
۱/۵۸	-	-	۰/۰۵	۱/۶	-	۰/۷۲	۱/۱۳	۹۳/۱۶	دوده سیلیسی

مصالح سنگی مصرفی شامل شن با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر و ار نوع سنگدانه آهکی شکسته و ماسه از نوع گردگوشه می‌باشد. در همه طرح‌ها از ۶۲ درصد شن و ۳۸ درصد ماسه استفاده گردید. در ضمن در طرح‌های حاوی دوده سیلیس و همچنین در سایر طرح‌ها در صورت نیاز از افزودنی فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلاتی برای دستیابی به روانی مناسب و پخش یکنواخت مواد سیمانی استفاده گردید.

#### طرح‌های مخلوط

طرح‌های استفاده شده در این تحقیق شامل ۴ طرح بدون پوزولان و با نسبت‌های آب به سیمان ۰/۳۵، ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ و همچنین ۳ طرح حاوی دوده سیلیسی به میزان جایگزینی ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد مجموع موادسیمانی و با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ می‌باشد. جزییات طرح‌های مخلوط استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مشخصات طرح‌های مخلوط مصرفی

مشخصات طرح							نام طرح
یون کلرید اولیه (c <sub>i</sub> )	اسلامپ (mm)	فوق‌روان‌کننده (kg/m <sup>3</sup> )	آب آزاد (kg/m <sup>3</sup> )	دوده سیلیسی (kg/m <sup>3</sup> )	عیار سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	w/b	
۰/۰۱۵	۸۰	۰/۳۵	۱۴۰	-	۴۰۰	۰/۳۵	C1
۰/۰۱۵	۷۰	۰/۲	۱۶۰	-	۴۰۰	۰/۴۰	C2
۰/۰۱۵	۱۵۰	۰/۱	۱۸۰	-	۴۰۰	۰/۴۵	C3
۰/۰۱۵	۱۸۰	۰	۲۰۰	-	۴۰۰	۰/۵۰	C4
۰/۰۱	۶۰	۱/۲	۱۶۰	۲۰	۳۸۰	۰/۴۰	SF5
۰/۰۱	۵۰	۱/۴	۱۶۰	۳۰	۳۷۰	۰/۴۰	SF7.5
۰/۰۱	۸۰	۱/۶	۱۶۰	۴۰	۳۶۰	۰/۴۰	SF10

#### آزمونه‌ها و شرایط رویارویی

برای تعیین توزیع غلظت یون کلرید (پروفیل یون کلرید) در بتن، دو دسته آزمونه تهیه شد. دسته اول آزمونه‌های آزمایشگاهی شامل مکعب‌های با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متری که برای تعیین مقاومت فشاری نیز بکار رفت [۱۲]. دسته دوم آزمونه‌های قرار گرفته در محیط سایت تحقیقاتی به شکل منشور و با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۶۰۰ میلی‌متر می‌باشد. آزمونه‌ها پس از ساخت، بر روی میز لرزان متراکم شده و پس از یک روز از قالب خارج شدند. سپس آزمونه‌های آزمایشگاهی در شرایط استاندارد و آزمونه‌های سایت تحقیقاتی در دمای محیط منطقه ۲ روز عمل‌آوری رطوبتی شدند. پس از آن، آزمونه‌های نفوذ یون کلرید از ۵ وجه توسط پوشش اپوکسی رنگ شدند تا تنها از یک طرف که سمت بالای آزمونه است، نفوذ اتفاق بیافتد.

