

## کاهش اسیدیته آب دریاچه ارومیه با استخراج سولفات به روش غیر

### تبخیری و تاثیر آن روی کاهش خوردگی بتن در پل میانگذر دریاچه ارومیه

مجید اسم حسینی<sup>۱\*</sup>، نادر صولتی فر<sup>۲</sup>، سیما صولتی فر<sup>۳</sup>، مسعود حبیبی مهر<sup>۴</sup>

۱- گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۳- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی ارومیه

۴- کارشناس ارشد، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۰/۶/۲

تاریخ پذیرش: ۹۰/۹/۱۲

#### چکیده:

در مناطقی که خاک‌ها و آبهای زیرزمینی، حاوی مقادیر زیادی سولفات هستند و یا سازه‌هایی که در محیط‌های دریائی احداث شده‌اند، طراحی بتن باید به نوعی باشد که در مقابل حملات سولفاتی، مقاومت کافی را دارا باشد. نمک‌های سولفاتی در حالت جامد، قادر به آسیب رساندن به بتن نمی‌باشند؛ اما زمانی که بصورت محلول در می‌آیند، می‌توانند با مواد ایجاد شده از عملیات هیدراتاسیون سیمان یعنی هیدروکسید کلسیم، آلومینات کلسیم و هیدرات سیلیکات، واکنش دهند که این واکنش‌ها به فروپاشی و از هم گسیختگی بتن منتهی می‌شود. در این مطالعه، میزان استحصال و بررسی شرایط بهینه جهت بهره‌برداری سدیم سولفات از آب دریاچه ارومیه با بهره‌گیری از شرایط اقلیمی منطقه و حداقل انرژی و با استفاده از روش‌های غیر تبخیری مورد بررسی قرار گرفته است. به دلیل فراوانی ذخایر سولفات سدیم در ایران و همچنین عدم وجود واکنش شیمیایی در فرایند فرآوری و در نتیجه سادگی تجهیزات، نکات فنی و شرایط عملیاتی مطالعه در این زمینه اهمیت زیاد دارد. به علت وجود مقادیر فراوان یون سولفات در آب دریاچه ارومیه، سازه بتنی میانگذر شهید کلاتتری از آسیب خوردگی حاصل از سولفات، در امان نخواهند بود. در این طرح علل خوردگی توسط یون سولفات بررسی گردیده و نتایج حاصل به دست آمده است.

**واژگان کلیدی:** کاهش خوردگی بتن، پل میانگذر دریاچه ارومیه، یون سولفات، روش غیر تبخیری.

## مقدمه:

آب از دیرباز در سرزمین خشک و بیابانی ایران از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. چرا که به غیر از قسمت های شمالی و غربی ایران، سایر مناطق در محدوده ای قرار می گیرند که از بارندگی مناسبی برخوردار نیستند.<sup>۱</sup> مسئله آب های شور یکی از مشکلاتی است که کشورمان با آن روبرو است. جداسازی نمک ها از آب شور پساب های صنعتی و زهکشی زمین های کشاورزی می تواند نقش بسزایی در بهبود کیفیت منابع آب و بالا بردن کیفیت محصولات صنعتی ایفا نماید. از طرف دیگر بعضی از این نمک های مصرفی بعد از جداسازی و خالص سازی از ارزش بالایی در بعضی صنایع کشور برخوردارند و از این رو می تواند درآمدزا باشد. امروزه در کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه، برنامه ریزی، طرح و بهره برداری بهینه از منابع آبی و معادن جهت استحصال و افزایش بهره برداری اهمیت ویژه ای پیدا کرده است به طوریکه محققان زیادی در سراسر دنیا برای دستیابی به این منابع و یا هر چه نزدیکتر شدن به هدف مورد نظر، طرح های تحقیقاتی مختلفی را پیشنهاد می کنند. برآورد و تخمین میزان منابع موجود و همچنین خالص سازی منابع بهره برداری شده از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است به طوریکه یکی از پایه های اصلی صنایع و اقتصاد هر کشوری به شمار می رود. براساس این مطالعه و با توجه به وجود ذخایر فراوان در کشورمان، مخصوصاً دریاچه ارومیه که حاوی غلظت بالایی از یون از جمله سولفات و سدیم و ... است، ضروری می نمود تا طرحی نیمه صنعتی پیشنهاد شود که در مقیاس صنعتی استحصال سدیم سولفات را مورد مطالعه قرار دهد. سولفات دو سود از املاح قابل استحصال شوراب ارومیه است. سولفات دو سود به صورت کانی میرابیلیت در حوضچه ها تشکیل شده و طی فرایند های شیمیایی خاصی به سولفات دو سود تبدیل می شود.<sup>۲</sup>

