ارزیابی آماری و بررسی عملکرد ابزار دقیق نصب شده در مونیتورینگ سدهای خاکی- سنگریزه‌ای (مطالعه موردی: سد شهید مدنی تبریز)

رامین وفایی پورسرخابی*[۱و۲] رسول فرجنیا[۳]

[۱*] گروه مهندسی عمران، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

[۲] مرکز تحقیقات رباتیک و فناوری های نرم، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران

[۳] گروه عمران، واحد ورزقان، دانشگاه آزاد اسلامی، ورزقان، ایران

* raminvafaei@yahoo.com

چکیده

حفاظت، نگهداری و کنترل رفتار سدها، حفظ سرمایه‌ی ملی بوده و افزایش عمر سدها را به دنبال دارد، با توجه به گذشت زمان، تغییراتی در رفتار هسته رسی سدهای خاکی به دلیل تغییرات میزان فشار منفذی، تنش و جابجایی های بدنه سد اتفاق می افتد، این تغییرات بایستی کنترل گردند. در سد شهید مدنی تبریز که یک دهه از پایان ساخت آن گذشته و هنوز به عللی آبگیری مخزن شروع نشده است. کنترل پایداری بدنه در وضعیت فعلی، آبگیری و بهره برداری با توجه به شرایط خاص زمین شناسی منطقه با استفاده از ابزار نصب شده در بدنه سد صورت خواهد پذیرفت، ارزیابیِ نوع، تعداد و کارکرد مناسب ابزار بکار رفته در بدنه سد متناسب با آیین نامه های ابزار گذاری سدهای خاکی-سنگریزه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار خواهد بود. در سد مورد مطالعه، تمام ابزارهای طراحی شده برای نصب در بدنه و پی سد، بعد از ده سال تقریبا سالم بوده و قابل قرائت می‌باشند. بنابراین برای سدی که یک دهه از اتمام ساخت آن گذشته ولی تاکنون آب‌گیری نشده است بررسی پایداری بدنه سد مورد نظر به لحاظ شرایط خاص آن قبل و بلافاصله بعد از آبگیری مخزن ضروری است. با توجه به نتایج ماخوذه از تحلیل های عددی حاصل از نرم‌افزار میداس، مقادیر نشست، تنش کل و فشار منفذی به ترتیب ۹۴، ۸۳ و ۹۳ درصد مقادیر حاصل ازنتایج داده‌های ابزار دقیق است. همخوانی نتایج، نشان دهنده ی عملکرد مناسب ابزار نصب شده در بدنه و پی سد بوده و می‌توان بر مبنای نتایج این تحقیق از داده‌های حاصل از ابزار، برای کنترل پایداری بدنه سد در وضعیت فعلی و همزمان با آب‌گیری مخزن استفاده نمود. علاوه بر کنترل پایداری بدنه سد با استفاده از نتایج داده های ابزار نصب شده در حین آب‌گیری مخزن و تحلیل داده‌های جدید، می توان برنامه آب‌گیری ویژ ه‌ای بر اساس کنترل پایداری بدنه سد ارائه نمود.

کلمات کلیدی

سد شهید مدنی، سد سنگریزه‌ای ، ابزار دقیق، فشار منفذی، تنش، نرم‌افزار میداس

۱- مقدمه

سدهای خاکی و سنگریزه ای به عنوان یکی از بزرگترین سازه‌های خاکی به شمار می‌روند، هزینه ساخت و خسارات جبران ناپذیر ناشی از خرابی آنها باعث گردیده که عملکرد آن‌ها همواره مورد ارزیابی قرار گیرد[۳-۱]. طراحی سدها بر پایه اطلاعات فنی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی مصالح و با در نظر گرفتن دستورالعمل های طراحی بدنه سدها صورت می‌پذیرد[۴]. رفتارنگاری به معنای بررسی عملکرد یک سازه در دوران ساخت، مرحله بهره برداری و تطبیق آن با پیش بینی های زمان طراحی می باشد [۵]. برای اطمینان از

ACCEPTED MANUSCRIPT

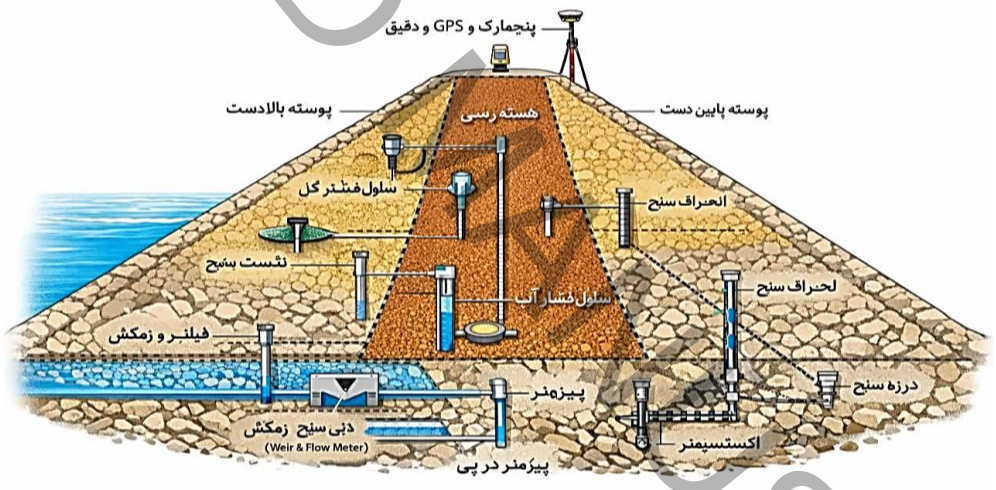
صحت طراحی، بایستی عملکرد سازه ها با استفاده از ابزاری مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد تا در صورت عدم تطبیق با پیش بینی های زمان طراحی و یا بروز مشکل، تمهیدات لازم اندیشیده شده و انجام پذیرد[۶]. پیش بینی دقیق رفتار خاک به علت غیرهمسان و غیرهمگن بودن آن مشکل می باشد. پدیده‌هایی چون روان‌گرائی، لغزش شیروانی‌ها، رگاب و شستگی مصالح ریزدانه از جمله مواردی است که بر پیچیدگی رفتار خاک مِی‌افزاید [۸-۶]. در طی دوران ساخت و بهره‌برداری بایستی همواره رفتار بدنه سازه های خاکی- سنگ‌ریزه ای مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور بایستی از ابزارهای مناسب و متناسب جهت کنترل پایداری بدنه‌ی سد استفاده نمود که به ابزار دقیق معروف هستند. به طور کلی هدف اصلی ابزارگذاری ژئوتکنیکی در چهار گروِه ارزیابی تحلیلی، پیش‌گوئی برای اجرا در آینده، استفاده برای استنادهای قانونی (ارزیابی قانونی) و تحقیق برای طراحی های آینده، دسته بندی می‌گردد[۹]. تعیینِ مقادیر تنش، تغییراتِ فشارمنفذی و جابجایی‌های بدنه‌ی سد در نقاط مختلف هسته و پوسته‌ی سنگی، ناشی از عملیات اجرائی، تراکم مصالح در حین ساخت و زمین‌لرزه‌های طبیعی، توسط ابزار مناسب نصب شده در بدنه‌ی سدها، ثبت می‌گردد. از اطلاعات ابزاردقیق، می‌توان برای آگاهی یافتن از صحت فرضیات و طرح های اولیه در رفتار خاکریز و شرایط اجرا، بهره‌برداری مناسب و یا وجود پتانسیل گسیختگی در اثر تنش‌های متقابل استفاده نمود [۱۰]. عملکرد سدها از نظر فشار آب منفذی ایجاد شده، نسبت فشار آب حفره‌ای r_u، نشست، تنش‌های ایجاد شده، درجه قوسی و احتمال شکست هیدرولیکی در دوره ساخت و تا زمان اولین آبگیری بایستی بررسی گردد [۱۱و۱۲]. در این تحقیق با استفاده از آیین‌نامه‌های موجود، حداقل ابزار مورد نیاز به منظور پایش و کنترل وضعیت پایداری بدنه سد را بیان نموده و به بررسی عملکرد داده های ابزار نصب شده پرداخته شده است. سد شهید مدنی تبریز به عنوان سد سنگ‌ریزه‌ای بزرگ، در شمال غرب کشور با توجه به فاصله‌ی نسبتاً کم با شهر تبریز، ارتفاع زیاد و همچنین لرزه‌خیزی منطقه مورد توجه قرار گرفته است. این سد با ارتفاع ۹۳ متر و طول تاج ۲۷۷ متر از نوع سنگ‌ریزه ای با هسته رسی در۵ کیلومتری شهر تبریز احداث گردیده است[۱۳]. با گذشت یک دهه از پایان ساخت بدنه سد از اطلاعات بیش از ۵۰۰ ابزار نصب شده به منظور کنترل وضعیت پایداری استفاده گردیده، این ابزار آیتم‌های ضروری جهت کنترل پایداری بدنه، همچون تغییرات میزان جابجاییِ قائم، جابجایی افقی، تغییرات تنش و فشارآب منفذی در پی و بدنه سد را نشان می‌دهند[۱۴]. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پایش و مدل‌سازی عددی انجام شده، کمک قابل‌توجهی به تحلیل پایداری سدهای خاکی می‌کند[۱۸-۱۵]. در این تحقیق به بررسی و ارزیابی نوع و تعداد ابزار لازم جهت نصب در بدنه‌ی سدها برای استفاده در مونیتورینگ پرداخته شده است. در این پژوهش ارائه یک چارچوب یکپارچه برای ارزیابی بلندمدت عملکرد شبکه ابزار دقیق سدهای خاکی–سنگریزه‌ای پس از گذشت یک دهه از پایان ساخت و پیش از آبگیری مخزن ارائه گردیده است. برای نخستین بار ترکیب همزمان تحلیل آماری داده‌های رفتارنگاری، صحت‌سنجی عملکرد ابزارها، تحلیل برگشتی پارامترهای ژئوتکنیکی و مدل‌سازی عددی المان محدود برای یک سد در شرایط خاص بدون آبگیری اولیه مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با استفاده از داده‌های بیش از ۵۰۰ ابزار نصب شده در بدنه و پی سد، ضمن ارزیابی کارایی و قابلیت اعتماد سیستم ابزارگذاری، تطابق کمی نتایج رفتارنگاری با تحلیل عددی به منظور پیش‌بینی رفتار واقعی سد و ارائه مبنای علمی برای برنامه‌ریزی ایمن آبگیری مخزن ارائه شده است که می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی برای مدیریت ریسک، کنترل پایداری بلندمدت و بهینه‌سازی سیستم‌های پایش سدهای خاکی–سنگریزه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مطالعه موردی