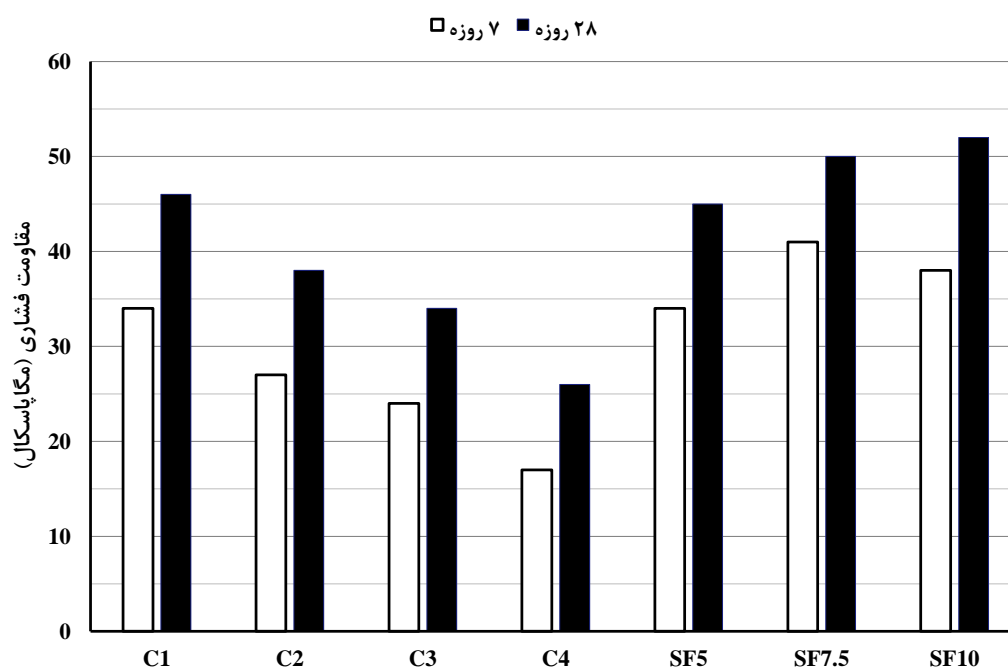
آزمونه‌های قرار گرفته در سایت تحقیقاتی در شرایط جزر و مدی آب دریای خلیج فارس در جزیره قشم قرار گرفتند. آزمونه‌های آزمایشگاهی نیز همانطور که در ادامه بیان می‌شود، در شرایط روش استاندارد آماده سازی شدند.

### نمونه برداری و آزمایش‌ها

آزمایش مقاومت فشاری بتن بر روی مکعب بتنی طبق EN 12390-3 و در سن ۷ روز و ۲۸ روز انجام شده است. ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها مطابق استاندارد EN 12390-2 بوده است [۱۳، ۱۴]. پروفیل غلظت یون کلرید محلول در اسید (یون کلرید کل) پس از ۳ ماه رویارویی در شرایط آزمایشگاهی و پس از ۳، ۹، ۲۷ و ۵۰ ماه در شرایط جزر و مدی سایت تحقیقاتی مطابق استاندارد ASTM C1556 انجام گرفت [۱۵]. پودرگیری از نمونه‌ها برای اندازه‌گیری میزان یون کلرید در اعماق بتن با دقت ۰/۵ میلی‌متر انجام گرفت. پودر مربوط به ۱ میلی‌متر اول نیز مطابق دستور آزمایش، استفاده نشد. پودرهای مربوط به اعماق مختلف بصورت جداگانه طبق دستور آزمایش ASTM C114 (بخش ۱۹) و ASTM C1152 آماده‌سازی و سپس غلظت یون کلرید محلول در اسید آن اندازه‌گیری گردید [۱۶، ۱۷].

### نتایج آزمایش‌ها و تفسیر آن‌ها

نتایج مقاومت فشاری مربوط به طرح‌های مختلف در شکل شماره ۱ مشاهده می‌شود. هر نتیجه، حاصل میانگین نتایج سه نمونه مربوط به هر طرح اختلاط می‌باشد.



