

آب بندی تونل های بین شهری با استفاده از ژئوممبران (مطالعه موردی: تونل باغان، محور جدید سنندج - مریوان)

بابک رحیمی^{۱*}، سیوان احمدی^۲، سیده شیلا حسینی^۳، مهران میرزایی^۱

مهندسین مشاور راه یاب ملل

(babakrahimi.mine@gmail.com)

چکیده

با رشد و توسعه زندگی شهری و گسترش سیستم های حمل و نقل، استفاده از فضاهای زیرزمینی رشد روزافزونی پیدا کرده است. از جمله این فضاهای زیرزمینی می توان به انواع تونل های بین شهری، ایستگاه های مترو، پناهگاه ها و زیرگذرها اشاره نمود. باتوجه به لزوم استفاده بلند مدت از این سازه ها لازم است مخاطرات احتمالی تاثیر گذار بر پایداری این سازه ها مورد توجه قرار گیرد. از جمله تهدیداتی که همواره یک سازه زیرزمینی در طول عمر خود از زمان اجرا تا بهره برداری با آن مواجه است، جریان و نشت آب به داخل سازه می باشد. حضور آب علاوه بر تاثیر منفی در پایداری سازه، سبب کاهش عمر لاینینگ، خرابی تجهیزات داخل تونل و کاهش ایمنی ترافیکی می گردد. از اینرو بررسی میزان آب ورودی به سازه و استفاده از روش های کنترل آن، ضروری می باشد. یکی از مهمترین روش های آب بندی تونل های بین شهری، استفاده از غشاهای ژئوممبران می باشد که مشکلات ناشی از ورود آب به سازه را به حداقل می رساند. در این مقاله با توجه به نشت آب میان لایه ای در حدود ۴٫۵ لیتر بر مترمربع در روز، علاوه بر بررسی مشکلات ناشی از وجود این مقدار آب، بحث های اجرایی نحوه استفاده از این مصالح آب بند در تونل بین شهری باغان، واقع در محور جدید سنندج-مریوان مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی:

آب بندی سازه های زیرزمینی، تونل باغان، ژئوممبران

۱- مقدمه

ورود آب به تونل ها یکی از مهم ترین مشکلات تونل سازی در محیط های سنگی است، زیرا در این محیط ها جریان آب به وسیله ناپیوستگی ها کنترل می شود. این مسئله باعث ایجاد مشکلاتی مانند کاهش پایداری توده سنگ، افزایش فشار روی سیستم های نگهداری، تأثیر مخرب روی پارامترهای ژئومکانیکی محیط و همچنین خطرات جانی و مالی می شود از اینرو پیش بینی نفوذ و کنترل ورود آب به داخل تونل، می تواند عملیات اجرایی و عمر مفید سازه و همچنین بهره برداری از پروژه را بهبود بخشد.

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، مهندسین مشاور راه یاب ملل

۲- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، شرکت ساختمانی پاوان

۳- کارشناسی ارشد زمین شناسی، مهندسین مشاور راه یاب ملل

در این مقاله با بررسی روش‌های مختلف مرسوم که در آب بندی فضاهای زیرزمینی در محیط‌های شهری و حفاری در آبرفت استفاده می‌شوند، سعی خواهد شد تا روش‌های مناسب جهت آب بندی سازه‌های زیرزمینی بر مبنای تجربیات و کارهای انجام شده و توصیه‌های بین المللی و تجربیات محدود ملی بر مبنای مصالح ژئوسینتیکی ارائه گردد. باید توجه نمود که هیچ سیستم آب بندی واحدی وجود ندارد که برای تمامی پروژه‌ها ایده آل باشد؛ لذا در هر پروژه بایستی بر اساس وضعیت زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی و وضعیت اقتصادی پروژه، اقدام به انتخاب سیستم آب بندی مناسب نمود. محافظت از یک سازه زیرزمینی می‌تواند توسط سیستم‌های آب بند سطح مثبت (خارجی) و یا سطح منفی (داخلی) انجام شود. به طور کلی سیستم برتر آب بندی از نوع سطح مثبت است؛ چرا که سازه را در برابر تمامی حملات محافظت می‌نماید. سیستم‌های آب بندی سطح منفی، غالباً در کارهای بهسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲).

به طور کلی سازه‌های زیرزمینی به چند منظور آب بندی می‌شوند:

- ۱- جلوگیری از رسیدن آب به بتن سازه (لاینینگ) و عدم ایجاد شوره در بتن
- ۲- کاهش تأثیر آب بر ناپایداری سازه
- ۳- جلوگیری از تأثیر عوامل محیطی مانند یخبندان
- ۴- هدایت و زهکشی آب‌های پیرامونی و انتقال به مجرای خروجی

از جمله عوامل موثر بر انتخاب نوع روش آب بندی، بررسی میزان نشت آب می‌باشد. تعیین میزان نشت مجاز به داخل فضای زیرزمینی بر مبنای کاربری آن است. در جدول ۱ مقادیر نشت مجاز بر حسب لیتر بر مترمربع در روز مشاهده می‌شود.