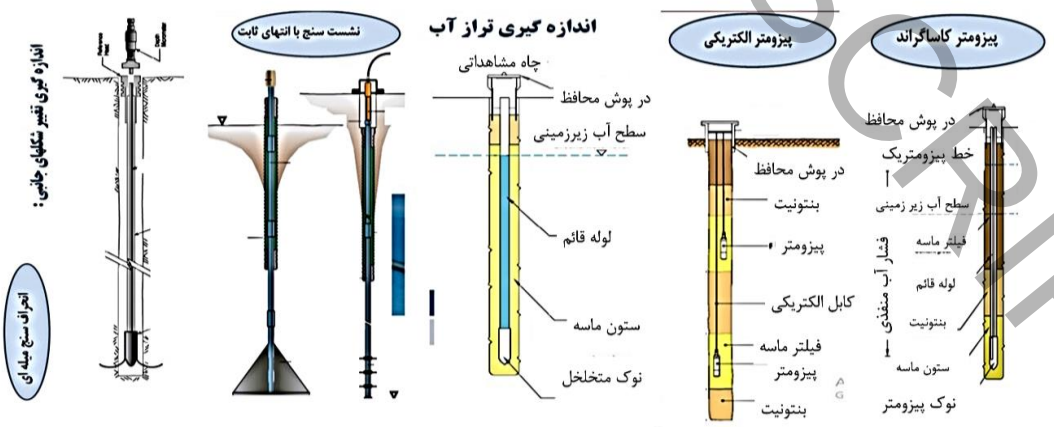
رفتار نگاری در سدهای خاکی، بررسی رفتار بسیار پیچیده بدنه سد بوده و بخشی از برنامه جامع کنترل پایداری سدها است. به عبارتی هدف اصلی تشخیص هرگونه مشکل احتمالی می باشدکه پایداری سد را تهدید می‌کند، این کار به خوبی با رفتارنگاری توسط ابزار دقیق برآورده می‌شود. با توجه به اهمیت ایمنی و پایداری سازه سدهای خاکی و سنگ‌ریزه‌ای، طراحی یک شبکه رفتارنگاری برای کنترل وضعیت بدنه سد و انجام تحلیل برگشتی برای کنترل داده‌های رفتارنگاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شبکه‌ی رفتارنگاری سد قادر

ACCEPTED MANUSCRIPT

است تغییراتی همچون تنش کل، فشار منفذی، جابجایی و تغییرمکان های خاکریز را ثبت نماید و هرگونه رفتار غیرعادی را نشان دهد [۶و۱۹].برای کنترل و مونیتورینگ وضعیت بدنه سدهای خاکی و سنگریزه ای ابزارهایی همچون اندازه‌گیری فشار آب منفذی، تنش کل، تغییر شکل، نشست، ارتفاع آب مخزن، شتاب زلزله، ترک، ایستگاه هواشناسی و اتاق کنترل مرکزی از ابزارهای متعارف می‌باشند. ابزارها قادر به اندازه‌گیری مقدار تنش موثر نیستند لذا اندازه‌گیری همزمان تنش کل و فشار آب منفذی در یک نقطه از بدنه‌ی سد برای تعیین تنش موثر در آن نقطه لازم می‌باشد. تعیین موقعیت ابزار دقیق بایستی بر اساس پیش‌بینی رفتارِ سازه در محل انجام گیرد. موقعیت ابزارها بایستی با اهمیت ژئوتکنیکی و روش تحلیلی که در زمان تفسیر اطلاعات استفاده خواهد شد سازگار باشد. در شکل(۱) نمایی ازقسمت های مختلف بدنه یک سد خاکی- سنگ‌ریزه‌ای جهت نصب ابزار به همراه ابزار مناسب هر قسمت بر اساس آیین نامه طراحی سدهای خاکی- سنگریزه ای ارائه شده است[۲۳-۲۰]. ابزارهای مورد نیاز برای ابزارگذاری وابسته به نوع اطلاعات مورد نیاز می‌باشند. اندازه‌گیری-های ساختگاهی شامل جابجایی افقی و قائم، تغییر شکل های نسبی (کرنش ها) جهات مختلف، چرخش‌ها برای سدهای بتنی، تنش‌های صفحه‌ای جهت‌های مختلف، فشار آب حفره‌ای(برای سدهای خاکی) و زیر فشار(برای سدهای بتنی)، مشاهدات پیزومتری، نفوذ و نشت آب، دماها (برای سدهای بتنی)، جابجایی درزه‌ها (برای سدهای بتنی و تونل ها) و شتاب نگار، اثرات زلزله شامل حداقل سه مولفه شتاب و نتایج جابجایی های دائمی، در رقوم های مختلف بدنه سد اندازه گیری می شوند[۲۹و۳۰]. در شکل(۲) نمایی از انواع ابزارهای متعارف که در سدهای خاکی- سنگریزه ای مورد استفاده قرار می گیرند به ترتیب شامل پیزومترکاساگرانده، پیزومتر الکتریکی، اندازه گیری تراز آب، نشست سنج با انتهای ثابت و انحراف سنج میله ای نشان داده شده است.



شکل ۱: نمایی از قسمت های مختلف جهت نصب ابزار به همراه ابزار مناسب هر قسمت



ACCEPTED MANUSCRIPT

شکل ۲. ابزارهای متعارف مورد استفاده در سدهای خاکی- سنگریزه ای

تراز تاج سد شهید مدنی تبریز ۱۵۰۴ (بالاتر از سطح دریا)، تراز نرمال مخزن ۱۴۹۸ متر بالاتر از سطح دریا، حجم مخزن در تراز نرمال ۳۶۱ میلیون مترمکعب می‌باشد. به منظورکنترل عملکرد بدنه سد و بررسی رفتار آن یک سیستم رفتارنگاری با توجه به مشخصات بدنه سد و وضعیت زمین شناسی پی در نظر گرفته شده است[۲۴]. در این تحقیق ضمن ارائه نقشه های طراحی و جانمایی ابزار نصب شده، به بررسی مبانی تجهیزات، کنترل صحت ابزار و صحت سنجی نتایج داده های حاصل از ابزار نصب شده پرداخته شده است. برای رفتارنگاری بدنه سد شهید مدنی در مرحله طراحی، ۵ مقطع ابزار گذاری به نام های A,B,C,D,E به نحوی انتخاب شده اند که امکان قرائت و کنترل آنها به سهولت امکان پذیر باشد. این مقاطع بر روی تصویر شماره۴ الف (پروفیل طولی) بدنه سد مشخص بوده و هدف از تعبیه این سیستم ها، اندازه گیری حرکات خارجی سد، حرکات داخلی، فشارهای داخلی خاک، فشار آب حفره ای، سطح آب مخزن، سطح آب زیر زمینی، نشت آب از بدنه و پی و لرزه نگار برای ثبت اندازه گیری حرکات ناشی از زمین لرزه در دوره های مختلف عمر سد می باشد[۱۴]. اطلاعات ابزار نصب شده شامل موقعیت، تاریخ، محل نصب و وضعیت فعلی ابزارها بررسی شده و جدول مشخصات کامل ابزارها ارائه شده است. در شکل (۳) نمایی از سد به همراه پلان مقاطع اصلی ابزار گذاری در امتداد عمود بر محور، برج آبگیر و اتاق کنترل تجهیزات ابزار سد شهید مدنی نشان داده شده است. تعداد ابزار نصب شده در بدنه سد شهید مدنی بیش از ۵۰۰ عدد بوده که شامل پیزومترهای الکتریکی (VP) ، کاساگراند (SP) برای ارزیابی فشار منفذی، سلول‌های اندازه‌گیری فشار کل (PC)، انحراف‌سنج (I)، نشت‌سنج (SD) و سه دستگاه شتاب نگار برای تعیین میزان شتاب های حاصل از لرزش‌های منطقه پیش بینی شده است. درمرحله‌ی پایان ساخت، تعداد ۱۲۰ دستگاه سلول فشار کل (PC)، ۶۲ پیزومترالکتریکی (VP)، ۲۷ پیزومترکاساگراند (SP)، ۱۷ انحراف‌سنج (I)، ۲۷۵نشت‌سنج (SD)، نصب شده است[۱۵]. در شکل (۴) به ترتیب پروفیل طولی سد و قرارگیری مقاطع ابزار گذاری شده در بزرگترین مقطع بدنه سد (مقطعC) که شامل نواحی مختلف و نحوه آرایش و جانمایی ابزار های نصب شده در مقطع ارائه شده است. بر اساس دستورالعمل ابزار گذاری مطابق ابعاد هر ناحیه از بدنه سد حداقل یک الی چند ابزار به فاصله مناسب پیشنهاد گردیده که در این تحقیق علاوه بر نصب حداقل ابزار در ناحیه مورد نظر در تراز های مختلف نیز به تعداد مکفی ابزار مناسب نصب گردیده شده است[۲۵-۲۴].