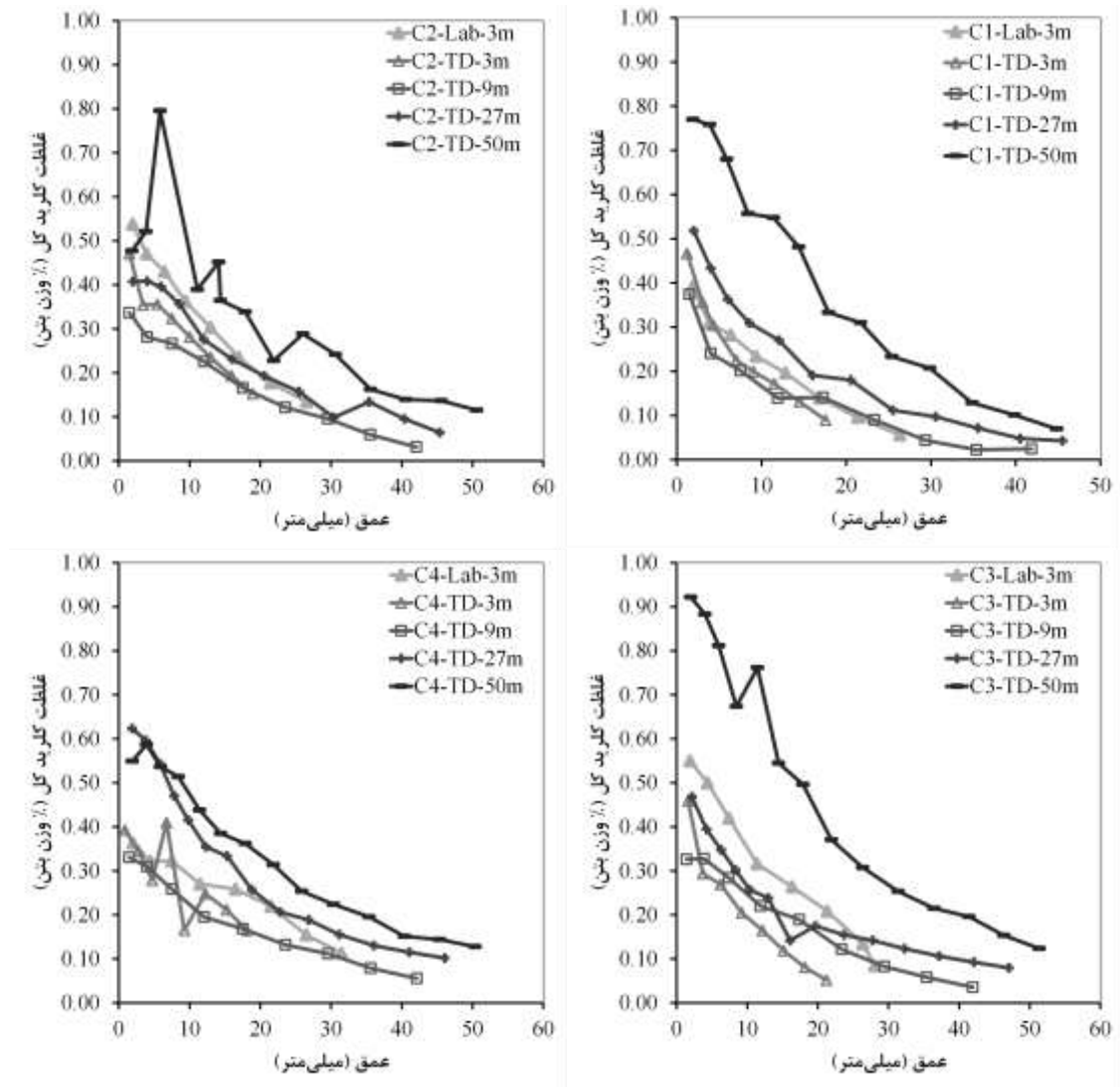
شکل ۱- مقاومت فشاری طرح‌های مختلف در سنین ۷ و ۲۸ روز

مطابق نمودار شکل ۱، افزایش مقاومت فشاری در اثر کاهش نسبت آب به سیمان به‌وضوح مشاهده می‌گردد. بطور متوسط، کاهش ۰/۰۵ در نسبت آب به سیمان منجر به افزایش ۲۰ درصدی در مقاومت فشاری شده است. استفاده از دوده سیلیسی نیز مقاومت فشاری بتن را افزایش داده است. در سن ۲۸ روز، استفاده از ۱۰ درصد دوده سیلیسی بیشترین مقاومت فشاری را ایجاد نموده است که مقاومتی حدود ۳۵ درصد بیش از بتن بدون دوده سیلیسی می‌باشد. کمترین مقاومت هم مربوط به استفاده از ۵ درصد دوده سیلیسی و با افزایش حدود ۲۰ درصد در مقاومت فشاری بوده است. قابل ذکر است که عملکرد ۵ درصد دوده سیلیسی در افزایش مقاومت فشاری، مشابه عملکرد کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ به ۰/۳۵ می‌باشد. در سن ۷ روز، استفاده از ۷/۵ درصد دوده سیلیسی منجر به بیشترین مقاومت و افزایش حدود ۵۰ درصد در مقاومت فشاری شده است. رابطه ۵ برای تاثیر استفاده از دوده سیلیسی بر افزایش مقاومت فشاری بتن نسبت به حالت بدون استفاده از دوده سیلیسی بر اساس نتایج موجود، پیشنهاد می‌گردد.