از طرف دیگر بتن با توجه به مقرون به صرفه بودن، وجود منابع فراوان مواد متشکل، سازگاری با محیط و مقاومت مطلوب و دلایل دیگر بیشترین کاربرد را در طرح های مهندسی عمران دارد. متأسفانه در سال های اخیر در کشورهای صنعتی بیش از ۵۰٪ بودجه های عمرانی صرف تعمیر سازه های بتنی شده است. به هر حال آنچه مهم است دلیل اصلی این آسیب دیدگیها شرایط سخت و مهاجم اقلیمی و محیطی است. در خصوص تهاجم اسیدها، محلول های اسیدی معدنی و اسیدهای آلی از مهمترین اسیدهایی هستند که بتن را در معرض خرابی قرار می دهند.<sup>۲</sup>

بتن از دو فاز مختلف یعنی سیمان هیدراته شده (فاز ملات) و دانه های سنگی (فاز سنگدانه) تشکیل شده است. فصل مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه که به ناحیه انتقال موسوم است مهمترین نقش را در خصوص آسیب دیدگی های موجود بازی می کند که هر چه ارتباط این منافذ با یکدیگر بیشتر باشد نفوذ پذیری افزایش یافته و عوامل مهاجم براحتی وارد بتن خواهند شد.<sup>۳</sup>

بتن و فولاد دو نوع مصالحی هستند که امروزه بیشتر از سایر مصالح در ساخت انواع سازه ها از قبیل سازه پل، سد، مترو، فرودگاه، روسازی راه و ساختمان بناهای مسکونی و اداری و غیره به کار برده می شوند. شاید به جرأت می توان گفت که

بدون این دو پیشرفت جوامع بشری به شکل کنونی میسر نبود. با توجه به اهدافی که از ساخت یک بنا دنبال می شود، بتن و فولاد به تنهایی و یا به صورت مکمل کار برد پیدا می کنند. فولاد به لحاظ اینکه در شرایط به دقت کنترل شده ای تولید می شود دارای کاربری آسانتر از بتن است. بتن در یک شرایط کاملاً متفاوتی با توجه به پارامترهای مختلف از قبیل نوع سیمان، نوع مصالح و شرایط آب و هوایی تولید و استفاده می شود و عدم اطلاع کافی از خواص مواد تشکیل دهنده بتن و نحوه تولید و کاربرد آن می تواند ضایعات جبران ناپذیری را به دنبال داشته باشد. با توجه به پیشرفت علم و تکنولوژی در قرن اخیر، علم شناخت انواع بتن و خواص آنها نیز توسعه قابل ملاحظه ای داشته است، به نحوی که امروزه انواع مختلف بتن با مصالح گوناگون تولید و استفاده می شود و هر یک خواص و کاربرد مخصوص به خود را داراست. هم اکنون انواع مختلفی از سیمانها که حاوی پوزولانها، خاکستر بادی، سرباره کوره های آهن گدازی، سولفورها، پلیمرها، و افزودنیهای متفاوتی هستند، تولید می شود. بتن محصولی است که از اختلاط آب با سیمان و سنگدانه های مختلف در اثر واکنش آب با سیمان در شرایط محیطی خاصی به دست می آید و دارای ویژگیهای خاص است.

### ترکیب شیمیایی دریاچه ارومیه

از نظر طبقه بندی شیمیایی، آب دریاچه ارومیه تیپ کلره داشته و باقیمانده خشک عناصر محلول در آب آن در دوران پربابی در حدود ۲۲۰ تا ۲۸۰ گرم در لیتر می باشد.<sup>۴</sup> بخش عمده املاح دریاچه را کلرید سدیم، سولفات سدیم، کلرید منیزیم، سولفات منیزیم و سولفات پتاسیم تشکیل می دهد.<sup>۵</sup> مقدار یون های مخرب در آب دریاچه ارومیه بسیار بیشتر از دریاچه های دیگر و حتی خلیج فارس می باشد. به طور مثال مقدار یون کلر موجود در آب دریاچه ارومیه که یکی از عوامل مهم در خوردگی بتن می باشد ۶/۷ برابر یون کلر موجود در آب خلیج فارس و ۱۶ برابر دریای بالتیک است. همچنین مقدار سولفات موجود در آب دریاچه ارومیه ۸/۳ برابر یون سولفات موجود در آب خلیج فارس و ۱۸/۲ برابر دریای بالتیک می باشد. یون سولفات نیز از مخربترین یون های موجود در آب دریا می باشد که دوام سازه ای بتن را به صورت جدی تهدید می کند. در جدول شماره ۱ مقایسه ای بین املاح شیمیایی موجود در دریاچه ارومیه و دریاچه های مهم دنیا آمده است:<sup>۶</sup>