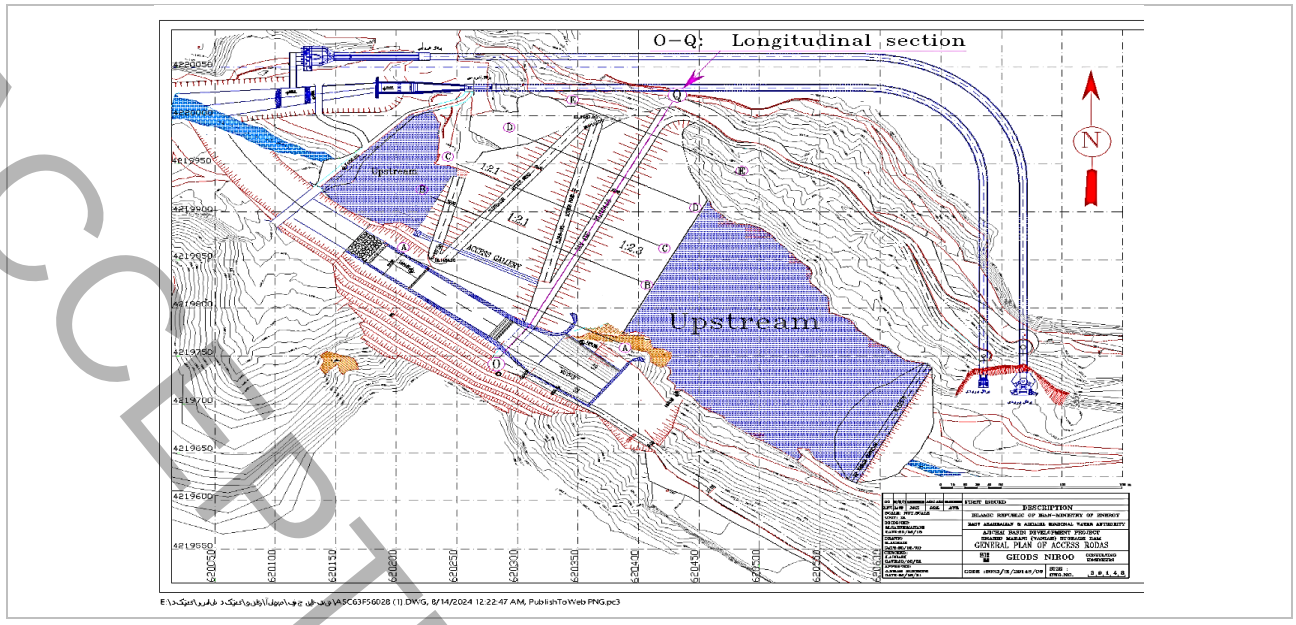
لیست تجهیزات کابلی و تجهیزات مکانیکیِ نصب شده در بدنه‌ی سد شهید مدنی براساس نقشه های ازبیلت و گزارش‌های رفتارنگاری، در جداول (۱ و ۲) ارائه شده است[۲۴].

(الف)



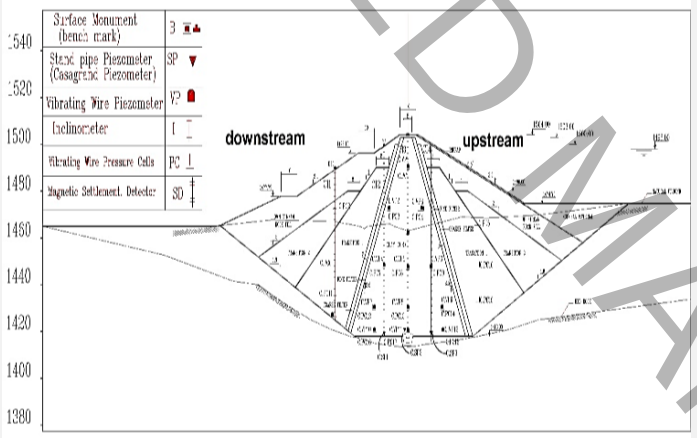
(ب)

ACCEPTED MANUSCRIPT

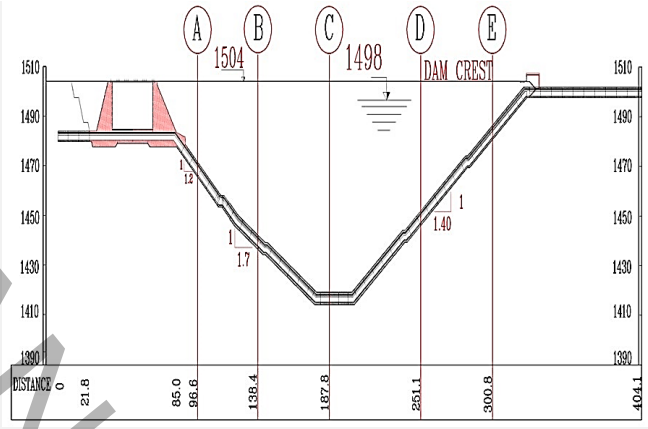


شکل۳. الف: نمای سد ب: پلان آرایش مقاطع ابزار گذاری در امتداد عمود بر محور سد

(ب)



(الف)



شکل۴. الف: پروفیل طولی سد ب: آرایش ابزارهای نصب شده در بزرگترین مقطع بدنه سد(مقطعC)

جدول۱. ابزارهای کابلی نصب شده در بدنه و پی سد[۲۴].

ردیف	موقعیت ابزار دقیق	سلول فشار کل			پیزومتر الکتریکی		
		تعداد کل	تعداد نصب شده	درصد نصب	تعداد کل	تعداد نصب شده	درصد نصب
۱	مقطع A	۹	۹	۱۰۰	۷	۷	۱۰۰
۲	مقطع B	۳۱	۳۱	۱۰۰	۱۵	۱۵	۱۰۰
۳	مقطع C	۴۲	۴۲	۱۰۰	۱۸	۱۸	۱۰۰
۴	مقطع D	۲۹	۲۹	۱۰۰	۱۵	۱۵	۱۰۰
۵	مقطع E	۹	۹	۱۰۰	۷	۷	۱۰۰
	تعداد کل	۱۲۰	۱۲۰	۱۰۰	۶۲	۶۲	۱۰۰

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول۲. ابزارهای مکانیکی نصب شده در بدنه و پی سد[۲۴].

ردیف	موقعیت ابزار دقیق	انحراف سنج					صفحات نشست سنج			پیزومتر کاساگرانده		
		تعداد کل	متراژ کل	تعداد نصب شده	متراژ نصب شده	درصد نصب شده (تعداد)	درصد نصب شده (متراژ)	تعداد کل	تعداد نصب شده	درصد نصب	تعداد کل	تعداد نصب شده	درصد نصب
۱	مقطع A	۳	۸۵	۳	۸۵	۱۰۰	۱۰۰	۲۴	۲۴	۱۰۰	۵	۵	۱۰۰
۲	مقطع B	۴	۲۳۴	۴	۲۳۴	۱۰۰	۱۰۰	۷۷	۷۷	۱۰۰	۶	۶	۱۰۰
۳	مقطع C	۴	۲۸۲	۴	۲۸۲	۱۰۰	۱۰۰	۹۴	۹۴	۱۰۰	۶	۶	۱۰۰
۴	مقطع D	۴	۲۱۳	۴	۲۱۳	۱۰۰	۱۰۰	۶۶	۶۶	۱۰۰	۶	۶	۱۰۰
۵	مقطع E	۲	۴۲	۲	۴۲	۱۰۰	۱۰۰	۱۴	۱۴	۱۰۰	۴	۴	۱۰۰
	مجموع	۱۷	۸۵۶	۱۷	۸۵۶	۱۰۰	۱۰۰	۲۷۵	۲۷۵	۱۰۰	۲۷	۲۷	۱۰۰

۳- نتایج و بحث

پارامترهای مقاومتی مصالح بدنه و پی سد براساس نتایج آزمایشات آزمایشگاهی حاصل از مطالعات منابع قرضه، مطالعات زمین شناسی منطقه و آزمایش های آزمایشگاهی انجام گرفته برروی مصالح نواحی مختلف بدنه سد بدست آمده است. پارامترهای مقاومتی بخش‌های مختلف بدنه‌ی سد و پی در جدول (۳) ارائه شده است. در جدول (۳)، K، ضریب نفوذپذیری، φ، زاویه‌ی اصطکاک داخلی، υ، ضریب پواسون E ، مدول الاستیسیته، γ_{sat}، وزن مخصوص اشباع و γ_d ، وزن مخصوص خشک خاک می‌باشد[۱۳].

