

## تبیین روش های موثر در ترمیم و مراقبت از سازه های هیدرولیکی در جهت سلامت و کارایی بهتر سازه

امیررضا سلیمی: کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه پیام نور مرکزی  
 sghf.sghfarchitects@gmail.com

### چکیده

ترمیم و مراقبت مداوم از سازه های هیدرولیکی به دلیل خطر افزایش آسیب ها و بروز حوادث جانی و مالی سنگین از اهمیت بالایی برخوردار است. هدف از این پژوهش ارائه راهکارهایی مناسب برای ترمیم و نگهداری سازه های هیدرولیکی می باشد که به وسیله این روش ها بتوان تا حد امکان عمر مفید این سازه ها را افزایش داد و یا بعضاً از تخریب آن ها جلوگیری کرد. به منظور تحقق این هدف، پس از انجام مطالعات کتابخانه ای و به شیوه کیفی و توصیفی، ابتدا به بیان علل آسیب دیدگی سازه های هیدرولیکی پرداخته شده سپس به دنبال تبیین راهکارها و روش های نوین افزایش کارایی سازه های هیدرولیکی، راهکارهای مذکور در دو دسته روش های پیشگیری از آسیب ( تقویت سازه در حین اجرا ) و روش های ترمیم و مراقبت ( پس از پایش دوره ای ) طبقه بندی شده است. در همین راستا به معرفی متریاال های نوین آب بندی و ترمیم ترک های موضعی همچون پوشش نفوذگر کریستال شونده Aquafin IC ، الیاف و رزین اپوکسی ها، ژئوتکستایل، واتر استاپ ها، عایق های اکریلیک، مشتقات نفتی و بتن های پلیمری پرداخته شده و ویژگی های هر یک از آن ها مورد بررسی قرار گرفته است. از میان ویژگی های متعدد مورد بررسی، به موارد پر تکرار و مشترک بین روش های مذکور (امکان قرارگیری مداوم در معرض رطوبت، شکل پذیری و انعطاف، سازگاری با محیط زیست، مقاومت در برابر کربناسیون و چسبندگی سطحی بالا) ضریب اهمیت بالاتری اختصاص یافته و در قالب جدول ۶ جمع بندی شده است. سپس مجموع ضرایب اهمیت هر کدام از روش ها و متریاال های مورد اشاره (بر اساس شاخص های مهم مذکور) محاسبه شده و نتایج حاصل از بررسی، بر استفاده از رزین اپوکسی و استفاده از واتر استاپ ها به عنوان کارآمدترین روش های تقویت، ترمیم و مراقبت از سازه های هیدرولیکی دلالت دارد.

واژگان کلیدی: سازه های هیدرولیکی، سلامت سازه، ترمیم، نگهداری، کارایی سازه

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی  
 پرتال جامع علوم انسانی

## مقدمه

با توجه به اینکه سازه های هیدرولیکی در معرض بارهایی علاوه بر آنچه که برای آن طراحی شده اند (مانند بار ناشی از عوامل جوی نامساعد و طوفان های مخرب) قرار می گیرند، کنترل متناوب و رفع آسیب های جزئی آن از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. با استفاده از یک سیستم پایش سلامت سازه، اطلاعات قابل اعتماد از سازه کسب شده و نقص های سازه ای در مراحل اولیه ی رشد آسیب، تشخیص داده می شود. تشخیص زودهنگام نقص ها از طریق سیستم پایش سلامت موجب کاهش هزینه های نگهداری و جلوگیری از وقوع فاجعه شکست سازه خواهد شد (ملازاده و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به روند رو به رشد فناوری در زمینه سازه های هیدرولیکی که اکثراً بتن در آن ها نقش تعیین کننده ای دارد، توجه به بعد ترمیم و مراقبت بیش از پیش احساس می شود. سیستم خود ترمیمی بتن، نوعی الگوبرداری از سیستم دفاعی بدن موجودات زنده در ترمیم قسمت های آسیب دیده است. به طوری که سازه های بتنی نیز با کمک مصالحی بتوانند همچون نمونه های زیستی، پس از بروز آسیب به شناسایی و ترمیم خویش بپردازند. آسیب های وارده بر سازه های هیدرولیکی و همچنین نوع دستگاه های باربری سازه های هیدرولیکی بر نحوه و تعیین نوع ترمیم ها بسیار تاثیر گذار است (Müller et al, 2008)) کاربرد چنین مصالح هوشمندی برای سازه های مهم از جمله سازه های فضایی، سازه های زیرزمینی، زیرآبی یا مخازن ذخیره مایعات، به دلیل دسترسی بسیار محدود و دشوار، سیستم نظارت و هزینه های گزاف ترمیم و تقویت، بسیار حائز اهمیت خواهد بود. (توفیق، ۱۳۹۴).

ترمیم و مراقبت مداوم از سازه های هیدرولیکی به دلیل خطر افزایش آسیب ها و بروز حوادث جانی و مالی سنگین از اهمیت بالایی برخوردار است. این پژوهش به دنبال تبیین راهکارها و روش های نوین افزایش کارایی سازه های هیدرولیکی، پس از آسیب شناسی این سازه ها، راهکارهای مذکور را در دو دسته روش های پیشگیری از آسیب (تقویت سازه در حین اجرا) و روش های ترمیم و مراقبت (پس از پایش دوره ای) طبقه بندی نموده است. در همین راستا به معرفی متریکال های نوین آب بندی و ترمیم ترک های موضعی همچون پوشش نفوذگر کریستال شونده Aquafin IC، الیاف و رزین اپوکسی ها، ژئوتکستایل، واتر استاپ ها، عایق های اکریلیک، مشتقات نفتی و بتن های پلیمری پرداخته شده و ویژگی های هر یک از آن ها مورد بررسی قرار گرفته است. از مهم ترین ویژگی های آن ها به منظور افزایش کارایی سازه های هیدرولیکی می توان به چسبندگی سطحی بالا تحت تنش های محیطی، امکان قرارگیری مداوم در معرض رطوبت و تقویت خواص خود ترمیمی در بتن اشاره نمود.

## بیان مسئله

بسیاری از سازه های هیدرولیکی موجود در کشور، از جمله سد هایی که در سال های بعد از ۱۳۸۰ در ایران ساخته شده اند، سدهای خاکی می باشند. سدهای خاکی در اجزا و تأسیسات وابسته خود از بتن و مواد و الیاف بتنی استفاده می کنند که این امر در سرریزها و گالری ها بیشتر دیده می شود. حال آن که علیرغم تعدد این قبیل سازه ها در کشور و صرف هزینه های بالا برای ساخت آن ها، شیوه های مدونی برای پیشگیری از آسیب، ترمیم و مراقبت از آن ها وجود ندارد. گرچه در مرحله طراحی سدها و تأسیسات وابسته، دقت مضاعف و ضریب اطمینان کافی در نظر گرفته می شود، اما به علت مشکلات اجرایی و گاهی بی دقتی های حاصل از اجرا، همواره معضلات عدیده ای در بخش هایی از سازه مشهود است و یا ممکن است شرایط نامناسب بهره برداری، آسیب هایی را بر سازه های هیدرولیکی وارد آورد. لذا موضوع مورد توجه در این نوشتار، مراقبت از سلامت سازه در حین ساخت و بعد از آن بوده و نگرش کلی این پژوهش بر مبنای این نکته که همواره نگهداری و پیشگیری مقدم بر درمان است، استوار می باشد. این پژوهش در پی یافتن پاسخ این مسئله خواهد بود که از میان روش های متعدد ترمیم و مراقبت از سازه های هیدرولیکی، کدامیک کارا تر و مناسب تر بوده و به این منظور، مهم ترین این روش ها بررسی و مورد مقایسه قرار گرفته اند.

## ضرورت و اهداف پژوهش

سازه های هیدرولیکی به علت نزدیکی به محدوده رطوبت همیشه در معرض آسیب های جدی قرار دارند و از این رو جزو سازه های پرخطر محسوب می گردند. به همین جهت در زمان بهره برداری و ساخت این سازه ها، نیازمند شرایط مناسب برای نگهداری می باشند. لذا با توجه به شرایط سخت این سازه ها بایستی راهکارهای کنترلی برای حفاظت از این سازه ها پیش بینی گردد که به صورت متناوب، سلامت و کارایی بهتر سازه را فراهم نموده و در صورت بروز آسیب های کلی و جزئی اعم از ترک خوردگی بدنه سازه، آسیب دیدگی تأسیسات مربوط به سازه و... اقدامات لازم برای جلوگیری از حاد شدن محل آسیب دیده انجام شود. ترمیم و مراقبت سازه های هیدرولیکی مانند سدها و سازه های عظیم، نیازمند دقت عمل بالایی است چرا که همواره خطر بروز حوادث از جانب آن ها احساس می شود و در صورت آسیب دیدن این گونه سازه ها ممکن است صدمات جبران ناپذیری بر جان افراد وارد گردد. همچنین از آنجا که برای ساخت این سازه ها هزینه های زیادی صرف می شود، در صورت آسیب دیدگی خسارات جبران ناپذیری به بار خواهد آورد. از طرف دیگر، مزمن بودن یک آسیب جزئی در سازه های هیدرولیکی، میزان خسارات و آسیب ها را به صورت تصاعدی و غیرخطی افزایش می دهد لذا کنترل و مراقبت دائمی از آن ها امری ضروری می باشد.

هدف از این پژوهش، تبیین راهکارهای ترمیم و مراقبت سازه های هیدرولیکی می باشد که به وسیله این روش ها بتوان تا حد امکان عمر مفید این سازه ها را افزایش داد و یا بعضاً از تخریب آن ها جلوگیری کرد. در بدنه تحقیق، مهم ترین روش های آب بندی به منظور پیشگیری و ترمیم ترک ها به منظور رفع زود هنگام آسیب های این سازه ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## پیشینه پژوهش

تاکنون پژوهش های بسیاری بر روی ویژگی ها و آسیب های بتن صورت گرفته و راهکارهایی نیز برای رفع آسیب ها و استفاده حداکثری از ویژگی های مثبت بتن ارائه شده است. ولیکن تعداد کمی از این پژوهش ها با نگاه به سازه های هیدرولیکی و محدودیت های پیش فرض این قبیل سازه ها صورت پذیرفته است. در پژوهشی که توفیق (۱۳۹۴) انجام داده است، به کاربرد تکنولوژی نانو در ساخت بتن خود ترمیم شونده پرداخته شده که در آن به واسطه استفاده از سنگدانه های هوشمند و سیمان بهبود یافته، امکان دستیابی به بتنی نفوذ ناپذیر با خاصیت خود ترمیمی مورد بررسی قرار می گیرد که به منظور استفاده در شرایط نامناسب (محیط های کلرید و یا سولفات) و یا در سازه های حساسی چون سازه های هیدرولیکی بسیار مناسب است. همچنین ملازاده و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به شیوه های نوین شناسایی آسیب جهت مراقبت و کنترل سازه های هیدرولیکی پرداخته و روش های مبتنی بر فرکانس طبیعی، نرمی سازه، میرایی، پردازش سیگنال، هوش مصنوعی و ... را مورد بررسی قرار داده اند. این پژوهش به دلیل عدم امکان دسترسی انسانی به برخی مقاطع سازه ای و جزئیات، بر موضوع مراقبت و ترمیم سازه ها مبتنی بر متریکال های نوین تاکید دارد.

## روش پژوهش

روش تحقیق در این پژوهش از نوع کیفی و به صورت توصیفی و فرا تحلیلی می‌باشد و نگارش متون همراه با تحلیل‌های نظری و منطبق با اسناد کتابخانه‌ای و معتبر است. داده‌های پژوهش از منابع و پژوهش‌های پیشین تهیه و گردآوری شده و در قالب راهکارهای سلامت و کارایی بهتر سازه‌های هیدرولیکی و سدهای خاکی مورد بررسی قرار گرفته است. راستای تحلیلی این تحقیق بر مبنای معرفی و بازشناخت اهمیت مصالح و مواد جدید در جهت سلامت و کارایی بهتر سازه‌های هیدرولیکی و تبیین روش‌های مؤثر مراقبتی در مقابل خطرات و صدمات احتمالی می‌باشد. بدین منظور، پس از معرفی و تبیین این روش‌ها، ویژگی‌های مربوط به هر یک در قالب جدولی جمع‌بندی شده و بر اساس میزان فراوانی این ویژگی‌ها در روش‌های مختلف، ضریب اهمیت مشخصی به هر ویژگی تعلق گرفت و از مجموع ضرایب اهمیت اختصاص یافته به هر کدام از روش‌های ترمیمی، مهم‌ترین و کارآمدترین شیوه‌های تقویت، ترمیم و مراقبت از سازه‌های هیدرولیکی نتیجه‌گیری شده است.

## مبانی نظری

### آسیب دیدگی سازه‌های هیدرولیکی

هر سازه بتنی در طول مراحل ساخت و بهره‌برداری می‌تواند به علل مختلف مانند خوردگی آرماتورها، نفوذ آب، حمله سولفات و کلرها، کربناسیون، قلیایی شدن بتن، اشتباهات طراحی و بارگذاری، حوادث، ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی و عدم کیورینگ و نگهداری مناسب، عدم اجرای نامناسب بتن، عدم کیفیت لازم طرح اختلاط، عدم فراهم بودن شرایط مناسب بتن‌ریزی و ... دچار نقص کیفی در بتن گردد که باعث تحلیل عضو بتنی، کاهش شدید دوام و مقاومت بتن و حتی از بین رفتن دائمی عضو می‌گردد. از سوی دیگر بدیهی است که هرگونه ترمیم و تعمیر اصولی و کارآمد بتن نیازمند تشخیص کارشناسی عوامل ایجادکننده نقص و تشریح نیازهای مورد نظر از ترمیم می‌باشد که این امر، خود نیازمند احاطه کامل کارشناسان به مصالح متنوع ترمیمی - چه از نظر ساختار و چه از منظر کاربرد و اجرا - است. چرا که عدم رعایت اصول و مراحل ترمیم بتن می‌تواند باعث تشدید آسیب‌ها، تحمیل هزینه‌های مضاعف و کاهش بیش‌ازپیش کیفیت عضو و کاربری آن می‌شود. از این رو بدیهی است که یک عملیات ترمیم اصولی و با کیفیت، در تعامل با مجموعه‌ای از دانش‌های فنی و تجربه اجرایی مورد نیاز انجام‌پذیر است. در همین راستا روزبه‌روز مصالح نوینی معرفی می‌شود که کاربردهای فراوانی داشته و مشکلات مصالح قدیمی را ندارند. از جمله خصوصیات مصالح نوین باربری زیاد، سبکی، زیبایی، نصب و حمل آسان و طول عمر فراوان می‌باشد (مصباح ایران‌دوست و فرخی زاده، ۱۳۹۳).



شکل ۱- آسیب دیدگی سازه‌های هیدرولیکی (منبع: <https://www.wikipaper.ir>)

### ترمیم و آب بندی سطوح بتنی سازه‌های هیدرولیکی

#### ترمیم با استفاده از مصالح و ملات‌های نوین ترمیم شونده

اصلاح مناطق تخریب شده و یا فضاهای پوک و سست با استفاده از مصالح معمولی و یا چسب بتن از اشتباهاتی است که نتیجه‌ای جز شکست نخواهد داشت. اغلب سازه‌های بتنی مورد استفاده در شرایط سخت خوردگی و غیرمتعارف مانند سازه‌های دریایی، محیط‌های صنعتی و شیمیایی با مشکلات عدیده‌ای همراه است که علل عمده آن استحکام کم بتن برای کاربردهای خاص و نفوذپذیری بالای آن در مقابل آب و املاح است. همچنین پخت بتن بر بوده که این امر باعث ایجاد مشکلات مضاعف در ساخت و تعمیر سازه‌ها می‌گردد. از طریق جایگزینی کامل ماتریس سیمانی در بتن توسط حامل پلیمری، ترکیبی به دست می‌آید که به آن بتن پلیمری می‌گویند. این ترکیب دارای مزایای بسیاری نسبت به بتن معمولی است که در جدول ۱ به آن‌ها اشاره شده و عمده‌ترین آن‌ها استحکام و دوام بالا و زمان کم موردنیاز برای پخت است (ملکان و دشتی رحمت آبادی، ۱۳۹۴). پروسه کامل ترمیم شامل بررسی و تشخیص علت عیوب، آماده‌سازی سطح، تخریب و حذف نقاط پوک و سست، اجرای لایه‌های محافظت و ممانعت از خوردگی آرماتورها، اجرای پرایمرهای واسط چسبندگی و در نهایت پر کردن نواحی معیوب با ملات‌های ترمیمی مناسب بسته به عمق تخریب خواهد بود.

ملات‌های ترمیمی از قبیل: Inducret-BIS1/6, Inducret-BIS 5/4, Asocret-RS, Asocret- IM, Asocre - از جمله مواردی هستند که در رفع معضلات و عیوب بتن توسط متخصصین پیشنهاد می‌گردد.

جدول ۱- مزایای استفاده از سیستم های مدرن ترمیم سیمان پلیمری (Harald et al, 2013)

رفتار فیزیکی مشابه بتن
متخلخل با قابلیت پخش بخار
قابلیت اعمال بر سطوح مرطوب
مقاوم در برابر نمک های یخ زدایی
عدم جدایش از بتن اصلی تحت تنش های محیطی
چسبندگی فوق العاده به سطح بتن و دوام بسیار خوب
کاهش میزان نفوذ CO2 مقاوم در برابر کربناسیون
رسیدن به حداکثر مقاومت های فیزیکی و مکانیکی و در حداقل زمان
سخت شدن بدون ایجاد ترک و با میزان جمع شدگی Shrinkage بسیار کم

توجه: میزان مواد مورد نیاز برای ترمیم بتن به مقدار پوکی ها و سایر عیوب بتن بستگی داشته و به هیچ وجه قبل از تخریب نقاط سست قابل محاسبه نمی باشد (Harald et al, 2013)

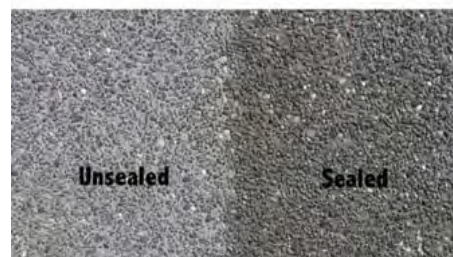
### آب بندی سازه بتنی با پوشش نفوذگر کریستال شونده Aquafin IC

سیستم پایه سیمانی Aquafin IC گزینه ای دائمی و قابل اعتماد جهت آب بندی سازه بتنی سدها در جهت منفی و مثبت است. مواد نفوذ گر در تماس با آب از طریق لوله های موئینه وارد بتن شده و با آهک آزاد موجود در بتن واکنش شیمیایی می دهند. تشکیل کریستال های نامحلول، کلیه منافذ بتن را پر نموده و با ایجاد ساختاری یکپارچه بتن را از عمق آب بند می نماید. امکان آب بندی فشار منفی از مشخصات منحصر به فرد این محصول است. جهت متوقف نمودن نشتی های فعال از مواد آبی گیر fix10 و تزریق رزین پلی اورتان P1 و P4 استفاده می گردد. جدول شماره ۲ به مزایای استفاده از Aquafin IC در آب بندی سطوح بتنی اشاره می نماید.

جدول ۲- خواص و مزایای پوشش نفوذگر کریستال شونده Aquafin IC (Harald et al, 2013)

اجرای آسان و مقرون به صرفه
سریع سخت شونده در تماس با آب و رطوبت
مقاوم در برابر فشارهای هیدرواستاتیک قوی تا ۱۳ بار (مثبت و منفی)
تداوم فعالیت در طی زمان و کاربری سازه
چسبندگی بسیار عالی به بتن
قابل اعمال بر روی سطوح مرطوب
فاقد کلراید
مقاوم در برابر زنگ زدگی آرماتورها، یخبندان، شبنم و با تغییرات دمایی تا ۵۰+ درجه سانتیگراد
محافظت از بتن در مقابل اثرات مخرب آب های شیرین و شور، جریان های فاضلابی، آب های خورنده زیرزمینی، کربنات ها، کلراید ها، سولفات ها و نیترات های محلول
دارای تابیدیه آب آشامیدنی
غیر سمی و سازگار با محیط زیست
ایجاد مانع در برابر کربناسیون بتن

این محصول پس از اعمال و خشک شدن، ترک ها را تا عرض ۰/۴ میلیمتر سیل می نماید و دارای اثر خود- ترمیمی است. به این معنا که در صورت ترک خوردگی بتن، در نتیجه رشد کریستال ها در تمامی جهات و جوانب (مطابق شکل ۲)، توسط کریستال ها خود به خود ترمیم می شود.



شکل ۲- پوشش نفوذگر کریستال شونده Aquafin IC (منبع: www.clinicetcon.com)



از آنجا که AQUAFIN-IC با آب موجود در بتن تازه واکنش می دهد، پروسه ای که در مکانیزم آب بندی این محصول طی می شود، شیمیایی و زمان بر می باشد.

در واقع هر بلور نقطه شروعی برای تشکیل کریستال های بعدی است. ترکیبات شیمیایی آب بند کننده برای همیشه فعال باقی می ماند و از سازه در مقابل نفوذ آب محافظت می کنند و در مدت زمان قابل قبولی از زمان اعمال، سطح را تا عمق مناسبی آب بندی می نمایند (حداقل زمان لازم برای خشک شدن این ماده سه روز است و ممکن است یک ماه تا حصول ماکزیمم خواص، زمان نیاز باشد). عوامل محیطی از جمله دمای محیط، دانسیته بتن، تخلخل بتن، میزان رطوبت موجود و شرایط جوی، همگی بر زمان پروسه آب بندی تأثیر گذارند. لذا از دیگر خواص آن ها این است که؛

- برای ایجاد و رشد کریستال های بیشتر جهت آب بند نمودن ترک ها، زمان بیشتری لازم است.
- AQUAFIN-IC در شرایط محیطی خشک غیر فعال شده و به محض تماس مجدد با رطوبت فعال می گردد.
- جلوگیری از خوردگی آرماتور داخل بتن، از ترک خوردن و تخریب های ناشی از عوامل جوی جلوگیری می نماید (Harald et all, 2013)

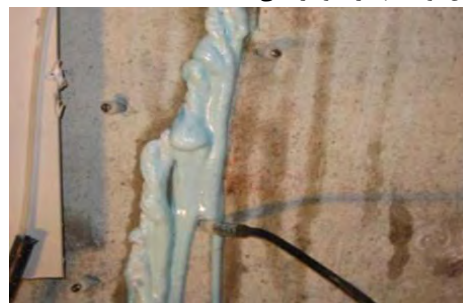
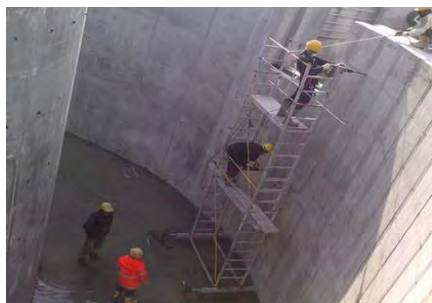
### استفاده از عایق های جدید اکریلیک و رزین های آبی و مشتقات نفتی

امولسیون های آکرلیک پایه آبی در بسیاری از پوشش های ساختمانی، ترافیکی و چسب ها مورد استفاده قرار می گیرند. از جمله عوامل استفاده گسترده از آن ها کاهش چشمگیر آلاینده گی محیطی به دلیل داشتن میزان مواد فرار آلی بسیار کم و قیمت پایین آن ها است (سلیمانی و میقانی، ۱۳۹۵). این عایق ها بر پایه آب و آکرلیک با ساختار کاملاً طبیعی و بهداشتی برای اولین بار در جهان بدون نمونه تولیدی و کاملاً انحصاری توسط یک شرکت در ایتالیا تولید شده است. اجرای این عایق به مراتب آسان تر از اجرای رنگ است به طوری که پس از پاک نمودن سطح از مواد چرب و خاکریزه، محلول رقیق شده را پاشیده و سپس دو مرتبه پس از خشک شدن هر لایه، لایه بعدی پاشیده می شود که این پاشش را می توان با ابزاری مثل قلم مو یا اریس انجام داد که در نهایت یک سطح صاف را ایجاد کند. مشکل عمده ای که اغلب عایق ها با آن مواجه می باشند قابلیت کشسانی و انعطاف پذیری است که این عایق جدید با کشسانی حدود ۵۰ درصد این مشکل را کاملاً مرتفع نموده است. نوعی از این محصول بنا به خاصیت فیزیکی خود دارای حالت ژله ای و کشسانی بسیار بالایی می باشد به طوری که با انعطاف پذیری و کشسانی بالای خود، شکل پذیری خیلی بالایی داشته و به همین سبب با تغییرات حاصل از تنش در سازه مثل ویبریشن موجود در تاسیسات صنعتی و نیروگاه های برق آبی سازگار بوده چرا که در این نوع مکان ها عایق هایی چون ایزوگام و قیر در اثر تنش بالا از سطح جدا شده و پاره می شوند اما عایق جدید تحت این تنش ها در آزمایشات واقعی نتایج مثبت داشته است. هر چند هزینه مواد اولیه و اجرای این عایق بیش تر از قیرگونی می باشد اما با بالا رفتن زمان دوره تعمیرات و نگهداری سازه ها، با هزینه ای به مراتب کمتر از عایق های مرسوم به کار می رود (شهبازی و فراهانی، ۱۳۸۹).

### تزریق رزین اپوکسی

اپوکسی ها (اپوکسیدها) از خانواده رزین های مصنوعی هستند که دارای کربن و اکسیژن بوده و به همین خاطر اپوکسید نامیده می شوند. گروه های اپوکسید به خاطر داشتن ساختمان مولکولی خاص می توانند با بیش از پنجاه نوع نمونه شیمیایی مخلوط شوند و سیستم های عمل آمده و سخت شده رزین را ایجاد کنند. رزین های اپوکسی که در محل مورد استفاده قرار می گیرند از اختلاط دو بخش محصولات رزین سخت شده و بخش سخت کننده حاصل می شود که باعث به وجود آمدن خصوصیات منحصر به فردی از جمله چسبندگی بسیار عالی رزین، مقاومت شیمیایی رزین در برابر اسیدها، جمع شدگی پایین، مقاومت رزین در برابر رطوبت و خاصیت ویسکوزیته بالای رزین می شوند. به جهت خصوصیات ویژه رزین های اپوکسی و برتری نسبت به سیمان و سایر مواد، از آن ها برای پر و آب بند کردن ترک های سطوح، چسباندن بتن تازه به بتن سخت شده، وصله زنی و لکه گیری و ترمیم سطوح، تحکیم پایه ماشین آلات دارای حرکت، کاربرد در زیر آب (به دلیل مقاومت بالا و جمع شدگی کم) استفاده می گردد. همچنین کار با رزین های اپوکسی در کاربرد های مختلف آماده سازی سطوح بتنی، فلزی و ... با روش های مختلف از اهمیت ویژه ای برخوردار است. به دلیل وجود اثرات منفی بعضی خواص فیزیکی و شیمیایی رزین های اپوکسی، مشکلات محدودی در زمینه کار با آن ها به وجود می آید که با رعایت ملاحظات و ایمنی هایی قابل حل بوده و این مشکلات هیچ خدشه ای به مزیت های اپوکسی وارد نمی آورد.

برای تزریق درزها و ترک ها، ماده ای ترکیبی از رزین اپوکسی مایع و فیلر به کار می رود. این ماده ترکیبی قابلیت چسبندگی به دو وجه مرطوب بتن ترک خورده حتی در دمای پایین را دارد. عملیات توسط حفاری گمانه های اکتشافی-تحقیقاتی در هر قسمت وجه بالادست باید انجام شود تا مشخصات و محل جز به جز ترک ها و درزها مشخص شود. برای مثال در سد سفیدرود برآوردهای اولیه توسط آزمایش نشت آب، وجود ۸۰ ترک را در سد اثبات کرد که متعاقباً توسط تزریق اپوکسی ترمیم شدند. تعمیر ۳۴ ترک مشاهده شده در ۳۴ درز اجرایی به طور هم زمان انجام پذیرفت. برای تزریق درزها و ترک ها از ماده ای با نام تجاری رودار استفاده شده بود که خود ترکیبی از رزین اپوکسی مایع و فیلر غیر آلی است. گمانه های حفر شده برای تزریق، با در نظر گرفتن فاصله میان آن ها طوری طراحی شده بودند که بعد از انجام تزریق، ترک ها محل مناسبی برای قرار گرفتن مهارهای عبوری باشند. فشار تزریق در موقعیت ترک بین ۶ تا ۱۰ مگاپاسکال و فاصله گمانه ها بین ۱ تا ۲ متر بود. بررسی چاله های حفر شده و مغزه های گرفته شده از ترک های مقطعی که بعداً تزریق شده اند نشان می دهد که این مغزه گیری ها تمام خرابی های به وجود آمده در اثر زلزله که با چسب رزین ترمیم شده را پوشش داده است. مقدار زیاد تنش های برشی در اثر زلزله منجر به بروز ترک های عمقی در جهات مختلف شده بود که به راحتی قابل تشخیص بود (شهبازی و فراهانی، ۱۳۸۹).



شکل ۳- تزریق رزین اپوکسی در بدنه سد ها (www.clinicbeton.com)

## بررسی رفتار الیاف و تاثیر آن در کنترل ترک های سازه های هیدرولیکی بتنی

یکی از راه های مناسب برای مقابله با ترک های موجود در بتن استفاده از مقادیر کم الیاف به منظور کنترل رشد ترک و افزایش مقاومت کششی بتن است. کاربرد الیاف به طور فراگیر از اواسط سال ۱۹۶۰ در کشورهای صنعتی پیشرفته آغاز شده و در طی این ۴ دهه جنس و شکل الیاف و نحوه ساخت بتن الیافی بهبود یافته و کاربرد آن نیز فزونی یافته است. شاهد تاریخی این فناوری، کاربرد کاه گل در ساختمان هاست. در واقع بتن الیافی نوع پیشرفته این فناوری می باشد که الیاف طبیعی و مصنوعی جدید، جانشین کاه، و سیمان جانشین گل به کار رفته در کاه گل شده است.

الیاف به کار رفته در بتن در جنس های مختلفی نظیر شیشه، فوم، کربن، پلی پروپیلن، کولار و... تولید می شوند. از جمله مزایای الیاف فولادی این است که دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالا بوده که با توجه به قابلیت شکل گیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب ترین و اقتصادی ترین نوع الیاف به حساب می آید و بالاترین میزان مقاومت و شکل پذیری را در بتن ایجاد می کنند. همچنین در اشکال ظاهری گوناگونی جهت بهبود رفتار بتن قابل ساخت هستند و از طرفی اختلاط آن ها با دیگر مواد بتن به سهولت انجام پذیر است. این الیاف به منظور کنترل ترک های ناشی از جمع شدگی در بتن استاندارد و خود تراکم می باشند. اگر بتن از جمع شدن باز داشته شود، تنش های کششی ایجاد شده در آن باعث ترک خوردگی مقطع می شوند. در بتن استاندارد با نسبت آب به سیمان بالاتر از ۴۵ درصد، جمع شدگی ناشی از خشک شدن به عنوان مهم ترین دلیل ایجاد ترک در سنین اولیه تعریف شده است. در بتن خود تراکم در سنین اولیه، به دلیل چسبندگی بالا، جمع شدگی و خزش بیشتری نسبت به بتن استاندارد مشاهده می شود ولی در مراحل سخت شدن تأخیری در شروع جمع شدگی، بتن خود تراکم به وجود می آید که به دلیل پایین بودن سرعت تبخیر از سطح خارجی اعضای بتنی می باشد (ملکان و دشتی رحمت آبادی، ۱۳۹۴).

### استفاده از انواع جدید آب بند (واتر استاپ)

این نوع جدید واتر استاپ که مخصوص رفع نشت درزهای اجرایی و مقاطع قطع بتن ریزی است، با استفاده از پلیمرهای لاستیکی و پلیمر با خاصیت ارتجاعی بسیار زیاد (مطابق با خواص شیمیایی جدول ۵) طراحی شده است که به صورت کنترل شده ای در هنگام تماس با آب متورم می شوند و مانع عبور آب از درزهای اجرایی و درزهای سرد خواهند شد و با استاندارد های زیر مطابقت دارد؛  
ASTM D792, ASTM D297, ASTM D217, ASTM D71

جدول ۳- خواص و اثرات آب بند ها (Harald et al, 2013)

شکل پذیری زیاد و نصب آسان
بدون نیاز به اورلپ کردن یا جوشکاری در زمان نصب
ایجاد واتر استاپ یکپارچه و بدون درز و فاقد گسیختگی
سمی نبودن
امکان اجرا بر روی سطوح بتنی ناصاف (درز های سرد احتمالی)
دارای قابلیت تراکم پذیری و شکل پذیری
مقاومت در مقابل نم، رطوبت و خشک شدن مداوم
عملکرد دائمی و بدون نقص
امکان تاخیر بیشتر در سیستم متورم سازی

جدول ۴- موارد کاربرد آب بند ها (همان)

آب بندی درز های اجرایی سطوح افقی و عمودی
آب بندی سطوح ناهموار یا درز های سرد احتمالی
آب بندی دور لوله ها و جایگزینی فلنج های آب بند
نفوذ پذیر سازی درز های اجرایی و مقاطع بتن ریزی در انواع سازه های آبی و سد ها

همچنین عملکرد فنی آن ها به شرح ذیل می باشد؛

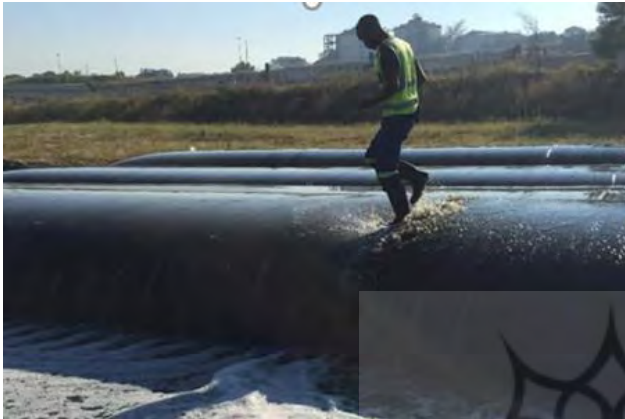
- گل بنتونیت موجود در محصول شامل ورقه های متعددی حاوی ذره های باردار است که در تماس با آب متورم شده و مانع عبور آب یا سایر مواد از درز مورد کاربرد می شوند.
- بین این ورقه ها بارهای مثبت و منفی وجود دارد و هنگام بروز نشت، مولکول های آب به بارهای مثبت و منفی حمله نموده و خود را بین آن ها قرار داده و باعث تورم این محصول می گردد. همانطور که در جدول ۳ آمده است، امکان تاخیر بیش تر در سیستم متورم سازی وجود خواهد داشت.
- بنتونیت های هیدراته شده از نفوذ آب جلوگیری می کند و هرچه فشار هیدرو استاتیک افزایش می یابد (مقاومت هیدرو استاتیک بالاتر از ۷۰ متر طبق جدول ۵)، ورقه های کوچک فشردگی بیشتری یافته و تشکیل درزگیر محکم تری را می دهند. بدین ترتیب یک آب بند دائمی در مقابل فشار سیال حاصل می گردد (Harald et al, 2013)

جدول ۵- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب بندها (همان)

مقاومت هیدرو استاتیک بالاتر از ۷۰ متر
وزن مخصوص gr/cm <sup>3</sup> 57/1: مطابق استاندارد ASTM D 792
مقاومت عالی در برابر خشک شدن و مرطوب شدن مکرر
درصد ازدیاد طول: بیشتر از ۴۵۰%
قابلیت انبساط: بیشتر از ۳۰۰%

## استفاده از ژئوتکستایل در ترمیم سد های خاکی

یکی از راهکارهای ترمیم ترک ها در سد های خاکی، استفاده از مصالح پلیمری ژئوتکستایل است. کاربرد ژئوتکستایل در زمینه سد سازی برای ضد آب سازی و جلوگیری از نشت آب از بدنه سد بوده و از تخریب تدریجی آن جلوگیری می نماید. نتایج به دست آمده از مطالعه موارد استفاده شده از ژئوتکستایل در سد های خاکی نشان می دهد که اجرای ژئوتکستایل از لحاظ اقتصادی، اجرایی، سازگاری در ترمیم ترک های سدهای خاکی بسیار مناسب است (کاماسی و نصیری زاده، ۱۳۹۳). در این کاربرد، از ژئوتکستایل سنگین که نقش لایه غیر قابل نفوذ را بازی می کند، استفاده می شود. ژئوتکستایل همچنین به عنوان زهکشی سطحی دیواره سد و انتقال رطوبت به زهکشی های پایین سد عمل می کند. یک ژئوتکستایل زمانی به عنوان یک فیلتر به کار می رود که اجازه عبور آب را در حالی که از عبور ذرات خاک جلوگیری می کند، بدهد. بنابراین باید در فضای بین خاک تثبیت شونده و مصالح زهکشی (لوله زهکش یا ژئوسنتتیک های زهکشی) قرار گیرد که معمولاً بدین منظور از نوع نیافته ای آن ها استفاده می شود. همچنین یک ژئوتکستایل زمانی به عنوان جداکننده به کار می رود که بین دو نوع مصالح غیر مشابه قرار گیرد مانند دو نوع خاک ریزدانه و درشت دانه. انواع بافته و نبافته این محصول و همچنین ژئوکامپوزیت ها به شرطی که حداقل شرایط مقاومتی مورد نیاز را داشته باشند، می توانند به خوبی عمل جدایش را انجام دهند. این عملکرد جزء اولیه ترین عملکردهای ژئوتکستایل می باشد.



شکل ۴- مصالح پلیمری ژئوتکستایل در سدهای خاکی (منبع: <https://geotextile.ir>)

## یافته های پژوهش

از آنجایی که راهکارها و نگرش های مطرح در ترمیم سازه های هیدرولیکی روز به روز جدیدتر و بروز تر می شوند، نیاز همیشگی به آن ها محسوس است. برای جلوگیری از تخریب و عدم آسیب دیدگی سازه های هیدرولیکی، با توجه به صرف هزینه های بسیار زیاد و بزرگ مقیاس بودن این قبیل پروژه ها، روش های پیشگیری از آسیب بهتر از سایر روش های ترمیمی بوده و توجه به مواد و مصالح ترمیم شونده از راهکارهای مناسب در این خصوص می باشد. در جدول ۶، مهم ترین روش های مطرح شده در پژوهش به منظور تقویت، ترمیم و مراقبت از سازه های هیدرولیکی به همراه ویژگی های کلیدی هر یک جمع بندی شده است؛ جدول ۶- روش های تقویت، ترمیم و نگهداری سازه های هیدرولیکی (نگارنده)

ویژگی ها	متریال	
استحکام و دوام بالا قابلیت اعمال بر سطوح مرطوب Shrinkage بسیار کم عدم جداشدگی از بتن اصلی تحت تنش محیطی کاهش میزان نفوذ CO <sub>2</sub> و مقاوم در برابر کربناسیون	بتن پلیمری	ترمیم آسیب دیدگی سازه های موجود
انعطاف پذیری و کشسانی بالا عدم جداشدگی از سطح تحت لرزش های مداوم مواد فرار آلی بسیار کم کم خطر برای محیط زیست	عایق های جدید اکریلیک	
چسبندگی بالا مقاومت شیمیایی در برابر اسیدها مقاومت در برابر رطوبت ویسکوزیته بالا جمع شدگی پایین	رزین اپوکسی	
مقرون به صرفه بودن سهولت در اجرا کاربردهای متنوع (لایه ترمیمی، لایه فیلتر، جداکننده)	ژئوتکستایل	
امکان آب بندی فشار منفی قابل اعمال بر روی سطوح مرطوب غیر سمی و سازگار با محیط زیست	پوشش نفوذگر کریستال شونده	مقاوم سازی و تقویت در حین اجرای سازه

ایجاد مانع در برابر کربوناسیون بتن	بتن الیافی
افزایش مقاومت کششی کرنش شکست بالا قابلیت شکل‌گیری مناسب سهولت اختلاط و بهبود رفتار بتن	
مقاومت در برابر رطوبت قابلیت شکل‌پذیری کم خطر برای محیط زیست قابلیت انبساط طولی بالا	واتر استاپ

### تحلیل یافته های پژوهش

در جدول ۶ به دسته بندی مشخصی از انواع روش های اجرای معرفی شده در این پژوهش، پرداخته شده است. همانطور که پیش تر نیز اشاره شد، راهکارهای رفع و یا کاهش آسیب های سازه های هیدرولیکی، در دو دسته مقاوم سازی و تقویت در حین اجرای سازه و پایش، شناسایی و ترمیم آسیب دیدگی در زمان های متناوب، طبقه بندی می گردد. استفاده از واتر استاپ ها، بتن الیافی و پوشش نفوذگر کریستال شونده در دسته اول، و بکارگیری بتن پلیمری، عایق های اکریلیک، رزین اپوکسی و ژئوتکستایل در دسته دوم، به عنوان روش های نوین و بهینه در راستای افزایش کارایی سازه های هیدرولیکی شناسایی و مورد بررسی قرار گرفته اند. پس از بررسی تفصیلی این روش ها، ویژگی های هر یک استخراج گردیده و به عنوان یافته های این پژوهش جمع بندی و فراوانی آن ها به منظور تعمیم به سازه های هیدرولیکی به عنوان عوامل موثر بر سلامت و کارایی این سازه ها مورد بررسی قرار گرفت. از بین این ویژگی ها به ترتیب مقاومت در برابر رطوبت (امکان اجرا بر روی سطوح مرطوب)، انعطاف پذیری و کشسانی بالا، سازگاری با محیط زیست و چسبندگی سطحی بالا (عدم جداسازی از بتن اصلی تحت تنش های محیطی)، از بیشترین فراوانی در میان دیگر ویژگی های مطرح شده، برخوردار بوده و لذا دارای اهمیت بالاتری در ترمیم و مراقبت از سازه های هیدرولیکی نیز می باشند.

### نتیجه گیری

همانطور که در تحلیل یافته های پژوهش و جدول ۶ اشاره گردید، چهار عامل مذکور، نسبت به دیگر ویژگی ها از اهمیت بیش تری برخوردارند. با نسبت دادن ضریب اهمیت ۱ و ۰،۷۵ به این چهار عامل و نسبت دادن ضریب اهمیت ۰،۵ و ۰،۲۵ به دیگر عوامل با اهمیت و فراوانی پایین تر، مطابق جدول شماره ۷، رزین اپوکسی با درجه ۳،۵ و پس از آن واتر استاپ با درجه ۳ به ترتیب بیش ترین امتیاز را به دست آوردند. نتیجتاً استفاده از رزین اپوکسی و پس از آن استفاده از واتر استاپ ها به عنوان کارآمد ترین روش های تقویت، ترمیم و مراقبت از سازه های هیدرولیکی در مقایسه با دیگر روش ها نتیجه گیری می شوند.

جدول ۷- جمع بندی ضریب اهمیت روش ها (نگارنده)

مجموع ضرایب	متریال
۳	بتن پلیمری
۲،۷۵	عایق های جدید اکریلیک
۳،۵	رزین اپوکسی
۰،۷۵	ژئوتکستایل
۲،۵	پوشش نفوذگر کریستال شونده
۱،۷۵	بتن الیافی
۳	واتر استاپ

همچنین برخی از روش های یاد شده در جدول ۶، برای جلوگیری از تخریب و آسیب دیدگی سازه های هیدرولیکی به کار می روند و نقش عامل باز دارنده را برای تخریب سازه ایفا می کنند و برخی دیگر در صورت آسیب دیدگی و ایجاد ترک و یا خوردگی در سطح سازه کارایی دارند. حال آن که بهتر است برای جلوگیری از آسیب دیدن سازه، ابتدا اقدامات پیشگیرانه ای نظیر ساخت بتن ضد آب و کاهش نفوذ پذیری بتن با کم کردن تخلخل آن را انجام داد اما از آنجا که بازدهی هیچ روشی به صورت آرمانی و ایده آل نمی باشد، می بایست تدابیری نیز جهت ترمیم آسیب های احتمالی وارده همچون نفوذپذیری بتن، نشستی از لوله های انتقال آب و اتصالات، سطح بالای آب های زیرزمینی، بارندگی و ... اتخاذ نمود.

### منابع

- توفیق، عماد، ۱۳۹۴، بتن خودترمیم شونده، تحولی در صنعت ساخت و ساز، سومین همایش ملی مصالح ساختمانی و فناوری های نوین در صنعت ساختمان، میبد، <https://civilica.com/doc/543367>.
- سلیمانی، حسین و میقانی، حسین، ۱۳۹۵، مروری بر پوشش های پایه آبی آکرلیک اصلاح شده با پلیمرهای با عملکرد بالا و نانومواد، <https://civilica.com/doc/541312>.
- طائفی، محمد علی؛ نصیری، سیحان، ۱۳۷۹، چهارمین کنفرانس سدسازی طراحی، اجرا، بهره برداری و نگهداری مدیریت، بهره برداری سد و مخزن، ۱۳۷۹، بهسازی و ترمیم بتن با نگرش ویژه به سدها و سازه های آبی و شرایط خاص ایران.
- کماسی، مهدی و محمد نصیری زاده، ۱۳۹۳، ترمیم سد خاکی با استفاده از ژئوتکستایل، دومین کنفرانس ملی پژوهش های کاربردی در عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران، دانشگاه جامع علمی کاربردی.
- محمدی، امیر؛ محمدیاسین شجاعی فر و باقر نیکوفر، ۱۳۸۶، ترمیم و بهسازی سازه های بتنی با استفاده از روش تزریق مواد شیمیایی پلی اورتان (نمونه موردی پوشش و ترمیم بتن سازه سرریز و گالری تزریق سد علویان)، سومین کنگره ملی مهندسی عمران، تبریز، دانشگاه تبریز، دانشکده فنی - مهندسی عمران.



۶. مصباح ایراندوست، فرهاد و سعید فرخی زاده، ۱۳۹۳، کاربرد مصالح ساختمانی نوین، همایش ملی مهندسی عمران، معماری و مدیریت پایدار شهری، گرگان، سازمان ملی استاندارد استان گلستان.
۷. ملازاده، مهدی و جهان، امیرمحمد و جهان، سعید، ۱۳۹۷، روش های نوین شناسایی آسیب جهت پیش سلامت سازه های هیدرولیکی، اولین دوره همایش ملی مدل سازی و فناوری های جدید در مدیریت آب، بیرجند، <https://civilica.com/doc/1008020>
۸. ملکان، میثم و محمدعلی دشتی رحمت آبادی، ۴۹۳۱، بتن پلیمری، همایش بین المللی معماری عمران و شهرسازی در آغاز هزاره سوم، تهران، کانون سراسری انجمن های صنفی مهندسان معمار ایران.
۹. Harald S. Müllera, Edgar Bohnera, Michael Vogela, Vladislav Kvitsela, Solichinb (2013) The 2nd Innovative Solutions for the Construction and the Repair of Hydraulic Structures International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering.
۱۰. Müller H S, Fenchel M, Bohner E and Mutschler T (2008). Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung auf Java, Teil 2 Konzeption und Realisierung des Sperrwerkes und des Rückstauwehres. Technologischer In: Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft, Müller H S, Nolting U and Haist M (eds.), University of Karlsruhe, Scientific Publishing, pp. 121-137.
۱۱. Bohner E, Fenchel M and Müller H S (2009). Konzeption und Herstellung eines unterirdischen Betonsperreswerkes zur 7-7- Trinkwassergewinnung auf Java, WasserWirtschaft, Vol. 99, No. 7-8, pp. 47-52.
۱۲. Nestmann F, Oberle P, Ikhwan M and Singh P (2008). Bau eines Höhlenkraftwerkes zur Trinkwassergewinnung auf Java, Teil 1: Gesamtkonzept zur energetischen Nutzung unterirdischer Wasserressourcen in Karstgebieten. In: Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft, Müller H S, Nolting U and Haist M (eds.), University of Karlsruhe, Scientific Publishing, pp. 109-120.
۱۳. [www.clinicbeton.com](http://www.clinicbeton.com)
۱۴. <https://geotextile.ir>.
۱۵. <https://www.wikipaper.ir>