جدول ۱: مقایسه ترکیب شیمیایی دریاچه های مختلف با آب دریاچه ارومیه (بر حسب میلی اکی والان در لیتر)

نسبت املاح دریاچه به خلیج فارس	نسبت املاح دریاچه ارومیه به دریای بالتیک	دریای بالتیک	دریای اتلانتیک	دریای مدیترانه	خلیج فارس	دریاچه ارومیه	یون ها
۳/۱۲	۷/۸	۱۸۰	۴۳۰	۴۲۰	۴۵۰	۱۴۰۴	K <sup>+</sup>
۳/۱۶	۷/۱۵	۱۹۰	۴۱۰	۴۷۰	۴۳۰	۱۳۶۰	Ca <sup>+2</sup>

۸/۵	۲۰/۶۹	۶۰۰	۱۵۰۰	۱۷۸۰	۱۴۶۰	۱۲۴۱۸	Mg <sup>+2</sup>
۸/۳	۱۸/۲	۱۲۵۰	۲۵۴۰	۳۰۶۰	۲۷۲۰	۲۲۷۵۲	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
۶/۹	۱۷/۲۸	۴۹۸۰	۹۹۵۰	۱۱۵۶۰	۱۲۴۰۰	۸۶۰۶۶	Na <sup>+</sup>
۶/۷	۱۶/۰۳	۸۹۶۰	۱۷۸۳۰	۲۱۳۸۰	۲۱۴۵۰	۱۴۳۷۰۴	Cl <sup>-</sup>
۶/۸	۱۶/۵۶	۱۶۱۶۰	۳۲۶۶۰	۳۸۶۷۰	۳۸۹۱۰	۲۶۷۷۰۴	مجموع

### مقابله با خوردگی فولاد و بتن

مسأله خوردگی فولاد در بتن از معضلات عمده کشورهای مختلف جهان است. این مسأله حتی در کشورهای پیشرفته همچون آمریکا، کانادا، ژاپن و بعضی کشورهای اروپایی هزینه های زیادی را برای تعمیر آنها به دنبال داشته است. به عنوان مثال در گزارش های اخیر بررسی پل ها در آمریکا حدود ۱۴۰،۰۰۰ پل مسأله داشته اند. این مسأله در کشورهای در حال توسعه و در کشورهای حاشیه خلیج فارس بسیار شدیدتر بوده و سازه های بتنی زیادی در زمانی نه چندان طولانی دچار خوردگی و خرابی گشته اند. بررسی ها در این مناطق نشان می دهد که اگر مصالح مناسب انتخاب گردد، بتن با مشخصات فنی ویژه این مناطق طرح گردد، در اجرای بتن از افراد کاردان استفاده شود و سرانجام اگر عمل آوری کافی و مناسب اعمال شود، بسیاری از مسائل بتن بر طرف خواهد گشت. به هر حال برای پیشگیری در سال های اخیر روش ها و موادی توصیه و به کار گرفته شده است که تا حدی جوابگوی مسأله بوده است.