$$I_f = 1.46 \times SF \quad (5)$$

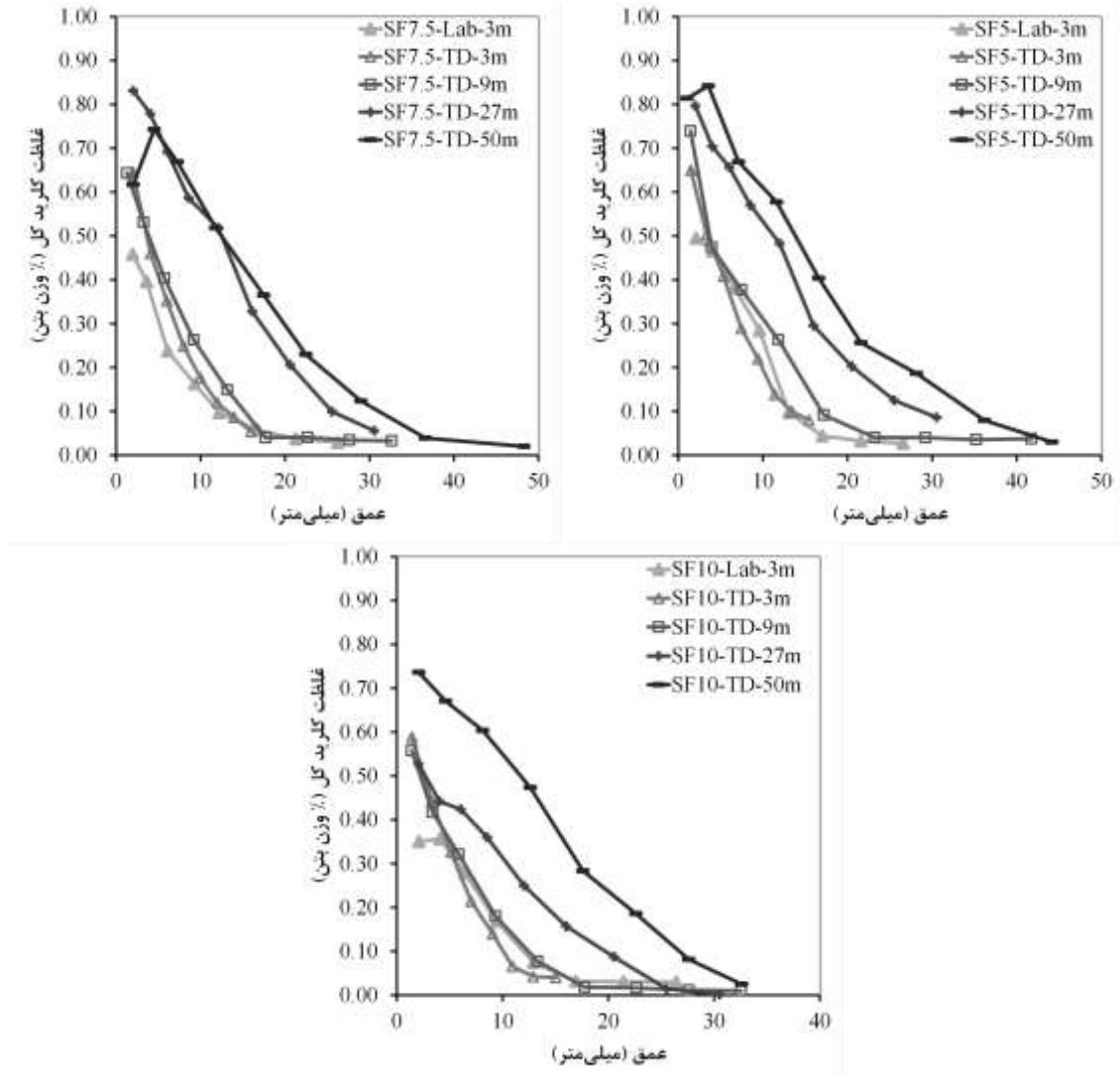
که در آن،  $I_f$  میزان افزایش مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز در اثر استفاده از دوده سیلیسی (MPa)، و SF درصد استفاده از دوده سیلیسی نسبت به کل مواد سیمانی مصرفی می‌باشد.

