مطالعه بعضی مشخصه‌ها و پایائی بتن، در دریاجه ارومیه

محمود نادری* و سید عبدالخالق موسوی‌فرد**

دانشکدهٔ فنی و مهندسی قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره)

(دریافت مقاله: ۸۳/۱۲/۲۵- دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۲/۴)

چکیده – آسیب دیدگی سازه‌های بتنی که عمدتا از عدم آشنایی به محیط و شرایط بهره برداری ناشی می‌شود خسارتهای هنگفتی را به صنعت ساخت و ساز و بهره برداران تحمیل می‌کند. از این رو، در این مقاله نتایج مطالعات و بررسیهای عوامل آسیب رسان به بتن در دریاچه ارومیه ارائه شده است. در این مطالعات مقاومت و دوام مخلوطهای بتنی به‌دست آمده از ترکیب ۲ نوع سیمان، پر تلند نوع ۱ و ۲، به‌همراه گرده سیلیس، ماده ضد خوردگی، ضد آب و هوازا با نسبتهای آب به سیمان مختلف، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز در شرایط آزمایشگاهی و دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بحث مقاومت، علاوه بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی نمونه‌ها و در بحث دوام، مقدار سایش، مقاومت الکتریکی، نفوذ کلر، جذب آب و یخ و ذوب یخ با به‌کارگیری تعداد ۵۰۴ نمونه و انجام ۵۷۶ آزمایش، اندازه‌گیری شده است. در خاتمه با توجه به نتایج به‌دست آمده، پیشنهادهایی در ارتباط با نسبت آب به سیمان، نوع سیمان مصرفی، مقدار بهینه درصد گرده سیلیس و نقش مواد افزودنی ارائه شده است.

واژگان کلیدی : بتن، آسیب فیزیکی و شیمیایی، مقاومت، دوام، دریاچه ارومیه.

Investigation of Some Properties and Durability of Concrete in the Urumie Lake

M. Naderi and S. A. K. Mousavi

Faculty of Engineering, Imam Khomeini Internation University, Qazvin, Iran

Abstract: ***Deterioration of concrete, which is mainly due to ignorance of environmental and service conditions, causes considerable costs for the construction industry. With this in mind, in this paper, results of investigation into the major causes of concrete deterioration in the Urumie Lake are presented. For the purposes of this investigation, samples were obtained by mixing two types of cement (OPC types 1&2), micro silica, anti oxide, water proof and air entraining agent, with different w/c ratios and***

* – استادیار ** – کارشناس ارشد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

tested at the ages of 7, 14, and 28 days. In addition to compression strength, tensile strength of the samples was measured. Regarding the durability studies, abrasion resistance, electrical resistivity, chloride penetration, water absorption and freeze-thaw tests were carried out under both laboratory and real conditions in the Urumieh lake. Based on our findings recommendations are made about optimum w/c ratio, most suitable types of cement, optimum percentage of micro silica content, and additives.

Keywords: *Concrete, Physical and chemical deterioration, Strength, Durability, Urumieh Lake*

۱- مقدمه

داشتن دانش کافی درباره رفتار فیزیکی و شیمیایی بتن در شرایط مختلف محیطی و اقلیمی خاص، برای ارائه طرح اختلاط سازگار با محیط سازه، از نیازهای اساسی طراحان سازه است، چون بر اساس آماری که مورد مطالعه قرار گرفته است[۱] ، مشکلاتی که در سازه‌های بتنی بروز می‌کند ۳۷٪ به طراحی، ۵۱٪ به اجرا، ۴/۵٪ به مصالح نامرغوب و ۷/۵٪ به نگهداری نامناسب مربوط می‌شود. لذا با توجه به شرایط منحصر به فرد منطقه دریاچه ارومیه، برای رسیدن به طرح اختلاط بتن سازگار با این محیط، پس از مطالعه شرایط میکروی و ماکروی محیط[۲]، به بر رسی عوامل آسیب رسان به بتن در این منطقه پرداخته شده است که نتایج حاصله در این مقاله ارائه شده است.

دریاچه ارومیه که بعد از بحرالمیت شورترین دریاچه جهان است، دارای وسعتی در حدود ۵۵۰۰ کیلومتر مربع و محیطی شوره زار، باتلاقی و لجن زار است. عمق این دریاچه بین ۵ تا ۱۶ متر و دمای آن ۲۲- تا ۳۸ درجه سانتیگراد، و رطوبت نسبی محیط آن ۴۸ تا ۸۱/۵ ٪ متغیر است [۳]. هدایت الکتریکی آب دریاچه ۲/۱۵ تا۳×۱۰ بتوان ۵ میکرو موس بر سانتیمتر و PH آن بین ۷/۷۲ تا۷/۷۴ است. در بین یونهای موجود در آب دریاچه ارومیه کلرید (Cl^-)، سولفات($SO4^{2-}$)، بی کربنات(HCO_3^-)، و برم (Br^-) به‌عنوان آنیون(یون منفی) و سدیم(Na^+)، منیزیم (Mg^{2+})، پتاسیم(K^+) و کلسیم (Ca^{2+}) به‌عنوان کاتیون (یون مثبت) بیشترین فراوانی را دارند. لازم به توضیح است که یونهای کلرید و سولفات در حین انجام این پروژه به ترتیب مقادیر ۱۳۶/۰۱ و ۲۲/۵۰۴ گرم بر لیتر اندازه‌گیری شدند.

برابر اطلاعات موجود، مقدار یونهای مخرب موجود در آب دریاچه ارومیه بسیار بیشتر از دریاهای دیگر و حتی خلیج فارس است [۴]. به طور مثال مقدار یون کلر موجود در آب دریاچه ارومیه، که یکی از عوامل مهم در خوردگی بتن است، ۶/۷ برابر یون کلر موجود در آب خلیج فارس و ۱۶ برابر یون کلر موجود در آب دریای بالتیک است و همچنین مقدار یون سولفات موجود در آب دریاچه ارومیه، ۸/۳ برابر یون سولفات موجود در آب خلیج فارس و ۱۸/۲ برابر یون سولفات موجود در آب دریای بالتیک است [۵]. یون سولفات نیز از مخربترین یونهای موجود است که دوام سازه‌های بتنی را به‌طور جدی تهدید می‌کند.

با توجه به مطالب مذکور می‌توان نتیجه گرفت که شرایط محیطی دریاچه ارومیه از دیدگاه احتمال آسیب دیدگی و خوردگی بتن مسلح، جزو سخت ترین منطقه‌ها محسوب می‌شود.

در این بررسیها نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، شرایط عمل آوری و نگهداری (آب دریاچه ارومیه و آب معمولی)، تعداد سیکلهای یخ و ذوب یخ، سن بتن و مواد افزودنی به عنوان متغیرهای طرح اختلاط در نظر گرفته شده و با ساخت ۱۵ نوع طرح اختلاط و تهیه ۲۴ نمونه از هر طرح اختلاط، مقاومت فشاری و کششی در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، مقاومت سایشی، مقاومت در برابر یخ و ذوب یخ، مقدار نفوذ یونهای کلر و مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده است.

۲- آزمایشها

در مراحل مختلف این مطالعات، با ساخت ۱۵ نوع طرح اختلاط، جمعا ۵۰۴ نمونه بتنی تهیه و ۵۷۶ آزمایش به‌شرح زیر انجام شده است.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

نظر به اینکه از انواع سیمان معرفی شده در استاندارد BS ۱۲ [۶] فقط ۵ نوع از آن در ایران تولید می‌شود و با عنایت به اینکه سیمان ضد سولفات به‌دلیل پایین بودن C_3A، علی‌رغم مقاومت خوبش در مقابل سولفاتها، در مقابل تهاجم یونهای کلر بسیار آسیب پذیر است [۷و۸] ، و از طرفی همین دلایل در مورد سیمان با گرما دهی کم نیز صادق بوده و بسیار دیر گیر است، و اینکه سیمان زود گیر هم به‌دلیل تولید گرمای زیاد و مقاومت نهایی پایین مناسب منطقه مورد نظر نیست، در این مطالعات فقط سیمانهای پر تلند معمولی نوع ۱و۲ [۹] مورد استفاده قرار گرفته است.

در این تحقیقات، نسبتهای آب به سیمان به کار گرفته شده ۰/۳۸، ۰/۴۰ و ۰/۴۴ بوده همچنین در صد میکروسیلیس جایگزینی صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵درصد وزن سیمان بوده که علاوه بر مواد افزودنی ضد آب، ضد خوردگی و هوازا، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لازم به ذکر است که تعداد سیکلهای یخ و ذوب یخ انتخابی صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ سیکل. با استفاده از هر طرح اختلاط ۱۲ نمونه مکعبی (با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتیمتر) برای سنجش مقاومت فشاری بتن در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل آوری در شرایط نگهداری در آب دریاچه ارومیه و آب معمولی تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند. همچنین به ازای هر طرح اختلاط، ۱۲ نمونه استوانه‌ای ۱۵×۳۰ سانتیمتر برای آزمایش کششی، ۴ نمونه مکعبی برای آزمایش سایش و ۴ نمونه مکعبی برای تعیین میزان نفوذ کلر و سنجش هدایت الکتریکی ساخته شدند.

۲-۲- آزمایشهای انجام شده

آزمایشهای انجام گرفته در این مطالعات شامل مقاومت فشاری (نمونه‌های مکعبی- استاندارد BS ۱۸۸۱) [۱۰]، مقاومت کششی (روش برزیلی[۱۱])، تعیین درصد سایش (استاندارد ASTM-C ۷۷۹[۱۲])، سنجش مقدار نفوذ کلر با به‌کارگیری روشهای تجزیه شیمیایی ولهارد و مورا [۱۳]سنجش میزان هدایت الکتریکی (قابلیت خوردگی)، مقامت در مقابل یخ و ذوب یخ (استاندارد ASTM-C ۶۶۶) [۱۴]، و آزمایش جذب آب (مطابق استاندارد BS ۱۲)[۱۵] است.

۳- نتایج و تحلیل آنها

۳-۱- نسبت آب به سیمان

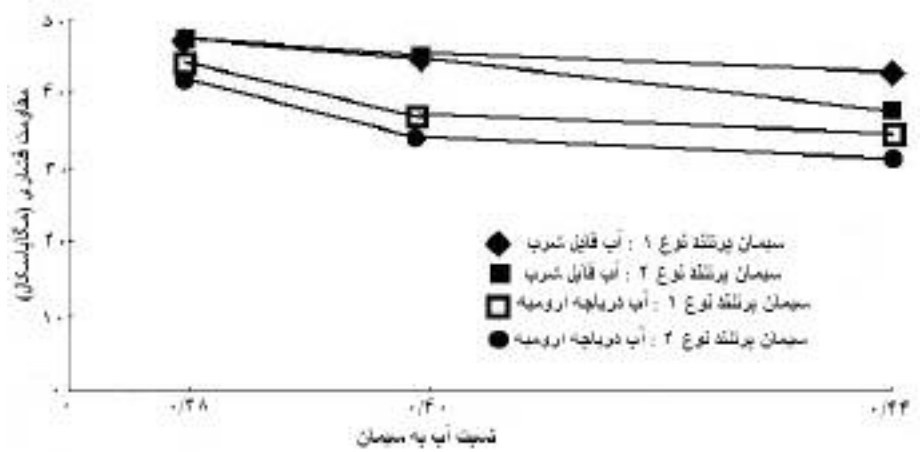
قبل از پرداختن به بحث و تحلیل نتایج، شایان ذکر است که برای احتراز از اطاله کلام، فقط تعدادی از نمودارها در این مقاله ارائه شده است. از آنجا که یکی از مهمترین فاکتور مقاومسازی بتن در مقابل عوامل مخرب فیزیکی و شیمیایی و به‌طور کلی با دوام کردن آن، نسبت آب به سیمان است که با در نظر گرفتن اینکه برای عمل هیدراسیون سیمان آب لازم معادل ۰/۲۳ است [۷] و با توجه به اینکه این مقدار آب، کارایی لازم را فراهم نمی‌آورد، لذا مصرف آب اضافی باعث به‌وجود آمدن تخلخل و در نتیجه کاهش مقاومت بتن می‌شود. در این رابطه، نتایج نسبتهای آب به سیمان ۰/۳۸، ۰/۴۰، و ۰/۴۴ با به‌کارگیری ۲ نوع سیمان مورد مطالعه، در شکل (۱) ارائه شده است. از این شکل پیداست که برای کلیه شرایط، کاهش نسبت آب به سیمان باعث افزایش مقامت فشاری می‌شود. البته مشخص است که سیمان نوع ۲ به‌دلیل دارا بودن مقدار کمتری از C_3S و C_3A نسبت به سیمان نوع ۱، گیرشش دیرتر و در نتیجه سرعت افزایش مقاومتش کند تر است.

در طی این سری تز مطالعات مشاهده شد که اختلاف در مقدار مقاومت فشاری نمونه‌ها با گذشت زمان بیشتر می‌شود به طوری که نمونه‌های ساخته شده با این ۲ نوع سیمان دارای مقاومت فشاری ۷ روزه ولی مقاومت ۱۴ و ۲۸ روزه نظیر آنها دارای اختلاف فاحشی‌اند. این مطلب می‌تواند به این دلیل باشد که کسب مقاومت جزء C_3S تا ۲۸ روز با سرعت زیادی صورت می‌گیرد و بعد از آن کاهش یافته به‌طوری که مقاومت فشاری دراز مدت آن تقریبا برابر مقاومت فشاری C_2S می‌شود.

نکته قابل توجه اینکه اختلاف بین مقامت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان معمولی و نمونه‌های نظیر آنها که با سیمان اصلاح شده ساخته شده‌اند برای نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ کمتر

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

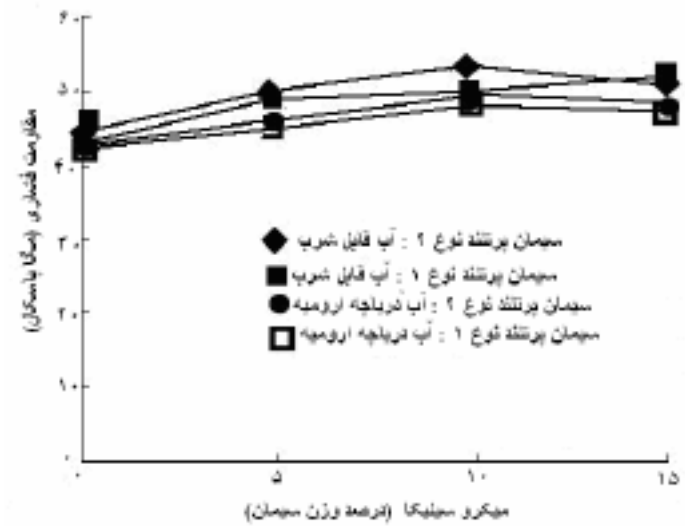


شکل ۱- مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوطهای مختلف در آب معمولی و دریاچه ارومیه

از نسبت‌های ۰/۴ و۰/۴۴ است. علت این امر سرعت زیاد سیمان معمولی در انجام ترکیبات شیمیایی است که در نتیجه آن ژل سیمان که دارای حجمی بیشتر از اجزای تشکیل دهنده آن است تشکیل می‌یابد و از مقدار تخلخل و منافذ کاسته می‌شود. همچنین کاهش نسبت آب به سیمان با کاهش پوکی، تخلخل و به تبع آن با افزایش مقاومت و دوام بتن همراه خواهد بود. بررسی مقاومت کششی مخلوطهای مشابه همانهایی که برای مطالعه مقاومت فشاری به‌کار گرفته شده بودند، نشان داد که مقاومت کششی نیز با کاهش نسبت آب به سیمان، افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که تاثیر کاهش نسبت آب به سیمان بر افزایش مقاومت فشاری بتن به‌صورت خطی نبوده و با توان بیشتری تاثیر گذار است. به طور مثال با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۴ به ۰/۴ مقاومت کششی ۲۸ روزه از $3,08\ N/mm^2$ به $3/15\ N/mm^2$ رسید در حالی‌که کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۳۸ (۰/۰۲ کاهش) منجر به افزایش مقاومت کششی از $3/15\ N/mm^2$ به $3/39\ N/mm^2$ شد که با فرض خطی بودن، این رقم باید حدود $0/045\ N/mm^2$ می‌بود که رقم حاضر حدود ۵/۳ برابر آن است. عدد اخیر برای نمونه‌های نگهداری شده در آب دریاچه ارومیه حدود ۹/۲ است که نشانگر تاثیر بسیار چشمگیر کاهش نسبت آب به سیمان در افزایش مقاومت کششی می‌باشد. علل افزایش مقاومت کششی در بتنهایی که با نسبت آب به سیمان پایینتری ساخته شده‌اند همان علل مذکور در افزایش مقاومت فشاری است. نکته قابل توجه اینکه، با توجه به بالا بودن مقاومتهای فشاری به‌دست آمده، نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری، در ترکیبهای مورد نظر حدود ۰/۰۸ بوده و دامنه تغییر آن حدود ۰/۰۰۶ است.

در کلیه نمونه‌ها با افزایش سن بتن مقدار مقاومت فشاری و کششی افزایش می‌یابد. تقریبا در همه ترکیبها، شیب زمانی نمودارها در زمان ۷ تا ۱۴ روز بیشتر از شیب زمانی ۱۴ تا ۲۸ روز بود. با بررسی این سری از نتایج، می‌توان به ۲ نکته اشاره کرد. اول اینکه با کاهش میزان نسبت آب به سیمان از کاهش مقاومت کششی نمونه‌ها بر اثر عمل‌آوری آنها در آب دریاچه ارومیه کاسته می‌شود که علت این امر کاهش تخلخل و جلوگیری از نفوذ عوامل مهاجم (SO_4^{-2}, Cl^- و ...) در اثر کاهش نسبت آب به سیمان است. ثانیا با گذشت زمان و افزایش مدت قرارگیری نمونه‌ها در آب دریاچه ارومیه اختلاف مقاومت کششی آنها با نمونه‌های نظیر خود که در آب معمولی عمل‌آوری شده‌اند بیشتر می‌شود. علت این امر تداوم هجوم سولفات منیزیم و سولفات سدیم که از مخربترین سولفاتهاست که باعث تبدیل هیدروکسید کلسیم به سولفات کلسیم و همچنین تبدیل آلومیناتها و فریتهای کلسیم هیدراته شده به سولفو آلومینات کلسیم و سولفو فریت می‌شوند که این محصولات دارای مقاومت کم و حجم بیشتری نسبت به هیدراتهای اولیه‌اند.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل۲- تاثیر در صد جایگزینی میکرو سیلیس بر مقاومت فشاری مخلوطهای مختلف

از بررسی اثر نسبت آب به سیمان بر روی مقاومت سایشی، مشاهده شد که با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت سایشی نیز همانند مقاومت فشاری و کششی افزایش می‌یابد. البته هر چند شیب افزایش مقاومت سایشی و مقاومت فشاری کاملا با هم برابر نیستند ولی تا حد قابل توجهی مشابه‌اند. اختلاف بین شیب نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچه بسیار بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط آب معمولی (حدود ۲ برابر) است. علت این امر کاهش تخلخل و نفوذ پذیری بتن در نسبتهای آب به سیمان پایین می‌باشد. همچنین مشاهده گردید که همانند مقاومت فشاری، مقاومت سایشی نمونه‌های ساخته شده از سیمان تیپ یک معمولی، بیشتر از نمونه‌های نظیر خود است که از سیمان نوع ۲ ساخته شده‌اند می‌باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان این اختلاف بیشتر شده و ارجحیت سیمان نوع یک بارزتر می‌شود. همچنین اختلاف بین مقاومت سایشی نمونه‌های ساخته شده از ۲ نوع سیمان، که در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل‌آوری شده‌اند بسیار بیشتر از نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط معمولی است.

۳-۲- اثر جایگزینی میکروسیلیس

تاثیر میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری بتن را تحت تاثیر ۲ مشخصه مهم آن می‌توان بر رسی کرد. یکی به علت داشتن فعالیت پوزولانی فوق العاده که باعث تبدیل شدن هیدروکسید کلسیم ناپایدار سیمان به عناصر پایدار و مقاوم سیلیکات کلسیم و افزایش ژل تولیدی در خمیر سیمان می‌شود و دیگر اینکه به علت داشتن دانه‌های بسیار ریز(۰/۳ الی ۰/۱ میکرون) و نرمی فوق العاده دانه‌های آن که تقریبا در حدود ۱۰۰ برابر نرمی دانه‌های سیمان است، باعث پر کردن خلل و فرج بین ذرات ژل و سیمان می‌شود و کاهش تخلخل و نفوذ پذیری موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. لازم به توضیح است که به‌دلیل تاثیر منفی افزایش میکروسیلیس بر روانی بتن، همراه با میکروسیلیس از فوق روان کننده نیز استفاده شده است.

برای بررسی نتایج به‌دست آمده از آزمایش فشاری نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف میکروسیلیس شرایط و مدت عمل‌آوری و نوع سیمان متفاوت، نمودار (۲) تهیه شده است. همان‌طوری که انتظار می‌رود مقاومت فشاری همه نمونه‌ها با افزایش سن افزایش یافته اند، اگرچه این افزایش برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در دریاچه ارومیه با شیب زمانی کمتری صورت گرفته است.

بررسی این نمودار نشان می‌دهد که در مخلوطهای ساخته شده با سیمان نوع معمولی، با افزایش درصد جایگزینی

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

میکروسیلیس، مقاومت فشاری بتن با توجه به شرایط محیطی آن افزایش می‌یابد، در حالی که برای مخلوطهای ساخته شده با سیمان نوع ۲، این مطلب در مورد درصد جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس صادق نیست. به عبارت دیگر مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش جایگزینی میکروسیلیس تا ۱۰٪ در این نوع سیمان سیر صعودی داشته و بعد از آن با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس سیر نزولی به خود می‌گیرد در حالی‌که این روند برای نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۱ به طور کلی صعودی است.

علت این امر مربوط به عملکرد مکانیزم اول میکروسیلیس و اجزاء تشکیل دهنده سیمان نوع۲ است. همان‌طوری‌که قبلا بیان شد سرعت گیرش و تشکیل ژل در سیمان نوع ۲ به علت کاهش درصد C_3S و C_3A نسبت به سیمان نوع ۱ پایینتر است. لذا مقدار فراورده‌های هیدراسیون که یکی از آنها هیدروکسید کلسیم (CaOH) است کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مکانیزم اول و عملکرد اصلی میکروسیلیس، ترکیب با محصول ناپایدار هیدروکسید کلسیم و تبدیل آن به محصول پایدار و مقاوم سیلیکات کلسیم است، لذا با کاهش هیدروکسید کلسیم با عنایت به تعادل معادله شیمیایی، مقدار کمتری میکروسیلیس مورد نیاز است. لذا در صورت به‌کارگیری میکروسیلیس بیش از مقدار لازم (مازاد بر مصرف ۲ مکانیزم فوق) باعث افزایش حجم، کاهش چسبندگی و به تبع آنها کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود.

همچنین شیب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲، با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۱۰٪، بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ است. این مطلب نیز با عنایت به مباحث فوق قابل توضیح است. بدین ترتیب که با افزایش میکروسیلیس تا ۱۰٪ ، در مخلوطهای حاوی سیمان نوع ۲، مقدار ترکیبات ناپایدار و غیر مقاوم به حداقل ممکن رسیده و ترکیبات پایدار و مقاوم جایگزین می‌شود، در حالی که در مخلوطهای حاوی سیمان نوع۱ به علت بالا بودن سرعت گیرش، مقدار هیدروکسید کلسیم زیادتر بوده و مقدار میکروسیلیس بیشتری برای ترکیب مورد نیاز است.

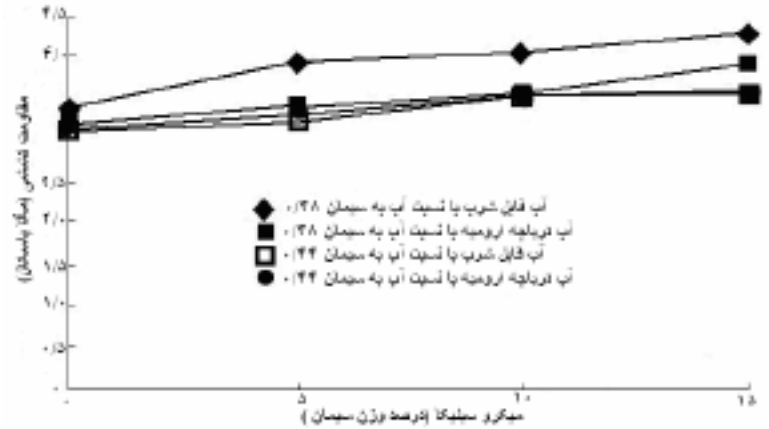
در مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ و ۲، چنین نتیجه‌گیری می‌شود که مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه‌های نظیر خود که با سیمان نوع ۱ ساخته شده‌اند، بالاتر است. علت این امر با توجه به نظریه فوق قابل توضیح است.

در بررسی تاثیر آب دریاچه ارومیه بر روی مقاومت فشاری نمونه‌ها و مقایسه آن با شرایط آب معمولی، دیده می‌شود، برای همه مخلوطها با کاهش مقاومت فشاری نسبت به نمونه‌های نگهداری شده در آب معمولی همراه بوده که با گذشت زمان به مقدار کاهش افزوده می‌شود. البته این کاهش برای نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ بسیار زیادتر از نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ بوده است. علت این امر پایین بودن مقاومت فشاری و نفوذ پذیری زیاد این نمونه‌ها در سنین پایینتر (۷ روزه) است.

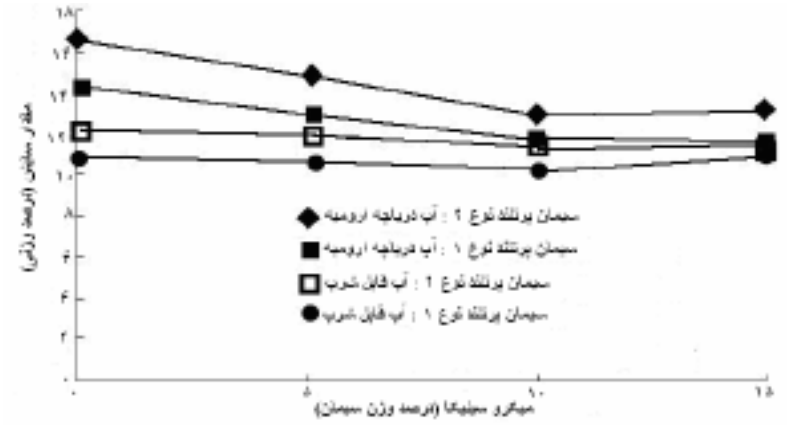
برای مطالعه اثر جایگزینی درصدهای مختلف میکروسیلیس (۰، ۵، ۱۰، ۱۵) بر روی مقاومت کششی بتن، نتایج در نمودار(۳) ارائه شده است. از بررسی این نمودار نتیجه می‌شود که با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، مقاومت کششی افزایش می‌یابد، به‌طوری که جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقاومت کششی بتن را در شرایط معمولی در حدود ۲۲٪ نسبت به نمونه بدون میکروسیلیس افزایش می‌دهد. این رقم برای نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۱ و یا ۲ که در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل‌آوری شده‌اند حدود ۲۰٪ است.

افزایش مقاومت کششی بتن‌های حاوی میکروسیلیس همانند مقاومت فشاری آنها، ناشی ازدو مکانیزم مهم میکروسیلیس است که قبلا به آنها اشاره شد. از بررسی تاثیر آب دریاچه ارومیه بر روی مقاومت کششی مخلوطها، ملاحظه می‌شود که در همه موارد، عمل‌آوری در آب دریاچه ارومیه باعث کاهش مقاومت کششی شده است و این کاهش نسبی برای بتن‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ کمتر از بتن‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ است. خصوصا این مطلب برای بتن

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل ۳- مقاومت کششی ۲۸ روزه مخلوطهای دارای میکروسیلیس در آبهای معمولی و دریاچه ارومیه



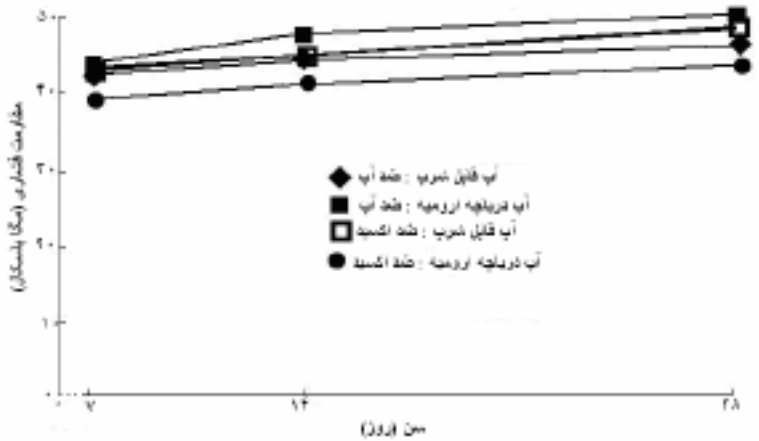
شکل ۴- مقدار سایش مخلوطهای میکروسیلیس دار نگهداری شده در آبهای معمولی و دریاچه ارومیه

با ۱۰٪ میکروسیلیس که سیمان نوع ۲ در آن به‌کار رفته کاملا واضح است زیرا در این نمونه‌ها، عمل‌آوری در آب دریاچهٔ ارومیه باعث کاهش حدود ۱۵٪ مقاومت کششی شده در حالی که این رقم برای نمونه‌های نظیر آنها که از سیمان نوع ۱ ساخته شده‌اند حدود ۱۳٪ است. البته با افزایش میکروسیلیس، اثر آب دریاچه در جهت کاهش مقاومت کششی در این نوع سیمان (نوع ۲) نیز قوت می‌یابد. علت این امر همانند مقاومت فشاری مربوط به عملکرد مکانیزم اول میکروسیلیس و اجزای تشکیل دهندهٔ سیمان نوع ۲ است که قبلا توضیح داده شد.

نکتهٔ قابل توجه در شکست نمونه‌های کششی حاوی میکروسیلیس شکست ترد و ناگهانی این نمونه‌هاست که با افزایش درصد میکروسیلیس بر میزان تردی و شکست ناگهانی آنها افزوده می‌شود در حالی‌که شکست کششی نمونه‌های بدون میکروسیلیس، اکثرا همراه با ظاهر شدن ترکهای کم عرض و گاهی به‌صورت مویی همراه بود ولی در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با باز شدن کامل و دو نیم شدن نمونه همراه بود که این عمل برای نمونه‌های حاوی میکروسیلیس زیادتر با سرعت بالا تر و به‌صورت ناگهانی و همراه با صدای انفجاری خفیف اتفاق می‌افتاد. باید اضافه کرد که تردی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچهٔ ارومیه نسبت به نمونه‌های نظیر خود که در آب معمولی عمل‌آوری شده بودند کمتر بود.

نتایج مطالعه تاثیر جایگزینی میکروسیلیس بر روی مقاومت سایشی در نمودار (۴) ارائه شده است. بررسی این نمودار نشان می‌دهد که جایگزینی میکروسیلیس، در هر ترکیب بدون توجه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل۵- تاثیر افزودنیها بر مقاومت فشاری در سنین مختلف و شرایط عمل آوری متفاوت

به نوع سیمان و شرایط عمل‌آوری، باعث کاهش مقدار سایش شده است. همچنین بررسی این نمودار نشان می‌دهد که افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در سیمان معمولی با کاهش مقدار سایش همراه بوده در حالی‌که برای نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲، افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس تا ۱۰٪ باعث کاهش سایش و بیش از آن باعث افزایش سایش شده است. نکته قابل توجه اینکه شیب کاهش مقدار سایش در نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۲ تا ۱۰٪ میکرو سلیس جایگزینی بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ است. قابل ذکر است که شیب مقدار سایش برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچه ارومیه بسیار چشمگیر است به‌طوری‌که در نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ با افزایش درصد جایگزینی سیمان تا ۱۰٪، مقدار سایش حدود ۳۰٪ کاهش می‌یابد. همچنین رقم اخیر برای نمونه‌هایی که در آنها از سیمان نوع ۱ به‌کار رفته بود حدود ۱۸٪ است.

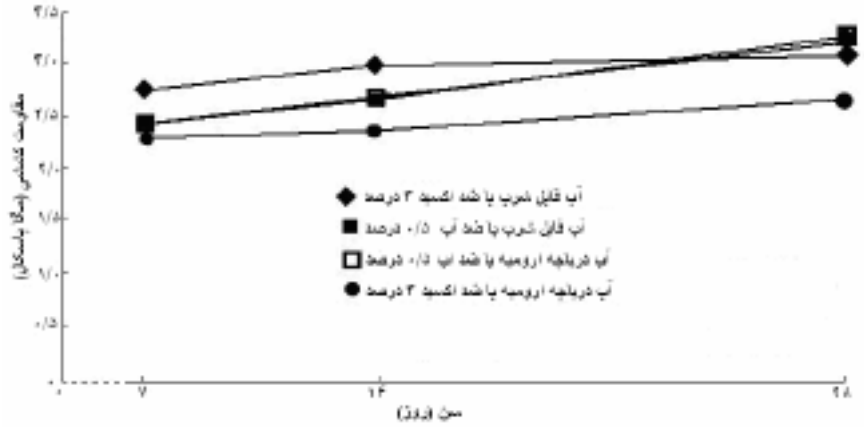
اثر آب دریاچه ارومیه بر روی مقدار سایش بدون توجه به نوع سیمان همواره مثبت بوده است. به‌عبارت دیگر عمل‌آوری نمونه‌ها در آب دریاچه ارومیه باعث کاهش مقاومت سایشی آنها (به خصوص نمونه‌های بدون میکروسیلیس) می‌شود. به طور مثال در نمونه‌های ساخته شده‌از سیمان نوع ۲ (بدون میکروسیلیس) عمل‌آوری در آب دریاچه ارومیه مقاومت سایشی را حدود ۳۰٪ کاهش داده است. با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس (تا ۱۰٪ برای سیمان نوع ۲) از اختلاف مذکور بین مقاومت سایشی نمونه‌ها عمل‌آوری شده در شرایط آب معمولی و آب دریاچه کاسته می‌شود. این اختلاف از ۳۰٪ برای نمونه‌های بدون میکروسیلیس به حدود ۵٪ برای نمونه‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس کاهش می‌یابد.

۳-۳ - تاثیر به کارگیری مواد افزودنی

در این مطالعه تاثیر سه نوع ماده افزودنی، ضد خوردگی برای محافظت میلگردهای بتن مسلح در مقابل خوردگی مخصوصا خوردگی حاصل از تهاجم یونهای کلر; ماده افزودنی آب بند کننده- برای آب بند کردن و کاهش نفوذپذیری بتن در برابر آب و یونهای مهاجم سولفات و کلر و ... که در آب دریاچه ارومیه به مقدار بسیار زیادی وجود دارند; و ماده افزودنی هوازا که با توجه به اینکه آب و هوای دریاچه ارومیه سرد کوهستانی است لذا در شبهای زمستان احتمال یخ زدن آب پاشیده شده بر روی بتن از طریق امواج وجود دارد که برای مقاوم سازی بتن در مقابل سیکلهای یخ و ذوب یخ، استفاده از این ماده افزودنی مورد مطالعه قرار گرفته است.

نسبت آب به سیمان در این ترکیبات برابر نسبت احسن ۰/۳۸ در نظر گرفته شده است و نتایج مطالعه اثر به‌کارگیری توامان، این مواد افزودنی در شکل (۵) نشان داده شده است. از مقایسه این نتایج با نتایج قبلی، چنین به نظر می‌رسد که افزودن

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل۶ - تاثیر افزودنیها بر مقاومت کششی در سنین و شرایط عمل آوری مختلف

ماده افزودنی واترپروف و ضد خوردگی به مخلوط باعث کاهش مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روزه می‌شود. این کاهش برای نمونه‌هایی که درآنها از ماده افزودنی ضد خوردگی استفاده شده و در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل‌آوری شده‌اند بیشتر است. در شرایط آب معمولی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های حاوی واترپروف کمتر از مقاومت فشاری نظیر نمونه‌های حاوی ماده افزودنی ضد خوردگی است، در حالی‌که برای شرایط آب دریاچه ارومیه عکس این مطلب حاکم بوده و مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روزه ترکیب حاوی واترپروف بیشتر از ترکیب حاوی ضد خوردگی شده است. با مقایسه نمونه‌های عمل‌آوری شده در شرایط محیطی مختلف، چنین نتیجه گرفته می‌شود که به‌طور اعم این کاهش برای نمونه‌های حاوی ماده ضد خوردگی محسوستر است. کاهش نفوذپذیری بتن ساخته شده با واترپروف عامل اصلی عملکرد بهتر آن در محیط آب دریاچه ارومیه است.

بررسیها نشان می‌دهند که مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی هواساز کاهش بسیار شدیدی نسبت به نمونه‌های نظیر خود که فاقد هوازا بوده‌اند از خود نشان داده است، که افزایش میزان حبابهای هوای داخل بتن و پوکی آن، عامل کاهش مقاومت فشاری در این ترکیب است.

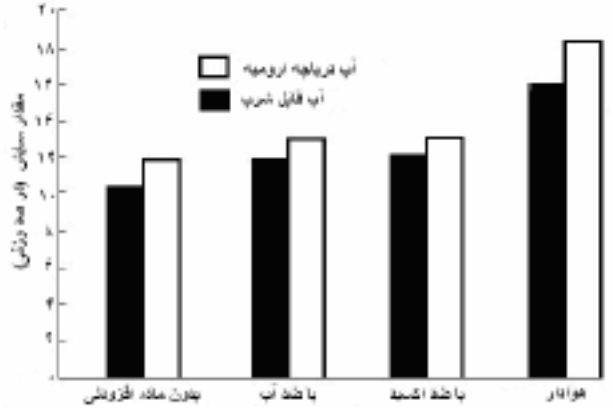
نکته قابل توجه این است که کاهش میزان تاثیر منفی آب دریاچه ارومیه بر روی مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ماده هواساز است، که با عنایت به کاهش نفوذپذیری بتن حاوی هوازا، این نکته قابل توجیه است.

نتایج بررسی اثر واترپروف، ضد خوردگی و هوازا بر روی مقاومت کششی، در شکل (۶) ارائه شده است. از این نمودار مشاهده می‌شود که افزودن این مواد مضاف بر بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس باعث افت مقاومت کششی می‌شود و این افت برای نمونه‌های حاوی واترپروف که در شرایط معمولی عمل‌آوری شده حدود ۱۴٪ و برای نمونه‌های مادهٔ ضد خوردگی حدود ۱۸٪ است. این ارقام برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در دریاچهٔ ارومیه ۱/۳٪ و ۲۰٪ است که نشانگر کاهش بسیار چشمگیر و نفوذ ناپذیری نمونه‌های واترپروف در مقابل عوامل مهاجم (Cl^-, SO^{2-}_4 و ...) موجود در آب دریاچهٔ ارومیه است.

مکانیسم اول میکروسیلیس در این دو ترکیب (حاوی واترپروف و ضد خوردگی) عاملهای اصلی کاهش مقاومت کششی‌اند.

نتایج مطالعه اثر مواد افزودنی استفاده شده بر مقاومت سایشی، در نمودار (۷) فراهم آمده است. با بررسی این نمودار، نتیجه می‌شود که افزودن مواد مضاف مذکور باعث کاهش مقاومت سایشی شده است، به‌طوری‌که این کاهش برای نمونه‌های حاوی واترپروف تقریبا کمتر از دو ماده افزودنی دیگر است. خصوصا به‌علت کاهش نفوذپذیری نمونه‌های

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل ۷- تاثیر افزودنیها بر مقاومت سایشی مخلوطهای مختلف

حاوی واترپروف، ا ختلاف مقاومت سایشی آنها با نمونه‌های شاهد (۱۰٪ میکروسیلیس) که هر دو در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل‌آوری شده‌اند، بسیار کمتر از دو ماده افزودنی دیگر است (حدود۸٪).

همچنین مشاهده می‌شود که افزودن ماده مضاف ضد خوردگی نیز باعث کاهش مقاومت سایشی شده است. این کاهش حدود۲۰٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب معمولی و حدود۱۰٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچه ارومیه است. علت اصلی این کاهش در بخش مقاومت فشاری توضیح داده شده است.

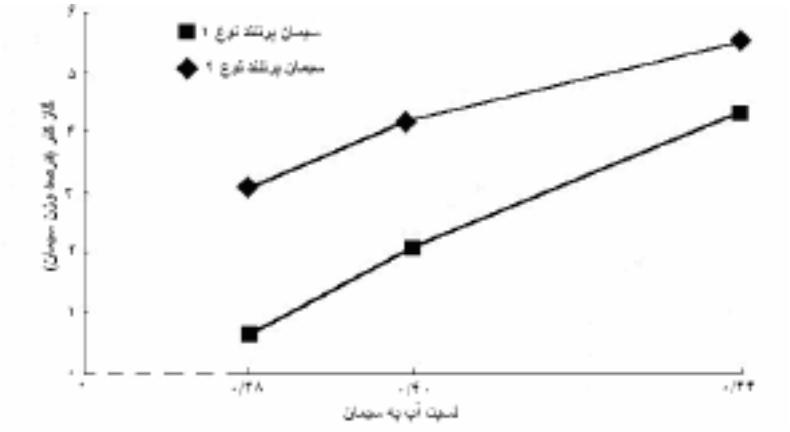
همچنین کمترین مقاومت سایشی متعلق به نمونه‌های حاوی ماده افزودنی هوازاست که حدود۵۸٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب معمولی وحدود۲٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچه ارومیه است. افزایش پوکی، خلخل و کاهش مقاومت فشاری، از عوامل اصلی کاهش مقاومت سایشی در این نمونه‌ها هستند.

۳-۴- بررسی نفوذ کلر

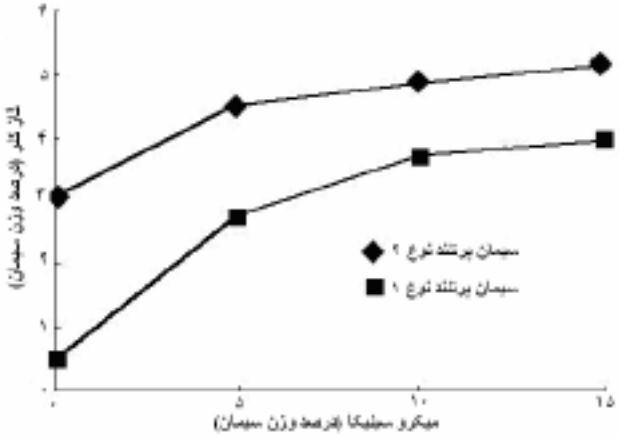
مهمترین فرایند آسیب دیدگی بتن‌آرمه به ویژه در سازه‌های بتنی معروض به آب دریا، خوردگی آرماتور است که برای شروع و تداوم آن که یک پدیدهٔ الکترو شیمیایی است، وجود یون کلر Cl^- از مهمترین عوامل تعیین کننده است. یونهای کلر بعد از نفوذ در داخل بتن خود را به سطح آرماتور می‌رسانند و برای ترکیب با یونهای آهن که در اثر واکنش‌های شیمیایی ایجاد می‌شود، با یونهای هیدروکسید (OH^-) به رقابت می‌پردازند. و کمپلکس کلرید آهن را تشکیل می‌دهند که در صورت وجود رطوبت این کمپلکس با آب ترکیب شده و به هیدروکسید فریک (قرمز مایل به قهوه‌ای) و اسید کلریدریک تبدیل می‌شود. اسید حاضر پایدار نبوده و به یونهای Cl^- و OH^- تجزیه می‌شود و سیکل خوردگی ادامه می‌یابد. لذا اگر بتنی ساخته شود که مقدار نفوذ کلر در آن حد اقل باشد و یا از سرعت حرکت یونهای کلر در داخل آن کاسته شود، می‌توان مقدار خوردگی را به نحو چشمگیری کاهش داد. برای این منظور مقدار نفوذ کلر در نمونه‌های مورد نظر که در داخل آب دریاچه ارومیه قرار گرفته بودند، به روش تجزیه شیمیایی (روش مور[۲]) در آزمایشگاه شیمی تجزیه با دقت بسیار خوبی اندازه‌گیری شد.

نتایج این بررسیها در نمودارهای (۸) تا (۱۰) ارائه شده است. به‌طور کلی از این نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت آب به سیمان، مقدار نفوذ کلر به داخل بتن افزایش می‌یابد. عامل اصلی این مطلب را می‌توان افزایش تخلخل در نسبتهای آب به سیمان بالا دانست. همچنین مشاهده می‌شود که تاثیر افزایش نسبت آب به سیمان بر روی نفوذپذیری بتن به صورت خطی نیست (همانند اثر نسبت آب به سیمان برای مقاومت فشاری) به‌طوری‌که با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۸ به ۰/۴۴ مقدار نفوذ پذیری نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع۱

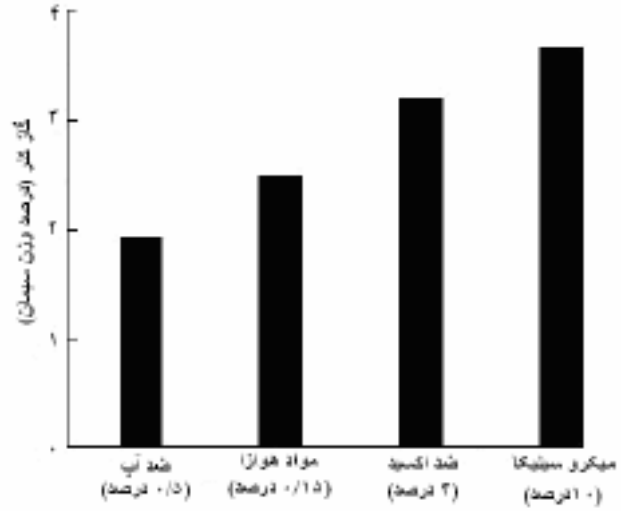
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل ۸- تاثیر نسبت آب به سیمان و نوع سیمان در مقدار نفوذ کلر



شکل ۹- تاثیر مقدار میکرو سیلیس و نوع سیمان بر مقدار نفوذ کلر



شکل ۱۰- تاثیر افزودنیها بر مقدار نفوذ کلر

حدود۶۲٪ و برای نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ حدود۴۰٪ افزایش یافته است.

همچنین ملاحظه می‌شود که قابلیت نفوذپذیری نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ است. علت این امر انجام هیدراسیون سریع و تشکیل ژل بیشتر در سیمان نوع ۱ به علت بالا بودن درصد C_3S و C_3A نسبت به سیمان نوع ۲ است، زیرا انجام هیدراسیون منجر به تبدیل ذرات سیمان به ژل سیمان می‌شود که حجم آن حدود۵۰٪ بیشتر از دانه‌های اولیه سیمان می‌باشد و لذا حجم منافذ و تخلخل در بتن کاهش می‌یابد.

با بررسی نمودار (۹) که نمایانگر تاثیر جایگزینی میکروسیلیس با درصدهای مختلف بر روی میزان نفوذ کلر است مشاهده می‌شود که به‌طور کلی جایگزینی میکروسیلیس باعث کاهش نفوذ کلر شده است. با افزایش درصد میکروسیلیس مقدار نفوذ نیز کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ به ازای جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقدار نفوذ کلر حدود۵۴٪ نسبت به نمونه شاهد (تدون میکروسیلیس) کاهش یافته است. البته قابل ذکر است که روند کاهش نفوذ کلر در نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ با افزایش درصد میکروسیلیس تقریبا به‌صورت خطی است. در حالی‌که برای نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ روند کاهش نفوذ کلر تا ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس خطی بوده و بعد از آن تقریبا

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

ثابت می‌ماند. علت این امر پایین بودن سرعت هیدراسیون و کمبود هیدروکسید کلسیم لازم برای ترکیب با میکروسیلیس در ترکیبهای حاوی سیمان نوع ۲ است که مقدار میکروسیلیس بیش از ۱۰٪ تقریبا کارایی چندانی ندارد که این مطلب در مورد مقاومت فشاری این ترکیبها نیز به اثبات رسید.

از بررسی عملکرد مواد افزودنی (واترپروف، ضد خوردگی و هوازا) در مقابل نفوذ یونهای کلرنشان داده شده در نمودار(۱۰) ترسیم شده است. همان‌طوری‌که در نمودار مشاهده می‌شود، افزودن ماده افزودنی واترپروف به مقدار ۰/۵٪ وزن سیمان، مقدار نفوذپذیری بتن در مقابل یونهای کلر را حدود۴۹٪ کاهش می‌دهد. به‌عبارت دیگر مقدار نفوذ کلر در این ترکیب به حداقل (۰/۸۴٪) رسیده است.

همچنین افزودن مواد هوازا به مقدار ۰/۱۵٪ حدود ۳۳٪ مقدار نفوذ یونهای کلر را نسبت به ترکیب حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس کاهش داده است که علت این امر وجود حبابهای ریز (۰/۱mm) ایجاد شده در داخل منافذ است که مقدار نفوذ پذیری بتن را کاهش می‌دهند. همچنین افزودن ماده ضد خوردگی نیز باعث کاهش نسبی مقدار نفوذ کلر شده است که افزایش کارایی و تراکم بیشتر بتن از عوامل این امرند.

۳-۵- تعیین مقاومت الکتریکی

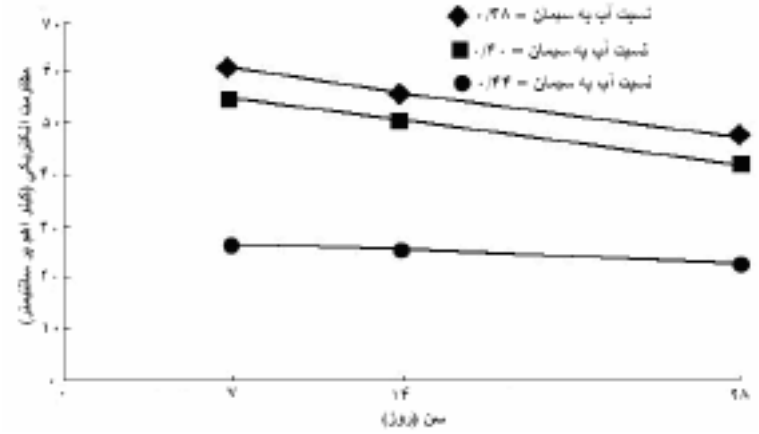
یکی از مهمترین عواملی که شروع و شدت خوردگی را کنترل می‌کند، مقاومت الکتریکی بتن است. زیرا فرایند خوردگی یک پدیده الکترو شیمیایی بوده و در آن انتقال یونهای هیدروکسید (OH^-) از کاتد به آند از طریق بتن انجام می‌گیرد. به طور کلی در فرایند خوردگی، بتن در نقش الکترولیت پیل شیمیایی عمل می‌کند که انتقال یونها را به عهده دارد لذا با افزایش مقاومت الکتریکی بتن از تحرک و انتقال یونها کاسته می‌شود. با توجه به اینکه مهمترین عوامل کنترل کننده شدت خوردگی، مقدار یونهای آزاد، قدرت تحرک یونها، مقدار و توزیع اندازهٔ منافذ و میزان رطوبت می‌باشد، مقاومت الکتریکی بتن تنها عاملی است که با تمامی این عوامل ارتباط دارد. نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی مخلوطها در نمودارهای (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده است.

با مطالعه این نمودارها مشاهده می‌شود که به‌طور کلی با افزایش مدت زمان قرارگیری نمونه‌ها در شرایط آب دریاچه از مقدار مقاومت الکتریکی آنها کاسته می‌شود. علت این امر تداوم نفوذ آب، رطوبت و یونهای موجود در آن مخصوصا کلر) در اثر افزایش زمان قرارگیری نمونه‌ها در شرایط آب دریاچه است. کاهش مقاومت الکتریکی برای ترکیبهای دارای نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ بیش از نسبتهای دیگر قابل ملاحظه است که علت آن کاهش نفوذپذیری در اثر کاهش این نسبت است. به‌طوری‌که در نسبت آب به سیمان ۰/۴۴ قسمت عمده نفوذ آب و یونهای همراه تحت اثر پدیده انتشار (اختلاف غلظت ماده در دو محیط مجاور) در ۷ روز اول قرار گرفته است در حالی‌که در نسبت ۰/۳۸ این فرایند با سرعت بسیار کمتری با توجه به نفوذپذیری پایین این ترکیب صورت می‌گیرد. از نمودار (۱۱) ملاحظه می‌شودکه با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد. به‌طور مثال با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۴ به ۰/۳۸ مقدار مقاومت الکتریکی حدود دو برابر افزایش می‌یابد، که این پدیده به علت کاهش نفوذپذیری بتن در اثر کاهش نسبت آب به سیمان است.

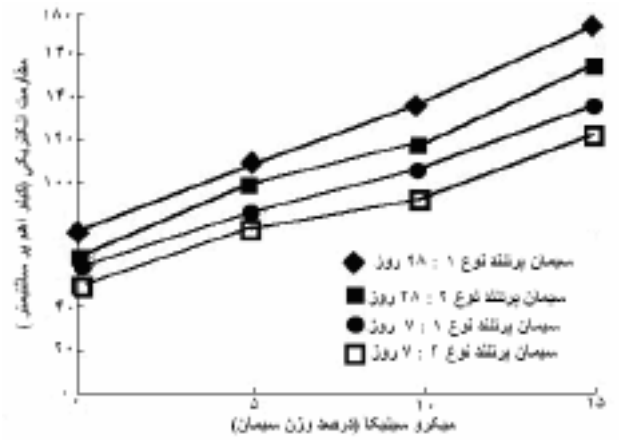
همچنین قابل ذکر است که در نسبت آب به سیمان پایین (۰/۳۸) مقاومت الکتریکی نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ در مقایسه با نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ بیشتر است. در حالی‌که با افزایش نسبت آب به سیمان از برتری سیمان نوع ۱ کاسته می‌شود که این مطلب در مورد مقاومتهای فشاری، کششی، ... کم و بیش به چشم می‌خورد. علت این امر آن است که در نسبت آب به سیمان پایین (۰/۳۸) زمان لازم برای قطع ارتباط بین منافذ مویین برای سیمان نوع ۱ بسیار کم است.

از شکل (۱۲) نیز ملاحظه می‌شودکه به‌طور کلی در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس نیز با افزایش زمان قرارگیری نمونه‌ها در داخل آب دریاچه به‌علت تداوم نفوذ آب و یونهای موجود، از مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاسته می‌شود. نکتهٔ دیگر

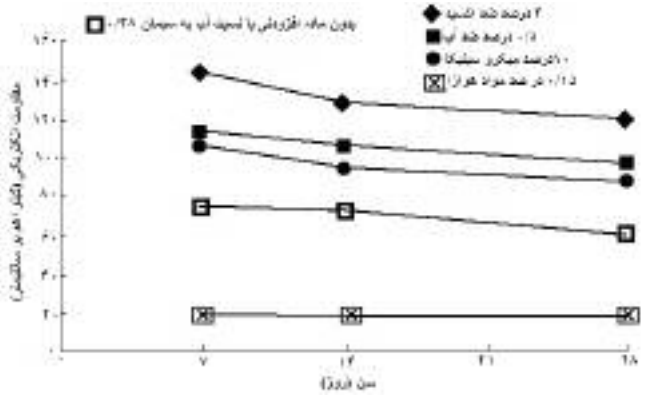
[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل ۱۱- تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت الکتریکی مخلوطهای ساخته شده از سیمان نوع ۲ در سنین مختلف



شکل ۱۲- مقایسه تاثیرات مقدار میکرو سیلیس بر مقاومت الکتریکی مخلوطهای ساخته شده از دو نوع سیمان



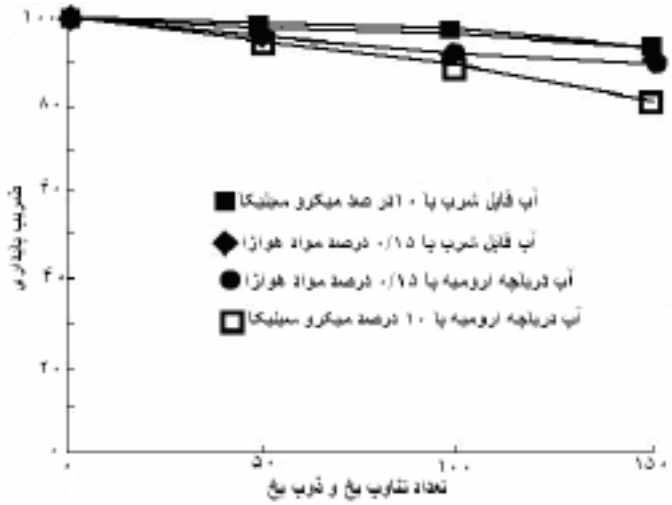
شکل ۱۳- تاثیر افزودنیها بر مقاومت الکتریکی مخلوطها در سنین مختلف

این است که بدون توجه به نوع سیمان به‌کار رفته، با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس مقاومت الکتریکی نیز افزایش می‌یابد که علت اصلی آن افزایش ترکیب پایدار سیلیکات کلسیم به‌جای هیدرات ناپایدار هیدروکسید کلسیم ($Ca(OH)_2$) می‌باشد.

البته قابل ذکر است که نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع۱دارای مقاومت الکتریکی بیشتری نسبت به نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۲ هستند. این برتری در ترکیبهای حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس بیش از ترکیبهای دیگر است، زیرا همان‌طوری‌که در بخشهای قبل اشاره شد، در سیمان نوع ۲ قسمتی از میکروسیلیس در ترکیب مذکور مازاد بر مصرف باقی می‌ماند و کارکرد خود را از دست می‌دهد.

نتایج تاثیر مواد افزودنی مورد مطالعه بر روی مقاومت الکتریکی، در نمودار (۱۳) ارائه شده است. از این نمودار پیداست که مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی مواد افزودنی واترپروف به علت کاهش نفوذپذیری، از دیگر نمونه‌ها بیشتر است. همچنین با توجه به مقاومت الکتریکی مخلوط شاهد (حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس)، نمونه‌های مواد افزودنی ضد خوردگی دارای مقاومت الکتریکی بیشتری‌اند. با توجه به پایین بودن مقدار یونهای کلر نفوذ کرده، می‌توان نتیجه گرفت که مقدار یونهای کلر آزاد نیز در این مخلوط نسبت به ترکیب شاهد کمتر است. در حالی‌که در نمونه‌های حاوی مادهٔ افزودنی هوازا عکس این

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل ۱۴- مقایسه رفتار مخلوطهای مختلف در مقابل یخ و ذوب یخ در آبهای معمولی و دریاچه ارومیه

مطلب صادق است، به این ترتیب که هر چند نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نشان می‌دهد که مقدار کل یونهای کلر موجود در مخلوط حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس بیشتر از مخلوط حاوی مادهٔ افزودنی هوازاست، ولی باید به خاطر داشت که در داخل بتن قسمتی از یونها به‌صورت ترکیب یافته و قسمت دیگر به‌صورت آزاد حضور دارند و تنها یونهای آزاد می‌توانند عامل شروع یا تشدید خوردگی شوند. لذا با توجه به پایین بودن مقاومت الکتریکی (تحرک یونها) در مخلوط حاوی ماده افزودنی هوازا، علی رغم کم بودن مقدار کل یون کلر نفوذ کرده، مقدار یونهای آزاد کلر نسبت به مخلوط شاهد بیشتر است.

۳-۶- بررسی تاثیر یخ و ذوب یخ

با عنایت به اینکه دریاچه ارومیه در منطقه معتدل کوهستانی واقع شده است و بر اساس داده‌های هواشناسی ایستگاههای سینوپتیک ارومیه، حداقل دمای هوای دریاچه و جزایر آن، در ماههای سرد سال (دی ماه) ۲۲- درجه سانتیگراد گزارش شده است، لذا احتمال یخ زدن آب پاشیده شده توسط برخورد امواج بر روی سازه و یا آب باران وجود دارد. بنابراین لازم است مقاومت مخلوطهای مورد نظر در برابر سیکلهای یخ و ذوب یخ مورد مطالعه قرار گیرد.

مخلوطهای انتخاب شده برای این قسمت از بررسیها هوازا بودند. لذا رفتار و مقاومت این مخلوط به‌عنوان شاخص تعریف رفتار مخلوطهای دیگر در نظر گرفته شد. مخلوط دیگر که دارای نسبت آب به سیمان برابر با مخلوط قبل بود تنها، در داشتن ماده افزودنی هوازا با آن تفاوت دارد. وترکیب سوم حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ بود.

با بررسی کلی نتایج این سری از آزمایشها که در شکل (۱۴) ترسیم شده است، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکلهای یخ و ذوب یخ از ضریب دوام بتن کاسته می‌شود. این کاهش مخصوصا برای نمونه‌های فاقد ماده افزودنی هوازا و میکروسیلیس بسیار فاحش است. به‌طوری‌که در ۱۵۰ سیکل یخ و ذوب یخ در آب دریاچه ارومیه حدود۵۴٪ از دوام خود را از دست داده و در پایان آزمایش نیز ترکهای نسبتا بزرگ در سطح نمونه‌ها قابل تشخیص بود.

با بررسی دقیق این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت بتن با ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس، در برابر یخ و ذوب یخ، تقریبا با مقاومت بتن حاوی ماده افزودنی هوازا قابل مقایسه است. علت این امر را می‌توان در کاهش تخلخل بتن و ابعاد خلل و فرج آن دانست. همچنین افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بتنهای حاوی میکروسیلیس نیز می‌تواند عامل مهمی برای مقابله با فشارهای مخرب داخلی حاصل از یخ زدن باشد.

از آنجایی که نسبت آب به سیمان در هر سه مخلوط مورد

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

مطالعه برابر است، لذا مخلوط فاقد ماده افزودنی استعداد بیشتری برای آسیب دیدگی دارد. زیرا همان‌طوری‌که گفته شد کاهش نفوذپذیری، تخلخل و ابعاد منافذ در بتن میکروسیلیسی از نفوذ بیشتر آب به داخل بتن جلوگیری می‌کند که در نتیجه هنگام یخ زدن(افزایش حدود۳/۸ در صد) فشار کمتری به بتن وارد می‌شود. وجود میلیونها حباب ریز هوا در داخل بتن حاوی مادهٔ افزودنی هوازا با متراکم شدن خود، هنگام یخ زدن باعث کاهش فشارهای داخلی می‌شوند، در صورتی‌که در بتن فاقد ماده افزودنی هیچکدام از این مکانیزمها وجود ندارد.

همچنین ملاحظه می‌شودکه نمونه‌های آزمایش شده در آب دریاچه ارومیه، دارای مقاومت کمتری در برابر سیکلهای یخ و ذوب یخ‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس دارای مقاومت بیشتری نسبت به بتن حاوی مادهٔ هوازاست. علت این امر را می‌توان در تشدید سیکلهای یخ و ذوب یخ در اثر وجود نمک زیاد در آب دریاچهٔ ارومیه، بالا بودن مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس دانست.

همان‌طوری که می‌دانیم وجود نمک در آب باعث پایین آمدن دمای ذوب آن می‌شود. لذا در صورت یخ زدن آب، بالا بودن غلظت نمک در محلی از بتن باعث ذوب شدن یخ آن گشته و تشکیل حوضچه‌ای در بین یخهای مجاور می‌دهد. مایع حاصل جذب بتن شده و به‌علت پایین بودن نقطه انجماد آن به‌صورت مایع باقی مانده، با ذوب شدن بیشتر یخ غلظت نمک در آب کاهش یافته و نقطه انجماد محلول بالا می‌رود و در این موقع یخ زدن اتفاق می‌افتد. بدین ترتیب وجود نمک در آب باعث تشدید سیکلهای یخ و ذوب یخ شده و دوام بتن معروض به خود را به مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد.

۳-۷- مطالعه مقدار جذب آب

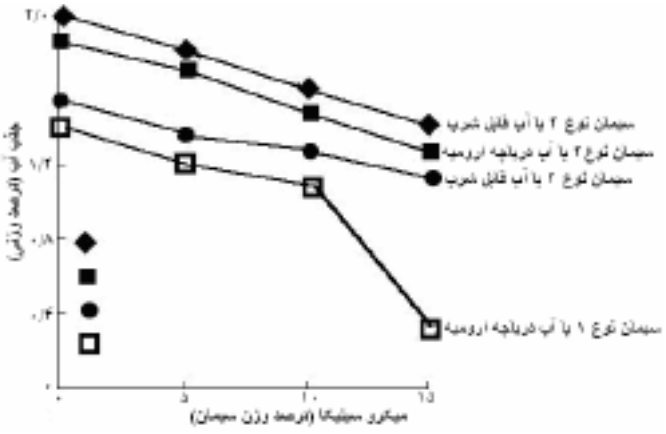
از آنجایی‌که حملهٔ کلیهٔ عوامل مهاجم از قبیل یونهای سولفات و کلر و ... در داخل حجم بتن انجام می‌شود لذا برای ایجاد آسیب دیدگی در بتن، لازم است این عوامل خود را از طریق منافذ موجود به داخل برسانند. بنابراین در اکثر موارد، مهمترین عامل برای جلوگیری از آسیب دیدگیها، ممانعت از راهیابی عوامل مهاجم به درون حجم بتن، از طریق کاهش نفوذپذیری آن است. لذا مقدار جذب سطحی آب برای مقایسه مقدار نفوذپذیری مخلوطهای مختلف اندازه‌گیری گردیده است که نتایج آن در نمودارهای (۱۵) و(۱۶) ترسیم شده‌اند.

باید توجه داشت گر چه نفوذپذیری بتن متناسب با میزان تخلخل آن می‌باشد اما این تناسب به‌صورت تابع ساده نیست بلکه به اندازهٔ توزیع و تداوم منافذ بستگی دارد. به‌عنوان مثال اگرچه تخلخل ژل سیمان ۲۸٪ است، اما به‌دلیل ساختار فوق‌العاده ریز و اندازهٔ خیلی کوچک حفره‌های ژل (۲/۵–۰/۵ nm)، نفوذپذیری آن بسیار اندک است. لذا در خمیر سیمان سخت شده، به‌علت بزرگتر بودن حفره‌های موئینه، نفوذپذیری معمولا تابعی از تخلخل موئینه است. از آنجا که تخلخل موئینه تحت تاثیر نسبت آب به سیمان و درجه هیدراسیون قرار دارد، لذا نفوذپذیری خمیر سیمان نیز به ا ین عوامل وابسته است. لذا آزمایش جذب آب (مطابق استاندارد BS-1881-Part 5) برای مقایسه مقدار نفوذپذیری مخلوطهای مختلف انجام گرفته و نتایج آن در نمودارهای (۱۵) و(۱۶) ترسیم شده‌اند.

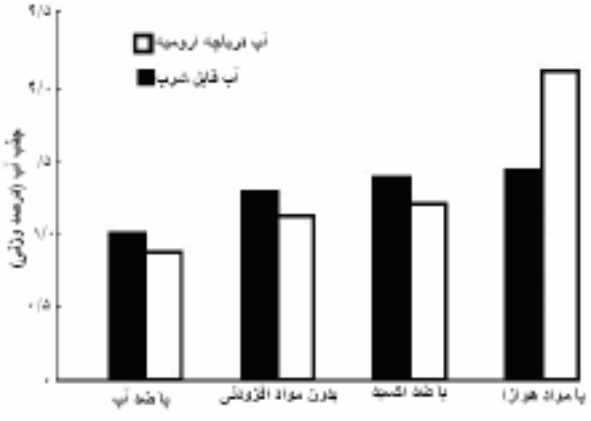
در طی این قسمت از بررسیها ملاحظه شد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقدار آب جذب شده نیز کاهش می‌یابد. برای مثال با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۴ به ۰/۳۸ در نمونه‌های ساخته شده با سیمان معمولی که در شرایط محیطی آب معمولی نگهداری شده‌اند، مقدار جذب آب حدود ۲۰٪ کاهش یافت که نشانگر کاهش منافذ موئینه در اثر کاهش نسبت آب به سیمان بود. همچنین مقدار آب جذب شده توسط نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۲ بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان معمولی با در نظرگیری شرایط عمل‌آوری و نسبت آب به سیمان برابر است. علت این پدیده را در دو عامل می‌توان پیگیری کرد. اول اینکه به‌علت بالا بودن C_3S و C_3A در سیمان معمولی درجهٔ هیدراسیون آن بالاتر از سیمان نوع ۲ است که با افزایش درجه هیدراسیون و تشکیل ژل سیمان بیشتر از مقدار

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]



شکل ۱۵- تاثیرات نوع سیمان و مقدار میکرو سیلیس بر جذب آب مخلوطها در آبهای معمولی و دریاچه ارو میه



شکل ۱۶- تاثیر افزودنیها بر جذب آب مخلوطهای مختلف در آبهای معمولی و دریاچه ارومیه

منافذ موئینه کاسته می‌شود و بنابراین از مقدار نفوذپذیری ترکیب نیز کاسته می‌شود. دوم اینکه به‌علت بالا بودن سطح ویژه (نرمی) سیمان معمولی نسبت به سیمان نوع ۲، ترکیب حاصل از هیدراسیون، منسجمتر و اندازهٔ منافذ موئینه آن نیز کمتر است.

از شکلهای (۱۵) و (۱۶) ملاحظه می‌شود که با در نظرگیری نسبت آب به سیمان و نوع سیمان یکسان، نمونه‌های نگهداری شده در آب دریاچهٔ ارومیه نسبت به نمونه‌های نظیر خود که در آب معمولی نگهداری شده‌اند، آب کمتری جذب کرده‌اند. در تحلیل این مسئله می‌توان به دوعامل اشاره کرد. یکی اینکه ترکیبات شیمیایی ایجاد شده بین یونهای شیمیایی موجود در آب دریاچه ارومیه (Mg^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}, SO^{2-}_{4}و ...) و محصولات حاصل از هیدراسیون(C_3A, $Ca(OH)_2$) اکثرا همراه با افزایش حجم‌اند. به‌طور مثال اترینگایت (C_4AH_{13})تشکیل یافته از ترکیب سولفات منیزیم ($MgSO_4$) نفوذ کرده و هیدرواکسید کلسیم($Ca(OH)_2$) حاصل از هیدراسیون، همراه با ۲۲٪ افزایش حجم نسبت به محصولات مادر است. لذا با توجه به این افزایش حجم از مقدار منافذ به نحو چشمگیری کاسته می‌شود. دیگر اینکه رسوب املاح و مواد موجود در آب دریاچهٔ ارومیه بر روی سطح بتن، لایه محافظ نازکی بر روی بتن ایجاد می‌کند که از سرعت نفوذ آب و عوامل دیگر می‌کاهد. همچنین احتمال کریستالیزه شدن املاح جمع شده در خلل و فرج بتن می‌تواند عامل بازدارندهای برای نفوذ پذیری شود. بررسی شکل (۱۵) نشان می‌دهد که به طور کلی با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس، مقدار آب جذب شده کاهش یافته است. دلیل این امر تبدیل هیدروکسید کلسیم$Ca(OH)_2$ به فاز سیلیکات کلسیم هیدراته شدهC-S-H است که باعث کوچکتر شدن منافذ می‌شود. همچنین ذرات ریز میکروسیلیس (قطر آنها تقریبا برابر ۱/۱۰۰ قطر دانه‌ای سیمان) از ضخامت منطقهٔ انتقالی[۳] (سطح تماس) بین خمیر سیمان و سنگدانه‌ها می‌کاهد و با حضور ذرات میکروسیلیس در این منطقه از آب‌آوری بتن نیز کاسته می‌شود که هر کدام از این مکانیزمها گام مهمی در جهت کاهش نفوذپذیری بتنهای حاوی میکروسیلیس است.

نکته دیگر این است که هر چند همانند حالت قبل (بدون میکروسیلیس) درصد آب جذب شده توسط نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ بیشتر از نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۱ است ولی شیب کاهش درصد جذب آب با افزایش مقدار درصد جایگزینی میکروسیلیس توسط نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲ بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ است.

با ملاحظهٔ نمودار (۱۶) مشخص می‌شود که مقدار آب جذب شده توسط نمونهٔ حاوی مادهٔ افزودنی واترپروف کمتر از نمونهٔ شاهد است. همچنین در نمونه‌های حاوی مادهٔ افزودنی ضد خوردگی آب جذب شده بیشتر از نمونه شاهد است (۵٪).

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]
[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

علت آن احاطهٔ لایهٔ نازکی از آب حاوی این مادهٔ افزودنی بر روی دانه‌هاست که باعث جلوگیری از آب‌آوری بتن می‌شود.

همچنین در نمونه‌های حاوی ماده افزودنی هوازا به‌علت بالا بودن تخلخل و کاهش وزن، مقدار درصد آب جذب شده بیشتر از نمونه‌های شاهد است (۸٪).

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایشها و بررسیهای انجام شده در طول این تحقیقات می‌توان نتیجه گرفت که:

۱- با کاهش نسبت آب به سیمان در مخلوطهای تهیه شده، بدون در نظرگیری نوع سیمان و شرایط عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری، کششی، سایشی و مقاومت الکتریکی افزایش یافته و از مقدار یونهای کلر نفوذ کرده و آب جذب شده کاسته می‌شود. بنابراین تا حد امکان نسبت آب به سیمان را باید پایین نگه داشت که کمترین مقدار نسبت آب به سیمان, با توجه به کارایی مناسب بتن و نسبتهای مورد مطالعه قرار گرفته در این تحقیقات, ۰/۳۸ است.

۲- با در نظرگیری نسبت آب به سیمان و شرایط عمل آوری و نگهداری مساوی، نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱، دارای مقاومت فشاری، کششی، سایشی، ... ودوام بیشتری نسبت به نمونه‌های نظیر خود هستند که از سیمان نوع ۲ ساخته شده‌اند و با افزایش نسبت آب به سیمان اختلاف مذکور در نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ فاحشتر می‌شود.

۳- با افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس در مخلوطهای ساخته شده از سیمان نوع ۱، مقاومت فشاری، کششی، سایشی، و الکتریکی افزایش پیدا کرده و از مقدار نفوذ پذیری بتن در مقابل یونهای کلر کاسته می‌شود. باید توجه کرد که در مخلوطهای ساخته شده از سیمان نوع ۲، افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس تا ۱۰٪ تاثیر مثبت و بعد از آن اثر منفی روی مقاومت بتن دارد.

۴- به‌کارگیری ماده افزودنی واترپروف، با کاهش چشمگیر مقدار نفوذ یون کلر و افزایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها، شرایط نسبتا مناسبی برای جلوگیری از عوامل مهاجم را فراهم می‌کند. البته قابل ذکر است که نمونه‌هایی که در آب معمولی نگهداری شده بودند با کاهش جزیی در مقاومت فشاری همراه بودند که مقدار این کاهش برای نمونه‌های نگهداری شده در آب دریاچه قابل اغماض بود (۱/۴٪).

۵- به‌کارگیری ماده افزودنی ضد خوردگی همراه با ده درصد جایگزینی میکروسیلیس، با کاهش مقاومت و افزایش نفوذپذیری همراه بود.

۶- استفاده از ماده افزودنی هوازا باعث کاهش شدید مقاومت فشاری، کششی، سایشی، و افزایش مقاومت در برابر سیکلهای یخ و ذوب یخ شد. همچنین قابل ذکر است که مقاومت نمونه‌های حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس در مقابل سیکلهای یخ و ذوب یخ، تقریبا در حد مقاومت نمونه‌های ساخته شده از مخلوط حاوی مواد افزودنی هوازاست. لذا استفاده از آن در محیط دریاچه ارومیه چندان مفید به نظر نمی‌رسد.

۷- مخلوطی که در آن از سیمان نوع ۱ همراه با ۱۰٪ جایگزینی میکروسیلیس و ۰/۵٪ واترپروف استفاده شده بود ضمن در نظرگیری اقتصاد مسئله (قیمت میکروسیلیس) دارای دوام بیشتری نسبت به سایر مخلوطهاست.

۸- علی‌رغم اینکه, در ارتباط با ایجاد سازه‌های بتنی, شرایط دریاچه ارومیه از سخت ترین شرایط برخوردار است, ولی تاثیر منفی این شرایط بر ویژگیهای بتن که در این مقاله به آنها اشاره شد، کمتر از حد انتظار است.

واژه نامه

1. Volhard and mohr
2. Mohr method
3. Transition

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]

مراجع

۱. موسوی فرد، س ع خ. ؛بررسی عوامل آسیب دیدگی بتن و راههای جلوگیری از آن در دریاچه ارومیه؛ پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بین المللی امام خمینی، ۱۳۸۰.

2. Akili, "Structures on the Gulf Coast: A Durability Assessment," *Proceedings of the international conference on the concrete in the service of mankind. Concrete for infrastructure and utilities*, pp. 4-8., 1996

۳. اداره کل محیط زیست استان آذربایجان غربی،مجله محیط شناسی، شماره۱۷، ص۱۸-۳۰، ۱۳۷۶.

4. Nilsson, L. O., "Interaction Between Microclimate and Concrete-A Prerequisite for Deterioration," *Construction and Building materials*, Vol. 10(5), pp. 301-308, 1996.

۵. جبار لوی شبستری، ت. ؛دریاچه ارو میه اشک طبیعت ایران؛ انتشارات نقش مهر، ص ۳-۲۸. اردیبهشت ۱۳۷۸.

6. BS 12 *Specification for Portland Cement*, British Standards Institution, London.

7. Neville A. M., and Brooks. j., *Concrete Technology*, Longman Scientific and Technical Publications, pp. 38-45 & 101, 1992.

8. Neville, A. M., *Properties of concrete*, 1977.

9. BS 146: 2002: Specification for Portland Blast Furnace Cements with Strength Properties Outside the Scope of BS EN 197-1.

10. BS 1881: Part 116, *Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes*, British Standards Institution, London.

11. ASTM D3967 95(01) Standard Test Methods for Tensile Strength, Splitting (Brazilian) of Concrete, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

12. ASTM C779, Standard Test Methods for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

13. Beljaars, PR., and Horwitz W. "Comparison of the Volhard and Potentiometric Methods for the Determination of Chloride in Meat Products: Collaborative Study." : *J Assoc Off Anal Chem*. Vol. 68, No. (3), pp. 480-4., 1985.

14. ASTM C666, Standard test methods for Resistance of Concrete to RapidFreezing and Thawing, American Society for Testing and Materials.

15. BS 1881: Part 122 Methods for Determination of Water Absorption, British Standards Institution, London.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2024-07-03]

[DOR: 20.1001.1.22287698.1386.26.1.9.6]