استفاده از آرماتورهای ضدزنگ و نیز آرماتورهای با الیاف پلاستیکی FRP یکی از این روش ها است که به علت هزینه بالای آن هنوز کاملاً توسعه نیافته است. به علاوه عملکرد دراز مدت این مواد باید پس از تحقیقات روشن گردد. از روش های دیگر کاربرد حفاظت کاتدیک در بتن می باشد که با استفاده از جریان معکوس با آند قربانی شونده می توان محافظت خوبی برای آرماتورها ایجاد نمود. این روش نیاز به مراقبت دائم دارد و نسبتاً پرخرج است ولی روش مطمئنی می باشد. برای محافظت آرماتور در مقابل خوردگی، چند سالی است که از آرماتور با پوشش اپوکسی استفاده می شود. تاریخچه مصرف این آرماتورها بویژه در محیط های خورنده نشان می دهد که در بعضی موارد این روش موفق و در پاره ای ناموفق بوده است. به هر حال اگر پوشش سالم بکار گرفته شود با این روش می توان حدود ۱۰ تا ۱۵ سال خوردگی را عقب انداخت. استفاده از ممانعت کننده ها و بازدارنده های خوردگی بتن نیز به دو دهه اخیر بر می گردد. مصرف بعضی از این مواد همچون نیترات کلسیم و نیترات سدیم جنبه تجارتي یافته است. به هر حال عملکرد این مواد در تاخیر انداختن خوردگی در تحقیقات آزمایشگاهی و نیز در محیط های واقعی مناسب بوده است. بازدارنده های دیگری از نوع آندی و کاتدی مورد آزمایش قرار گرفته اند ولی دلیل گرانی زیاد هنوز کاربرد صنعتی پیدا نکرده اند. برای محافظت بیشتر آرماتور و کم کردن

نفوذپذیری پوشش های مختلف سطحی نیز روی بتن آزمایش و به کار گرفته شده است. این پوشش ها که اغلب پایه سیمانی و یا رزینی دارند با دقت روی سطح بتن اعمال می گردند. عملکرد دوام این پوشش به شرایط محیطی وابسته بوده و در بعضی محیط ها عمر کوتاهی داشته و نیاز به تجدید پوشش بوده است. پوشش های با پایه سیمانی هم ارزانتتر بوده و هم به علت سازگاری با بتن پایه پیوستگی و دوام بهتری در محیط های خورنده و گرم نشان می دهند.

با پیشرفت روزافزون انقلاب تکنولوژیک به ویژه در تولید بتن های خاص برای مناطق و شرایط خاص می توان از این بتن ها در ساخت و سازهای آینده استفاده نمود. دانش استفاده صحیح از مصالح، اجرای مناسب و عمل آوری کافی می تواند به دوام بتن در مناطق خاص بیفزاید. تحقیقات گسترده و دامنه داری برای بررسی دوام بتن های خاص در شرایط ویژه و در دراز مدت بایستی برنامه ریزی و به صورت جهانی به اجرا گذاشته شود. حمله سولفات به علت وجود مقادیر فراوان در آب دریاچه ارومیه و همچنین رطوبت زیاد محیط، اسید سولفوریک و باران اسیدی و حملات آنها بر سطح بتن و واکنش شیمیایی  $SO_2$  که با رطوبت موجود تولید سولفات کلسیم نموده که به سادگی بخاطر محلول بودن آن توسط آب شسته می شود، بنابراین، سفیدک زدگی (Leaching) انجام می شود و در نتیجه مقاومت بتن کاهش می یابد. بخصوص تحت فعالیت مداوم  $SO_2$  و سولفات کلسیم تولید شده، در صورت شستشو جهت تمیز کاری با آب دریا، کریستال گچ بوجود می آید که با سیمان واکنش داده و تاماسایت (Thaumasite) تولید می شود که باعث تولید خمیر بسیار نرمی می شود. نرخ و پیشرفت خرابی توسط حمله سولفاتها بستگی به غلظت سولفات، نوع نمک سولفات، نفوذپذیری، و تخلخل بتن دارد. خرابی، در زمانی اتفاق می افتد که بتن از یک طرف تحت شرایط فشار آب و از طرف دیگر هوا باشد. تر و خشک شدن در اثر نشت آب و یا شستشوی سازه بتنی با آب شور دریا، هیدروکربورهای ریخته شده روی سطح بتن، باعث نفوذ آب در خلل و فرج خمیر سیمان و سنگدانه ها و در نتیجه افزایش نفوذپذیری می شود. نفوذ یون کلر و حملات سولفات ها باعث خوردگی آرماتورها و در نتیجه ترک خوردگی می شوند. حرکات ماشین آلات، باعث تولید ترک ها در بتن می شود. نشت بخار و گازها از لوله های موجود در پالایشگاه ها باعث خرابی سطوح بتنی و در نتیجه اجزاء تشکیل دهنده بتن می شود. علاوه بر شرایط مضر بر بتن، شرایط نگهداری و حفاظت سازه های بتنی نیز مهم می باشند.