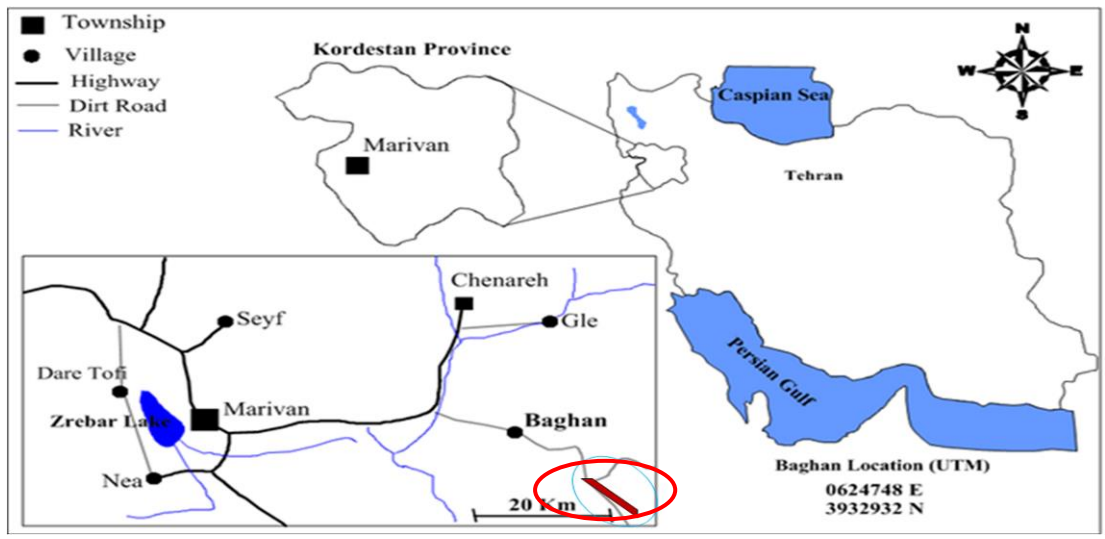
جدول ۱- میزان نشت مجاز در سازه های مختلف (۷)

مقدار نشت مجاز (لیتر بر مترمربع در روز)	نوع کاربری
صفر	انبارهای مواد غذایی یا مواد حساس به رطوبت، مکان هایی که حضور بلند مدت افراد در آن رخ می دهد
۰,۰۰۱	ایستگاه های مترو، انبارهای کالا
۰,۰۱	تونل های بزرگراهی، تونل های قطار سریع السیر
۱	پارکینگ ها، تونل های پیاده رو، تونل های ماشین رو عادی
۰,۵	تونل های مترو (بدون تأسیسات حساس به آب)

۲- معرفی پروژه تونل باغان

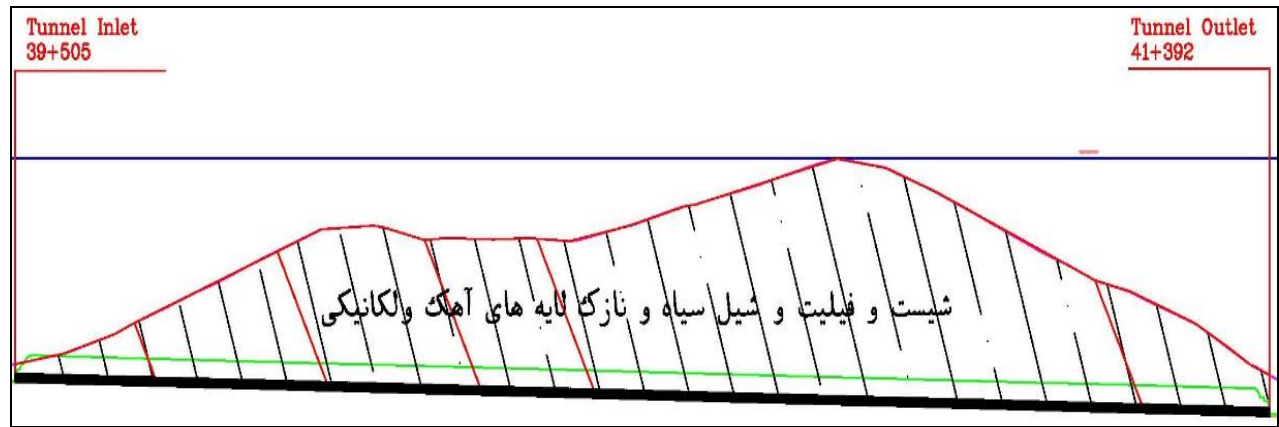
تونل باغان در مسیر محور جدید سنندج - میوان در غرب استان کردستان، در ۲۰ کیلومتری شرق میوان در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۲۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه واقع شده است (شکل ۱). طول این تونل ۱,۸ کیلومتر بوده و دارای سطح مقطع ۹۲ مترمربع می‌باشد.

