

تأثیر مخرب نفوذپذیری و وجود ترک های حرارتی اولیه بر بتن دریایی درجا و ارائه

راهکارهای مناسب

مهدي يوسفی*^۱

^۱ دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

مهدي رضاپور^۱

چکیده

نفوذ پذیری و وجود ترک های اولیه مهمترین عوامل مؤثر بر تخریب تدریجی بتن دریایی بوده که به عنوان نخستین فاکتورهای تأثیر مواد شیمیایی موجود در آب دریا بر بتن و همچنین خوردگی میلگردها شناخته می شود. به عبارتی چنانچه راهکارهایی ارائه گردد که نفوذپذیری بتن تا حد امکان کاهش یابد، میزان اثر مخرب مواد شیمیایی به ویژه کلرایدها به شدت کاهش خواهد یافت. معمولاً بتن پیش ساخته مورد استفاده در سازه های دریایی به دلیل وجود دقت زیاد در طراحی و مناسب بودن شرایط محیطی کارخانه به صورت اصولی اجرا گردیده و بالاترین مقاومت و بیشترین پایداری را در دراز مدت خواهد داشت، اما این مسأله در مورد بتن دریایی درجا به دلیل عدم وجود شرایط مناسب صدق نمی کند. از این رو در این مقاله ابتدا عوامل مؤثر بر افزایش نفوذپذیری و ایجاد ترک های اولیه در بتن و چگونگی پیشرفت خرابی ناشی از وجود ترک ها و نفوذپذیری ارائه می گردد. سپس در ادامه راهکارهایی جهت اجرای اصولی بتن دریایی درجا و همچنین راهکارهایی جهت کاهش اثرات زیانبار نفوذ کلرایدها، سیکل های یخ زدن-آب شدن، تبلور نمک ها و هوازگی بتن دریایی که ناشی از نفوذپذیری می باشند، پیشنهاد خواهد گردید.

کلمات کلیدی: بتن درجا، بتن دریایی، سیکل یخ زدن-آب شدن، تبلور نمک ها، هوازگی، فاکتور پایداری، ضریب پخش کلرایدها

*

Corresponding author

E-mail address: M_yousefi@cmu.ac.ir

Postal Address: Chabahar Maritime University

University Avenue, Chabahar ۹۹۷۱۷ ۵۶۴۹۹, Iran

۱- مقدمه

متأسفانه همواره اجرای صحیح بتن درجا با مشکلات فراوانی همراه بوده است. این مشکلات باعث گردیده تا سازه های دریایی که چند دهه قبل ساخته شده‌اند، اکنون دچار خسارت های جدی گردند. این خسارت ها گاهی تا حدی است که هزینه تعمیر آنها با هزینه ساخت اولیه برابری می‌کند. استفاده از مصالح سنگدانه‌ای آزمایش شده و تأیید شده مطابق استانداردها، رعایت حداکثر نسبت آب به سیمان، استفاده از سیمان های ضد سولفات و در بعضی موارد استفاده از سیمان پرتلند با سرباره کوره بلند، همه این ها مواردی هستند که با توجه به اهمیت سازه های دریایی مورد ملاحظه قرار می‌گیرند، اما مشکل در اینجاست که قسمت هایی از سازه های دریایی که با بتن پیش ساخته اجرا شده اند کمترین آسیب و قسمت هایی که در محل ساخته شده‌اند با گذشت زمان چنان آسیب می‌بینند که چاره‌ای جز تخریب و ساخت مجدد آنها نخواهد بود و این نشان از عدم اجرای صحیح بتن درجا دارد که باعث ایجاد نفوذپذیری، تخلخل و همچنین کاهش مقاومت بتن می‌شود. در قسمت اول این مقاله نواقص ناشی از اجرای غیراصولی بتن درجا که باعث ایجاد ترک های اولیه و افزایش نفوذپذیری بتن می‌گردد، بر اساس آخرین تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته و سپس چگونگی پیشرفت ترک های اولیه و اثر نفوذپذیری روی افزایش فشار تبلور نمک ها و فشار ناشی از سیکل یخ زدن-آب شدن (Freezing-Thawing) مورد تحلیل قرار گرفته است. در ادامه راهکارهایی برای اجرای اصولی بتن درجا، استفاده از بتن خود متراکم جهت حل مشکل تراکم نامناسب و مقابله با اثر سیکل های یخ زدن-آب شدن ارائه می‌گردد.