### حمله سولفات ها

عبارت است از حرکت یون های سولفات و  $SO_3$  به داخل بتن و ترکیب آنها با آلومینات ها و در نتیجه تورم و ترکیدگی بتن در جایی که واکنش های شیمیایی مضر اتفاق می افتد. Webster و Kukacka بیان می کنند که گازهای خشک برای اجزاء سازه مضر نمی باشند، ولی همراه با رطوبت به داخل خمیر سیمان نفوذ کرده باعث خرابی بتن می شوند. هرچند  $SO_2$  خشک برای بتن مضر نمی باشد، ولی به هر حال یک واحد حجم آب، ۴۵ واحد حجم گاز را حل می کند که محلول

کاهش اسیدیته آب دریاچه ارومیه با استخراج سولفات به روش ...

اسید سولفوریک حاصل باعث خرابی بتن می شود. در تأسیسات صنعتی، در جائیکه سولفور دی اکسید از دوده آزاد شده و با رطوبت اتمسفر ترکیب می شود، باعث تولید اسید سولفیدریک شده که به تدریج با وجود اکسیژن، اسید سولفوریک تولید می شود، و باعث ایجاد باران های اسیدی می شود که برای بتن و فولاد مضر می باشد. این واکنش ها، عامل اصلی کاهش وزن مخصوص، مقاومت و دوام بتن می شوند. با اجزاء آلومیناتی سیمان ترکیب شده تولید اترینگایت می نماید که به آلومینات - سولفوکلسیم معروف است. اترینگایت در محلول کلرور حل شده و در زمان شستشوی سطح بتن از روی آن پاک می شود و به دلیل تخلخل زیاد خلل و فرجهای موئینه موجود در بتن سخت شده بخاطر نسبت آب به سیمان بالا W/C در زمان ساخت بتن و اثر حمله سولفات ها باعث خرابی بتن می گردد. همچنین می تواند در اثر سفیدک زدن (Leaching) مداوم، سولفات کلسیم و گچ بوجود آید.

در مناطقی که خاک ها و آب های زیرزمینی، حاوی مقادیر زیادی سولفات هستند و یا سازه هایی که در محیط های دریائی احداث شده اند، طراحی بتن باید به نوعی باشد که در مقابل حملات سولفاتی، مقاومت کافی را دارا باشد. نمک های سولفاتی در حالت جامد، قادر به آسیب رساندن به بتن نمی باشند؛ اما زمانی که بصورت محلول در می آیند، می توانند با مواد ایجاد شده از عملیات هیدراسیون سیمان یعنی هیدروکسید کلسیم، آلومینات کلسیم و هیدرات سیلیکات، واکنش دهند که این واکنش ها به فروپاشی و از هم گسیختگی بتن منتهی می شود. جهت بهبود عملکرد بتن در محیط های سولفاتی، روش هایی وجود دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

- استفاده از سیمان مقاوم در برابر سولفات.
- استفاده از نسبت آب به سیمان حدود ۰/۳۲ و استفاده از خاکستر گدازه های آتشفشانی یا خاکستر کوره.
- استفاده از سیلیکافوم (میکرو سیلیس) و استفاده از آب بندکننده ها یا سایر مواد افزودنی بهبود دهنده.<sup>۷</sup>

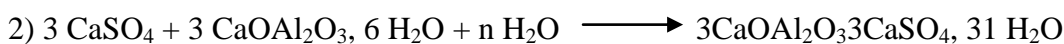
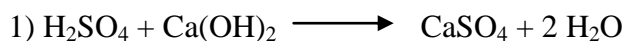
### آسیب دیدگی های بتن در محیط های اسیدی

سازه های بتنی با سولفات های سدیم، پتاسیم و منیزیم که در خاک ها یا در منابع زیرزمینی بصورت محلول می باشند در تماس اند. در برج های خنک کننده و لوله های فاضلاب نیز خطر تهاجم اسیدی به بتن وجود دارد. آسیب دیدگی بتن در معرض سولفات ها ممکن است همراه با واکنش های ذیل باشد:

- تبدیل هیدروکسید کلسیم حاصل از هیدراتاسیون سیمان به کلسیم سولفات و متبلور شدن که این ترکیب با انبساط و تخریب بتن همراه است.
- تبدیل آلومینات ها و فریت های کلسیم هیدراته شده به سولفوآلومینات کلسیم و سولفوفریت. این محصولات نیز حجم بیشتری نسبت به هیدرات های اولیه در بتن دارند و تشکیل آنها سبب انبساط و تخریب بتن می گردد.

