

## مطالعه بعضی مشخصه‌ها و پایداری بتن، در دریاچه ارومیه

محمود نادری\* و سید عبدالخالق موسوی فرد\*\*

دانشکده 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 عمدتاً 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 به دست آمده از ترکیب ۲ نوع سیمان، پر تندر نوع ۱ و ۲، به همراه 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 به دست 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 International 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

\*\* - کارشناس ارشد

\* - استادیار

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 میکرو و ماکرو محیط [۲]، به بررسی 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 بحرالमित 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 تا ۱۰×۳ بتوان ۵ میکرو موس بر سانتیمتر و PH آن بین ۷/۷۲ تا ۷/۷۴ است. در بین یونهای موجود در آب دریاچه ارومیه کلرید (Cl<sup>-</sup>)، سولفات (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)، بی کربنات (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)، و برم (Br<sup>-</sup>) به عنوان آنیون (یون منفی) و سدیم (Na<sup>+</sup>)، منیزیم (Mg<sup>2+</sup>)، پتاسیم (K<sup>+</sup>) و کلسیم (Ca<sup>2+</sup>) به عنوان 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 اندازه گیری 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 به طور 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 اندازه گیری شده است.

## ۲- آزمایشها

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

## 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 به دلیل پایین بودن  $C_3A$ ، علی‌رغم مقاومت خوبش در مقابل سولفات‌ها، در مقابل تهاجم یونهای کلر بسیار آسیب پذیر است [۸ و ۷]، 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 به دلیل تولید گرمای زیاد و مقاومت نهایی پایین مناسب منطقه مورد نظر نیست، در این مطالعات فقط سیمانهای پر تلند معمولی نوع ۲ او [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 ۱۵ درصد 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، ۵، ۱۰ و ۱۵ سیکل. با استفاده از هر طرح اختلاط ۱۲ نمونه مکعبی (با ابعاد  $15 \times 15 \times 15$  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  $30 \times 15$  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)، مقاومت در مقابل یخ و

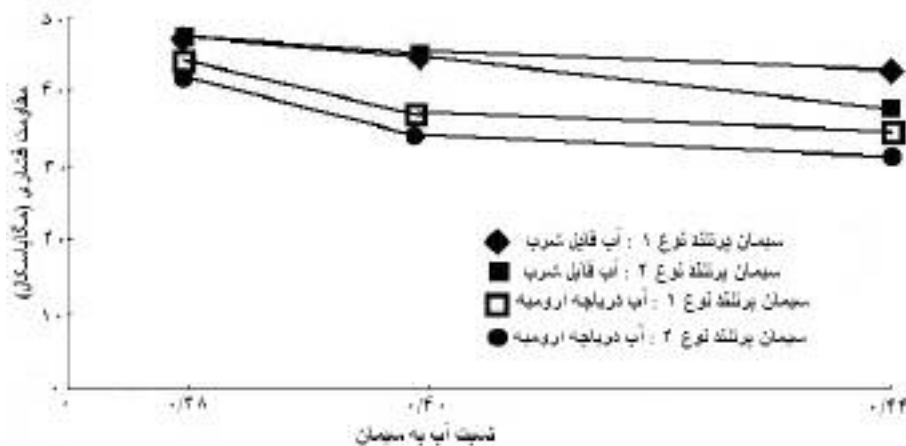
ذوب یخ (استاندارد ASTM-C ۶۶۶ [۱۴])، و آزمایش جذب آب (مطابق استاندارد BS ۱۲ [۱۵]) است.

## 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 مقاومت‌سازی 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 به دلیل 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 به طوری که مقاومت فشاری دراز مدت آن تقریباً 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

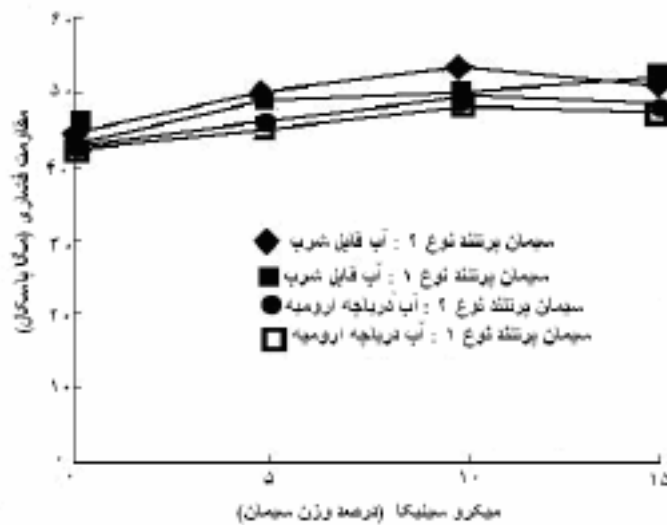


شکل ۱- مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوطهای مختلف در آب معمولی و دریاچه ارومیه

مقاومت فشاری است. نکته قابل توجه اینکه، با توجه به بالا بودن مقاومت‌های فشاری به دست 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. تقریباً 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 ( $SO_4^{2-}$  و  $Cl^-$ ) در اثر کاهش نسبت آب به سیمان است. ثانیاً 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.

از نسبت‌های ۰/۴ و ۰/۴۴ 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 به کار 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 به صورت 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  $3,08 \text{ N/mm}^2$  به  $3/15 \text{ N/mm}^2$  رسید در حالی که کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴ به ۰/۳۸ (کاهش ۰/۰۲) منجر به افزایش مقاومت کششی از  $3/15 \text{ N/mm}^2$  به  $3/39 \text{ N/mm}^2$  شد که با فرض خطی بودن، این رقم باید حدود  $0/045 \text{ N/mm}^2$  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 پایبندی ساخته شده‌اند همان علل مذکور در افزایش



شکل ۲- تاثیر در صد جایگزینی میکرو سیلیس بر مقاومت فشاری مخلوطهای مختلف

تاثیر ۲ مشخصه مهم آن می توان 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 می شود و دیگر اینکه به علت داشتن دانه های بسیار ریز (۳/۰ الی ۰/۱ میکرون) و نرمی فوق العاده دانه های آن که تقریباً در حدود ۱۰۰ برابر نرمی دانه های سیمان است، باعث پر کردن خلل و فرج بین ذرات ژل و سیمان می شود و کاهش تخلخل و نفوذ پذیری موجب افزایش مقاومت فشاری می شود. لازم به توضیح است که به دلیل تاثیر منفی افزایش میکروسیلیس بر روانی بتن، همراه با میکروسیلیس از فوق روان کننده نیز استفاده شده است. برای بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش فشاری نمونه های ساخته شده با درصدهای مختلف میکروسیلیس شرایط و مدت عمل آوری و نوع سیمان متفاوت، نمودار (۲) تهیه شده است. همان طوری که انتظار می رود مقاومت فشاری همه نمونه ها با افزایش سن افزایش یافته اند، اگرچه این افزایش برای نمونه های عمل آوری شده در دریاچه ارومیه با شیب زمانی کمتری صورت گرفته است.

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

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 می یابد. البته هر چند شیب افزایش مقاومت سایشی و مقاومت فشاری کاملاً با هم برابر نیستند ولی تا حد قابل توجهی مشابه اند. اختلاف بین شیب نمونه های عمل آوری شده در آب دریاچه بسیار بیشتر از نمونه های عمل آوری شده در شرایط آب معمولی (حدود ۲ برابر) است. علت این امر کاهش تخلخل و نفوذ پذیری بتن در نسبتهای آب به سیمان پایین می باشد. همچنین مشاهده گردید که همانند مقاومت فشاری، مقاومت سایشی نمونه های ساخته شده از سیمان تپ یک معمولی، بیشتر از نمونه های نظیر خود است که از سیمان نوع ۲ ساخته شده اند می باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان این اختلاف بیشتر شده و ارجحیت سیمان نوع یک بارزتر می شود. همچنین اختلاف بین مقاومت سایشی نمونه های ساخته شده از ۲ نوع سیمان، که در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل آوری شده اند بسیار بیشتر از نمونه های عمل آوری شده در شرایط معمولی است.

### ۳-۲- اثر جایگزینی میکروسیلیس

تاثیر میکروسیلیس بر روی مقاومت فشاری بتن را تحت

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 حالی که 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 نوع ۲ است. همان طوری که قبلاً بیان شد سرعت گیرش و تشکیل ژل در سیمان نوع ۲ به علت کاهش درصد  $C_3A$  و  $C_3S$  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 به کارگیری 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.

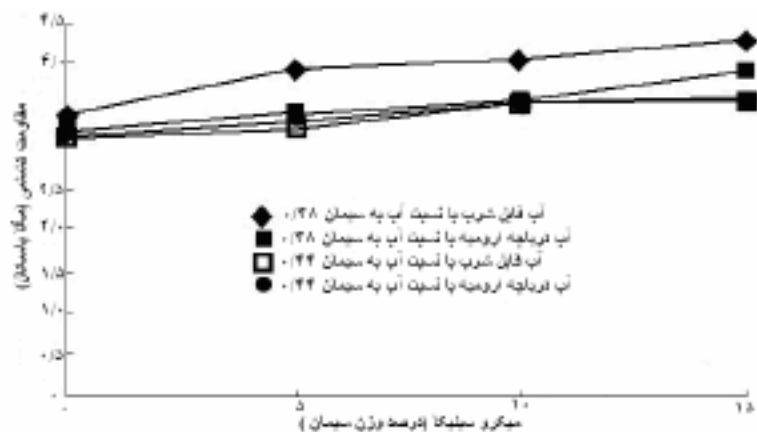
همچنین شیب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۲، با افزایش درصد میکروسیلیس تا ۱۰٪، بیشتر از نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱ است. این مطلب نیز با عنایت به مباحث فوق قابل توضیح است. بدین ترتیب که با افزایش میکروسیلیس تا ۱۰٪، در مخلوطهای حاوی سیمان نوع ۲، مقدار ترکیبات ناپایدار و غیر مقاوم به حداقل ممکن رسیده و ترکیبات پایدار و مقاوم جایگزین می‌شود، در حالی که در مخلوطهای حاوی سیمان نوع ۱ 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 (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، به طوری 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 ۲ که در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل‌آوری شده‌اند حدود ۲۰٪ است.