جدول ۳. پارامترهای مقاومتی مصالح بدنه و پی سد شهید مدنی [۱۳].

نوع مصالح	γ_d (KN/M^3)	γ_{sat} (KN/M^3)	E (MPa)	υ	C (KPa)	φ (درجه)	K(m/s)
هسته رسی	۱۹	۲۰	۲۰	۰/۳	۴۰	۲۸	۵×۱۰^{-۱۰}
فیلتر	۲۰	۲۱	۴۰	۰/۲۵	۰	۳۳	$۱۰^{-۵}$
پوسته سنگریز	۲۱	۲۲	۷۰	۰/۲۵	۰	۴۴	$۱۰^{-۳}$
پوسته	۲۰	۲۱	۵۰	۰/۲۵	۰	۳۸	$۱۰^{-۴}$
ناحیه انتقالی	۱۹/۲	۱۹/۸	۱۵	۰/۳	۲۰	۲۸	$۱۰^{-۶}$
آبرفت	۱۸/۵	۱۹/۵	۴۰	۰/۳	۲۰	۲۰	$۱۰^{-۷}$
پی سنگی	۲۱	۲۲	۲۰۰	۰/۲۵	۸۰	۲۸	۱۰-۹

ارزیابی رفتار سدهای خاکی در حین ساخت و بهره برداری مهم ترین هدف از نصب ابزار دقیق در قسمت های مختلف بدنه است. تحلیل داده های ابزار دقیق تصویری واقعی از تمام تغییرات و ایمنی سد در دراز مدت را در اختیار ما قرار می دهد. این امر در صورتی ممکن است که ابزار سالم بوده و در یک چیدمان مناسب شبکه رفتار سنجی سد را تشکیل دهند. در راستای تصدیق رفتار بدنه سد و به منظور تدقیق پارامترهای در نظر گرفته شده در پروسه طراحی سد و ساخت، مدل عددی منطبق بر شرایط واقعی احداث سد، مدل‌سازی گردیده و تحلیل برگشتی انجام شده و امکان پیش‌بینی رفتار سد مهیا می گردد.

۳-۱- پایش نتایج ابزار دقیق

روند تغییرات داده های ابزارهای نصب شده در بدنه سد شهید مدنی تبریز یک دهه پس از پایان ساخت برای هر ۵ مقطع عرضی ابزارگذاری شده ارائه گردیده و پایداری سد برحسب میزان تغییرات توزیع تنش، اضافه فشار منفذی و جابجایی و نشست بدنه سد مورد ارزیابی قرار گرفته و پایداری بدنه سد بر اساس نتایج داده ها مورد بحث قرار گرفته است. در شکل(۵) به ترتیب نمایی از سیستم های کنترل مرکزی تجهیزات الکترونیکی نصب شده در بدنه و نحوه قرائت دستی تجهیزات مکانیکی نشان داده شده است.

ACCEPTED MANUSCRIPT

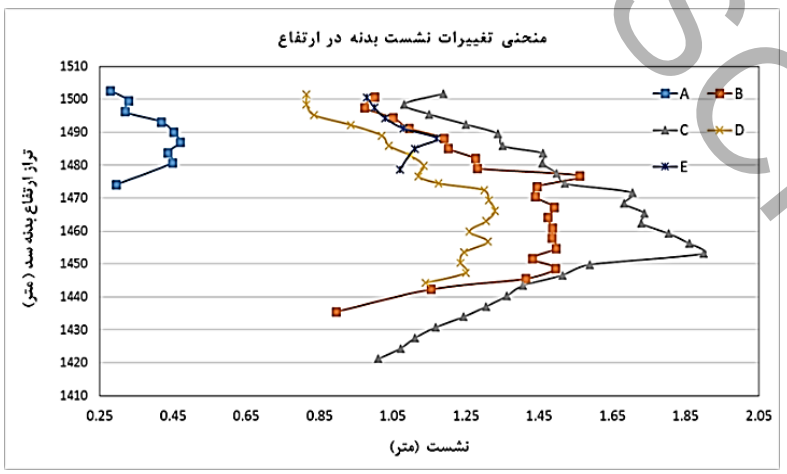
(الف) (ب)



شکل ۵. الف: نمایی از کنترل مرکزی تجهیزات الکترونیکی نصب شده در بدنه ب: قرائت دستی تجهیزات مکانیکی

۳-۱-۱- نشست

ابزار کنترل نشست، شامل نشست سنج های داخلی سد در سه گروه عمودی، افقی و حرکت چرخشی طبقه‌بندی شده‌اند. حرکت‌های افقی عمدتا به حرکت‌های بالادستی که در زمان اولین آب‌گیری در مخزن سد رخ می دهد اشاره دارد، که به دلیل کاهش سریع تنش موثر در مصالح بالادست نسبت به سایر قسمت های سد اتفاق می افتد و حرکت پایین‌دست به دلیل فشار افقی آب مخزن سد است. حرکات چرخشی که در دامنه های بالادست و پایین‌دست ظاهر می‌شوند به دلیل مقاومت برشی کمتر مصالح در پی یا بدنه سد است. استفاده از نقاط نقشه‌برداری، شیب‌سنج ها (لوله‌های استقرار) و نشست‌سنج قائم یک روش معمول برای اندازه‌گیری این تغییر شکل ها در سدهای خاکی است. برای بررسی جابجایی عمودی بدنه سدهای خاکی – سنگریزه ای، از یک سری صفحات مغناطیسی که در فواصل مختلف داخل لوله های نشست سنج نصب شده اند استفاده شده است. پایین ترین صفحه، صفحه پایه بوده بر روی بستر سنگی نصب شده است که کمترین جابجایی در آن رخ می دهد، این نقطه تقریباً ثابت است. به منظور ارزیابی تغییر شکل های عمودی در سد شهید مدنی، از ۱۷ انحراف سنج (I) و ۲۷۵ نشست سنج (SD) (صفحات استقرار مغناطیسی) در سطوح مختلف بدنه سد استفاده شده است. منحنی های تغییرات نشست در ارتفاع بدنه سد برای هر پنج مقطع اصلی بدنه سد حاصل از داده های ابزار دقیق در شکل(۶) نشان داده شده است. بیشترین مقدار تغییرشکل عمودی حاصل از نتایج ابزار نشست سنج در مقاطع عرضی بدنه سد (A، B، C، D و E) سد شهید مدنی در جدول(۴) نشان داده شده است.



شکل ۶. منحنی های تغییرات نشست در ارتفاع پنج مقطع عرضی بدنه سد

ACCEPTED MANUSCRIPT

جدول ۴. حداکثر نشست عمودی حاصل از نتایج ابزار در مقاطع بدنه سد [۲۴].

نام مقطع عرضی	ماکزیمم مقدار نشست حاصل از ابزار دقیق (متر)
A	۰/۴۶۹
B	۱/۵۶
C	۱/۹۰
D	۱/۳۳
E	۱/۱۷

حداکثر میزان نشست عمودی پس از یک دهه از پایان ساخت بر اساس قرائت ابزار نصب در بزرگترین مقطع عرضی بدنه سد بوده (مقطع C)، بوده وبه مقدار ۱,۹۰ (متر) است. این میزان نشست می تواند ناشی از عمل تحکیم مصالح و وقوع چندین زمین لرزه طبیعی در منطقه آذربایجان طی ده سال گذشته باشد.

۳-۱-۲- تنش

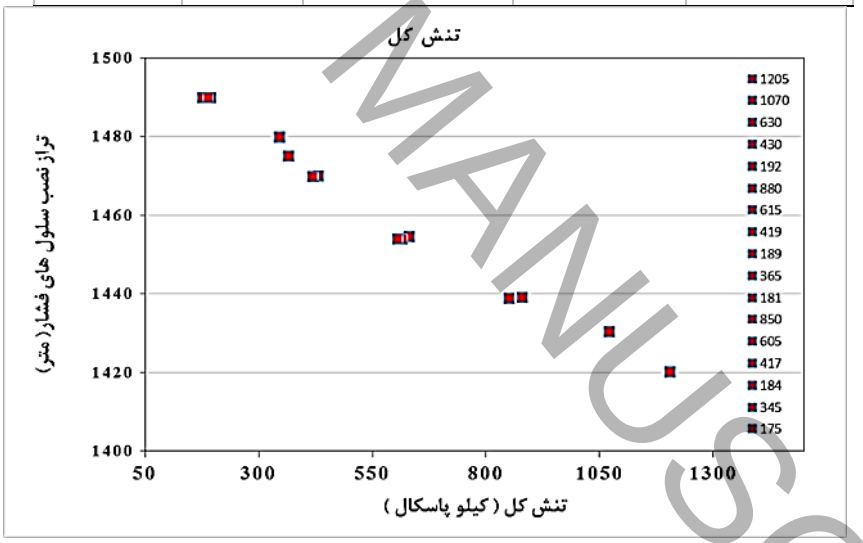
سلول‌های فشار نصب شده در ترازهای مختلف بدنه سد های خاکی- سنگریزه ای به بررسی تغییرات میزان تنش کل در نقاط مختلف بدنه سد می پردازد. در سد شهید مدنی ۱۲۰ سلول فشار در قسمت های مختلف بدنه تعبیه شده اند. این سلول ها در خوشه های ۳ تایی قرار دارند و تنش ها را در ۳ جهت (دو جهت افقی ، یک جهت عمودی) اندازه گیری می کنند. PC، نشان دهنده سلول‌های فشار است که در پنج مقطع A, B, C, D و E بدنه سد نصب شده‌اند. کالیبراسیون سلول‌های فشار برای تعیین تنش ها کار دشواری است، عدم کالیبراسیون و خرابی این ابزارها منجر به بروز خطا در تعیین دقیق میزان تنش ها خواهد گردید. برای جلوگیری از آسیب به سلول‌های فشار، خاک اطراف سلول ها با تراکم کمتری در مقایسه با سایر قسمت‌های هسته فشرده گردیده است. تنش عمودی کل عامل اصلی جلوگیری از ایجاد ترک در هسته سدهای خاکی است، در زمان پایان ساخت و اولین آب‌گیری مخزن، کاهش تنش عمودی می تواند ترک های افقی ایجاد کند، زیرا فشار آب بیشتر از مقدار تنش عمودی است. مقدار تنش های عمودی بدست آمده از سلول های فشار هسته سد در پنج مقطع سد در جدول (۵) آورده شده است. در شکل (۷) منحنی های تغییرات تنش کل در ارتفاع بدنه سد حاصل از نتایج ابزار دقیق ارائه است.