• تجزیه سیلیکات‌های کلسیم هیدراته شده که سبب نرم شدن بتن و کاهش مقاومت آن می‌شود.

در صورت تهاجم کلسیم سولفات به بتن فقط واکنش دوم رخ می‌دهد ولی اگر سدیم سولفات به بتن نفوذ کند واکنش اول و دوم اتفاق می‌افتد و چنانچه نمک از نوع منیزیم سولفات باشد ممکن است آسیب دیدگی بتن به دلیل هر سه واکنش مورد اشاره باشد. در صورت تهاجم اسیدسولفوریک به بتن واکنش‌های ذیل رخ می‌دهد:



در رابطه دوم مشاهده می‌شود که سولفوآلومینات (اترینگایت) تشکیل می‌شود که بلوری شدن آن منجر به انبساط و تخریب بتن می‌شود. اگر بتن مسلح در محیط‌های اسیدی قرار گیرد خوردگی در آرماتور ایجاد خواهد شد. در صورتی که حمله کلر و سولفات‌ها توأم باشد فرآیند خوردگی تشدید خواهد شد. البته لازم به ذکر است که هنوز در این زمینه تحقیقات لازم و کافی صورت نگرفته است. در صورت تهاجم سایر اسیدها می‌توان گفت که مکانیزم تهاجم بستگی به نوع اسید دارد و در حالت کلی می‌توان مکانیزم را در دو فاز مطرح نمود، فاز اول تشکیل نمک کلسیم و فاز دوم تهاجم اسید به ژل سیمان. البته فاز دوم زمانی صورت می‌گیرد که تمام هیدروکسید کلسیم در فاز اول مصرف شده باشد. اگر نمک کلسیم محلول باشد در فاز ملات جایجا شده و فاز ملات سست خواهد شد.<sup>۳</sup>



شکل ۱: نمونه ای از خوردگی بتن در اثر تهاجم اسیدی

جهت دستیابی به بتنی مقاوم در برابر اسید که دارای مقاومت فشاری نسبتاً زیادی است موارد ذیل توصیه می‌شود. خارج کردن یون سولفات می‌تواند در این امر بسیار کمک کننده باشد و نیازی به استفاده از روش‌های زیر نباشد.

۱. انتخاب نوع سیمان از نظر مقادیر  $\text{C}_4\text{AF}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{S}$  و قلیائی‌ها.

۲. استفاده از نسبت سیمان نسبتاً پایین در بتن تقریباً برابر  $225 \text{ Kg/m}^3$ .

۳. استفاده از نسبت آب به مواد سیمانی پائین و کمتر از ۰/۴۲.

۴. استفاده از فوق روان کننده جهت بدست آوردن کارایی بالا.

۵. استفاده از میکروسلیس و خاکستر بادی (یا پوزولان مناسب) بصورت توأم.

۶. بالا بردن چگالی بتن یا کاهش تخلخل.

۷. استفاده از طرح اختلاط مناسب و مخلوط نمودن مناسب بتن.<sup>۳</sup>

### کارهای عملی استحصال سدیم سولفات

جهت استحصال سدیم سولفات از آب دریاچه ارومیه مراحل زیر انجام شد:

۱. جمع آوری نمک میرابیلیت رسوب داده شده از آب دریاچه ارومیه در مواقع سرد سال.
  ۲. تهیه نمک  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  بدون آب از میرابیلیت  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ، با استفاده از حرارت.
  ۳. اندازه گیری سولفات و سدیم سولفات در نمک بدست آمده از آب دریاچه ارومیه.
- در این تحقیق، هدف استحصال نمک سدیم سولفات از آب دریاچه ارومیه به روش غیر تبخیری و استفاده از شرایط جوی و آب و هوایی منطقه بود. ابتدا از منطقه چی چست دریاچه ارومیه چهار نمونه به حجم ۱۵ لیتر و در ارتفاع ۲۰ سانتی متر در ظرف های بزرگی با شرایط یکسان تهیه شد. به مدت ۴۴ روز (از ۱۵ دی تا ۳۰ بهمن که هوا خنک تر می باشد) در محیط بیرون، آزمایشات انجام شده است. همچنین ۱۰ نمونه ۱ لیتری هم آزمایش شدند. در فاصله هر ۸ ساعت دمای هوا اندازه گیری شده است، تا بهترین شرایط جهت خلوص بیشتر سدیم سولفات به دست آید و بتوان میزان تقریبی سدیم سولفات به دست آمده از دریاچه ارومیه را تخمین زد. با توجه به شرایط جغرافیایی محیط و هوای سرد نمک از آب جدا و رسوب تولید شده است. نمونه های بزرگ به ترتیب در هر ۱۱ روز یکبار نمونه برداری شدند تا به شرایط صنعتی نزدیکتر باشند. نمونه های ۱ لیتری در هر ۴ روز نمونه برداری شدند تا معلوم شود آیا تغییرات دمایی که در زمستان در طول روز روی می دهد، تغییری در میزان استحصال خواهد گذاشت یا موجب کاهش میزان استحصال خواهد شد. نمک به دست آمده قبل از خشک شدن وزن و سپس در آن در دمای بیشتر از ۱۰۵ درجه سلسیوس حرارت داده شده است تا به صورت کاملاً پودر تبدیل شده باشد. در هر نمونه میزان سولفات و سدیم سولفات هم با روش وزن سنجی و هم با روش اسپکتروفتومتر اندازه گیری شد و روش ها با هم مقایسه گردید. میزان ناخالصی ها از قبیل کلر، کلسیم، منیزیم و پتاسیم در نمک بدست آمده، هم با روش حجم سنجی و هم با روش های جذب اتمی اندازه گیری شدند. در جدول شماره ۲ نتایج حاصل از نمونه های آمده است.

جدول ۲: مقادیر اندازه گیری شده عناصر در نمک به دست آمده از آب دریاچه ارومیه

نام نمونه	کلر mg/kg	کلسیم mg/kg	منیزیم g/kg	سولفات g/kg	سدیم g/kg	پتاسیم g/kg	کربنات mg/kg	سدیم سولفات g/kg	درصد سدیم سولفات
نمونه ۱	۶۵	۴۸۰	۴	۶۲۴	۳۲۲	۷	۵/۲	۹۲	۹۲



نمونه ۲	۷۳/۷	۴۸۰	۴	۶۵۰	۳۴۶	۷/۱	۵/۲	۹۶۰	۹۶
نمونه ۳	۷۳/۷	۴۸۱	۴/۰۵	۶۵۰	۳۴۷	۶/۵	۶	۹۶۰	۹۶

### مقایسه و نتیجه گیری حاصل از انجام آزمایشات

با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شده است که با کاهش دمای هوا، مقدار استحصال سدیم سولفات افزایش یافته و میزان خلوص هم بیشتر شده است. بنابراین استفاده از روش های غیر تبخیری یعنی توسط بروود هوا، روش بسیار مفید و مقرون به صرفه جهت استحصال سدیم سولفات از آب دریاچه ارومیه می باشد. با توجه به کوهستانی بودن منطقه و شرایط آب و هوایی و جغرافیایی منطقه این روش توصیه شده است.

طبق آزمایشات مکرر انجام یافته، سدیم سولفات در دماهای پایین تر از ۵- درجه سانتی گراد از آب جدا می شود و چون از ۱۵ بهمن ماه به بعد دما کاهش زیادی یافته است و به ۸- درجه سانتی گراد رسیده و با توجه به نتایج سولفات و سدیم سولفات، میزان سولفات و سدیم سولفات از نمونه اول به نمونه آخر افزایش یافته، می توان گفت بروود هوا در این افزایش تاثیر داشته است. پس بهترین دما جهت استحصال، دمایی در حدود ۸- درجه سانتی گراد می باشد. بنابراین در این طرح که با توجه به شرایط اقلیمی منطقه با حداقل انرژی و با استفاده از روش های غیر تبخیری، سدیم سولفات استحصال می گردد لذا در نوع خود بی نظیر می باشد. پس استحصال سدیم سولفات در دمای زیر ۸- درجه سانتی گراد باعث شده ماکسیمم مقدار سولفات موجود در آب دریاچه رسوب کند که مقرون به صرفه بودن روش غیر تبخیری را نشان می دهد. بنابراین می توان با این روش ماکسیمم مقدار سولفات را با انرژی طبیعی و رایگان از آب دریاچه ارومیه خارج نمود و کمک فراوانی به کاهش خوردگی سازه بتنی پل میانگذر نمود. با توجه به مطالعات انجام شده نتیجه شد محیط حاوی سولفات به همراه کلر شرایط بسیار نامناسبی برای سازه های بتنی فراهم می آورد. حذف سولفات این منطقه در افزایش طول عمر بهره برداری سازه های بتنی بسیار موثر خواهد بود و با این روش می توان از صرف مقادیر زیاد هزینه جهت ترمیم سازه های بتنی جلوگیری نمود.