موقعیت تونل باغان بر روی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مریوان در شکل و پروفیل طولی زمین شناسی آن در **Error!** موقعیت تونل باغان بر روی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مریوان در شکل و پروفیل طولی زمین شناسی آن در **Error!** Reference source not found. نمایش داده شده است. (۱)



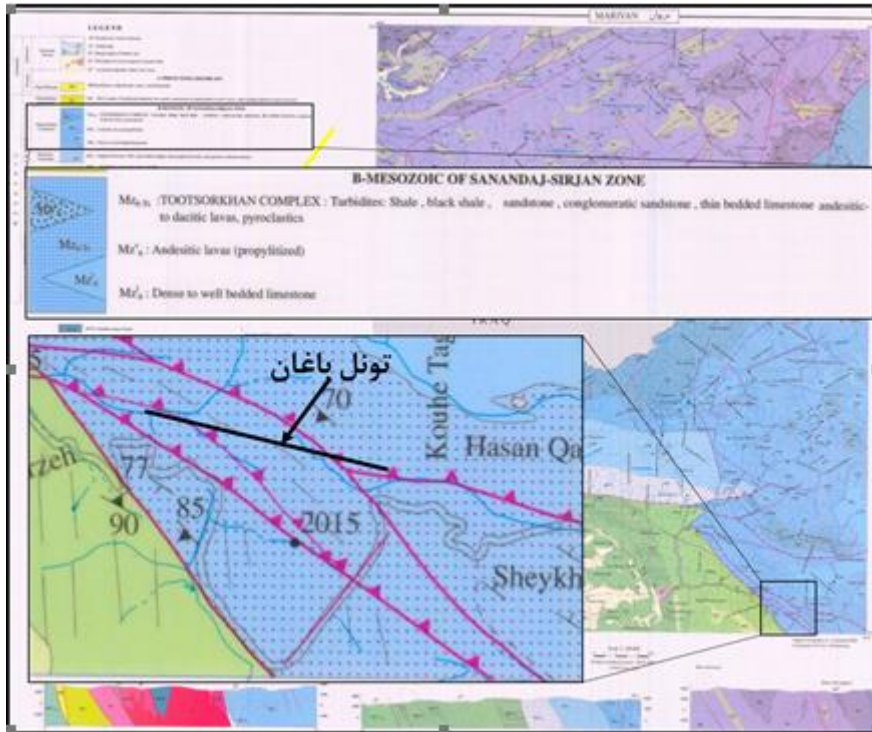
شکل ۱- موقعیت و راه های دسترسی به تونل باغان

تونل مذکور به طور کامل در زون سنندج-سیرجان واقع شده و از تناوب شیل سیاه، شیست و نازک لایه های آهک آندزیتی تشکیل شده است. (**Error! Reference source not found.**)



شکل ۲- پروفیل طولی تونل باغان

با توجه تراوش آب از دیواره و سقف تونل باغان و دبی سنج این تراوشات که نشان دهنده خروج آب به صورت قطره ایی و جریانی در بعضی از نقاط و ثبت حداکثر دبی در بخش انتهایی تونل به میزان ۴,۵ لیتر بر مترمربع در روز که با توجه به جدول ۱ بیش از میزان مجاز برای تونل ها بوده آب بندی و هدایت آب های حاصل در دستور کار قرار گرفت که در ادامه به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۳- موقعیت تونل باغان بر روی نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ مریوان

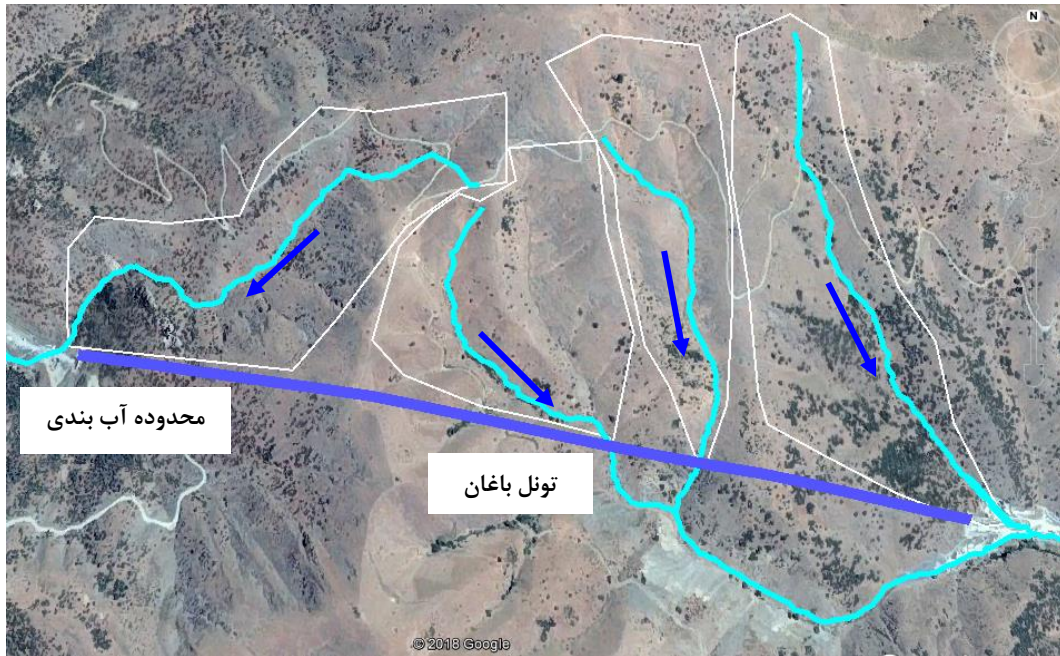
۳- وضعیت آب زیرزمینی تونل باغان

همان طور که اشاره شد، سنگ‌های تشکیل دهنده محور تونل باغان، سنگ‌های دگرگونی هستند. سنگ‌های دگرگونی به دلیل نفوذپذیری کمی که دارند (به سبب خاصیت ذاتی سنگ‌ها و پر شده بودن اغلب درزه‌ها در عمق)، از نظر پتانسیل آبی فاقد ارزش می‌باشند. رسوبات دانه ریز شیل، دارای فضاهای بسیار کوچک بین دانه‌ای هستند که آب ورودی به آنها در اثر نیروی جاذبه مولکولی به سطح دانه‌ها می‌چسبند و در نتیجه مانع جریان آزاد آب در بین فضاهای خالی می‌شود، لذا نفوذپذیری آنها بسیار ضعیف می‌باشد. همچنین این سنگ‌ها به دلیل عدم وجود خاصیت انحلالی، دارای استعداد تشکیل کارست نمی‌باشند.

بیشترین میزان بارش باران در منطقه مورد مطالعه، بهمن ماه با مقدار حدود ۸۰۰ میلیمتر گزارش شده است. بررسی‌های میدانی از منطقه و نیز مطالعه تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که سوی جریان‌های آب زیرزمینی و سطحی، در سمت ورودی تونل به طرف رودخانه جانوره و در سمت خروجی تونل به سوی رودخانه گردلان (مسیر رودخانه به موازات امتداد تونل و در سمت باختر آن در جریان است) است. همچنین چندین چشمه قابل دسترس در منطقه شناسایی و مطالعه شده است. تعداد یک چشمه در بالای تونل قرار دارد که به سمت ورودی تونل جریان دارد و ارتباطی با آب وارده به خروجی تونل، که آب بندی برای آن محدوده اجرا شد، ندارد.

در شکل نمایی از حوزه‌های آبریز محدوده تونل نمایش داده شده است. حوزه آبریز مرتبط با تونل از وسعت چندان زیادی برخوردار نمی‌باشد و نفوذ آب به داخل تونل، فقط از طریق شکستگی‌های کوچک و نقاط ضعف (گسل‌های اصلی

و فرعی) تونل امکان پذیر است، کمالینکه در محدوده ۹۰ متری نیز که برای کنترل ورود آب به داخل تونل، آب بند نصب گردید، به دلیل نشت آب از طریق شکستگی های موجود در تونل بوده است.



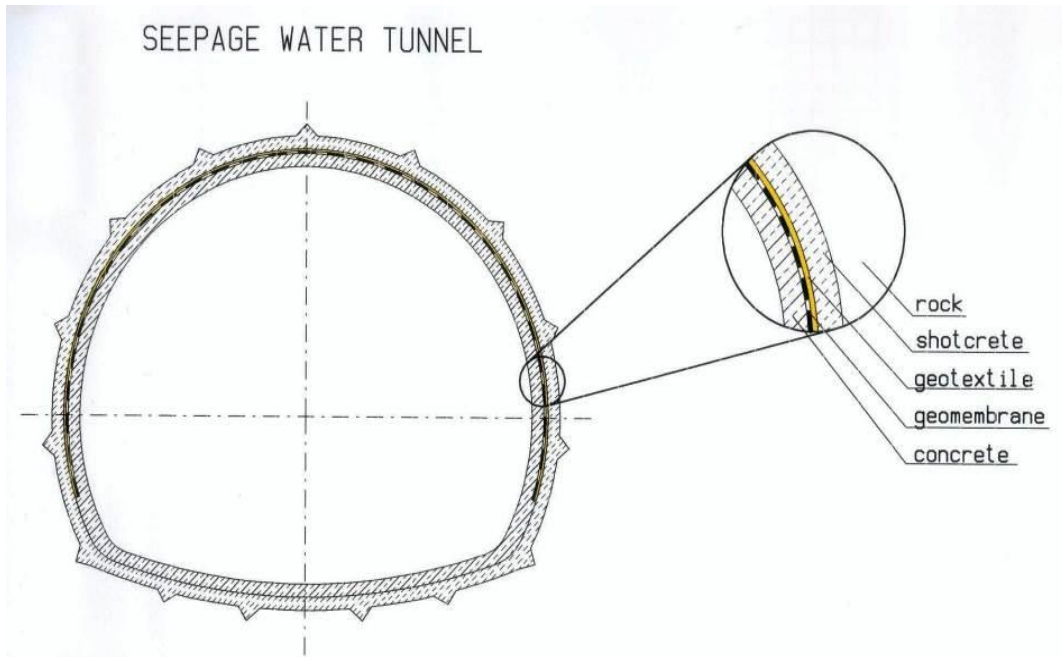
شکل ۴- نمایی از حوزه های آبریز محدوده تونل

۴- روش های آب بندی سازه های زیرزمینی

روش های مختلفی را می توان برای آب بندی فضاهای زیرزمینی بکار برد، اما معدودی از این روش ها به لحاظ عملکرد درازمدت برای آب بندی سازه ها مناسب تشخیص داده می شوند. روش های آب بندی معمولاً در مواقعی به کار گرفته می شوند که آب در محدوده سازه وجود دارد. این روش ها مبتنی بر جلوگیری از ورود جریان آب به داخل سازه هستند. در خصوص آب بندی سازه، دو اصطلاح کلی آب بندی مثبت و آب بندی منفی وجود دارد. در آب بندی مثبت، سیستم آب بند به گونه ای نصب می شود که مابین سطح داخلی تونل و سازه لاینینگ قرار می گیرد و آب قبل از تماس با لاینینگ، به لایه آب بند برخورد می کند. در سیستم آب بندی منفی، ابتدا آب به سازه لاینینگ برخورد نموده و سپس به لایه آب بندی که به سطح داخلی سازه لاینینگ متصل شده است، تماس برقرار می نماید. در مورد آب بندی سازه های زیرزمینی روش های متعددی مانند بتن آب بند، غشاهای پلاستیکی (ژئوممبران)، روش های تزریقی و غشاهای قیری وجود دارد که با توجه به اینکه هدف آب بندی در پروژه باغان آب بندی به روش مثبت بوده است و همچنین با در نظر گرفتن مسایل اجرایی و برآورد مالی، از غشای پلاستیکی (ژئوممبران) استفاده گردید.

۵- مراحل اجرایی

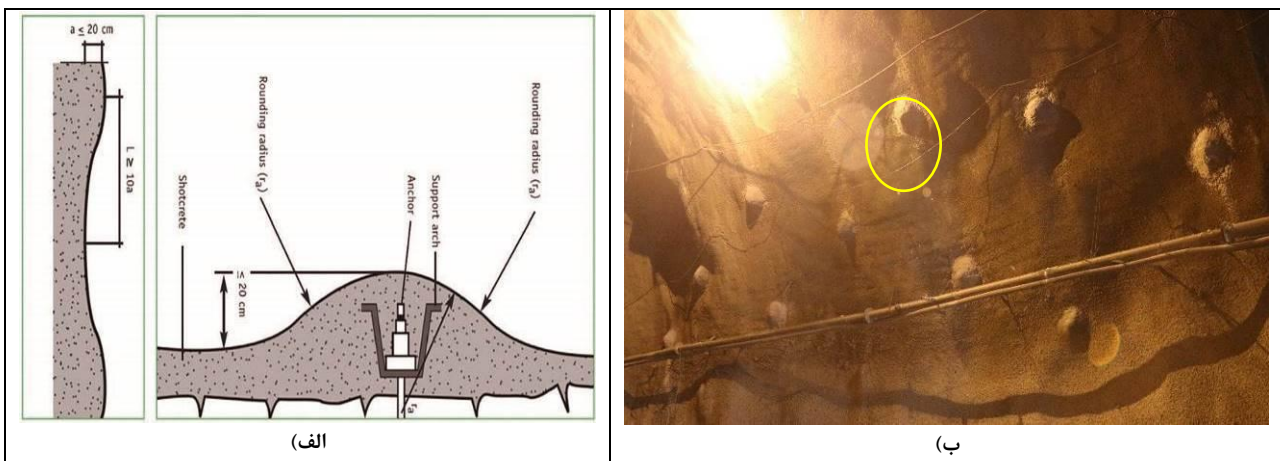
به طور خلاصه، مراحل آب بندی به ترتیب شامل نصب یک لایه ژئوتکستال به منظور حفاظت از لایه ژئوممبران و کمک در بهبود زهکشی، یک لایه ژئوممبران به عنوان آب بند اصلی و نهایتاً تحکیمات ثانویه (لاینینگ) می باشد (شکل ۵). با توجه به اهمیت مراحل نصب آب بندی، جزییات این عملیات در تونل باغان تشریح شده است.



شکل ۵- قسمت های مختلف آبندی تونل به صورت شماتیک

۱-۵- زیرسازی

از ابتدایی ترین نکات مورد توجه قبل از شروع نصب لایه آب بند، آماده سازی بستر جهت نصب لایه ژئوتکستال می باشد. در تونل باغان با توجه به نوع سیستم نگهداری مورد استفاده (دو لایه شاتکریت به ضخامت ۱۵ سانتیمتر، یک لایه مش و راکبولت سیستماتیک با شبکه ۲*۲) و نظر به برجستگی های ناشی از رزوه راکبولت ها، ابتدا عملیات سربندی سطح راکبولت با اندود سیمانی جهت جلوگیری از سوراخ شدن لایه ژئوتکستال در دستور کار قرار گرفت (شکل ۶).



شکل ۶- نحوه آماده سازی سطح زیرین ژئوممبران با پوشاندن سطح روی راکبولت ها با اندود سیمانی (الف - تصویر شماتیک و ب- اندود سطح راکبولت در تونل باغان)



۵-۲- نصب لایه ژئوتکستایل

ژئوتکستایل‌های استفاده شده در زیر لایه ژئوممبران، می‌تواند به دو منظور باشد:

- فیلتراسیون و هدایت آب‌های موجود در سقف و دیواره به داخل مجاری خروجی تعبیه شده در ژئوممبران
- حفاظت از لایه ژئوممبران و جلوگیری از آسیب دیدگی

با توجه به میزان دبی آب سطح دیواره تونل و وضعیت ناهمواری‌های سطح شاتکریت، از ژئوتکستال ۳۰۰ گرم بر مترمربع استفاده شد (شکل). لازم به ذکر است که استفاده از این ژئوتکستایل درصد بسیار زیادی تراوش‌های سطح دیواره و سقف تونل را هدایت و جمع‌آوری می‌کند.



شکل ۷- نصب لایه ژئوتکستال (علامت فلش)

۵-۳- ایجاد سطح اتصالی بر روی ژئوتکستایل (راندل)

از دیگر نکات اجرایی مورد اهمیت، نصب لایه‌های اتصالی ژئوممبران می‌باشد. با توجه به اینکه ایجاد سوراخ و پارگی سبب کاهش شدید کیفیت لایه آب بند شده و مجرای نامناسبی برای خروج آب به حساب می‌آید، لذا جهت جلوگیری از این امر، واشرهایی از جنس ژئوممبران بر روی ژئوتکستال متصل می‌شود که به اصطلاح راندل نامیده می‌شود. در این بخش ابتدا قطعاتی از لایه آب بند اصلی به وسیله تفنگ هیلتی بر روی ژئوممبران نصب و سپس با استفاده از جوش، لایه آب بند اصلی مهار می‌گردد.



(ب)



(الف)

شکل ۸- تعبیه راندل در سطح ژئوتکستال جهت اتصال ژئوممبران
(الف- تصویر شماتیک و ب- نمایی از تونل باغان)

۴-۵- نصب لایه آب بند ژئوممبران (PVC)

یکی از پر مصرف ترین و با سابقه ترین ژئوممبرین ها جهت آب بندی سازه های زیرزمینی، ژئوممبران (PVC) می باشد که با ترکیب افزودنی های ویژه و نرم کننده ها به فرمول ورق PVC تولید می شود. از کاربردهای عمده ژئوممبرین PVC می توان به آب بندی تونل های شهری، جاده ای، راه آهن، قطار شهری (مترو)، ایستگاه های مترو، زیر گذرها، گودها و فونداسیون ساختمان ها و سایر سازه های زیرزمینی اشاره نمود.

نرمی بسیار زیاد، جوش پذیری فوق العاده با دستگاه های اتوماتیک و دستی، مقاومت بسیار خوب در برابر اکسیداسیون خاک، عدم ایجاد ترک تنشی، مقاومت عالی در برابر سوراخ شدگی (Punching)، ازدیاد طول مناسب به هنگام تزریق بتن با شکل و عوارض سازه و ... از ویژگی های بارز این نوع محصول می باشد.
از کاربردهای لایه آب بند ژئوممبران می توان به موارد زیر اشاره نمود:

ایزولاسیون تونل های مترو و تونل های شهری، آب بندی فونداسیون ها و دیوارهای گود، ایزولاسیون بام جهت احداث روف گاردن، ایزولاسیون چاله های آسانسور، تونل های انتقال راه آهن، زیر گذرها و ...

یکی از دغدغه های اصلی مهندسی در خصوص احداث سازه های زیرزمینی، امکان مواجهه با آب و نفوذ آن به داخل سازه، بواسطه گذر از سطح زیرین زمین در محیط های شهری است. در چنین شرایطی بکارگیری محصولات مناسب ژئوسنتتیک جهت زهکشی و آب بندی این سازه ها علاوه بر کاهش ریسک بروز حوادث، کاهش قابل ملاحظه هزینه های تعمیر و نگهداری را نیز در پی خواهد داشت. مهمترین و اصلی ترین لایه آب بند در سازه های زیرزمینی، همان ژئوممبرین از جنس PVC می باشد. این لایه باید از نظر فیزیکی و مکانیکی، پارامترهای لازم را برای آب بندی داشته باشد. علاوه بر این خصوصیات، این محصول باید پایداری لازم و طول عمر بالا جهت ممانعت از ورود آب به داخل سازه که پیامدهای سنگین و هزینه برداری را برای کارفرما دارد، را داشته باشد.

با توجه به جدول ۲ و هندسه آب بندی از نوع چتری و نظر به آب میان لایه ای و عدم فشار هیدرولیکی و نوع مصالح تونل باغان (شیل سیاه و اسلیت و فیلیت)، از ژئوممبران به ضخامت ۲ میلیمتر استفاده گردید. در شکل ۹ فیس نهایی لایه ژئوممبران در تونل باغان مشاهده می شود. (۳)

جدول ۲- روش تعیین نوع آب بندی مورد استفاده بر حسب هندسه آب بندی و شرایط آب و مصالح (۶)
(روش آب بندی تونل باغان با رنگ قرمز نمایش داده شده است)

سیستم تزریق تلفیق شده	روش های تکمیلی		خورندگی خاک		فشار هیدرولیکی	هندسه آب بندی
	واتراستاپ	داخلي	شديد	کم و متوسط		
غیر اجباری	غیر اجباری	غیر اجباری	---	ژئوممبرین با ضخامت ۲ میلی متر	بدون فشار هیدرولیکی	چتری
غیر اجباری	غیر اجباری	موجود	---	بتن آب بند		
غیر اجباری	غیر اجباری	غیر اجباری	ژئوممبرین با ضخامت ۲ میلی متر	---	فشار ۰ تا ۳۰ متر آب	پیرامونی
غیر اجباری	غیر اجباری	غیر اجباری	ژئوممبرین با ضخامت ۳ میلی متر	بتن آب بند		
غیر اجباری	غیر اجباری	موجود	---	بتن آب بند+ ژئوممبرین با ضخامت ۳ میلی متر		
غیر اجباری	غیر اجباری	غیر اجباری	---	---	فشار بیش از ۳۰ متر تا ۶۰ متر	



شکل ۹- نمایی از نصب لایه ژئوممبران در تونل باغان

۵-۵- ایجاد لوله های زهکش نهایی

آخرین مرحله آب بندی شامل ایجاد لوله های زهکش در شبکه ژئوممبران می باشد که از طریق این مجاری آب وارد کانال های هدایت تعبیه شده در سیستم نگهداری ثانویه گردد (شکل).



(ب)



(الف)



(د)

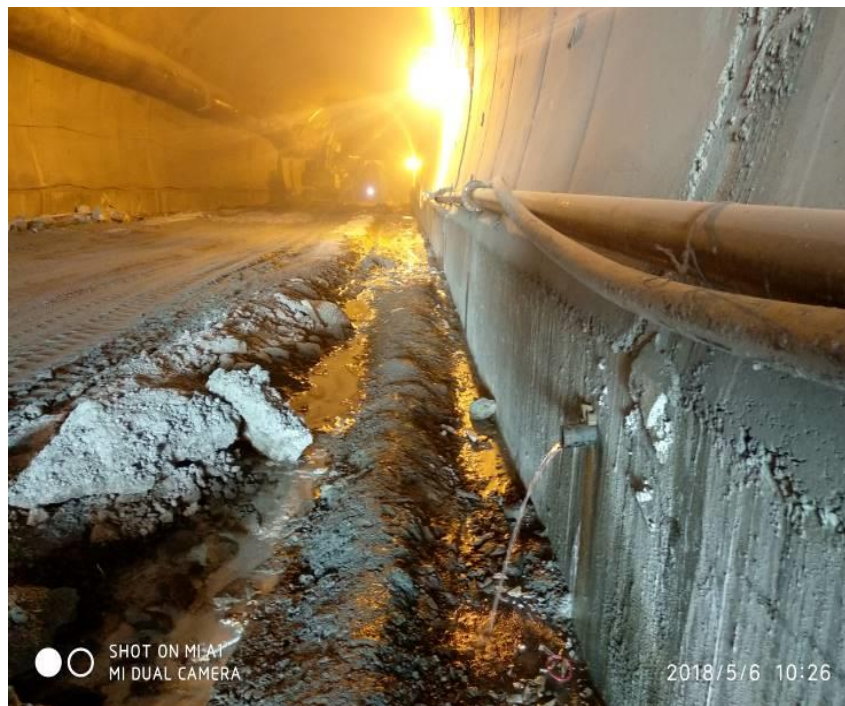


(ج)

شکل ۱۰- ایجاد لوله زهکش در داخل لایه ژئوممبران

(الف و ب: تعبیه لوله در ژئوممبران، ج: ارماتور بندی رامکا جهت بتن ریزی لاینینگ، د: خروج آب جهت هدایت به داخل کانال زهکش)

همانگونه که در شکل ۱۱ نمایش داده شده است، لوله‌های زهکش به عنوان خروجی آب جمع آوری شده در پشت ژئوممبران، عملکرد مناسبی داشته و آب را به طور کامل به داخل تونل و سپس از طریق کانال‌های کناری به خارج تونل هدایت می‌کنند.



شکل ۱۱- نمایی از خروج آب از لوله های زهکش
(میزان دبی خروجی این لوله ۰,۲۲ لیتر بر ثانیه است)

۶- نتیجه گیری

یکی از مهمترین مسایل و مشکلات پیش رو در عملیات تونل سازی در مقاطع سنگی، جریان آب به درون محیط تونل است که از طریق ناپیوستگی ها و خلل و فرج در دیواره ی تونل صورت می پذیرد. از جمله مهمترین مشکلاتی که به علت نشت آب به درون محیط تونل ایجاد میشود، می توان به مواردی همچون کاهش پایداری دیواره و سقف تونل، اعمال فشار مازاد بر سیستم نگهدارنده دایم و موقت، تاثیرات تخریبی بر وضعیت ژئومکانیکی سنگ و متعاقبا ایجاد خطرات جانی و مالی اشاره کرد. یکی از راههای مقابله با مشکلات ناشی از خطر نشت آب به درون تونل ها استفاده از یک سیستم بهینه زهکشی با در نظر گرفتن پارامترهای تاثیرگذار در این انتخاب است.

باتوجه به وضعیت تونل و میزان آب دهی در دیواره ها و سقف در ۹۰ متر انتهایی و نظر به لزوم آب بندی، از یک لایه ژئوتکستال و یک لایه ژئوممبران به ضخامت ۲ میلیمتر استفاده گردید که پایش لوله های نصب شده در شبکه آب بندی نشان از عملکرد مفید سیستم و هدایت بخش عمده ای از آب موجود در دیواره و سقف تونل را دارد

۷- تشکر و قدردانی

از کلیه همکاران مقیم در پروژه احداث محور تیزتیز- گاران و همچنین مدیریت محترم شرکت راه یاب ملل جهت حمایت جهت چاپ این مقاله تشکر و قدردانی می شود.

۸- مراجع

- ۱- احمدی، س. و رحیمی، ب.، "تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل به روش های تجربی عددی(مطالعه موردی تونل باغان)"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس کنفرانس ملی مدلسازی در مهندسی معدن و علوم وابسته، ۵ اردیبهشت، ۱۳۹۷.
- ۲- اقامالیان، م "روش های آب بندی در تونل های شهری با تکیه بر ژئوسینتتیکها"، مرکز مطالعات و برنامه ریزی شهر تهران، آبان، ۱۳۹۶.
- ۳- شرکت پوشش گسترپاسارگارد "گزارش طرح پیشنهادی آب بندی تونل باغان"، شهریور ۱۳۹۶.
- ۴- Recommendations for the Construction of Tunnel Sealing Systems EAG-EDT, Germany, ۲۰۰۵
- ۵- ASTM D۶۱۰۲, Standard Guide for Installation of Geosynthetic Clay Liners, ۱۹۹۷
- ۶- Additional technical terms and guidelines for civil engineering works-ZTV- part ۵ tunneling, Subpart ۵ sealing, ۱۲,۲۰۰۷
- ۷- Water Leakages in Subsurface Facilities: Required Water tightness, Contractual Matters, and Methods of Redevelopment, International Tunneling Association (ITA) (working Group, ۱۹۹۱