مقایسه مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز نشان می‌دهد که نمونه C4 دارای رشد مقاومتی بیش از ۵۰ درصد می‌باشد. با کاهش نسبت آب به سیمان میزان رشد مقاومت کاهش یافته است و همچنین برای طرح‌های حاوی دوده سیلیسی این رشد باز هم کمتر شده است. در بین نمونه‌های حاوی دوده سیلیسی، نمونه SF7.5 دارای کمترین میزان رشد (حدود ۲۵ درصد) و نمونه SF10 دارای بیشترین میزان رشد مقاومت فشاری از ۷ به ۲۸ روز (حدود ۳۵ درصد) را دارا می‌باشد. پروفیل یون کلرید کل آزمون‌های بتنی برای زمان‌های رویارویی مختلف در شرایط جزر و مدی و همچنین در شرایط آزمایشگاهی پس از ۳ ماه رویارویی، در شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. بطور کلی، مشاهده می‌شود که با پیشرفت زمان، غلظت یون کلرید در هر مکان افزایش می‌یابد. البته در برخی حالات کاهش غلظت یون کلرید در قسمت‌های سطحی و افزایش شدید در اعماق مخصوصاً برای طرح‌های با نفوذپذیری بیشتر مشاهده می‌شود. از طرف دیگر، برای طرح‌های با کیفیت بالاتر، غلظت یون کلرید زیادی در سطح مشاهده می‌گردد که منجر به کاهش غلظت یون در اعماق بتن شده است.



شکل ۲- غلظت یون کلرید کل (محلول در اسید) برای آزمون‌های بدون پوزولان

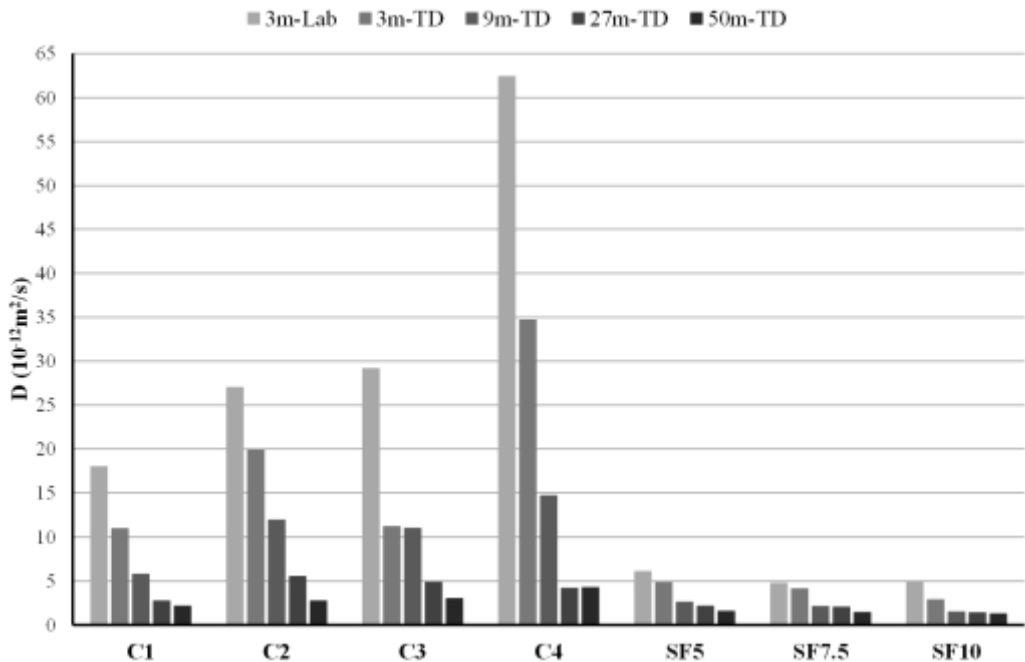
بطور کلی با افزایش نسبت آب به سیمان، میزان یون کلرید نفوذی افزایش یافته است. البته در برخی حالات موارد خلاف این موضوع هم مشاهده می‌گردد. در ضمن، میزان نفوذ در شرایط آزمایشگاهی پس از ۳ ماه رویارویی، بیشتر از میزان نفوذ یون کلرید پس از ۳ ماه و حتی ۹ ماه در شرایط جزر و مدی سایت تحقیقاتی بوده است.



شکل ۳- غلظت یون کلرید کل (محلول در اسید) برای آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی

مشاهده می‌شود که استفاده از دوده سیلیسی منجر به کاهش شدید نفوذ یون کلرید در بتن شده‌اند. البته همانطور که بیان شد، گاهی در اعماق کم، غلظت یون کلرید آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی بیش از آزمون بدون پوزولان می‌باشد. ولی در اعماق بتن، کاهش شدید نفوذ یون کلرید مشاهده می‌شود. پس از ۳ ماه رویارویی، پروفیل یون کلرید کل برای شرایط آزمایشگاهی و جزر و مدی تقریباً در یک سطح می‌باشد. در شرایط آزمایشگاهی افزایش مقدار استفاده از دوده سیلیسی باعث کاهش نفوذ شده است ولی جایگزینی ۷/۵ و ۱۰ درصد چندان تفاوت زیادی ایجاد نکرده است. در شرایط جزر و مدی، استفاده از ۵ و ۷/۵ درصد دوده سیلیسی مشابه یکدیگر باعث کاهش نفوذ شده‌اند ولی آزمون SF10 نفوذ کمتری نشان می‌دهد. در ضمن میزان یون کلرید در اعماق کم در آزمون بدون پوزولان C2، کمتر از آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی است. پس از ۹ ماه رویارویی، در شرایط جزر و مدی، با افزایش استفاده دوده سیلیسی از ۵ تا ۱۰ درصد، میزان نفوذ کاهش یافته است. پس از ۲۷ ماه رویارویی، در شرایط جزر و مدی، با افزایش استفاده دوده سیلیسی از ۵ تا ۱۰ درصد، میزان نفوذ کاهش یافته است. البته عملکرد درصد جایگزینی ۵ و ۷/۵ درصد بنظر مشابه می‌رسد. پس از ۵۰ ماه رویارویی، در شرایط جزر و مدی، با افزایش استفاده دوده سیلیسی از ۵ تا ۱۰ درصد، میزان نفوذ کاهش یافته است. در ضمن میزان یون کلرید در اعماق کم در آزمون بدون پوزولان C2، تفاوت چندان با آزمون‌های حاوی دوده سیلیسی ندارد.

در شکل ۴، تغییرات ضریب انتشار یون کلرید در طول زمان برای طرح‌های مختلف مشاهده می‌شود. بطور کلی با گذشت زمان، ضریب انتشار یون کلرید کاهش یافته است. روند کاهش ضریب انتشار در طول زمان نیز به مرور کمتر شده است به نحوی که می‌توان گفت ضریب انتشار در سن ۵۰ ماه تقریباً به مقدار ثابتی رسیده و پس از آن تغییر چندان نخواهد داشت.



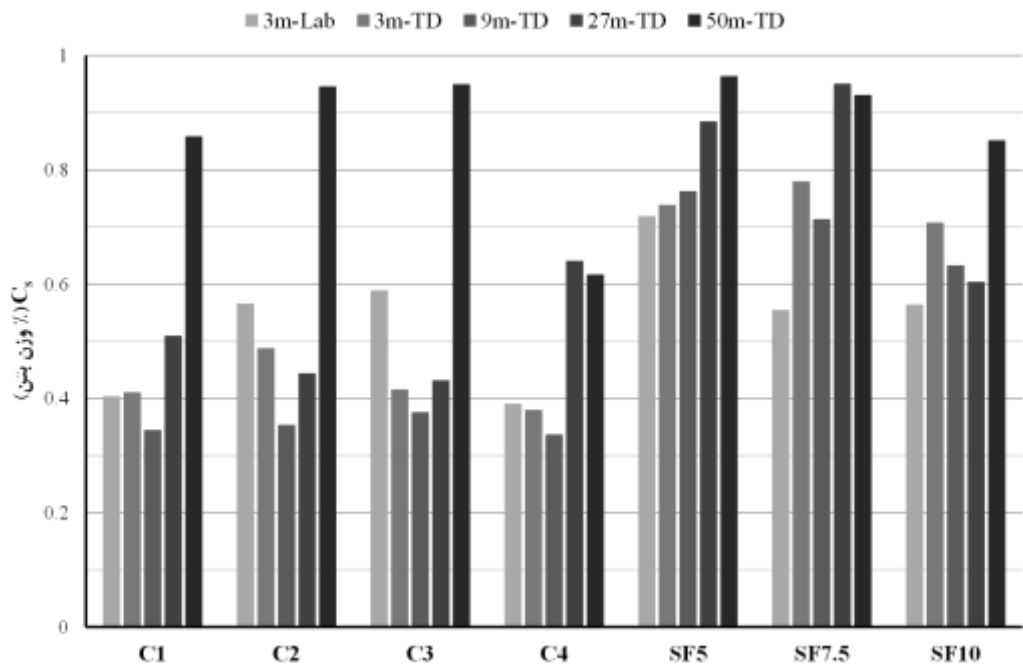
شکل ۴- تغییرات ضریب انتشار یون کلرید در طول زمان