۲- عوامل مؤثر در نفوذپذیری بالا و تشکیل ترک های حرارتی اولیه بویژه در بتن دریایی درجا

نفوذ کلرایدها در بتن دریایی تواند مخرب ترین اثر را روی آن داشته باشد. این نفوذ می‌تواند ناشی از نفوذپذیری بالای بتن و ترک های حرارتی اولیه شکل گرفته به ویژه در بتن دریایی درجا باشد که باعث افزایش سرعت انتشار کلرایدها و پیشروی آنها در امتدادهای معینی می‌گردد (Danish Hydraulic Institute, ۱۹۸۶). عوامل ذیل در افزایش نفوذپذیری بتن و همچنین تشکیل ترک های اولیه مؤثر می‌باشند.

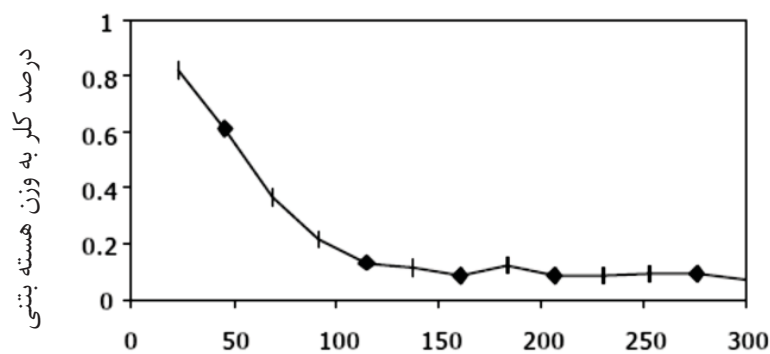
(۱) تبادل نظرهای گسترده برای میزان پخش بالای کلرایدها و تحلیل های شیمیایی از گرها (هسته‌ها) گرفته شده از بتن تخریب شده سازه های دریایی و بعضی مقادیر ثبت شده مطابق شکل ۱، مصداق های مفیدی برای تحلیل عوامل مؤثر در نفوذ و پخش کلر در داخل بتن فراهم می‌نماید Christensen (Messrs S.B. ۱۹۸۱, P., ۱۹۸۵). بتن با نفوذپذیری بالا به نوسان شدید در نسبت آب به سیمان (w/c) بویژه در بتن های درجا ارتباط دارد که بعضاً تغییراتی بین ۰/۷~۰/۳۵ مشاهده شده

است. در صورتی که بهترین میزان نسبت آب به سیمان در بتن دریایی حداکثر ۰/۴ بوده و برای میزان بیشتر آب موردنیاز از فوق روان کننده ها استفاده می شود.

(۲) با شکل گرفتن ترک های حرارتی اولیه نیز این احتمال وجود دارد که از همان ابتدای ساخت بتن، کلرایدها به سطح میلگردها برسند.

(۳) یکی دیگر از عوامل مهم نفوذپذیری بالا در بتن، عدم تراکم مناسب بتن می باشد که معمولاً در بتن های درجا بیشترین مشکل را ایجاد می نماید. تراکم کمتر از حد استاندارد باعث وجود هوا در لابلای بتن و در نتیجه وجود فاصله بین میلگرد و بتن میگردد و این درحالی است که تراکم بیش از حد بتن باعث جدا شدن شیره بتن از حد بتن باعث جدا شدن شیره بتن از سنگدانه ها می شود.

(۴) عمل آوری نامناسب نیز به خاطر خشک شدن اولیه بتن، باعث افزایش تخلخل لایه بیرونی، که پوشش (کاور) روی میلگرد را تشکیل می دهد، می گردد. بنابراین، ترک های حرارتی اولیه ناشی از عمل- آوری نامناسب به ویژه در اعضای بتنی مسلح باعث سرعت بیشتر پخش یون کلراید از پوسته بتن تا سطح میلگردها در یک دوره زمانی کوتاه مطابق شکل ۱ می گردند.



تراز نمونه از سطح دیوار موج شکن بر حسب میلیمتر

شکل ۱- نمودار نمایش کلراید در یک هسته استخراج شده از دیوار موج شکن،

منبع: Christensen P. et al (۱۹۸۵)

مشکلات فوق، به قدری جدی هستند که محیط مناسبی برای آرایش سریع خوردگی میلگردها بدون نیاز به مشارکت بیشتر عوامل حاضر دیگر از قبیل کاور نامناسب و نازک میلگردها، استفاده از سیمان پرتلند ضد سولفات (Sulphate Resisting Portland Cement) و کلرایدهای داخل اجزای اصلی ملات شامل میلگردهای آلوده به نمک، فراهم می نمایند.