افزایش مقاومت کششی بتن‌های حاوی میکروسیلیس همانند مقاومت فشاری آنها، ناشی از دو مکانیزم مهم میکروسیلیس است که قبلاً 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. خصوصاً این مطلب برای بتن



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



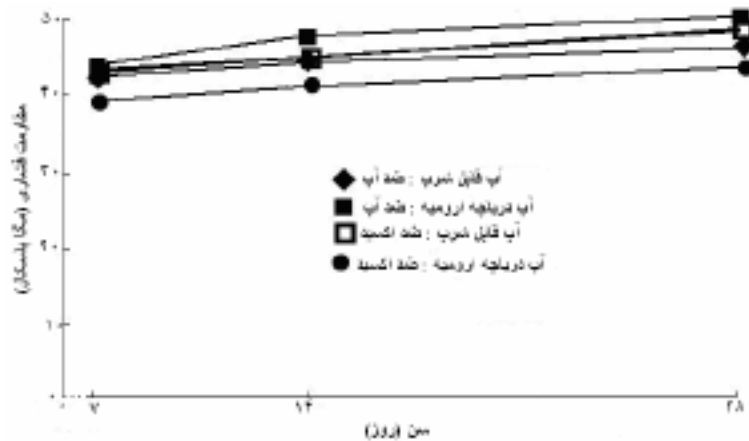
شکل ۴- مقدار سایش مخلوطهای میکروسیلیس دار نگهداری شده در آبهای معمولی و دریاچه ارومیه

آنها افزوده می شود در حالی که شکست کششی نمونه های بدون میکروسیلیس، اکثرا همراه با ظاهر شدن ترکهای کم عرض و گاهی به صورت مویی همراه بود ولی در نمونه های حاوی میکروسیلیس با باز شدن کامل و دو نیم شدن نمونه همراه بود که این عمل برای نمونه های حاوی میکروسیلیس زیادتر با سرعت بالا تر و به صورت ناگهانی و همراه با صدای انفجاری خفیف اتفاق می افتاد. باید اضافه کرد که تردی نمونه های عمل آوری شده در آب دریاچه ارومیه نسبت به نمونه های نظیر خود که در آب معمولی عمل آوری شده بودند کمتر بود.

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

با ۱۰٪ میکروسیلیس که سیمان نوع ۲ در آن به کار رفته کاملاً واضح است زیرا در این نمونه ها، عمل آوری در آب دریاچه ارومیه باعث کاهش حدود ۱۵٪ مقاومت کششی شده در حالی که این رقم برای نمونه های نظیر آنها که از سیمان نوع ۱ ساخته شده اند حدود ۱۳٪ است. البته با افزایش میکروسیلیس، اثر آب دریاچه در جهت کاهش مقاومت کششی در این نوع سیمان (نوع ۲) نیز قوت می یابد. علت این امر همانند مقاومت فشاری مربوط به عملکرد مکانیزم اول میکروسیلیس و اجزای تشکیل دهنده سیمان نوع ۲ است که قبلاً توضیح داده شد.

نکته قابل توجه در شکست نمونه های کششی حاوی میکروسیلیس شکست ترد و ناگهانی این نمونه ها است که با افزایش درصد میکروسیلیس بر میزان تردی و شکست ناگهانی



شکل ۵- تاثیر افزودنیها بر مقاومت فشاری در سنین مختلف و شرایط عمل آوری متفاوت

جایگزینی میکروسیلیس (تا ۱۰٪ برای سیمان نوع ۲) از اختلاف مذکور بین مقاومت سایشی نمونه‌ها عمل آوری 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

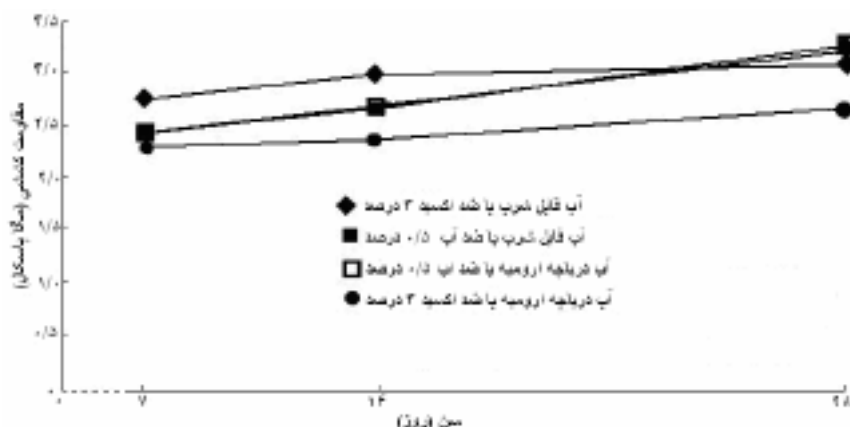
در این مطالعه تاثیر سه نوع ماده افزودنی، ضد خوردگی برای محافظت میلگردهای بتن مسلح در مقابل خوردگی مخصوصا خوردگی حاصل از تهاجم یونهای کلر؛ ماده افزودنی آب بند کننده- برای آب بند کردن و کاهش نفوذپذیری بتن در برابر آب و یونهای مهاجم سولفات و کلر و ... که در آب دریاچه ارومیه به مقدار بسیار زیادی وجود دارند؛ 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 به کارگیری توامان، این مواد افزودنی در شکل (۵) نشان داده شده است. از مقایسه این نتایج با نتایج قبلی، چنین به نظر می‌رسد که افزودن

به نوع سیمان و شرایط عمل آوری، 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 حالی که 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٪ میکروسیلیس جایگزینی بیشتر از نمونه‌های حاوی سیمان نوع ۱ است. قابل ذکر است که شیب مقدار سایش برای نمونه‌های عمل آوری شده در آب دریاچه ارومیه بسیار چشمگیر است به طوری که 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 به کار رفته بود حدود ۱۸٪ است.