مشاهده می‌شود که بطور کلی ضریب انتشار یون کلرید با افزایش نسبت آب به سیمان، افزایش یافته است ولی به مرور زمان این تغییرات و اختلاف‌ها کمتر شده است. استفاده از دوده سیلیسی منجر به کاهش حدود ۸۰ درصدی در ضریب انتشار در سنین کوتاه مدت و همچنین کاهش حدود ۴۵ درصدی در بلند مدت شده است. قابل ذکر است که مقادیر ضریب انتشار طرح‌های مختلف در سن ۵۰ ماه بر خلاف سنین کوتاه مدت، اختلاف بسیاری کمی دارند.

مقایسه ضرایب انتشار در طول زمان نشان می‌دهد که آزمون SF10 دارای کمترین ضرایب می‌باشد. البته اختلاف ضرایب انتشار یون کلرید آزمون‌های SF5 و SF7.5 با ضرایب آزمون SF10 بسیار کم است ولی در هر صورت افزایش مصرف دوده سیلیسی منجر به کاهش ضرایب انتشار یون کلرید شده است. از میان آزمون‌های بدون دوده سیلیسی، آزمون C1 دارای کمترین ضریب انتشار است ولی برخلاف مقاومت فشاری، اختلاف زیادی به آزمون SF5 دارد.

در تمامی طرح‌ها، ضریب انتشار آزمایشگاهی (قرار گرفته در مخزن آب نمک) بیشتر از شرایط جزر و مدی محل سایت تحقیقاتی بوده است که علت آن می‌تواند علاوه بر تفاوت نوع روبرویی، غلظت بیشتر یون کلرید در محلول آزمایشگاهی نیز باشد [۱۱]. در شکل ۵، تغییرات غلظت یون کلرید سطحی با زمان مشاهده می‌شود. بجز آزمون SF5 که در طول زمان غلظت یون کلرید سطحی افزایش یافته است، برای بقیه آزمون‌ها ابتدا کاهش و سپس افزایش غلظت یون کلرید سطحی مشاهده می‌گردد. روند تغییرات و افزایش غلظت یون کلرید سطحی به گونه‌ای است که در بلند مدت و در سن ۵۰ ماه، مقادیر غلظت یون کلرید سطحی برای آزمون‌های مختلف در بازه محدود ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ درصد قرار گرفته است.

رابطه مشخصی بین نسبت آب به سیمان و غلظت یون کلرید سطحی مشاهده نمی‌گردد، اما استفاده از دوده سیلیسی منجر به افزایش غلظت یون کلرید سطحی شده است. در میان همه طرح‌ها، SF5 و SF7.5 دارای بیشترین غلظت یون کلرید سطحی هستند و SF10 با اختلاف جزئی، مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که بطور کلی، در کوتاه مدت، هرچه بتن نفوذناپذیرتر باشد، میزان یون کلرید سطحی بیشتر است. اما در بلند مدت مقادیر یون کلرید سطحی در محدوده ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ درصد وزن بتن می‌باشد.



شکل ۵- تغییرات غلظت یون کلرید سطحی در طول زمان

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نفوذ یون کلرید در بتن حاوی دوده سیلیسی در شرایط آزمایشگاهی و شرایط جزر و مدی سایت تحقیقاتی دانشگاه تهران در جزیره قشم با بتن‌های بدون پوزولان و با نسبت‌های آب به سیمان مختلف بررسی و مقایسه شده است. بر این اساس، می‌توان موارد زیر را به‌عنوان نتایج اصلی این پژوهش بیان نمود.

- استفاده از دوده سیلیسی در بتن برای افزایش دوام بتن بسیار موثرتر از کاهش نسبت آب به سیمان مشاهده شد. در حالی که در مقاومت فشاری، استفاده از ۵ درصد دوده سیلیسی و کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۰ به ۰/۳۵، عملکرد مشابهی داشتند.

- در بلند مدت، طرح‌های با نفوذپذیری کمتر دارای غلظت یون کلرید بیشتر در سطح و غلظت کمتر در اعماق بتن هستند. برای طرح‌های نفوذپذیرتر، این پدیده برعکس می‌باشد.

- ضریب انتشار یون کلرید طرح‌های حاوی دوده سیلیسی به یکدیگر نزدیک می‌باشد ولی با این وجود آزمون SF10 کمترین میزان ضریب انتشار را داراست. در مقاومت فشاری نیز آزمون SF10 بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز را دارد.

- در طولانی مدت، اختلاف ضرایب انتشار طرح‌ها نسبت به کوتاه مدت بسیار کاهش می‌یابد و همچنین بنظر می‌رسد به علت تغییرات کم ضریب انتشار از سن ۲۷ به ۵۰ ماه، ضرایب انتشار بدست آمده در سن ۵۰ ماه، در ادامه تغییرات چندانی نداشته باشد.

- در طولانی مدت، غلظت یون کلرید سطحی طرح‌ها مشابه یکدیگر شده‌اند به نحوی که غلظت یون کلریدهای سطحی در محدوده ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ درصد وزن بتن می‌باشد. در ضمن روند کلی تغییرات کلرید سطحی، افزایش آن در طول زمان می‌باشد.

### تقدیر و تشکر

بدینوسیله از سازمان منطقه آزاد جزیره قشم و انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران برای تامین مالی ساخت سایت تحقیقاتی دوام سازه‌های بتنی دانشگاه تهران در جزیره قشم را که زمینه انجام این پژوهش را فراهم نموده است، تقدیر و تشکر می‌شود.

### منابع و مراجع

- [1] Rostam, S., "Service life Design of Concrete Structures – A Challenge to Designers as well as to Owners", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), 6(5), 2005, pp. 423-445.
- [2] Cranck, J., "The Mathematics of Diffusion", Clarendon Press, 2nd Edition, Oxford, UK, 1975.
- [3] 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, 2013, pp. 63-70.



- [4] Vedalakshmi, R., Rajagopal, K., Palaniswamy, N., "Longterm corrosion performance of rebar embedded in blended cement concrete under macro cell corrosion condition", *Construction and Building Materials*, 22(3), 2008, pp. 186-199.
- [5] Flores Medina, N., Barluenga, G., Hernández-Olivares, F., "Combined effect of Polypropylene fibers and Silica Fume to improve the durability of concrete with natural Pozzolans blended cement", *Construction and Building Materials*, 96, 2015, pp. 556-566.
- [6] Valipour, M., Pargar, F., Shekarchi, M., Khani, "Comparing a natural pozzolan, zeolite, to metakaolin and silica fume in terms of their effect on the durability characteristics of concrete: A laboratory study", *Construction and Building Materials*, 41, 2013, pp. 879-888.
- [7] Shi, X., Xie, N., Fortune, K., Gong, J., "Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview", *Construction and Building Materials*, 30, 2012, pp. 125-138.
- [8] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., Shen, C., "Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete", *Construction and Building Materials*, 44, 2013, pp. 1-6.
- [9] Dousti, A., Rashednia, R., Ahmadi, B., Shekarchi, M., "Influence of exposure temperature on chloride diffusion in concretes incorporating silica fume or natural zeolite", *Construction and Building Materials*, 49, 2013, pp. 393-399.
- [10] 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, 2006, pp. 858-865.
- [11] Li, Q., Li, K., Zhou, X., Zhang, Q., Fan, Z., "Model-based durability design of concrete structures in Hong Kong-Zhuhai-Macau sea link project", *Structural Safety*, 53, 2015, pp. 1-12.
- [۱۲] سازمان ملی استاندارد ایران، "بتن سخت شده - قسمت ۱: شکل، ابعاد و سایر الزامات آزمون‌ها و قالب‌ها"، استاندارد ملی شماره ۱-۱۳۹۳، ۱۶۰۸.
- [۱۳] سازمان ملی استاندارد ایران، "بتن سخت شده - قسمت ۲: ساخت و عمل‌آوری آزمون‌ها برای آزمون‌های مقاومت"، استاندارد ملی شماره ۲-۱۳۹۳، ۱۶۰۸.
- [۱۴] سازمان ملی استاندارد ایران، "بتن سخت‌شده - قسمت ۳: تعیین مقاومت‌فشاری آزمون‌ها - روش آزمون"، استاندارد ملی شماره ۳-۱۳۹۳، ۱۶۰۸.
- [15] ASTM C1556-11a, "Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.
- [16] ASTM Standard C114-13, "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [17] ASTM C1152 / C1152M-04(2012)e1, "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.