### برآورد اقتصادی استحصال سدیم سولفات از آب دریاچه ارومیه

دریاچه ارومیه با مساحتی حدود ۵۷۵۰ کیلومتر مربع و حجمی در حدود  $۴۵/۳ \times ۱۰^{۱۰}$  متر مکعب ( $۴۵/۳ \times ۱۰^{۱۳}$  لیتر، این حجم بر اساس عمق حداقل ۶ متر مقایسه گردیده است) حاوی مقادیر فراوانی از املاح و عناصر معدنی می باشد که بهره برداری اصولی هر یک از این عناصر می تواند منبع اقتصادی ارزشمندی باشد<sup>۸</sup>. با توجه به مقادیر فراوان سولفات سدیم در آب دریاچه ارومیه که در هر لیتر ۲۵ گرم سدیم سولفات به دست آمده و با توجه به حجم آب دریاچه  $۳/۴۵ \times ۱۰$  تخمین

کاهش اسیدیته آب دریاچه ارومیه با استخراج سولفات به روش ...

زده می شود  $10 \times 862/5$  میلیارد تن سولفات سدیم در دریاچه نرفته است. با توجه به قیمت یک تن در بازار ایران که در حدود ۲۰۰۰۰۰۰ ریال می باشد برآورد می شود در صورت بهره برداری اصولی سالانه ۱۷۲۵۰۰۰ میلیارد ریال به دست آید که از نظر اقتصادی به منطقه و کشور یاری خواهد رساند.

### نتیجه گیری کلی:

دریاچه ارومیه علاوه بر جاذبه های طبیعی و توریستی، دارای املاح باارزشی در خود می باشد که بهره برداری اصولی از آن ها بی شک تاثیر مهمی در رونق اقتصادی منطقه خواهد داشت. همچنین با توجه به مقادیر عظیم یون سولفات در آب دریاچه، با استحصال آن مخصوصاً با هزینه پایین و با روش غیر تبخیری که حداکثر سولفات از آب جدا می گردد، می توان از خوردگی سازه های بتنی حاصل از سولفات جلوگیری کرد که این امر موجب دوام و افزایش عمر بهره برداری از میانگذر شهید کلانتری شده و از صرف هزینه های فراوان جهت ترمیم سازه های بتنی جلوگیری می شود.

### مراجع:

- ۱- هاشمی، علی، (۱۳۸۰)، دریاچه ارومیه نگین ایران، مجموعه مقالات اولین همایش دریاچه ارومیه، ص ۵۱۲ تا ۵۱۸.
- ۲- سجادی، علی اکبر و هاشمیان، جمال الدین، (۱۳۸۰)، استحصال املاح معدنی از دریاچه ارومیه، مجموعه مقالات اولین همایش دریاچه ارومیه، ص ۴۵۸ تا ۴۶۶.
- ۳- قدوسی، پرویز، گنجیان، اسماعیل، پرهیزکار، طیبه و رضانیانپور، علی اکبر، (۱۳۷۸)، فن آوری بتن، آسیب شناسی بتن و ارزیابی آن، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- ۴- جبارلوی شیبستری، بهرام، (۱۳۷۸)، دریاچه ارومیه اشک طبیعت ایران، انتشارات مهر، تهران، فصل اول.
- ۵- امامعلی پور، علی، (۱۳۸۰)، بررسی زمین شناسی و پتانسیل دریاچه ارومیه، مجموعه مقالات اولین همایش دریاچه ارومیه، ص ۹ تا ۱۵.
- ۶- لطف اللهی یقین، محمدعلی و معروفی، سعید، (۱۳۸۰)، تاثیر بکارگیری مواد مضاف در کاهش خوردگی آب دریاچه ارومیه روی بتن آرمه، مجموعه مقالات اولین همایش دریاچه ارومیه، ص ۲۰۶ تا ۲۱۲.
- ۷- فخری، رضا، (۱۳۸۵)، بتن مقاوم در محیط حاوی سولفات آمونیوم شدید، هفتمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی.
- ۸- معادی، امیر، (۱۳۸۱)، روش های آزمایشگاهی برای استحصال منیزیم کلرید از آب دریاچه ارومیه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه.