

تبیین ابعاد و مؤلفه های ایمنی در استخرهای ذخیره آب ژئوممبرانی جهت پیشگیری از

حوادث

مصطفی ذوالفقاری، کارشناسی فرماندهی عملیات در حریق و حوادث، دانشگاه علمی کاربردی شهرداری مشهد مقدس
Zolfagharim963@gmail.com

عباس قوتی خرم آبادی، کارشناسی تربیت بدنی علوم ورزشی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تربت جام
ghovatiabas7@gmail.com

محمد نظری بزدی، کارشناسی ارشد مهندسی در سوانح طبیعی، دانشگاه غیرانتفاعی خیام
مشهد مقدس

Yahyadadash@gmail.com

چکیده

استخرهای ذخیره آب با پوشش ژئوممبرانی به دلیل کارایی بالا و هزینه مناسب، در صنایع مختلف کاربرد گسترده ای دارند. با اینحال، حوادث ناشی از نشت، لغزش شیب و تخریب سازه می تواند پیامدهای جبران ناپذیر زیست محیطی و اقتصادی به همراه داشته باشد. هدف از پژوهش حاضر، تبیین ابعاد و مولفه های کلیدی ایمنی در استخرهای ذخیره آب ژئوممبرانی جهت پیشگیری از حوادث است. این پژوهش با رویکرد کیفی و با استفاده از روش تحلیل مضمون انجام شده است. جامعه آماری شامل خبرگان و متخصصان فعال در حوزه طراحی، اجرا و نظارت بر استخرهای ژئوممبرانی، اساتید دانشگاه و پژوهشگران حوزه های ژئوتکنیک، هیدرولیک و ایمنی سازه ها بود. داده ها از طریق مصاحبه های نیمه ساختاریافته با ۱۳ نفر از خبرگان جمع آوری شد و فرآیند نمونه گیری تا رسیدن به اشباع نظری ادامه یافت. تحلیل داده ها منجر به شناسایی ۵ مضمون فراگیر اصلی شامل: (۱) ایمنی فنی و مهندسی سازه، (۲) ایمنی هیدرولیکی و مدیریت آب، (۳) ایمنی زیست محیطی و حفاظت از منابع، (۴) ایمنی عملیاتی و نگهداری، (۵) ایمنی مدیریتی و انسانی گردید. یافته ها نشان داد که نقطه ضعف بحرانی در اکثر پروژه ها، عدم دقت در اجرای اتصالات (جوشکاری) و نقص در سیستم های زهکشی زیرسطحی است. همچنین، تاکید بر پایش مداوم فشار منفذی، بازرسی های دوره ای پیشگیرانه و آموزش تخصصی نیروی انسانی به عنوان عوامل تعیین کننده در کاهش ریسک حوادث شناسایی شدند.

کلیدواژه ها: ایمنی سازه های آبی، پوشش ژئوممبران، مدیریت ریسک، استخرهای ذخیره آب، پایداری ژئوتکنیکی.

مقدمه

استخرهای ذخیره آب به عنوان یکی از زیرساخت های حیاتی در صنایع کشاورزی، معدنی، نفت و گاز و مدیریت منابع آب، نقش بی بدیلی در تامین نیازهای آبی ایفا می کنند (الگایر^۱، ۲۰۲۰). در سال های اخیر، استفاده از پوشش های پلیمری مصنوعی، به ویژه ژئوممبران ها^۲، به دلیل مزایای فنی نظیر نفوذپذیری بسیار پایین، مقاومت شیمیایی بالا و هزینه اجرای مناسب، جایگزین روش های سنتی مانند بتن ریزی یا لایه های رس طبیعی شده است. ژئوممبران ها ورقه های نازک و انعطاف پذیری هستند که عمدتاً از پلی اتیلن با چگالی بالا (HDPE^۳) یا سایر ترموپلاستیک ها ساخته می شوند و به عنوان یک سد هیدرولیکی عمل کرده و از نفوذ مایعات به خاک زیرین جلوگیری می کنند (اپاریسیو-اردیلا و سیلوا^۴، ۲۰۲۶). با اینحال، ماهیت ترکیبی این سازه ها که از تعامل پیچیده بین لایه های مختلف خاک، غشای پلیمری و شرایط محیطی تشکیل شده

است، آنها را به سیستم های حساسی تبدیل کرده که عملکرد ایمن آنها وابسته به همبستگی دقیق تمامی اجزای سازنده است.

ایمنی در استخرهای ژئوممبرانی فراتر از مفهوم ساده از عدم نشت تعریف می شود و شامل طیف وسیعی از ابعاد فنی، ساختاری و زیست محیطی است. از منظر فنی- سازه ای، ایمنی به معنای حفظ پایداری هندسی سازه در برابر نیروهای جانبی آب، فشار منفذی زیرسطحی و بارهای مکانیکی وارد شده بر سطح غشا می باشد. هرگونه لغزش شیب، کشیدگی بیش از حد غشا یا شکست اتصالات میتواند منجر به فروپاشی ناگهانی سیستم عایق بندی شود (لین^۵ و همکاران، ۲۰۲۴). از سوی دیگر، ایمنی هیدرولیکی به توانایی سیستم در مدیریت جریان های داخلی و خارجی، کنترل فشارهای آب زیرزمینی و جلوگیری از پدیده هایی نظیر بادکردن غشاء^۶ ناشی از تجمع آب در زیر لایه ژئوممبران اشاره دارد. عدم مدیریت صحیح این

^۴ Aparicio-Ardila & Silva^۵ Lin^۶ Blistering^۱ El Gayar^۲ Geomembranes^۳ High-density polyethylene

فشارها نه تنها باعث آسیب فیزیکی به پوشش میشود بلکه میتواند تعادل ژئوتکنیکی بستر استخر را مختل کند (وو^۷ و همکاران، ۲۰۲۵؛ الدسوکي^۸ و همکاران، ۲۰۲۳).

ابعاد زیست محیطی ایمنی نیز بخش جدایی ناپذیر از عملکرد ایمن این سازه ها محسوب می شود. استخرهای ذخیره آب اغلب حاوی مایعاتی هستند که ممکن است از مواد شیمیایی، فلزات سنگین یا آلاینده های صنعتی تشکیل شده باشند. بنابراین، ایمنی زیست محیطی به معنای تضمین عدم نفوذ این آلاینده ها به سفره های آب زیرزمینی و اکوسیستم های اطراف است (زیدان^۹، ۲۰۲۴). حتی در صورتیکه استخر صرفا برای ذخیره آب شیرین طراحی شده باشد، نشت آب می تواند منجر به اشباع بیش از حد خاک های اطراف، نشست زمین و تخریب زیرساخت های مجاور گردد. علاوه براین، عوامل محیطی نظیر تغییرات دمایی شدید، تابش مستقیم اشعه ماوراء بنفش (UV) و یخ زدگی می توانند خواص فیزیکی و شیمیایی ژئوممبران را در طول زمان

تضعیف کنند که این امر خود به یک تهدید بالقوه برای ایمنی بلندمدت سازه تبدیل می شود (لاوئی^{۱۰} و همکاران، ۲۰۲۴).

با وجود پیشرفت های تکنولوژیک در تولید مواد پلیمری و بهبود استانداردهای طراحی، حوادث مرتبط با استخرهای ژئوممبرانی همچنان گزارش می شود که ریشه بسیاری از آنها در ضعف های اجرایی و مدیریتی نهفته است (زیدان و همکاران، ۲۰۲۴). کیفیت نصب، دقت در جوشکاری اتصالات، نظارت بر فرآیند اجرا و همچنین پروتکل های نگهداری و تعمیرات (O&M) در فاز بهره برداری، از جمله عواملی هستند که تعیین کننده عمر مفید و ایمنی نهایی سازه می باشند. تجربه نشان داده است که بسیاری از نشتی ها و شکست ها نه ناشی از نقص ذاتی مصالح، بلکه نتیجه خطاهای انسانی، عدم رعایت دستورالعمل های فنی و فقدان برنامه های پایش

⁹ Zidan
¹⁰ Lavoie

⁷ Wu
⁸ Eldesouky

مستمر است (وو و همکاران، ۲۰۲۵؛ استارک^{۱۱} و همکاران، ۲۰۲۰).

بنابراین، ایمنی در این سازه ها یک وضعیت ثابت نیست بلکه حاصل یک چرخه پویا از طراحی دقیق، اجرای استاندارد، نظارت مستمر و نگهداری پیشگیرانه است که نیازمند رویکردی سیستماتیک و چندجانبه است. با توجه به پیچیدگی های فنی و حساسیت بالای اثرات ناشی از خرابی در استخرهای ژئوممبرانی، شناسایی و دسته بندی دقیق مولفه های موثر بر ایمنی ضروری به نظر می رسد. لذا این پژوهش به دنبال آن است که ابعاد کلیدی ایمنی را استخراج نموده و مدلی کارآمد جهت پیشگیری از حوادث ارائه دهد.

مبانی نظری و تجربی پژوهش

حفاظت از منابع محدود آب کشور و کنترل تلفات ناشی از سازه های آبی، یکی از چالش های اساسی در مدیریت منابع آب است که امروزه استفاده از پوشش های ژئوسنتتیک، به ویژه ورقه های ژئوممبران، به عنوان راهکاری کارآمد برای آب

بندی کانال ها و مخازن ذخیره مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات انجام شده نشان می دهد که اگرچه مزایای فنی این پوشش ها مانند سرعت اجرا و عملکرد آب بندی بالا غیرقابل انکار است، اما کیفیت نهایی سیستم وابستگی شدیدی به مسائل اجرایی و بهره برداری دارد. به عنوان مثال، اخوان و همکاران (۱۴۰۳) و همچنین اخوان گیگلو و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی شبکه آبیاری مغان، با استفاده از روش ورودی-خروجی میزان نشت را ارزیابی کردند و به میانگین نشت حدود ۴۶/۸۶ لیتر در روز به ازای هر متر مربع دست یافتند که در مقایسه با سایر مطالعات در محدوده متوسط قرار داشت.

همچنین بهراملو و همکاران (۱۳۹۶) با ارزیابی ۱۵ استخر در استان های مختلف ایران، تفاوت چشمگیری در میزان تلفات نشت بین ۱/۰ تا ۶/۳۷ لیتر در مترمربع در روز مشاهده کردند، اختلافی که آنها مستقیماً به بی توجهی به شیب بندی کف، بسترسازی نامناسب، وجود اشیاء نوک تیز زیر پوشش و عدم متراکم سازی صحیح بستر

نسبت دادند. این یافته ها تاکید می کنند که انتخاب نوع ورق (مانند HDPE با ضخامت ۵/۱ میلی متر) به تنهایی تضمین کننده ایمنی نیست و جزئیات اجرایی نقش حیاتی در کاهش تلفات ایفا می کنند.

پایداری طولانی مدت و عملکرد هیدرولیکی استخرهای ژئوممبرانی، نیازمند توجه دقیق به طراحی سیستم های زهکشی، لنگرگاه و انتخاب مصالح مقاوم در برابر شرایط محیطی است. وو و همکاران (۲۰۲۵) در مطالعه ای بر روی یک نیروگاه ذخیره ای پمپی در خاورمیانه، نشان دادند که استفاده از ژئوممبران کامپوزیت PVC با ضخامت ۲ میلی متر و افزودنی های ضد پیری و UV، همراه با طراحی سیستم زون بندی شده زهکشی و تهویه، می تواند پایداری سازه را تضمین کند. آن ها با تکیه بر نظریه گیروود^{۱۲} ابعاد و فاصله گودال های لنگرگاه را تعیین کرده و با استفاده از فناوری پایش بلادرنگ، نشت روزانه کمتر از ۲/۰ درصد ظرفیت مخزن را گزارش کردند. این مطالعات نشان می دهد که سازگاری

با تغییرات شکل، سهولت نگهداری و هزینه مؤثر، ژئوممبران های نمایان را به گزینه ای ترجیح داده شده تبدیل کرده است، مشروط بر اینکه سیستم های پشتیبان مانند زهکشی و مانیتورینگ به دقت طراحی شوند.

علاوه بر این، ردی و سودهاکار^{۱۳} (۲۰۲۳) در پروژه ای در هند، با طراحی یک سیستم خط کشی نفوذناپذیر چندلایه شامل ژئوتکستایل غیربافته، ملات سیمانی و لایه ژئوسل پر شده با بتن، نه تنها از نشت جلوگیری کردند بلکه از شیب های استخر نیز محافظت نمودند که نشان دهنده اهمیت لایه های محافظتی در افزایش دوام سازه در برابر فشارهای مکانیکی و محیطی است.

کیفیت اتصالات و فرآیند جوشکاری ژئوممبران، به عنوان نقطه ضعف بالقوه در بسیاری از پروژه ها، موضوع بحث های متعددی در ادبیات فنی بوده است. استارک و همکاران (۲۰۲۰) در یک مطالعه تطبیقی منحصر به فرد، قدرت اتصالات جوش داده شده در کارخانه را با اتصالات میدانی

¹³ Reddy & Sudhakar¹² Giroud

و مفهوم "Double Liner" را به عنوان پاسخی به خطرات ناشی از نقص های اجتناب ناپذیر معرفی نمود.

پایش و تشخیص نشت پس از احداث استخر، بخش جدایی ناپذیر مدیریت ایمنی و حفاظت از محیط زیست محسوب می شود. زیدان و همکاران (۲۰۲۴) با ارائه نتایج هفت سال کاربرد روش های الکتریکی موقعیت یابی نشت در ۱۹۵ پروژه در آمریکا، کانادا و مکزیک، نشان داد که در مساحت های بزرگ تر (بیش از ۲ هکتار) معمولاً تراکم نشت کمتری وجود دارد و ۶۳ درصد پروژه ها کمتر از ۵ نشت در هکتار داشته اند. این مطالعه تاکید می کند که بازرسی های دوره ای با روش های پیشرفته می تواند به شناسایی و تعمیر سریع نشت ها کمک کند و رفتار آماری نشت ها را برای طراحان و اپراتورها شفاف تر سازد.

از سوی دیگر، لینگ^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۹) یک روش کم تهاجمی به نام mise-à-la-masse را برای تشخیص نشت در کف استخرها توسعه

مقایسه کردند و مشخص شد که اتصالات کارخانه ای از ثبات و یکنواختی بیشتری برخوردارند و حدود ۱۰ درصد در برش و ۹ درصد در مقامت لایه به لایه قوی تر از اتصالات میدانی عمل می کنند. آنها گزارش دادند که حدود ۲۵ درصد از اتصالات میدانی اولیه به دلیل عدم رعایت استانداردهای کششی رد شدند که منجر به تاخیرات قابل توجه در پروژه گردید. این یافته ها حاکی از آن است که کاهش اتصالات میدانی از طریق پیش ساختگی در کارخانه، می تواند ریسک نقص در اتصالات را به طور چشمگیری کاهش دهد.

همچنین گیروود (۲۰۱۹) با بررسی سه مورد مطالعاتی در اروپا، خاورمیانه و آمریکای شمالی، هشدار داد که جزئیات ناقص ساخت و ساز ترکیب با طراحی ناکافی (به ویژه نادیده گرفتن شرایط زمین شناسی مانند خاک های کارستی) می تواند منجر به شکست فاجعه بار شود. او بر ضرورت رویکرد مهندسی سخت گیرانه که جنبه های ژئوتکنیک و ژئوسنتتیک را تلفیق کند، تاکید کرد

دادند. آزمایش های شبیه سازی شده و میدان آن ها نشان داد که این روش میتواند محل نشت را با دقت بالایی مشخص کند، هرچند تشکیل ناحیه رسانا در زیر نشت به دلیل افزایش محتوای رطوبتی یا غلظت یونی، ممکن است در طول زمان باعث ایجاد خطا در تخمین موقعیت نشت شود. این پژوهش ها نشان می دهند که تکنولوژی های نوین پایش، ابزاری قدرتمند برای اطمینان از عملکرد ایمن استخرها در فاز بهره برداری هستند.

در مجموع، مرور تجربیات نشان می دهد که ایمنی استخرهای ذخیره آب ژئوممبرانی حاصل تعامل پیچیده ای بین انتخاب صحیح مصالح، دقت در اجرای اتصالات، طراحی هیدرولیکی و ژئوتکنیکی مناسب، و نظارت مستمر بر عملکرد سازه است. مطالعات اخوان و همکاران (۱۴۰۳)، اخوان گیگلو و همکاران (۱۳۹۸) و بهراملو و همکاران (۱۳۹۶) بر اهمیت عوامل اجرایی و تاثیر مستقیم آن ها بر میزان نشت تاکید دارند. در مقابل، مطالعات بین المللی همچون وو و همکاران (۲۰۲۵)، ردی و سودهاکار (۲۰۲۳) و استارک و

همکاران (۲۰۲۰) بر جنبه های طراحی پیشرفته، سیستم های محافظتی چندلایه و برتری اتصالات کارخانه ای بر اتصالات میدانی تمرکز کرده اند. همچنین گیروود (۲۰۱۹) و زیدان و همکاران (۲۰۲۴) بر پیامدهای خطرناک نقص های طراحی و لزوم پایش مداوم نشت تاکید ورزیده اند. در نهایت، پژوهش های لینگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز نشان می دهند که با وجود پیشرفت در روش های تشخیص نشت، چالش هایی همچون تغییرات خواص الکتریکی خاک در اثر نشت مداوم همچنان پابرجاست. این مجموعه از یافته ها بیانگر آن است که هیچ عامل واحدی به تنهایی مسئول ایمنی نیست و یک رویکرد جامع که تمام ابعاد فنی، اجرایی و مدیریتی را پوشش دهد، برای پیشگیری از حوادث ضروری است.

روش پژوهش

روش پژوهش حاضر از نوع کیفی با ماهیت اکتشافی است که براساس تحلیل مضمون انجام می شود. جامعه آماری پژوهش شامل خبرگان و متخصصان فعال در حوزه طراحی، اجرا و نظارت بر استخرهای ذخیره آب با پوشش ژئوممبرانی،

همچنین اساتید و پژوهشگران حوزه های مرتبط (ژئوتکنیک، هیدرولیک و ایمنی سازه ها) میباشد. نمونه گیری به صورت هدفمند انجام می شود و انتخاب مشارکت کنندگان بر اساس میزان تجربه، تخصص و آشنایی آنان با موضوع پژوهش صورت می گیرد. گردآوری داده ها در این پژوهش از طریق مصاحبه های نیمه ساختار یافته و مطالعات کتابخانه ای انجام می شود. مصاحبه ها تا رسیدن محقق به اشباع نظری ادامه یافت (محقق با انجام ۱۳ مصاحبه به اشباع نظری رسیده است). در این پژوهش از تحلیل مضمون برای تحلیل داده های گردآوری شده بهره برده شده است. روش تحلیل مضمون براین فرض بنا شده است که با تحلیل پیام های زبانی می توان به کشف معانی، اولویت ها، نگرش ها، شیوه های درک و سازمان یافتگی جهان دست یافت.

کدگذاری در تحلیل مضمون بر اساس مفاهیم و معانی مورد نظر و عملیاتی نمودن متغیرها صورت می گیرد. بنابراین، پژوهشگر به پالایش مفاهیم می پردازد و ارتباط موجود میان مفاهیم را به دست می آورد و از طریق کدگذاری یا طبقه بندی

مفاهیم مورد نظر، به عملیاتی نمودن بررسی مضامین دست می یابد. در کدگذاری محتویات باید دقت لازم داشت؛ زیرا ممکن است کلمات افراد به گونه ای بیان شده باشد که حالت مبهم و دو پهلوی داشته باشد و به سادگی نتوان مقصود آن را تشخیص داد. کدگذاری تحلیل مضمون در این پژوهش بر اساس گام های زیر صورت گرفت:

۱- ابتدا خبرگان مورد نظر را شناسایی شدند و پس از تنظیم جلسه مصاحبه، تمامی صحبت های آنها ثبت و ضبط شد. مصاحبه ها بصورت متنی و در فایل های ورد به نوشتار تبدیل شد.

۲- متن مصاحبه به دقت مطالعه شد. هر کلمه کلیدی هایلایت شد و مفاهیم شناسایی شده و تکرارهای آن را یادداشت شدند.

۳- زمانیکه تمامی مفاهیم یادداشت شدند مفاهیم تکراری حذف گردید.

۴- مفاهیمی که غرابت معنایی داشتند را با یکدیگر ادغام و مضامین سازمان دهنده بدست آورده شد.

۵- در نهایت مضامین سازمان دهنده که کاربرد مشابهی دارند را در کنار هم قرار داده شد و

براساس مفاهیمی که کنار هم قرار گرفته شد به هر دسته از این مضامین یک دسته بندی جدیدی با عنوان مضامین فراگیر تخصیص داده شد.

شده در دو مصاحبه ی آخر و مقایسه ی آن با یافته های استخراج شده قبلی، مشخص شد که محتوای جدیدی به پژوهش اضافه نگردیده است

نتایج پژوهش

پس از انجام گام اول، مفاهیم اولیه و کلیدی شناسایی و استخراج گردیدند. در گام بعدی پس از مرور چندباره نتایج و ارتباط آنها، با برقراری پیوند بین عوامل، اطلاعات به شیوه جدیدی با یکدیگر ارتباط داده می شوند. با مقایسه ی کدگذاری ها و مفاهیم شناسایی شده و استخراج

رسیدن در پژوهش است. در نهایت مصاحبه ها در این مرحله متوقف شد. تعداد ۴۱ کد اولیه از مجموع مصاحبه ها استخراج شد.

در ادامه به جمع بندی کدهای اولیه (واحد های معنایی) و استخراج مضامین سازمان دهنده در مصاحبه با خبرگان پرداخته می شود.

جدول ۱. مضامین سازمان دهنده استخراج شده از کدهای اولیه

واحد های معنایی (کدهای اولیه)	مضمون سازمان دهنده
- جمع آوری ضایعات برش خورده ژئوممبران پس از اجرا - دفع صحیح مواد شیمیایی استفاده شده در فرآیند جوشکاری یا تعمیرات	مدیریت پسماند و بازیافت
- تدوین سناریوهای اضطراری برای نشت های بزرگ - وجود تجهیزات امدادی (پمپ های قوی، مواد جاذب، لوازم ترمیم سیار) در سایت - بیمه مسئولیت مدنی پیمانکاران و مالکان استخر	مدیریت ریسک و پاسخ به حوادث

• گزارش دهی شفاف حوادث و درس آموزی برای پروژه های آینده	
• محدود کردن نرخ پر و خالی کردن استخر برای جلوگیری از شوک هیدرولیکی • طراحی لبه های شناور یا ثابت متناسب با تغییرات سطح آب • ایجاد فضای امن بالای خط آب برای جلوگیری از سرریز شدن	کنترل نوسانات سطح آب
• روش های ترمیم موضعی در شرایط خشک و مرطوب • حذف علف های هرز و ریشه های تیز از سطح استخر • محافظت مکانیکی از غشاء در برابر فعالیت های انسانی یا حیوانی • تعویض قطعات فرسوده مانند نوارهای لاستیکی در دریچه ها	پروتکل های تعمیر و نگهداری (M&O)
• تعیین زاویه شیب مجاز بر اساس اصطکاک داخلی خاک و غشاء • طراحی سیستم لنگرگاه در تاج و بستر استخر • استفاده از شبکه های هندسی برای افزایش پایداری شیب	پایداری ژئوتکنیکی و هندسه شیب
• برگزاری کارگاه های تخصصی نصب و جوشکاری برای پیمانکاران • آموزش اصول ایمنی کار در ارتفاع و فضاهای بسته به پرسنل ناظر	آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی

• فرهنگ سازی اهمیت رعایت استانداردها در میان کارگران ساده • الزام به حضور ناظر متخصص ژئوممبران در تمام مراحل اجرا	
• تطابق نوع پلیمر (HDPE/PVC/LLDPE) با شرایط محیطی و شیمیایی آب • ضخامت استاندارد غشاء نسبت به عمق آب و فشار هیدرواستاتیک • مقاومت در برابر پاره شدگی و سوراخ شدگی • افزودنی های مقاوم در برابر اشعه UV و اکسیداسیون	انتخاب و کیفیت مصالح ژئوممبران
• اجرای لایه رس زیر ژئوممبران به عنوان سد دوم • نظارت بر کیفیت مواد شیمیایی ذخیره شده برای اطمینان از عدم واکنش با غشاء • فاصله ایمن استخر از چاه های آب آشامیدنی و منابع حساس اکولوژیک • برنامه پایش کیفیت آب زیرزمینی در حلقه های کنترلی اطراف استخر	جلوگیری از نفوذ آلاینده ها به سفره های زیرزمینی
• نصب لایه زهکش زیر ژئوممبران برای جلوگیری از بادکردن غشاء • طراحی دریچه های تخلیه فشار در نقاط بحرانی • جلوگیری از مسدود شدن لوله های زهکش توسط رسوبات ریزدانه	سیستم زهکشی و تخلیه فشار منفذی

• مانیتورینگ مداوم فشار آب زیرسطحی با سنسورهای پیزومتر	
• بازدید بصری ماهانه از سطح غشاء جهت شناسایی پارگی های میکروسکوپی • تست نشت یابی الکترونیکی سالانه • بررسی سلامت اتصالات و لنگرگاه ها در برابر فرسایش • مستندسازی کامل وضعیت موجود برای مرجع در زمان خرابی	بازرسی های دوره ای و پیشگیرانه
• کالیبراسیون منظم دستگاه های جوش حرارتی • انجام تست های خراب آور روی نمونه های تصادفی • تمیز بودن سطح تماس قبل از جوشکاری (حذف گرد و غبار و رطوبت) • آموزش اپراتورهای جوشکار و اخذ گواهینامه تخصصی • استفاده از نوارهای محافظ با جنس همگن با ورق اصلی	اجرای دقیق اتصالات و جوشکاری

در نتایج حاصل از بررسی مصاحبه های خبرگان سازمان دهنده در دسته های بزرگتری به مضامین فراگیر گروه بندی می شوند. این دسته استخراج شده است. در نهایت این مضامین بندی در جدول ۲ مشخص و گزارش شده است.

جدول ۲. مقوله بندی تحلیل مضامین مصاحبه ها

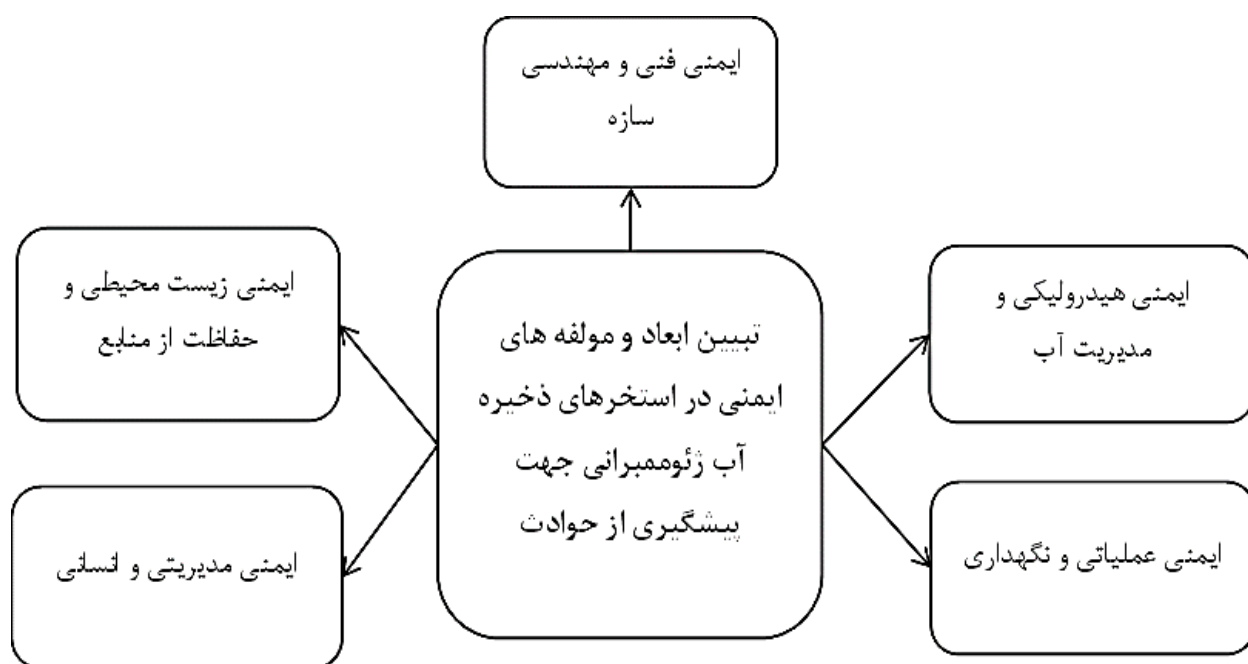
مضمون فراگیر	مضمون سازمان دهنده
	انتخاب و کیفیت مصالح ژئوممبران

ایمنی فنی و مهندسی	اجرای دقیق اتصالات و جوشکاری
سازه	پایداری ژئوتکنیکی و هندسه شیب
ایمنی هیدرولیکی و مدیریت آب	سیستم زهکشی و تخلیه فشار منفذی
	کنترل نوسانات سطح آب
ایمنی زیست محیطی و حفاظت از منابع	جلوگیری از نفوذ آلاینده ها به سفره های زیرزمینی
	مدیریت پسماند و بازیافت
ایمنی عملیاتی و نگهداری	بازرسی های دوره ای و پیشگیرانه
	پروتکل های تعمیر و نگهداری (M&O)
ایمنی مدیریتی و انسانی	آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی
	مدیریت ریسک و پاسخ به حوادث

بعد از استخراج مضامین سازمان دهنده و فراگیر

الگوی مفهومی تحقیق به شکل ۱ طراحی و

مشخص می شود.



شکل ۱. مدل مفهومی پژوهش

بحث و نتیجه گیری

اگرچه انتخاب پلیمر مناسب و ضخامت استاندارد

ضروری است، اما نقطه ضعف بحرانی در اکثر پروژه های داخلی، اجرای اتصالات و جوشکاری است. عدم رعایت کالیبراسیون دستگاه ها و نظارت ناکافی بر اپراتورها، باعث می شود حتی با استفاده از بهترین ورق ها نیز ریسک نشتی و شکست ساختاری به شدت افزایش یابد. بنابراین، ایمنی فنی تنها به معنای وجود یک پوشش عایق نیست بلکه تضمین پیوستگی کامل این پوشش در طول زمان و تحت بارهای مکانیکی است.

همزمان با جنبه فنی، «ایمنی هیدرولیکی و مدیریت آب» نقش حیاتی در پایداری بلندمدت

پژوهش حاضر با هدف تبیین ابعاد و مولفه های ایمنی در استخرهای ذخیره آب ژئوممبرانی جهت پیشگیری از حوادث انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل داده های پژوهش نشان می دهد که ایمنی در استخرهای ذخیره آب ژئوممبرانی پدیده ای تک بعدی نیست بلکه زنجیره ای پیچیده از تعاملات فنی، هیدرولیکی و مدیریتی است. «ایمنی فنی و مهندسی سازه» به عنوان سنگ بنای این سیستم، تاکید دارد که کیفیت مصالح و دقت در اجرا، خط مقدم دفاعی در برابر حوادث هستند. یافته ها حاکی از آن است که

سازه ایفا می کند. تحلیل ها نشان می دهد که فشار منفذی ناشی از عدم عملکرد صحیح سیستم زهکشی، یکی از عوامل اصلی تخریب ناگهانی ژئوممبران (پدیده بادکردن) است. وقتی آب زیرسطحی تخلیه نشود، فشار هیدرواستاتیک علیه غشا اعمال شده و اصطکاک بین خاک و غشا را کاهش می دهد که این امر مستقیماً منجر به لغزش شیب ها میشود. علاوه براین، نوسانات شدید سطح آب بدون طراحی لبه های مناسب، شوک های هیدرولیکی ایجاد کرده و اتصالات را تحت تنش های چرخشی قرار می دهد. بنابراین، ایمنی هیدرولیکی نیازمند تعادل میان ظرفیت ذخیره سازی و توانایی سیستم در کنترل فشارهای جانبی و زیرسطحی است.

از سوی دیگر، «ایمنی زیست محیطی و حفاظت از منابع» ابعاد اخلاقی و قانونی پژوهش را برجسته می کند. نتایج بیانگر آن است که ایمنی استخر تنها به حفظ ساختار فیزیکی محدود نمی شود بلکه شامل جلوگیری از آلودگی سفره های آب زیرزمینی نیز هست. حضور لایه های کمپلکس (ترکیب رس و ژئوممبران) و پایش

مداوم کیفیت آب اطراف استخر، شاخص های کلیدی برای ارزیابی ایمنی محیطی هستند. اگر استخری از نظر فیزیکی پایدار باشد اما به دلیل نفوذ آلاینده ها یا تغییرات شیمیایی آب، اکوسیستم اطراف را تهدید کند، نمیتوان آن را ایمن نامید. این یافته ها تایید میکنند که رویکردهای نوین مهندسی باید فراتر از ملاحظات سازه ای رفته و اثرات زیست محیطی را در چرخه عمر پروژه بگنجانند.

در فاز بهره برداری، «ایمنی عملیاتی و نگهداری» اهمیت پیشگیری از حوادث ثانویه را آشکار میسازد. بسیاری از حوادث پس از اجرا، نه ناشی از نقص طراحی اولیه، بلکه ناشی از بی توجهی به پروتکل های نگهداری (O&M) است. بازرسی های دوره ای منظم، ترمیم سریع پارگی های میکروسکوپی و کنترل رشد گیاهان علفی، از جمله اقداماتی هستند که از تبدیل خرابی های جزئی به فجایع بزرگ جلوگیری می کنند. همچنین، مستندسازی دقیق وضعیت موجود (As-Built) برای تسریع در تعمیرات اضطراری حیاتی است. داده ها نشان می دهند که

استخرهایی که برنامه نگهداری پیشگیرانه دارند، نرخ شکست کمتری نسبت به استخرهای فاقد نظارت مستمر دارند؛ چرا که ایمنی در این مرحله یک فرآیند پویا و مستمر است، نه یک وضعیت ثابت.

«ایمنی مدیریتی و انسانی» نیز به عنوان چتر حمایتی تمام ابعاد فوق، تعیین کننده نهایی موفقیت پروژه است. تحلیل مصاحبه ها نشان داد که حتی با وجود بهترین استانداردهای فنی، فقدان آموزش نیروی انسانی و ضعف در مدیریت ریسک میتواند منجر به بروز حوادث شود. حضور ناظران متخصص، آموزش پیمانکاران و داشتن سناریوهای پاسخ به بحران، ضریب اطمینان سیستم را به طور چشمگیری افزایش می دهد. بنابراین، ایمنی یک محصول نهایی نیست بلکه حاصل یک فرهنگ سازمانی قوی است که در آن مسئولیت پذیری، شفافیت و دانش فنی در تمام سطوح اجرایی نهادینه شده باشد. بدون سرمایه گذاری روی عامل انسانی و فرآیندهای مدیریتی، سایر اقدامات فنی و مهندسی ناقص خواهند ماند.

براساس یافته های پژوهش، پیشنهاد می شود مراجع ذی صلاح و پیمانکاران صنعتی دستورالعمل های اجرایی جدیدی تدوین کنند که الزام به تست نشت یابی الکترونیکی^{۱۵} بر روی ۱۰۰٪ سطح استخر قبل از تحویل کار را اجباری نماید، زیرا روش های سنتی نمونه گیری کافی نیستند. همچنین، تاسیس واحدی تحت عنوان «پایش سلامت سازه های ژئوممبرانی» در شرکت های آب و فاضلاب توصیه می شود تا با نصب سنسورهای دائمی فشار منفذی و نشت یاب، وضعیت ایمنی استخرها را به صورت آنلاین مانیتورینگ کنند. برگزاری دوره های آموزشی اجباری و صدور گواهینامه تخصصی نیز برای کلیه اپراتورهای جوشکاری و ناظران سایت، به عنوان شرط احراز صلاحیت در مناقصات دولتی، میتواند کیفیت اجرا و در نتیجه ایمنی این سازه ها را به شکل ملموسی ارتقا دهد.

منابع

- اصفهان، همدان، خوزستان، سمنان و البرز).
- تحقیقات مهندسی سازه های آبیاری و
زهکشی، ۱۸(۶۹)، ۱۲۳-۱۳۴.
- Aparicio-Ardila, M. A., & Silva, J. L. D. (2026). Textured high-density polyethylene geomembranes in geotechnical and environmental engineering: an overview. *Soils and Rocks*, 49(2), e2026012325.
- El Gayar, A. (2020). A study on water seepage losses for ponds and reservoirs. *International Journal of Agricultural Invention (IJAI)*.
- Eldesouky, H. M. G., Thiel, R., & Brachman, R. W. I. (2023). Assessment of geomembrane strain from pond liner bubbles. *Geotextiles and Geomembranes*, 51(6), 28-40.
- Giroud, J. P. (2019). Lessons learned from case histories of reservoirs lined with geomembranes. *Revue*
- اخوان، کرامت، خیری قوجه بیگلو، میلاد،
مردپور، مجید و کلاته، فرهود. (۱۴۰۳).
تحلیل صحرایی عملکرد لایه های ژئوممبران
در کاهش نشت آب از کانال های شبکه
آبیاری مغان. تحقیقات مهندسی سازه های
آبیاری و زهکشی، ۲۵(بهار)، ۶۹-۸۲.
- اخوان گیگلو، کرامت و خیری قوجه بیگلو،
میلاد و شوکت نقده، احمد و احمدپری،
هدیه. (۱۳۹۸). بررسی صحرایی کارایی
پوشش ژئوسنتتیک در کانال آبیاری (مطالعه
موردی کانال پمپاژ ۳ شبکه آبیاری مغان)،
سومین کنفرانس بین المللی پژوهش های
کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت
ساخت، تهران
- بهراملو، رضا، عباسی، نادر، موحدان، محمد،
قدمی فیروزآبادی، علی، مامن پوش، علیرضا،
موسوی فضل، سیدحسن، و سلامتی، نادر.
(۱۳۹۶). تاثیر مسائل اجرایی و بهره برداری
در کارایی پوشش ژئوممبران برای کنترل
تلفات آب (مطالعه موردی در استان های

- rain water harvest reservoir with geosynthetic products at Gummudipoondi, Tamil Nadu. *Indian Journal of Geosynthetics and Ground Improvement*, 12(2), 33-36.
- Stark, T. D., Hernandez, M. A., & Rohe, D. S. (2020). Geomembrane factory and field thermally welded seams comparison. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(4), 454-467.
 - Wu, Y., Luo, S., & Xu, H. Design and Construction of a Fully Exposed Geomembrane-Lined Reservoir for Seepage Control. In *Hydraulic and Civil Engineering Technology X: Proceedings of the 10th International Technical Conference (HCET 2025), Xiamen, China, 26-28 September 2025* (pp. 485-495). 1 Oliver's Yard, 55 City Road, London, EC1Y 1SP: SAGE Publications.
 - Zidan, P., Kemnitz, M., & Ritter, E. (2024). Locating leaks in *Française de Géotechnique*, (159), 2.
 - Lavoie, F. L., Kobelnik, M., Valentin, C. A., de Lurdes Lopes, M., da Silva, J. L., & Palmeira, E. M. (2024). Study of heat and UV radiation exposures on HDPE geomembranes. *Results in Materials*, 22, 100552.
 - Lin, H., Gong, X., Zeng, Y., & Zhou, C. (2024). Experimental study on the effect of temperature on HDPE geomembrane/geotextile interface shear characteristics. *Geotextiles and Geomembranes*, 52(4), 396-407.
 - Ling, C., Revil, A., Qi, Y., Abdulsamad, F., Shi, P., Nicaise, S., & Peyras, L. (2019). Application of the Mise-à-la-Masse method to detect the bottom leakage of water reservoirs. *Engineering Geology*, 261, 105272.
 - Reddy, D. K., & Sudhakar, M. (2023). Protection & lining of

geomembrane-lined ponds using
the electrical leak location
method: Case histories.
Geotextiles and Geomembranes,
52(4), 773-777.