اثر آب دریاچه ارومیه بر روی مقدار سایش بدون توجه به نوع سیمان همواره مثبت بوده است. به عبارت دیگر عمل آوری نمونه‌ها در آب دریاچه ارومیه باعث کاهش مقاومت سایشی آنها (به خصوص نمونه‌های بدون میکروسیلیس) می‌شود. به طور مثال در نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۲ (بدون میکروسیلیس) عمل آوری در آب دریاچه ارومیه مقاومت سایشی را حدود ۳۰٪ کاهش داده است. با افزایش درصد





شکل ۶ - تاثیر افزودنیها بر مقاومت کشتی در سنین و شرایط عمل آوری مختلف

هواساز است، که با عنایت به کاهش نفوذپذیری بتن حاوی هوازا، این نکته قابل توجه است.

نتایج بررسی اثر واترپروف، ضد خوردگی و هوازا بر روی مقاومت کشتی، در شکل (۶) ارائه شده است. از این نمودار مشاهده می شود که افزودن این مواد مضاف بر بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس باعث افت مقاومت کشتی می شود و این افت برای نمونه های حاوی واترپروف که در شرایط معمولی عمل آوری شده حدود ۱۴٪ و برای نمونه های ماده ضد خوردگی حدود ۱۸٪ است. این ارقام برای نمونه های عمل آوری شده در دریاچه ارومیه ۱۳٪ و ۲۰٪ است که نشانگر کاهش بسیار چشمگیر و نفوذ ناپذیری نمونه های واترپروف در مقابل عوامل مهاجم ( $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$  و ...) موجود در آب دریاچه ارومیه است.

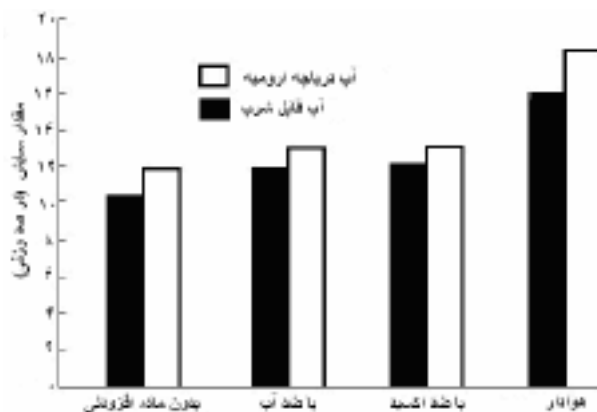
مکانیسم اول میکروسیلیس در این دو ترکیب (حاوی واترپروف و ضد خوردگی) عامل های اصلی کاهش مقاومت کشتی اند.

نتایج مطالعه اثر مواد افزودنی استفاده شده بر مقاومت سایشی، در نمودار (۷) فراهم آمده است. با بررسی این نمودار، نتیجه می شود که افزودن مواد مضاف مذکور باعث کاهش مقاومت سایشی شده است، به طوری که این کاهش برای نمونه های حاوی واترپروف تقریباً کمتر از دو ماده افزودنی دیگر است. خصوصاً به علت کاهش نفوذپذیری نمونه های

ماده افزودنی واترپروف و ضد خوردگی به مخلوط باعث کاهش مقاومت فشاری ۱۴ و ۲۸ روزه می شود. این کاهش برای نمونه هایی که در آنها از ماده افزودنی ضد خوردگی استفاده شده و در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل آوری شده اند بیشتر است. در شرایط آب معمولی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه های حاوی واترپروف کمتر از مقاومت فشاری نظیر نمونه های حاوی ماده افزودنی ضد خوردگی است، در حالی که 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 نمونه های عمل آوری شده در شرایط محیطی مختلف، چنین نتیجه گرفته می شود که به طور اعم این کاهش برای نمونه های حاوی ماده ضد خوردگی محسوس تر است. کاهش نفوذپذیری بتن ساخته شده با واترپروف عامل اصلی عملکرد بهتر آن در محیط آب دریاچه ارومیه است.

بررسیها نشان می دهند که مقاومت فشاری نمونه های حاوی هواساز کاهش بسیار شدیدی نسبت به نمونه های نظیر خود که فاقد هوازا بوده اند از خود نشان داده است، که افزایش میزان حباب های 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 نمونه های حاوی ماده



شکل ۷- تاثیر افزودنیها بر مقاومت سایشی مخلوطهای مختلف

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  $OH^-$  و  $Cl^-$  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<sup>۲</sup>) 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 نوع ۱

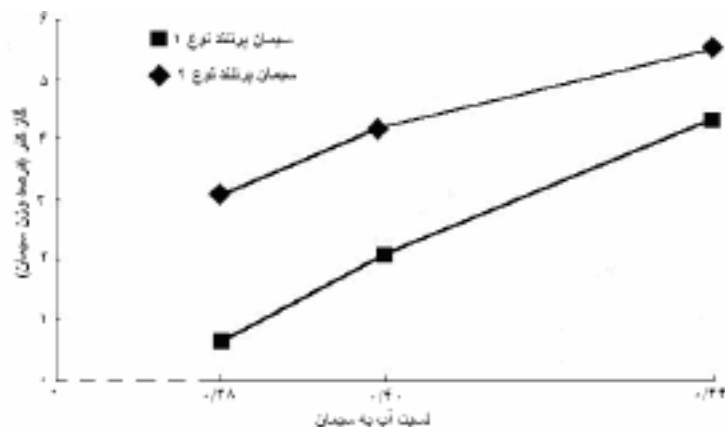
حاوی واترپروف، اختلاف مقاومت سایشی آنها با نمونه‌های شاهد (۱۰٪ میکروسلیس) که هر دو در شرایط آب دریاچه ارومیه عمل‌آوری شده‌اند، بسیار کمتر از دو ماده افزودنی دیگر است (حدود ۸٪).