جدول۵. تنش های قائم بدنه سد ده سال پس از پایان ساخت در مقاطع A، B، C، D و E [۱۳].

شماره سلول ها	محل نصب	فاصله از محور (متر)	تراز نصب	تنش کل قائم
APC.1	مرکز هسته	۰/۷۴	۱۴۹۰/۰۷	۱۸۱
APC.2	پایین دست هسته	-۶/۶۸۵	۱۴۷۵/۳۵	۳۶۵
APC.3	بالادست هسته	۶/۷۵۴	۱۴۷۵/۹	۳۵۱
BPC.1	مرکز هسته	۰/۰۷۵	۱۴۹۰/۱	۱۸۹
BPC.3	پایین دست هسته	-۹/۵۴	۱۴۶۹/۷۹	۴۱۹
BPC.4	بالادست هسته	۱۰/۳۰	۱۴۶۹/۷۹	۴۱۳
BPC.7	پایین دست هسته	-۱۷/۰۶	۱۴۵۴/۳۳	۵۶۵
BPC.8	مرکز هسته	۰/۳۶	۱۴۵۴/۴۵	۶۱۵
BPC.9	بالادست هسته	۱۸/۰۲	۱۴۵۴/۴۸	۵۸۰
BPC.11	پایین دست هسته	-۱۶/۲	۱۴۳۹/۲۰۵	۸۰۵
BPC.12	مرکز هسته	۰/۰۸	۱۴۳۹/۱۶۴	۸۸۰
BPC.13	بالادست هسته	۱۶/۸۱	۱۴۳۹/۱۶۱	۸۴۵
CPC.1	مرکز هسته	۰/۵	۱۴۹۰/۱۱	۱۹۲/۴
CPC.3	پایین دست هسته	-۱۰/۵۴	۱۴۷۰/۰۳۶	۴۳۰
CPC.4	بالادست هسته	۱۰/۲۴	۱۴۶۹/۹۳۵	۴۱۹/۳
CPC.7	پایین دست هسته	-۱۶/۹۲	۱۴۵۴/۶۴۹	۵۷۵

ACCEPTED MANUSCRIPT

CPC.8	مرکز هسته	۰/۴۹۲	۱۴۵۴/۶۶	۶۳۰/۱۸
CPC.9	بالادست هسته	۱۷/۹۵	۱۴۵۴/۶۲۹	۵۹۱/۶
CPC.12	پایین دست هسته	-۲۰/۰۲	۱۴۳۰/۹۰۹	۱۰۰۸/۳
CPC.13	مرکز هسته	۰	۱۴۳۱	---
CPC.14	بالادست هسته	۲۰/۳	۱۴۳۱/۳۲۱	۱۰۷۰/۵
CPC.16	پایین دست هسته	-۲۰/۴۳	۱۴۲۰/۲۹۴	۱۲۰۵
CPC.17	مرکز هسته	۱/۲۱	۱۴۲۰/۵۵	۱۱۵۰
CPC.18	بالادست هسته	۱۹/۸۴	۱۴۲۰/۲۹۶	۱۱۶۰
DPC.1	مرکز هسته	۰/۴	۱۴۹۰/۱۱	۱۸۴
DPC.3	پایین دست هسته	-۱۰/۶۹	۱۴۷۰/۱۱	۴۱۷
DPC.4	بالادست هسته	۱۰/۷۷	۱۴۷۰/۱۵۹	۴۰۸
DPC.9	پایین دست هسته	-۱۷/۹۱	۱۴۵۴/۴۲۲	۵۶۰
DPC.10	مرکز هسته	۰/۳۵۲	۱۴۵۴/۴۸۸	۶۰۵
DPC.11	بالادست هسته	۱۷/۹۶	۱۴۵۴/۱۷	۵۷۵
DPC.6	پایین دست هسته	-۱۷/۱۵	۱۴۳۹/۱۵۸	۷۹۰
DPC.7	مرکز هسته	۰/۱۸	۱۴۳۹/۰۴۴	۸۵۰
DPC.8	بالادست هسته	۱۷/۰۷	۱۴۳۹/۱۲۹	۸۲۲
EPC.1	مرکز هسته	۰/۰۴۹	۱۴۸۹/۹۶	۱۷۵
EPC.2	پایین دست هسته	-۶/۸۸	۱۴۷۹/۸۴۶	۳۴۵
EPC.3	بالادست هسته	۶/۷۳	۱۴۷۹/۹۰۷	۳۲۱



شکل ۷. تغییرات تنش کل عمودی

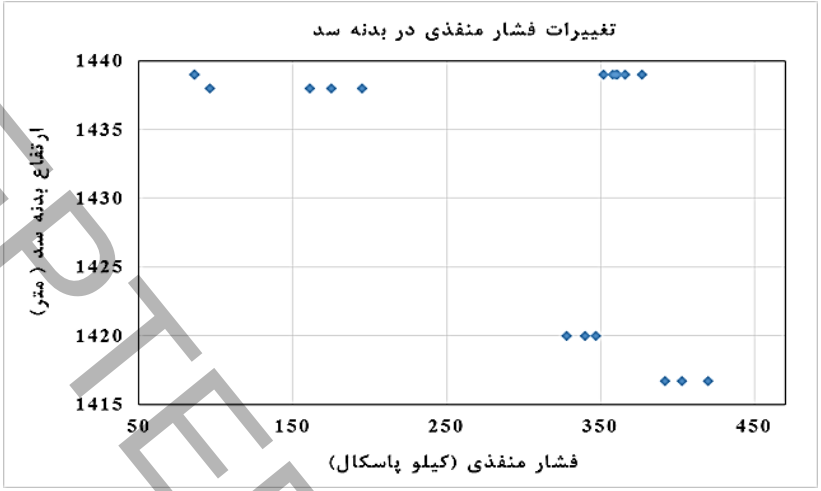
ماکسیم مقدار تنش کل حاصل از داده های سلول های فشاری در محل اتصال هسته به پی ۱۲۰۵ کیلو پاسکال می باشد، به دلیل گذشت زمان و تحکیم مناسب مصالح هسته این مقدار نزدیک به واقعیت بوده و با نتایج طرح اولیه همخوانی مناسب دارد.

۳-۱-۳-فشار منفذی

فشار منفذی از مسائل مهم در مهندسی مکانیک خاک است، تغییرات فشار منفذی در هسته سدهای خاکی به عواملی مانند میزان فشار سربار، سرعت خاکریزی، شرایط زهکشی، نفوذپذیری، میزان اشباع و تراکم خاک بستگی دارد. افزایش فشار منفذی باعث کاهش مقاومت برشی خاک شده و به خطر افتادن پایداری سد را بدنبال دارد. با کنترل سرعت خاکریزی در زمان ساخت، می توان سرعت افزایش فشار منفذی را کنترل نمود. در سدهای خاکی – سنگریزه ای به دلیل تغییرات تراکم مصالح هسته رسی و فونداسیون، متشکل از مصالح

ACCEPTED MANUSCRIPT

ریزدانه با نفوذپذیری کم و بارمصالح سربار، فشار منفذی ایجاد می گردد، در هسته سدهایی که نفوذپذیری و زهکشی کم دارند، عملیات خاکریزی بدنه سد منجر به افزایش فشار منفذی گردیده، که با کاهش تنش موثر منجر به گسیختگی برشی ناحیه هسته می گردد. در این سد از پیزومترهای الکتریکی و کاساگرنده برای تعیین میزان فشار منفذی درهر پنج مقطع ابزار گذاری شده در تراز های مختلف استفاده شده است. در شکل (۸) تغییرات فشار منفذی در ارتفاع بدنه سد حاصل از داده های قرائت پیزومترها ارائه شده است.



شکل ۸. تغییرات فشار منفذی در ارتفاع بدنه سد

به دلیل عرض زیاد هسته رسی، نفوذپذیری کم مصالح ریز دانه و تراکم مناسب هسته، فشار منفذی اضافی در هسته رسی ایجاد شده است. ماکزیمم فشار منفذی طی ده سال پس از پایان ساخت در سطوح پایین تر هسته در محل اتصال هسته به فونداسیون مشاهده شده است. برای کنترل فشار منفذی هسته رسی از ضرایب فشار منفذی نیز کمک گرفته شده است که میزان ضرایب فشار منفذی از روابط(۱) و (۲) قابل محاسبه است:

$r_u = \left(\frac{u}{\gamma * h}\right)$	(۱)
$R_u = \left(\frac{u}{\sigma_v}\right)$	(۲)

در روابط (۲و۱) به ترتیب u : فشار آب منفذی در نقطه مورد نظر، γ: وزن واحد مخصوص، h: ضخامت لایه خاک بالاتر از نقطه مورد نظر، σ : تنش عمودی کل در نقطه مورد نظر و r_u (ثبات نسبی) در طول و انتهای ساخت که سرعت مناسب ساخت را نشان می دهد، این محاسبات احتمال کم، شکست هیدرولیکی بدنه سد را نتیجه می دهد. مقدار پایین R_u نشان دهنده قابلیت اطمینان بالا در برابر شکست هیدرولیکی به دلیل پدیده قوس دهی است. ارزش R_u به طور کلی بیش از r_u در هسته است. در جدول (۶) تغییرات نسبت فشار منفذی به ترتیب در مقاطع B، C و D براساس قرائت پیزومترهای الکتریکی (VP) و پیزومترهای کاساگرانده (SP) آورده شده است.

جدول ۶. نسبت فشار منفذی پیزومترهای ارتعاشی و کاساگرانده ده سال پس از پایان ساخت در مقطع B، C و D [۱۳].

شماره پیزومتر	محل نصب	فاصله از محور(متر)	تراز نصب	فشار منفذی	r_u	R_u
				ابزار دقیق	ابزار دقیق	ابزار دقیق
BVP.7	پایین دست هسته	-۱۷/۳۶	۱۴۳۹/۱۸	۳۵۸/۶	۰/۲۷	۰/۴۴
BVP.8	مرکز هسته	۰/۴۸	۱۴۳۹/۱۶	۳۶۰/۲	۰/۲۷	۰/۴
BVP.9	بالا دست هسته	۱۶/۴۹	۱۴۳۹/۲۲	۳۶۶/۵	۰/۲۸	۰/۴۳
BSP.1	پایین دست هسته	-۱۵	۱۴۳۸	۱۷۵	۰/۱۳	-
BSP.2	مرکز هسته	-۳/۱۹	۱۴۳۸	۱۶۱	۰/۱۲	-
BSP.3	بالا دست هسته	۱۳/۳۸	۱۴۳۷	۱۹۵	۰/۱۴	-
CVP.10	پایین دست هسته	-۲۰/۶	۱۴۲۰/۵۲	۳۴۰	۰/۲	۰/۲۸

ACCEPTED MANUSCRIPT

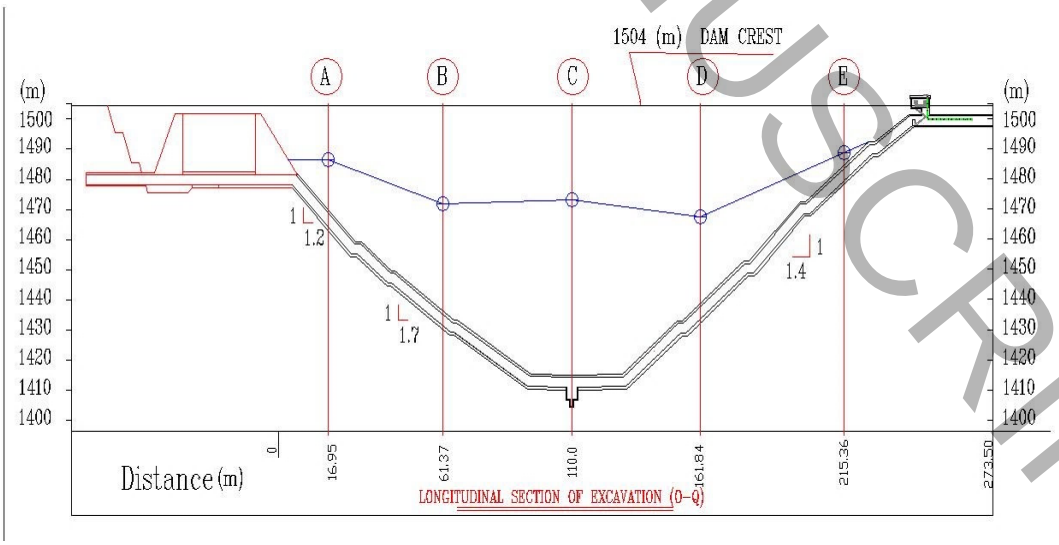
CVP.11	مرکز هسته	۰/۴۲۲	۱۴۲۰/۵۸	۳۲۸	۰/۱۹	۰/۲۸
CVP.12	بالا دست هسته	۲۰/۲۵	۱۴۲۰/۲۹	۳۴۷	۰/۲	۰/۲۹
CSP.1	پایین دست هسته	-۱۶/۲۴	۱۴۱۶/۷	۴۰۳	۰/۲۲	-
CSP.2	مرکز هسته	-۳/۸۰	۱۴۱۶/۷	۳۹۲	۰/۲۲	-
CSP.3	بالا دست هسته	۱۵/۹	۱۴۱۶/۷	۴۲۰	۰/۲۳	-
DVP.4	پایین دست هسته	-۱۶/۴۲	۱۴۳۹/۱۴	۳۷۷/۷	۰/۲۸	۰/۴۷
DVP.5	مرکز هسته	۰/۱۲	۱۴۳۹/۰۲	۳۵۲	۰/۲۶	۰/۴
DVP.6	بالا دست هسته	۱۷/۱	۱۴۳۹/۱	۳۶۱/۱	۰/۲۷	۰/۴۳
DSP.1	پایین دست هسته	-۱۴/۹۱	۱۴۳۸	۹۶	۰/۰۷	-
DSP.2	مرکز هسته	-۲/۹۲	۱۴۳۹	۸۶	۰/۰۶	۰/۱
DSP.3	بالا دست هسته	۱۴/۸۵	۱۴۳۹	۸۶	۰/۰۶	۰/۱

مقادیر ماکزیمم فشار منفذی، r_u و R_u حاصل از پایش پیزومترها در محدوده قابل قبولی بوده و حداکثر R_u بدست آمده حاصل از ابزار نصب شده در هسته ۰/۴۷می باشد. طبق گزارش فنی سد شهید مدنی R_u پیش بینی شده در مرحله طراحی ۰,۵ برآورد شده که از نظر مقاومت در برابر شکست هیدرولیکی ایمنی سد قابل قبول است. ماکزیمم فشار منفذی هسته رسی بر اساس قرائت پیزومترهای نصب شده در هسته بدنه سد ۴۲۰ کیلو پاسکال است که در پایین ترین تراز سطح هسته رخ داده است. روش دیگر برای کنترل پایداری بدنه سد در مقابل شکست هیدرولیکی کنترل میزان تنش موثر می باشد، با در نظر گرفتن ماکزیمم میزان تنش کل و ماکزیمم میزان فشار منفذی میزان تنش موثر را می توان از رابطه (۳) بدست آورد:

$$\sigma' = \sigma - u \qquad (۳)$$

با محاسبه انجام گرفته میزان تنش موثر ماکزیمم ۷۸۵ کیلوپاسکال می باشد که با این میزان تنش موثر، امکان بروز شکست هیدرولیکی و تراوش از هسته رسی برای بدنه سد وجود نخواهد داشت و پایداری سازه از نظر هیدرولیکی قابل قبول می باشد. با قرائت لوله های شاهد مستقر در بدنه سد مقدار تراز آب واقع در بدنه سد ده سال پس از اتمام عملیات ساخت قابل مشاهد می باشد. این تراز بخاطر تراز آب رودخانه و انحراف مسیر رودخانه از طریق تونل های انحراف بوده و تراز آب در بدنه سد تعیین می گردد. در شکل (۹) تراز استایی آب در پروفیل طولی بدنه سد بر اساس قرائت های بدست آمده از لوله های شاهد نشان داده شده است.

مطابق شکل ۹، فوق تراز آب در بالای تراز ۱۴۷۰ از بدنه سد قرار داشته واغلب مصالح بدنه سد بخصوص هسته رسی بخاطر تراز بالای آب اشباع بوده و این مصالح در حالت زهکشی نشده قرار دارند.

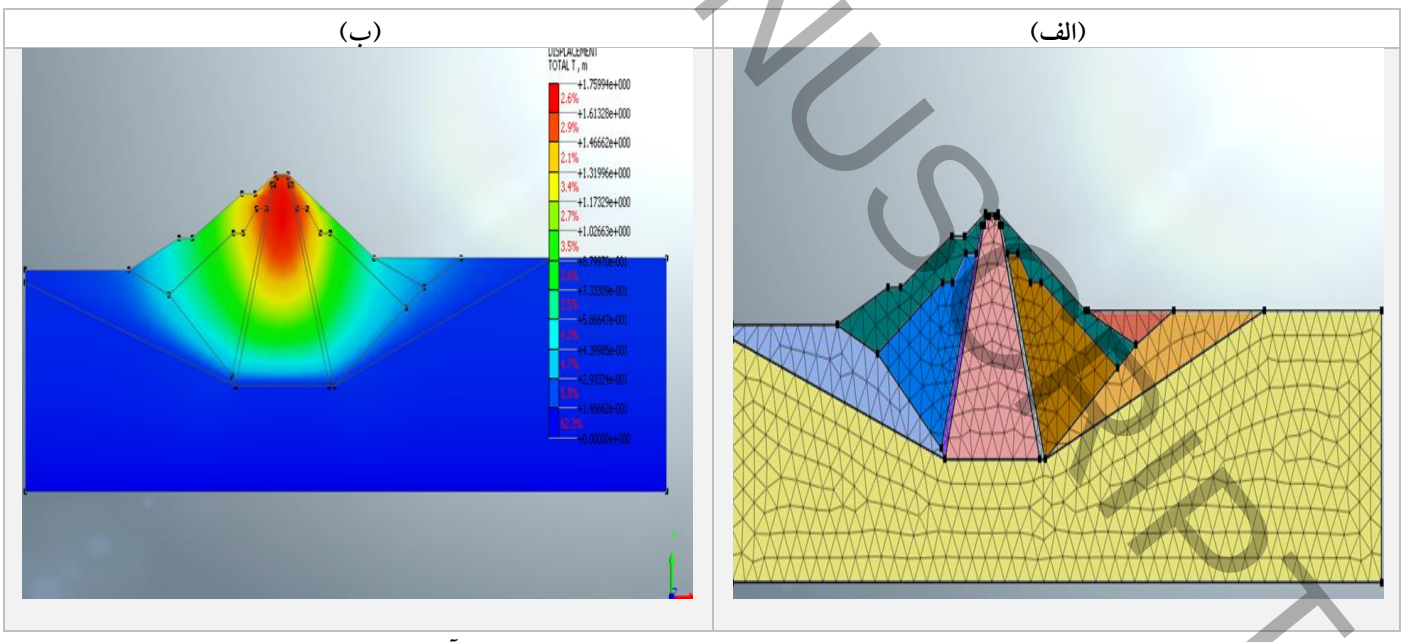


شکل ۹. تراز آب در بدنه سد شهید مدنی تبریز

ACCEPTED MANUSCRIPT

۳-۲- تحلیل عددی

برای کنترل صحت نتایج داده های ابزار دقیق و پایش پایداری سد علاوه بر داده های قرائت شده از ابزار شده در بدنه سد از آنالیز عددی استفاده شده است. در تحقیق حاضر به منظور انجام تحلیل های عددی دو بعدی یک مدل دو بعدی از بزرگترین مقطع بدنه سد (مقطع C) در نرم افزار المان محدود میداس ایجاد گردید. این نرم افزار یک نرم افزار تخصصی ژئوتکنیکی است که برای تحلیل های عددی سدهای خاکی- سنگی استفاده می شود. مدل سازی دقیق، تحلیل آسان و سرعت بالا از مزایای این نرم افزار است. مراحل اولیه کار در این برنامه ایجاد هندسه مدل سد با استفاده از شرایط مرزی است. به منظور کنترل پایداری بدنه سد و انجام آنالیزهای تنش و کرنش، از مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر – کولمب استفاده شده است. مدل موهر کولمب یک مدل الاستوپلاستیک کامل بوده که به طور گسترده برای شبیه سازی رفتار خاک به کار برده می شود. برای جلوگیری از زمان بر شدن تحلیل و رسیدن به دقت بالای نتایج در این تحلیل ها از آنالیزهای حساسیت کمک گرفته شده تا ابعاد بهینه مدل انتخاب گردد. میزان فاصله مرزها از مدل به قدری انتخاب شده که بر نتایج حاصل از شبیه سازی اثرگذار نباشد. ابعاد انتخاب شده در هر دو مدل از هر سمت مدل ۱,۵ الی ۲ برابر ابعاد مدل انتخاب شده است، شرایط مرزی مدل مطابق شرایط استاندارد تعریف شده است که در آن کف مدل در دو جهت افقی و قائم بسته و مرزهای کناری فقط در جهت افقی بسته می شود و امکان جابجایی در جهت قائم وجود دارد که متناسب با نوع مسئله انتخاب شده است. ابعاد مش انتخاب شده به نحوی است که در کل اجزا مدل تا نواحی مرزی به صورت یکنواخت گسترش یافته و در شکل ها نمایش داده شده است. بدلیل وجود لایه های فیلتر در بدنه سد مورد نظر که عرض بسیار کمتری نسبت به اجزای دیگر مدل دارند براساس آنالیز حساسیت و بررسی های فیزیکی انجام گرفته اندازه مش واحد (مش مناسب) برای مش بندی مدل انتخاب شده است. پس از رسم هندسه و اختصاص مصالح، شرایط اولیه به مدل اعمال می گردد، شرایط اولیه شامل شرایط هیدرولیکی و تنش اولیه است. به دلیل خشک بودن مدل شرایط هیدرولیکی در آن وجود نخواهد داشت ولی در ادامه برای انجام آنالیزها مطابق داده های حاصل از ترازآب زیر زمینی، مشخصات مصالح اشباع در مدل اعمال خواهد شد. در ادامه تحلیل اولیه تنش، جابه‌جایی اولیهٔ تکیه‌گاه صفر در نظر گرفته می شود. برای انجام تحلیل های عددی بر اساس مدل رفتاری موهر - کولمب‌از پارامترهای مقاومتی (جدول شماره۳) حاصل از آزمایشات منابع قرضه استفاده شده است. در شکل (۱۰) مدل عددی سد شامل شبکه المان دو بعدی مدل و نتایج آن نشان داده شده است.



شکل ۱۰. الف: مدل سازی و شبکه المان دو بعدی ب: آنالیز عددی

ACCEPTED MANUSCRIPT

بر اساس نتایج حاصل از آنالیز عددی بیشترین میزان نشست، تنش کل و فشار منفذی به ترتیب ۱۷۹ سانتی متر،۱۴۴۰ کیلو پاسکال و۴۵۰ کیلو پاسکال می باشد. با مقایسه نتایج بدست آمده از مدل‌سازی‌عددی و نتایج داده های ابزارهای دقیق، هم‌خوانی مناسب بین نتایج ملاحظه می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل های عددی برای نشست، تنش کل، فشار منفذی به ترتیب ۹۴، ۸۳ و۹۳ درصد مقادیر بدست آمده حاصل از رفتارنگاری ابزار می باشند، این همخوانی نتایج نشان از پایداری بدنه سد و صحت عملکرد ابزار نصب شده در بدنه و پی سد می باشد.

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، ضمن ارزیابی آماری و بررسی عملکرد ابزارهای لازم و متعارف برای مونیتورینگ بدنه سدهای خاکی- سنگریزه ای، به بررسی ابزارهای نصب شده، مونیتورینگ و پایداری بدنه سد شهید مدنی تبریز بعنوان مطالعه موردی یک دهه پس از پایان ساخت بدنه پرداخته شده است. ضمن بررسی تعداد و نوع ابزار به کار رفته در بدنه سد، نتایج داده های ابزار دقیق با نتایج حاصل از تحلیل عددی مقایسه گردیده و وضعیت پایداری بدنه سد و همچنین صحت عملکرد ابزار نصب شده بررسی و نتایج به شرح زیر ارائه شده است.

۱.یک دهه پس از اتمام ساخت بدنه سد، بر اساس قرائت ۲۷۵ ابزار نشست سنج نصب شده در پنج مقطع اصلی بدنه سد که همگی فعال و قابل قرائت می باشند، حداکثر میزان نشست عمودی در مقطع عرضی (C)، بوده که ۱,۹۰ (متر) است و میزان نشست حاصل از تحلیل عددی ۱,۷۹ (متر) می باشد همخوانی مناسب بین نتایج نشست مشاهده می گردد، دلیل این میزان نشست در عمل می تواند ناشی از تحکیم مناسب مصالح و وقوع چندین زمین لرزه طبیعی در منطقه آذربایجان طی ده سال گذشته باشد.

۲. یک دهه پس از اتمام ساخت بدنه سد، بر اساس قرائت ۱۲۰ ابزار سلول فشار نصب شده در پنج مقطع اصلی بدنه سد که غیر از چند مورد همگی فعال و قابل قرائت می باشند، ماکزیمم میزان تنش کل حاصل از سلول های فشاری در مقطعC، ۱۲۰۵ کیلو پاسکال است. میزان تنش حاصل از تحلیل عددی ۱۴۴۰ کیلو پاسکال می باشد همخوانی مناسب بین نتایج تنش کل مشاهده می گردد، به دلیل گذشت زمان و تحکیم مناسب مصالح هسته این مقدار نزدیک به واقعیت بوده و همچنین با نتایج طرح اولیه همخوانی مناسب دارد.

۳. یک دهه پس از اتمام ساخت بدنه سد، بر اساس قرائت ۸۹ ابزار پیزومتر الکتریکی و کاساگرنده نصب شده در سه مقطع اصلی بدنه سد که غیر از چند مورد همگی فعال و قابل قرائت می باشند، ماکزیمم میزان فشار منفذی حاصل از قرائت ابزار در مقطعC، ۴۲۰ کیلو پاسکال است که در پایین ترین تراز سطح هسته رخ داده است. میزان فشار منفذی حاصل از تحلیل عددی ۴۵۰ کیلو پاسکال می باشد همخوانی مناسب بین نتایج فشار منفذی مشاهده می گردد، بر این اساس ضریب فشار منفذی حداکثر R_u بدست آمده ابزار نصب شده در هسته ۰/۴۷ محاسبه گردیده که از نظر مقاومت در برابر شکست هیدرولیکی ایمنی سد قابل قبول است.

۴. بر اساس دستورالعمل ابزار گذاری مطابق ابعاد هر ناحیه از بدنه سد حداقل یک الی چند ابزار به فاصله مناسب پیشنهاد گردیده که در این سد تعداد ابزار مناسب در ترازها و مقاطع مختلف نصب گردیده و کلیه نقاط حساس توسط ابزار مناسب تحت پوشش قرار گرفته، همچنین همه این ابزار ها سالم بوده و داده های بدست آمده مناسب برای کنترل پایداری بدنه سد می باشند. نتایج حاصل از تحلیل های عددی علاوه بر همخوانی مناسب با داده های ابزار دقیق، نشان دهنده صحت عملکرد ابزار نصب شده در بدنه سد بوده و تاییدی بر پایداری وضعیت بدنه سد می باشد.

۵- مراجع

[1] B. Beiranvand, M. Komasi, Monitoring and numerical analysis of pore water pressure changes Eyvashan dam during the first dewatering period, Journal of Applied Research in Water and Wastewater, 11 (2019) 1–7. https://doi.org/10.22126/arww.2019.1017

ACCEPTED MANUSCRIPT

[2] R. Farajniya, R.V. Poursorkhabi, A. Zarean, Analysis and monitoring of the behavior of a rock fill dam ten years after construction: A case study of the Iran-Madani Dam, Geoenvironmental Disasters, 11 (2024) 30. https://doi.org/10.1186/s40677-024-00295-4
[3] R.V. Vafaei Poursorkhabi, A. Zareh, Evaluation of the electrokinetic treatment on the shear strength of clay soils using direct simple shear tests, Geotechnical and Geological Engineering, 43 (2025) 461. https://doi.org/10.1007/s10706-025-03420-8
[4] R. Farajniya, R.V. Poursorkhabi, A. Zarean, R. Dabiri, Investigating the arching in rock-fill dam ten years after the end of construction using numerical analysis and monitoring, Ferdowsi Civil Engineering, 35(1) (2022) 59–74. https://doi.org/10.22067/JFCEI.2022.73934.1098
[5] A. Soroush, A. Aghaei Araei, Analysis of behaviour of a high rockfill dam, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering, 159(1) (2006) 49–59. https://doi.org/10.1680/geng.2006.159.1.49
[6] A. Ghanbari, S. Shams Rad, Development of an empirical criterion for predicting the hydraulic fracturing in the core of earth dams, Acta Geotechnica, (2013) 1–12. https://doi.org/10.1007/s11440-013-0263-2
[7] H. Pouraziz, R.V. Vafaei Poursorkhabi, M. Yousefzadeh Fard, R. Dabiri, Laboratory investigation into the stabilization of dispersive clay using ionized material: Engineering performance and environmental efficiency, Environment and Water Engineering, (2025) e230322. https://doi.org/10.22034/ewe.2025.531542.2040
[8] H. Pouraziz, R.V. Poursorkhabi, M.Y. Fard, R. Dabiri, Experimental investigation of a special chemical additive for improving the geotechnical properties of dispersive clay soils, Results in Engineering, (2025) 107015. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107015
[9] A.R. Mazaheri, R. Alipour, B. Shokri Derivand, Study of monitoring and numerical analyses of rockfill dam (Case study of Marvak Dam in Lorestan, Iran), Civil Infrastructure Researches, 5(2) (2020) 153–164. https://doi.org/10.22091/cer.2020.5223.1194
[10] Iran Water Resources Management Company, Regulation No. A-1-505, Instructions for Installation and Commissioning of Instrumentation in Dams, Ministry of Energy, (2023). (In Persian)
[11] M. Rashidi, S.M. Mohsen Haeri, Evaluation of behaviors of earth and rockfill dams during construction and initial impounding using instrumentation data and numerical modeling, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, (2016) 709–725. http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.12.003
[12] Qods Niroo Consulting Engineers, Engineering Geology Report of Shahid Madani Dam, (2002). (In Persian)
[13] Technical review of numerical analyzes to control the static and dynamic stability of Shahid Madani dam, Ghods-Niroo Consultant Engineers Co, Tehran (2009). (In Persian)
[14] Abzar Khak Company, Instrumentation Report of the Body of Shahid Madani Dam, (2022). (In Persian)
[15] V. Ghiasi, F. Heidari, H. Behzadinezhad, Numerical analysis and back calculation for embankment dam based on monitoring results (Case study: Iran–Lurestan Rudbar), Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering, 28(5) (2021) 180–192. https://doi.org/10.24200/SCI.2021.56159.4579
[16] H. Pouraziz, R.V. Vafaei Poursorkhabi, M.Y. Fard, R. Dabiri, Effects of wollastonite powder on the geotechnical properties of a dispersive clayey soil, Discover Applied Sciences, 6(8) (2024) 433. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06133-4
[17] R. Farajniya, R.V. Poursorkhabi, Specialised impounding plan of a rockfill dam after construction: Case study of Madani dam, Geotechnical Research, 12(2) (2025) 102–112. https://doi.org/10.1680/jgere.24.00050
[18] S. Pourghani, F. Salmasi, B. Nourani, H. Arvanaghi, Investigation and comparison of saturated and unsaturated flow in the Gilan-Gharb embankment dam, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 57(5) (2025) 717–740. (in Persian) https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23522.8177
[19] M.R. Seify Asghshahr, A.R. Rahai, Pushover analysis of reinforced concrete bridges under chloride-induced corrosion, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(1) (2018) 73–88. (in Persian) https://doi.org/10.22060/ceej.2016.863
[20] S. Angardi, R.V. Poursorkhabi, A.Z. Shirvanehdeh, R. Dabiri, Vs profiling by the inversion of Rayleigh wave ellipticity curve using a hybrid artificial intelligence method, Pure and Applied Geophysics, (2024) 1–14. https://doi.org/10.1007/s00024-024-03514-z
[21] A. Dibamehr, F.B. Sarand, R.V. Sorkhabi, Application of geopolymerization as a new method for stabilizing marl soil, Indian Geotechnical Journal, 56 (2026) 699–713. https://doi.org/10.1007/s40098-024-01157-4

ACCEPTED MANUSCRIPT

[22] M. Khalili-Maleki, R.V. Poursorkhabi, A.A. Nadiri, R. Dabiri, Prediction of hydraulic conductivity based on the soil grain size using supervised committee machine artificial intelligence, Earth Science Informatics, 15(4) (2022) 2571–2583. https://doi.org/10.1007/s12145-022-00848-x
[23] R.V. Vafaei Poursorkhabi, S. Angardi, A. Zarean, Seismic analysis of sediments in the Tabriz plain using metaheuristic algorithms and shear wave velocity modeling, Journal of Geomine, 2(2) (2024) 58–68. https://doi.org/10.22077/jgm.2025.8356.1038
[24] Qods Niroo Consulting Engineers, Report on the Second Phase Studies of Shahid Madani Dam, (2002). (In Persian)
[25] Qods Niroo Consulting Engineers, Report on the Review of Numerical Analyses for Controlling the Static and Dynamic Stability of Shahid Madani Dam, (2009). (In Persian)
[26] A. Gholipoor Noroozi, R. Ajalloeian, M. Bayat, Static examination of the interface behavior of the filter soil material–the asphaltic concrete core using direct shear apparatus: Case study Mijran dam, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 55(2) (2023) 407–430. (in Persian) https://doi.org/10.22060/ceej.2022.20861.7548
[27] A. Zareh, R.V. Poursorkhabi, A.A. Majdi, F.B. Sarand, The efficiency of the electro-osmosis method on the consolidation and strength properties of the gray clay of Tabriz, Geoenvironmental Disasters, 10(1) (2023) 16. https://doi.org/10.1186/s40677-023-00245-6
[28] R.V. Poursorkhabi, A.R. Fard, Designing a model for earthquake timing and magnitude prediction based on neural networks and particle swarm optimization (PSO) algorithm, Discover Geoscience, 4 (2026) 42. https://doi.org/10.1007/s44288-026-00427-3
[29] R.V. Poursorkhabi, A. Naseri, A.A. Nadiri, Estimation of hydraulic conductivity using gradation information through Larsen fuzzy logic hybrid wavelet artificial neural network and combined artificial intelligence models, Discover Applied Sciences, 7 (2025) 885. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07444-w
[30] F. Behrouz Sarand, A. Dibamehr, R. Vafaeipoor, Improvement of Tabriz green marl using alkaline activated zeolite and metaclay, Journal of Civil and Environmental Engineering (2023). https://doi.org/10.22034/CEEJ.2023.54867.2213

ACCEPTED MANUSCRIPT