واضح است که اگرچه اجرای بتن دریایی به صورت درجا مستلزم راهکارهای مناسبی می باشد که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد، اما در هر صورت عدم استفاده از نیروهای ماهر و ورزیده می تواند تقریباً ریشه اصلی تمامی نواقص فوق باشد. بعلاوه اینکه باعث می گردد بتن با مشخصاتی غیر از مشخصات طراحی ساخته شده و ممکن است مقاومت لازم را نداشته باشد.

۳- توسعه خرابی های ناشی از نفوذپذیری بتن دریایی

۱-۴ ترک های حرارتی اولیه و توسعه خرابی

اجرای غیر صحیح بتن درجا بویژه عمل آوری نامناسب معمولاً باعث می گردد از همان ابتدای ساخت، در سازه هایی نظیر قسمت های فوقانی موج شکن ها که درجا ساخته می شوند، ترک های مویی ایجاد گردد. اما این ترک های ریز بعد از چند ماه شروع به بازشدگی و گسترش می نمایند که می تواند عاملی برای نفوذ کلرایدها و ایجاد خوردگی باشد. در برابر گسترش ترک ها همه اعضای بتن مسلح گسترش خوردگی سریع و قابل ملاحظه ای را نشان می دهند که به صورت خوردگی شدید با تنها اندکی سال بعد از اجراء اتفاق می افتد. شکل ۲ نمونه ای از خسارت وارده به یک دیوار موج شکن ناشی از وجود ترک های اولیه را نشان می دهد (Danish Hydraulic Institute, ۱۹۸۶).



شکل ۲- لایه لایه شدن کل کاور یک دیواره موج شکن، منبع: (Danish hydraulic Institue (۱۹۸۶)

۲-۴ فشار حاصل از تبلور نمک ها و توسعه خرابی

در مواد متخلخل فشار حاصل از تبلور نمک ها در محلول های فوق اشباع شده تنش هایی ایجاد می نمایند که ممکن است باعث ترک خوردگی و پوک شدگی گردند. چنین حالاتی در پوشش دیواره تونل ها و قطعات یا دیواره های بتن نفوذ پذیر رخ می دهد، خصوصاً زمانی که یک وجه عنصر سازه ای در معرض آب حاوی نمک (آب دریا) و وجوه دیگر در معرض هوای گرم (به عنوان مثال پدیده تبخیر) قرار می گیرد. به طور کلی هر چه درجه فوق اشباع بالاتر باشد، فشار کریستاله شدن نیز بیشتر خواهد بود. حتی برای درجه فوق اشباع پایین مانند ۲، بلوری شدن کلرید سدیم می تواند فشاری معادل ۶۰۰ اتمسفر اعمال نماید. در این حالت تنش حاصل به حدی خواهد بود که اغلب سنگ ها را می شکنند.

بنا به گفته فیگ، آب حاوی نمک قادر است از طریق خاصیت موئینه داخل بتن نفوذ نماید و بدین ترتیب در محدوده تبخیر (معمولاً ۰/۳ تا ۰/۵ متر بالای سطح آب) کریستاله شدن نمک باعث تخریب بتن می گردد که این تخریب مشابه خرابی ناشی از عمل یخبندان است.

در نتیجه در محدوده پاشش آب دریا تخریب بتن تا حدی در اثر فشار حاصل از تبلور نمک است. در بخش هایی از قطعات افقی بتنی که آب به صورت چاله راکد بماند امکان بروز آسیب دیدگی ناشی از تبلور نمک وجود دارد. در مواردی که سیکل های متعدد تبلور نمک رخ دهد تخریب و کنده شدن بتن از نوع «پوسته پیاز» صورت می گیرد که این پدیده به نام حلقه های لیزگنگ نیز معروف است.

کیفیت سطحی بتن نقش مهمی در تعیین سرعت رسوب گذاری نمک بر سطح سازه بتنی واقع در محیط دریایی ایفا می نماید. بنابراین در بتن ریزی مناسب، دستیابی سطح صاف و غیر قابل نفوذ در درجه اول اهمیت می باشد. این مسئله خصوصاً در مورد مخلوط های بتن حاوی میکرو سیلیس حائز اهمیت است، زیرا این مخلوط ها چسبنده اند و پرداخت سطح آن ها مشکل می باشد.

۳-۴ سیکل یخ زدن-آب شدن (F-T) و توسعه خرابی

اثر شرایط محیطی متناوب در قسمتی از سازه های دریایی که در معرض ناحیه پاششی سطح دریا قرار دارند به دلیل تر و خشک شدن متناوب و همچنین تماس با هوا، بیشتر است. به ویژه هنگامی که سازه بتنی در معرض محیط یخبندان قرار می گیرد، محلول منفذی در لوله های موئین تبدیل به یخ گردیده و حجم آن تقریباً ۹٪ اضافه می شود. به دلیل انبساط حجم، آب یخ زده تمایل به جابجایی به نزدیکترین مکان در دسترس خواهد داشت. جابجایی محلول های منفذی سرانجام فشار هیدرولیکی ایجاد می نماید. موقعی که نیروی انبساطی از مقاومت کششی بتن تجاوز می کند، میکروترک ها شروع به تولید و انتشار در اطراف خمیر سیمان می نمایند. با اولین ترکی که آغاز شده، مقدار بیشتری از رطوبت به داخل بتن نفوذ نموده و باعث افزایش خسارت ناشی از F-T می شود. بنابراین میکروترک هایی که در زمان سیکل های F-T

تولید شدند، می‌توانند به عنوان یک مسیر ورودی برای یون های مهاجم از قبیل کلرایدها عمل نمایند. هنگامی که یون های کلراید به میلگردهای سازه بتنی می‌رسند، نسبت تمرکز یون کلراید به یون هیدروکساید (Cl^-/OH^-) در نزدیکی میلگردها افزایش می‌یابد. اولین بار که نسبت (Cl^-/OH^-) بالاتر از ۰/۶ می‌شود، روکش نازک محافظ میلگرد، پایداریش زیاد طول نمی‌کشد (Mehta PK., et al., ۱۹۹۳). در نتیجه منجر به پتانسیل بالای خوردگی حفره‌ای می‌شود (Kaminetzky D., ۱۹۹۱), ACI Committee (۱۹۹۴, ۲۲۲). مکانی که خوردگی حفره‌ای اتفاق می‌افتد، یک نقطه متمرکز برای خوردگی اولیه خواهد شد و توسعه عمل خوردگی بوسیله ورود ممتد یون کلراید، اکسیژن، و آب بیرونی، اتفاق می‌افتد. سرانجام پایایی بتن می‌تواند به طور معنی داری کاهش یابد. این نوع از خرابی می‌تواند بیشتر در حالت عمومی برای آزمایش سازه های دریایی با تکرار عمل یخ زدن-آب شدن یا پیاده رو بتنی تحت اثر نمک یخ زدا، مشاهده شود. برای مقابله با اثرات سیکل های یخ زدن-آب شدن بتن در سازه های دریایی راهکارهایی در ادامه ارائه خواهد گردید.

۴- راهکارهای پیشنهادی برای اجرای اصولی انواع سازه های بتنی دریایی

۱-۵ اجرای بتن غیر مسلح حجیم در سازه های دریایی (Danish و Adel M. E. et al., ۲۰۰۰)
(H. I., ۱۹۹۴)

این نوع بتن که معمولاً در ساخت بدنه اصلی موج شکن ها استفاده می‌شود باید با نسبت آب به سیمان (w/c) برابر یا کمتر از ۰/۴ و از سیمان پرتلند مقاوم در برابر سولفات ها اجرا شود. ترجیحاً به صورت متناوب می‌توان از سیمان پرتلند با سرباره کوره های بلند (Blast-Furnace Slag Portland Cement) نیز استفاده نمود. عمل آوری تحت رطوبت را با خنک نگه داشتن اجزای اصلی بتن به کمک ورقه های یخی و قرار دادن لوله های PVC ثابت در امتداد تمام سطح مقاطع عرضی بدنه دیوار و در نتیجه جاری شدن آب در خلال آنها، بهبود بخشید. هدف از این کار کنترل گرمای هیدراتاسیون و در نتیجه جلوگیری از ترک های حرارتی اولیه و در نهایت تولید یک بتن نفوذ ناپذیر می‌باشد.

۲-۵ اجرای بتن مسلح در سازه های دریایی (Danish H. I., و Adel M. E. et al., ۲۰۰۰)
(۱۹۹۴)

برای اجرای بتن مسلح در سازه های دریایی در شروع کار اقدامات گسترده‌ای برای جلوگیری از خوردگی با استفاده از سیمان سرباره‌ای کوره بلند (Ground Granulated Blast-Furnace Slag) با ترکیب ۶۵٪ اتخاذ گردد. به طور مشابه با مورد بتن غیرمسلح حجیم، نسبت آب به سیمان به مقدار ماکزیمم ۰/۴ در حین

استفاده از فوق روان کننده ها محدود می شود. کل کلرایدها در جزء اصلی مصالح بتن به ۰/۲۵٪ وزن سیمان محدود می شود. همه میلگردها با اپوکسی پوشانده شده و با حداقل ۱۰۰ میلیمتر کاور اجرا می گردند. عمل آوری تأخیری تحت رطوبت برای دو هفته انجام شده تا با طبیعت کند هیدراتاسیون سیمان هماهنگ باشد. عمل آوری سطوح عمودی با استفاده از غشایی مرکب از چند ماده با نگهداری بتن در قالب مرطوب با درزبندی کامل و به مدت هفت روز انجام شده و همه سطوح افقی دارای شیبی به طرف حوزهای برای زهکشی آب بالا آمده دریا باشند.

۳-۵ اجرای بتن شمع های فولادی که سطوح دلفینی، باراندازها و اسکله ها را حمل می کنند

(Danish H. I., ۱۹۹۴ و Adel M. E. et al., ۲۰۰۰)

این نوع بتن ها باید تا عمق ۲ متر زیر سطح متوسط دریا با پوشش لازم محافظت شوند. این فرآیند با نصب یک سیستم حفاظت کاتدی آغاز شده و با آماده نمودن سطوح با ماسه پاشی و در نهایت ایجاد پوشش محافظ اپوکسی دنبال می شود. شمع ها سپس با پوشش های فایبرگلاس، ضد آب گردیده و بعد از آن با گروت های بتنی انبساطی، پر می شوند. لازم به توضیح است که لازمه یک حفاظت کاتدی مناسب نصب آندهای فداشونده در موقعیت های مناسب سازه است تا از حفاظت کاتدی بیش از اندازه در بعضی نقاط و یا کمبود حفاظت در نقاط دیگر جلوگیری شود. تاکنون استقرار آندهای فداشونده به صورت کاملاً تجربی انجام گردیده اما با توسعه الگوریتم هایی نظیر الگوریتم ژنتیک، تجمع مورچگان و غیره می توان مکان یابی بهینه ای برای آندها به دست آورد. استفاده از این نوع الگوریتم ها باعث می گردد تا علاوه بر توزیع خودکار چیدمان آندها هزینه حفاظت به حداقل ممکن برسد.

۵- استفاده از بتن خود متراکم برای بهبود تراکم و کاهش نفوذپذیری

برای حل مشکل عدم تراکم مناسب بتن، بتن های خود متراکم که چند سالی است از پیدایش آن در جهان و برای اولین بار در ژاپن نمی گذرد، تحول جدیدی در صنعت ساخت و ساز بتنی ایجاد کرده است. این بتن که نیاز به لرزاندن نداشته و خود به خود متراکم می گردد، مشکل لرزاندن در قالب های با آرما تور انبوه و محل های مشکل برای ایجاد تراکم را حل نموده است. این بتن علیرغم کارایی بسیار زیاد خطر جدایی سنگدانه ها و خمیر بتن را نداشته و ضمن ثابت بودن کارایی و اسلامپ تا مدتی طولانی می تواند بتنی با مقاومت زیاد و دوام و پایایی مناسب ایجاد کند. در طرح اختلاط این بتن باید نسبت های خاصی را رعایت نمود. به عنوان مثال شن حدود ۵۰ درصد حجم مواد جامد بتن را تشکیل داده و ماسه حدود ۴۰ درصد حجم ملات انتخاب می شود. نسبت آب به مواد ریزدانه و پودری بر اساس خواص مواد ریزدانه، بین ۰/۹ تا ۱ می باشد. با روش آزمون و خطا نسبت دقیق آب به سیمان و مقدار ماده فوق روان کننده مخصوص برای

مصالح مختلف تعیین می‌گردد. از این بتن با استفاده از افزودنی کهگری کهگرانروی بتن را می‌افزاید در زیر آب استفاده شده است.

۶- استفاده از افزودنی های سیمان در کاهش اثر مخرب سیکل های یخ زدن-آب شدن (F-T) در بتن دریایی

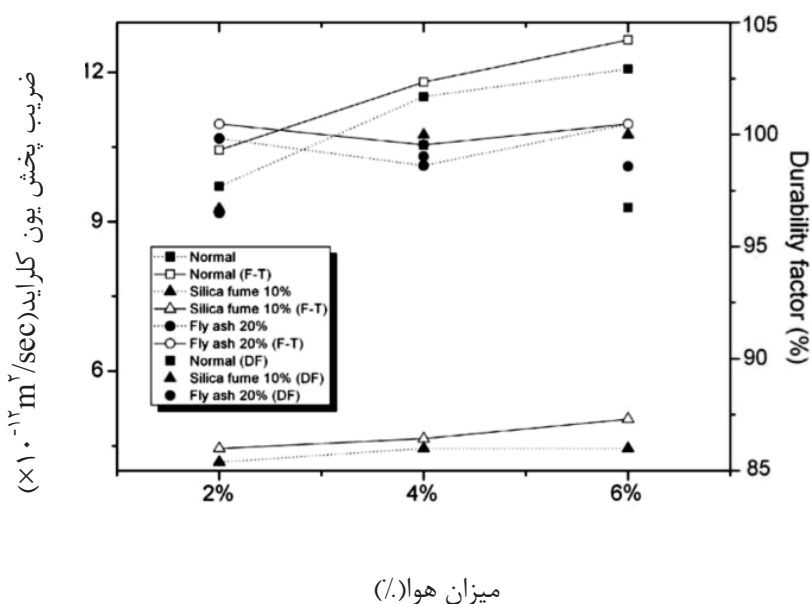
افزودنی های سیمان (Supplementary Cementing Materials) اغلب برای بهبود پایایی بتن، ترکیب می‌شوند. این مواد شامل خاکستر بادی، فوم سیلیکا، سرباره آسیاب شده کوره بلند (GGBFS)، و دیگر مصالح پوزولانی طبیعی کلسینه شده از قبیل خاکستر پوسته برنج و شکل دهیدراته شده کائولینیت معدنی رسی (متاکائولین)، می‌باشند. استفاده از افزودنی های سیمان (SCMs) در بتن در حال افزایش است زیرا این مواد با هزینه کم ساخت، بهبود بعضی خواص فیزیکی و پایایی بتن در محیط های متهاجم را نتیجه می‌دهند. برای مثال، تجربه نشان داده که خاکستر بادی، علیرغم سرعت واکنش کند، باعث بهبود کارایی و افزایش مقاومت بتن در درازمدت، با استفاده از تبدیل کلسیم هیدروکساید (CH) به هیدرات سیلیکات کلسیم (C-S-H)، می‌گردد. خاکستر بادی همچنین کاملاً در تولید بتن با نفوذپذیری کم مؤثر است. این ماده مخصوصاً مقاومت شیمیایی بتن را با استفاده از کاهش پتانسیل نفوذ یونی، جابجایی و تمرکز غلظت، افزایش داده، در نتیجه انبساط و ترک مرتبط با حمله سولفات ها، واکنش سیلیکای قلیایی و خوردگی را کنترل می‌نماید (C.W. Chung et al., ۲۰۱۰).

به هر حال در رابطه با استفاده از SCM ها در بتن در معرض سیکل های F-T باز هم جای بحث وجود دارد. برای مثال، شرایط آب و هوای سرد درصد خاکستر بادی را به دلیل پتانسیل ایجاد شتاب منفی در سرعت گیرش بتن و رسیدن به مقاومت نهایی، محدود می‌کند، بویژه موقعی که در معرض سطوح بالای نمک های یخ زدا باشد. بعلاوه، استفاده از فوم سیلیکا به عنوان جانشین بخشی از سیمان همچنین اثر مثبت و منفی روی مقاومت در برابر F-T دارد. اندازه کوچکتر منافذ مویی در بتن حاوی فوم سیلیکا مقدار کل آب قابل یخ زدن را کاهش داده، درحالیکه یک ماتریس سیمانی با نفوذپذیری کم فشارهای داخلی ایجاد شده ناشی از جابجایی آب داخل خمیر سیمان به حفره های هوا در طول سیکل های F-T، را افزایش می‌دهد. از این گذشته، حضور کربن در خاکستر بادی و فوم سیلیکا می‌تواند مشکل پایداری حفره های هوا را ایجاد نماید. از آنجایی که کربن ترکیب حباب زا را به تدریج جذب سطحی نموده و مانع از تولید بیشتر حباب های هوای میکروسکوپی می‌گردد، این ماده میزان کل هوای قابل دسترس در بتن سخت شده را کاهش می‌دهد (C.W. Chung et al., ۲۰۱۰).

اثر SCM ها و مواد حباب زا (Air Entraining Admixture) بر پایایی بتن سیمان پرتلند، استفاده از این مصالح را بنیاد نهاده است. در واقع، کارآمدی SCM و AEA در افزایش مقاومت در برابر حملات فیزیکی و

شیمیایی به طور وسیع گزارش شده است، ۱۹۹۷، Chandra S., (Joshi RC. ، Shon C.S. *et al.*, ۲۰۰۴) ۱۹۹۷، *et al.*، اما به هر حال، بیشترین تحقیقات تنها مشکل پایایی از قبیل آسیب سرمازدگی، خوردگی، حمله سولفات ها و واکنش سیلیکای قلیایی را نشان داده‌اند.

عموماً، ضریب پخش یون کلراید (Coefficient of Chloride Ion Diffusion)، نفوذپذیری و فاکتور پایایی (DF) دقیقاً مرتبط باهم هستند. هنگامی که نفوذپذیری با استفاده از حباب زایی افزایش داده می‌شود، CCID و DF هر دو افزایش می‌یابند. CCID چند نوع اختلاط قبل و بعد از تست F-T به صورت تابعی از میزان هوا و DF در نمودار شکل ۳ ارائه شده است. برای بتن معمولی، آشکار است که مخلوط با میزان هوای بالاتر، CCID بالاتری از مخلوط با میزان هوای کمتر نشان می‌دهد. همچنین بتن حاوی فوم سیلیکا نیز به استثنای حالتی که میزان هوا ۰.۶٪ است، همان روند را نشان می‌دهد.



شکل ۳- رابطه بین میزان هوا، فاکتور پایایی، و ضریب پخش یون کلراید (w/cm=۰.۵)، منبع: C.W. Chung et al., (۲۰۱۰)

اما این روند برای مخلوط های ترکیب شده با خاکستر بادی همیشه عمل نمی‌کند. برای نمونه همان طور که میزان هوای بتن حاوی خاکستر بادی از ۲٪ به ۴٪ افزایش می‌یابد، فاکتور پایایی (DF) نیز از ۱۰/۷٪ به ۱۰/۱٪ کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، هنگامی که میزان هوا به ۶٪ افزایش می‌یابد، DF برای بتن حاوی خاکستر بادی، علیرغم افزایش در CCID، از ۹۹ به ۹۸/۶ کاهش می‌یابد. این مسئله ممکن است به ویژگی توسعه مقاومت کم بعلاوه ناپایداری سیستم حفره های هوا ناشی از حضور کربن نسوخته در خاکستر بادی مربوط باشد. از آنجا که اندازه ذرات خاکستر بادی تقریباً با اندازه ذرات سیمان یکسان است، توسعه مقاومت

بتن حاوی خاکستر بادی نشان داده که درجه واکنش پوزولانی وابسته به این است که ذرات خاکستر بادی چگونه به طور مناسب در کنار ذرات سیمان هیدراته پخش شوند. این مسئله نقش اساسی بر توسعه ساختار میکروسکوپی بتن حاوی خاکستر بادی بازی می‌کند، که CCID و DF را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

- در بتن غیرمسلح حجیم دریایی برای کنترل گرمای هیدراتاسیون و جلوگیری از ایجاد ترک های حرارتی اولیه می‌توان از ورق های یخی برای خنک نگه داشتن و از لوله های PVC ثابت در مقاطع عرضی بتن جهت ایجاد جریان آب در درون بتن، استفاده نمود.
 - در بتن مسلح دریایی جهت کاهش نفوذپذیری و افزایش پایایی بتن باید از سیمان سرپاره‌ای کوره بلند با ترکیب ۶۵٪ استفاده نموده و کلیه میلگردها با اپوکسی جهت جلوگیری از خوردگی پوشانده شوند.
 - هنگامی که یک عمل‌آوری مناسب فراهم شود، بتن فاکتور پایایی (DF) خوبی صرف‌نظر از مقدار حجم هوا نشان می‌دهد.
 - ضریب پخش کلراید پس از اعمال سیکل های یخ زدن-آب شدن افزایش می‌یابد.
 - با افزایش نسبت w/cm و میزان هوا، ضریب پخش کلرایدها افزایش می‌یابد.
 - هنگامی که یک عمل‌آوری مناسب و حبابزایی فراهم شود، نمونه های بتنی حاوی هر دو ماده فوم سیلیکا و خاکستر بادی مقاومت خوبی در برابر پخش شدن یون کلراید قبل و بعد از سیکل های F-T نشان می‌دهند، زیرا یون کلراید به لایه های C-S-H جذب سطحی شده و بوسیله واکنش پوزولانی میکروساختار بهبود می‌یابد. به هر حال، بتن با خاکستر بادی هنگامی که w/cm برابر ۰/۶ و میزان هوا ۲٪ باشد، CCID بالاتری از بتن معمولی نشان می‌دهد.
 - جذب مویرگی مکانیزم اولیه‌ای است که بوسیله آن آب و کلرایدها به المانهای بتن دریایی در معرض هوا، نفوذ می‌کنند. این نشان می‌دهد که در اینجا انتشار یک نشانه ثانویه جذب است و اگر بتن آب را جذب نکند و یا رطوبت به داخل آن نرسد خوردگی اتفاق نمی‌افتد.
 - جهت کاهش میزان جذب در بتن دریایی نسبت آب به سیمان نباید از ۰/۴ تجاوز نماید و باید به جای آب مورد نیاز از فوق روان کننده ها استفاده گردد.
- در نهایت اگرچه اجرای بتن دریایی به صورت درجا مستلزم راهکارهای مناسبی می‌باشد اما در هر صورت عدم استفاده از نیروهای ماهر و ورزیده می‌تواند تقریباً ریشه اصلی تمامی نواقص باشد زیرا باعث می‌گردد بتن با مشخصاتی غیر از مشخصات طراحی ساخته شود.

۸- منابع

- ACI Committee ۲۲۲, (۱۹۹۴) *Corrosion of metals in concrete*, In: ACI Manual of Concrete Practice, Part ۱. Detroit: American Concrete Institute.
- Adel M.E., Ramadan A.M., and Fathi M.F., (۲۰۰۰) Concrete Deterioration in Brega Industrial Port: Case study of Causes and Remedy, *4th International Conference on Coasts, Ports & Marine Structure*, Nov, Shahidrajaee Port Complex, Bandar Abbass, Iran.
- Chung C.W., Shon Ch.S., and Y.S. Kim, (۲۰۱۰) Chloride Ion Diffusivity Of Fly Ash And Silica Fume Concretes Exposed To Freeze-Thaw Cycles, *Construction and Building Materials*, Vol. ۲۴, Elsevier, pp. ۱۷۳۹-۱۷۴۵
- Chandra S. (۱۹۹۷) *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*, NJ: Noyes, ۱۹۹۷.
- Christensen P., J., Mikkelsen and J. Jensen, (۱۹۸۵) *Investigations of Concrete Cores From Brega Industrial Port Libya*, PC Laboratories.
- Danish Hydraulic Institute, (۱۹۸۶) *Causes of Deterioration and Principles of Remedy - Brega Industrial Port*, Feb.
- Danish Hydraulic Institute, (۱۹۹۴) *Causes of Deterioration and Principles of Remedy - Brega Industrial Port*, vols. ۱۰ - ۱۲, Feb.
- Joshi R.C., and Lothita R.P., (۱۹۹۷) *Fly Ash In Concrete-Production Properties and Uses*, Amsterdam, Cordon and Reach Science; pp. ۷-۹.
- Kaminetzky D., (۱۹۹۱) *Design and construction failures*, New York: McGraw-Hill, pp. ۴۸۵-۵۳۹.
- Mehta P.K., Monteiro PJM., (۱۹۹۳) *Concrete Structure, Properties, and Materials*, ۲nd Ed. NJ: Prentice Hall; p. ۱۶۳
- Messrs Sand Berg, (۱۹۸۱) *Tests Upon Concrete Cores - Marsa Brega Port, Libya*, London, December.
- Shon C.S., Sarkar S.L., and Zollinger D.G., (۲۰۰۴) *Testing the Effectiveness of Class C and Class F Fly Ash in Controlling Expansion Due to Alkali-Silica Reaction Using Modified ASTM C ۱۲۶۰ Test Method*, *ASCE J. Mater*; ۱۶(۱), pp. ۲۰-۷.