همچنین مشاهده می‌شود که افزودن ماده مضاف ضد خوردگی نیز باعث کاهش مقاومت سایشی شده است. این کاهش حدود ۲۰٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب معمولی و حدود ۱۰٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچه ارومیه است. علت اصلی این کاهش در بخش مقاومت فشاری توضیح داده شده است.

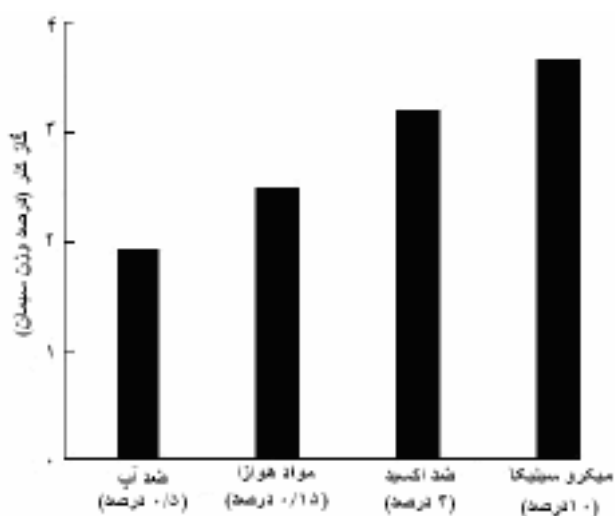
همچنین کمترین مقاومت سایشی متعلق به نمونه‌های حاوی ماده افزودنی هواز است که حدود ۵۸٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب معمولی و حدود ۲٪ برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب دریاچه ارومیه است. افزایش پوکی، خلخل و کاهش مقاومت فشاری، از عوامل اصلی کاهش مقاومت سایشی در این نمونه‌ها هستند.

### ۳-۴- بررسی نفوذ کلر

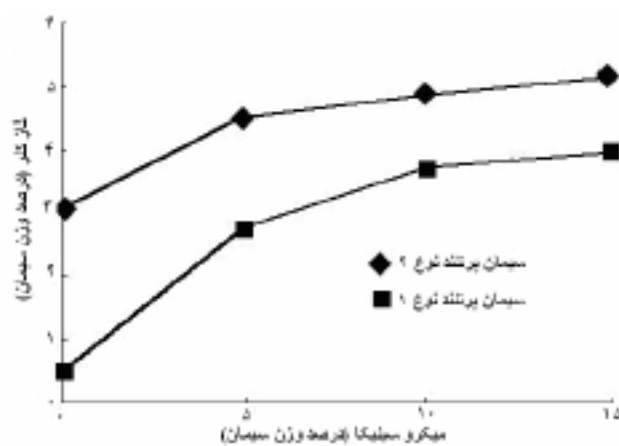
مهمترین فرایند آسیب دیدگی بتن آرمه به ویژه در سازه‌های بتنی معروض به آب دریا، خوردگی آرماتور است که برای شروع و تداوم آن که یک پدیده الکترو شیمیایی است، وجود یون کلر  $Cl^-$  از مهمترین عوامل تعیین کننده است. یونهای کلر بعد از نفوذ در داخل بتن خود را به سطح آرماتور می‌رسانند و



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



شکل ۱۰- تاثیر افزودنیها بر مقدار نفوذ کلر



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

میکروسیلیس با درصدهای مختلف بر روی میزان نفوذ کلر است مشاهده می شود که به طور کلی جایگزینی میکروسیلیس باعث کاهش نفوذ کلر شده است. با افزایش درصد میکروسیلیس مقدار نفوذ نیز کاهش می یابد به طوری که در نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۱ به ازای جایگزینی ۱۵٪ میکروسیلیس، مقدار نفوذ کلر حدود ۵۴٪ نسبت به نمونه شاهد (تدون میکروسیلیس) کاهش یافته است. البته قابل ذکر است که روند کاهش نفوذ کلر در نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۱ با افزایش درصد میکروسیلیس تقریباً به صورت خطی است. در حالی که برای نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۲ روند کاهش نفوذ کلر تا ۱۰ درصد جایگزینی میکروسیلیس خطی بوده و بعد از آن تقریباً

حدود ۶۲٪ و برای نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۲ حدود ۴۰٪ افزایش یافته است.

همچنین ملاحظه می شود که قابلیت نفوذپذیری نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۲ بیشتر از نمونه های 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 می شود که حجم آن حدود ۵۰٪ بیشتر از دانه های اولیه سیمان می باشد و لذا حجم منافذ و تخلخل در بتن کاهش می یابد.

با بررسی نمودار (۹) که نمایانگر تاثیر جایگزینی

ثابت می ماند. 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٪ تقریباً 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. همانطوری که در نمودار مشاهده می شود، افزودن ماده افزودنی واترپروف به مقدار ۰/۵٪ وزن سیمان، مقدار نفوذپذیری بتن در مقابل یونهای کلر را حدود ۴۹٪ کاهش می دهد. به عبارت 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 می دهند. 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

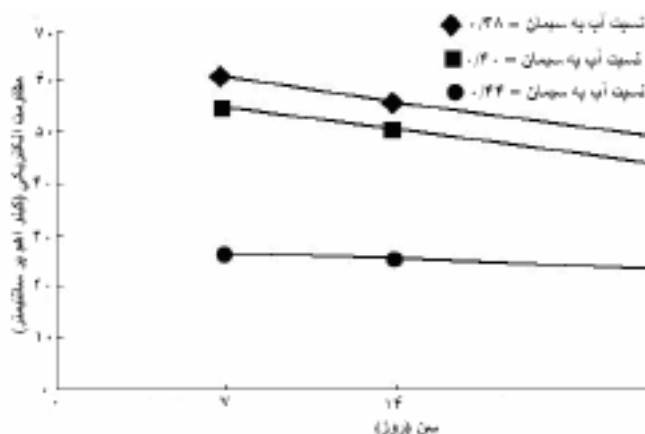
یکی از مهمترین عواملی که شروع و شدت خوردگی را کنترل می کند، مقاومت الکتریکی بتن است. زیرا فرایند خوردگی یک پدیده الکترو شیمیایی بوده و در آن انتقال یونهای هیدروکسید (OH<sup>-</sup>) از کاتد به آند از طریق بتن انجام می گیرد. به طور کلی در فرایند خوردگی، بتن در نقش الکترولیت پیل شیمیایی عمل می کند که انتقال یونها را به عهده دارد لذا با افزایش مقاومت الکتریکی بتن از تحرک و انتقال یونها کاسته می شود. با توجه به اینکه مهمترین عوامل کنترل کننده شدت خوردگی، مقدار یونهای آزاد، قدرت تحرک یونها، مقدار و توزیع اندازه منافذ و میزان رطوبت می باشد، مقاومت الکتریکی بتن تنها عاملی است که با تمامی این عوامل ارتباط دارد. نتایج

اندازه گیری مقاومت الکتریکی مخلوطها در نمودارهای (۱۱) تا (۱۳) ارائه شده است.

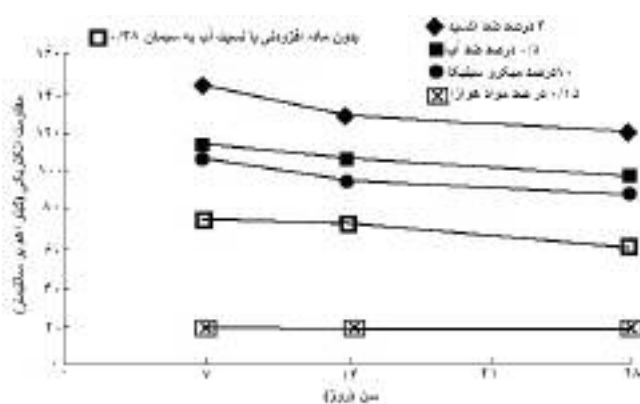
با مطالعه این نمودارها مشاهده می شود که به طور کلی با افزایش مدت زمان قرارگیری نمونه ها در شرایط آب دریاچه از مقدار مقاومت الکتریکی آنها کاسته می شود. علت این امر تداوم نفوذ آب، رطوبت و یونهای موجود در آن مخصوصاً کلر) در اثر افزایش زمان قرارگیری نمونه ها در شرایط آب دریاچه است. کاهش مقاومت الکتریکی برای 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. به طوری که 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 حالی که در نسبت ۰/۳۸ این فرایند با سرعت بسیار کمتری با توجه به نفوذپذیری پایین این ترکیب صورت می گیرد. از نمودار (۱۱) ملاحظه می شود که با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت الکتریکی افزایش می یابد. به طور مثال با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۴ به ۰/۳۸ مقدار مقاومت الکتریکی حدود دو برابر افزایش می یابد، 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 نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۱ در مقایسه با نمونه های ساخته شده با سیمان نوع ۲ بیشتر است. در حالی که با افزایش نسبت آب به سیمان از برتری سیمان نوع ۱ کاسته می شود که این مطلب در مورد مقاومت های فشاری، کششی، ... کم و بیش به چشم می خورد. علت این امر آن است که در نسبت آب به سیمان پایین (۰/۳۸) زمان لازم برای قطع ارتباط بین منافذ موین برای سیمان نوع ۱ بسیار کم است.

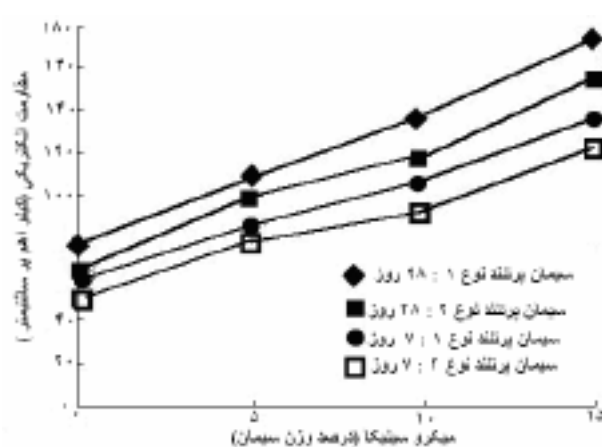
از شکل (۱۲) نیز ملاحظه می شود که به طور کلی در نمونه های حاوی میکروسیلیس نیز با افزایش زمان قرارگیری نمونه ها در داخل آب دریاچه به علت تداوم نفوذ آب و یونهای موجود، از مقاومت الکتریکی نمونه ها کاسته می شود. نکته دیگر



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



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



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

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 ماده افزودنی هوازا عکس این

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

البته قابل ذکر است که نمونه‌های ساخته شده از سیمان نوع ۱ دارای 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



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

بودند. لذا رفتار و مقاومت این مخلوط به عنوان 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. و ترکیب 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 می شود که با افزایش تعداد سیکلهای یخ و ذوب یخ از ضریب دوام بتن کاسته می شود. این کاهش مخصوصا برای نمونه های فاقد ماده افزودنی هوازا و میکروسیلیس بسیار فاحش است. به طوری که در ۱۵۰ سیکل یخ و ذوب یخ در آب دریاچه ارومیه حدود ۵۴٪ از دوام خود را از دست داده و در پایان آزمایش نیز ترکهای نسبتا بزرگ در سطح نمونه ها قابل تشخیص بود.

با بررسی دقیق این نمودار می توان 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 می توان در کاهش تخلخل بتن و ابعاد خلل و فرج آن دانست. همچنین افزایش چشمگیر مقاومت فشاری بتنهای حاوی میکروسیلیس نیز می تواند 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

مطلب صادق است، به این ترتیب که هر چند نتایج آزمایش تجزیه شیمیایی نشان می دهد که مقدار کل یونهای کلر موجود در مخلوط حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس بیشتر از مخلوط حاوی ماده افزودنی هوازاست، ولی باید به خاطر داشت که در داخل بتن قسمتی از یونها به صورت ترکیب یافته و قسمت دیگر به صورت آزاد حضور دارند و تنها یونهای آزاد می توانند عامل شروع یا تشدید خوردگی شوند. لذا با توجه به پایین بودن مقاومت الکتریکی (تحرك 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 داده های 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

مطالعه برابر است، لذا مخلوط فاقد ماده افزودنی استعداد بیشتری برای آسیب دیدگی دارد. زیرا همان طوری که گفته شد کاهش نفوذپذیری، تخلخل و ابعاد منافذ در بتن میکروسیلیسی از نفوذ بیشتر آب به داخل بتن جلوگیری می کند که در نتیجه هنگام یخ زدن (افزایش حدود ۳/۸ در صد) فشار کمتری به بتن وارد می شود. وجود میلیونها حباب ریز هوا در داخل بتن حاوی ماده افزودنی هوازا با متراکم شدن خود، هنگام یخ زدن باعث کاهش فشارهای داخلی می شوند، در صورتی که در بتن فاقد ماده افزودنی هیچکدام از این مکانیزمها وجود ندارد.

همچنین ملاحظه می شود که نمونه های آزمایش شده در آب دریاچه ارومیه، دارای مقاومت کمتری در برابر سیکل های یخ و ذوب یخ اند. همچنین مشاهده می شود که بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس دارای مقاومت بیشتری نسبت به بتن حاوی ماده هوازا است. علت این امر را می توان در تشدید سیکل های یخ و ذوب یخ در اثر وجود نمک زیاد در آب دریاچه ارومیه، بالا بودن مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس دانست.

همان طوری که می دانیم وجود نمک در آب باعث پایین آمدن دمای ذوب آن می شود. لذا در صورت یخ زدن آب، بالا بودن غلظت نمک در محلی از بتن باعث ذوب شدن یخ آن گشته و تشکیل حوضچه ای در بین یخ های مجاور می دهد. مایع حاصل جذب بتن شده و به علت پایین بودن نقطه انجماد آن به صورت مایع باقی مانده، با ذوب شدن بیشتر یخ غلظت نمک در آب کاهش یافته و نقطه انجماد محلول بالا می رود و در این موقع یخ زدن اتفاق می افتد. بدین ترتیب وجود نمک در آب باعث تشدید سیکل های یخ و ذوب یخ شده و دوام بتن معروض به خود را به مقدار چشمگیری کاهش می دهد.

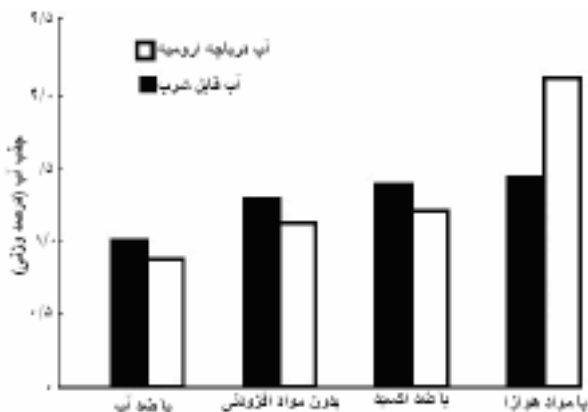
### ۳-۷- مطالعه مقدار جذب آب

از آنجایی که حمله کلیه عوامل مهاجم از قبیل یون های سولفات و کلر و ... در داخل حجم بتن انجام می شود لذا برای ایجاد آسیب دیدگی در بتن، لازم است این عوامل خود را از

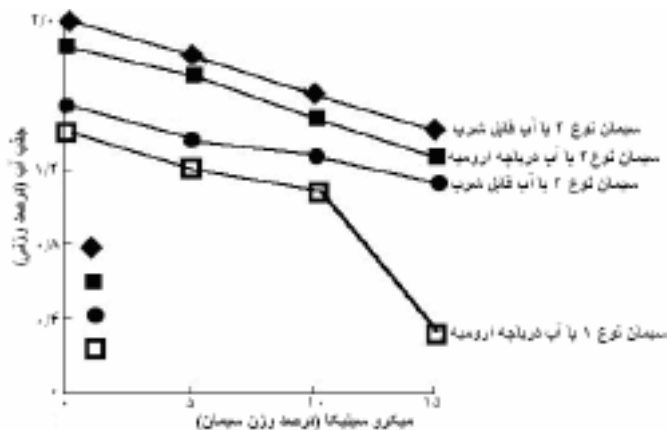
طریق منافذ موجود به داخل برسانند. بنابراین در اکثر موارد، مهمترین عامل برای جلوگیری از آسیب دیدگیها، مانعیت از راهیابی عوامل مهاجم به درون حجم بتن، از طریق کاهش نفوذپذیری آن است. لذا مقدار جذب سطحی آب برای مقایسه مقدار نفوذپذیری مخلوط های مختلف اندازه گیری گردیده است که نتایج آن در نمودارهای (۱۵) و (۱۶) ترسیم شده اند.

باید توجه داشت گر چه نفوذپذیری بتن متناسب با میزان تخلخل آن می باشد اما این تناسب به صورت تابع ساده نیست بلکه به اندازه توزیع و تداوم منافذ بستگی دارد. به عنوان مثال اگرچه تخلخل ژل سیمان ۲۸٪ است، اما به دلیل ساختار فوق العاده ریز و اندازه خیلی کوچک حفره های ژل (۲/۵-۰/۵ nm)، نفوذپذیری آن بسیار اندک است. لذا در خمیر سیمان سخت شده، به علت بزرگتر بودن حفره های موئینه، نفوذپذیری معمولاً 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 این عوامل وابسته است. لذا آزمایش جذب آب (مطابق استاندارد BS-1881-Part 5) برای مقایسه مقدار نفوذپذیری مخلوط های مختلف انجام گرفته و نتایج آن در نمودارهای (۱۵) و (۱۶) ترسیم شده اند.

در طی این قسمت از بررسیها ملاحظه شد که با کاهش نسبت آب به سیمان مقدار آب جذب شده نیز کاهش می یابد. برای مثال با کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۴۴ به ۰/۳۸ در نمونه های ساخته شده با سیمان معمولی که در شرایط محیطی آب معمولی نگهداری شده اند، 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 نمونه های حاوی سیمان نوع ۲ بیشتر از نمونه های حاوی سیمان معمولی با در نظرگیری شرایط عمل آوری و نسبت آب به سیمان برابر است. علت این پدیده را در دو عامل می توان پیگیری کرد. اول اینکه به علت بالا بودن  $C_3A$  و  $C_3S$  در سیمان معمولی درجه هیدراسیون آن بالاتر از سیمان نوع ۲ است که با افزایش درجه هیدراسیون و تشکیل ژل سیمان بیشتر از مقدار



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



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

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 شده C-S-H است که باعث کوچکتر شدن منافذ می‌شود. همچنین ذرات ریز میکروسیلیس (قطر آنها تقریباً برابر  $1/100$  قطر دانه‌های سیمان) از ضخامت منطقه انتقالی<sup>۳</sup> (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 ملاحظه نمودار (۱۶) مشخص می‌شود که مقدار آب جذب شده توسط نمونه حاوی ماده افزودنی واترپروف کمتر از نمونه شاهد است. همچنین در نمونه‌های حاوی ماده افزودنی ضد خوردگی آب جذب شده بیشتر از نمونه شاهد است (۵٪).

منافذ موئینه کاسته می‌شود و بنابراین از مقدار نفوذپذیری ترکیب نیز کاسته می‌شود. دوم اینکه به علت بالا بودن سطح ویژه (نرمی) سیمان معمولی نسبت به سیمان نوع ۲، ترکیب حاصل از هیدراسیون، منسجمتر و اندازه 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 دریاچه ارومیه نسبت به نمونه‌های نظیر خود که در آب معمولی نگهداری شده‌اند، آب کمتری جذب کرده‌اند. در تحلیل این مسئله می‌توان به دو عامل اشاره کرد. یکی اینکه ترکیبات شیمیایی ایجاد شده بین یونهای شیمیایی موجود در آب دریاچه ارومیه ( $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ) و محصولات حاصل از هیدراسیون ( $C_3A$ ,  $Ca(OH)_2$ ) اکثراً 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 دریاچه 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



علت آن احاطه لایه نازکی از آب حاوی این ماده 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 عمل‌آوری و نگهداری مساوی، نمونه‌های ساخته شده با سیمان نوع ۱، دارای مقاومت فشاری، کششی، سایشی، ... و دوام 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 نسبتاً مناسبی برای جلوگیری از عوامل مهاجم را فراهم می‌کند. البته قابل ذکر است که نمونه‌هایی که در آب معمولی نگهداری شده بودند با کاهش جزئی در مقاومت فشاری همراه بودند که مقدار این کاهش برای نمونه‌های نگهداری شده در آب دریاچه قابل اغماض بود (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، تقریباً 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 ۵/۵٪ 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 سخت‌ترین 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

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، شماره ۱۷، ص ۱۸-۳۰، 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 ارومیه 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 Rapid Freezing and Thawing, American Society for Testing and Materials.
15. BS 1881: Part 122 Methods for Determination of Water Absorption, British Standards Institution, London.