

بررسی خصوصیات ژئوتکنیکی بستر دریاچه ارومیه: با نگرش احیای مرحله‌ای

سمیه رستمی^۱، حجت احمدی^{۲*} و ناصر آق^۳

۱، ۲ و ۳- به ترتیب: دانش آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی؛ دانشیار گروه مهندسی آب و استاد پژوهشکده آرتیمیا و آبزی پروری دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۷/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۱۰

چکیده

بحران اخیر و خشک شدن بخش اعظم دریاچه ارومیه هم اکنون یکی از بزرگ‌ترین مخاطرات زیست‌محیطی در ایران محسوب می‌شود. باوجود تلاش‌های گسترده برای احیای دریاچه ارومیه، به دلیل محدودیت رواناب‌های ورودی به دریاچه، موفقیت قابل توجهی در این خصوص حاصل نشده است. یکی از روش‌های که می‌تواند برای احیای این دریاچه به کار گرفته شود احیای فازبندی دریاچه ارومیه است. بر این اساس روی دو مسیر مشخص پیشنهادی بر پایه حجم آورد رودخانه‌ها برای شکل‌گیری عمق مناسبی از آب دریاچه، نمونه‌های دست‌نخورده انتخاب و آزمایش‌های متداول شناسایی مواد بستری، مقاومت برشی و تحکیم پذیری اجرا شد. نتایج بررسی نشان داد که مواد بستری در هر دو مسیر انتخابی مشابه هم و بسیار سست با درصد بالای مواد آلی فعال هستند. پارامترهای مقاومت برشی حاصل از آزمایش‌ها نشان‌دهنده مقاومت برشی بسیار پایین مواد در دامنه ۶ تا ۱۲ KPa است. ضریب‌های فشردگی و تورمی برای نمونه‌های اخذشده برای مسیر شمالی‌تر بیشتر از مسیر جنوب دریاچه حاصل شد. میزان ماده آلی در دامنه ۳/۵۴ تا ۴/۶۷ درصد قرار دارد و از این رو نوع خاک بستر دریاچه نرم آلی ارزیابی شد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد به‌منظور اجرای فازبندی و جداسازی موقت بستر دریاچه به بخش‌های کوچک‌تر، باید از سازه‌های سبک با سطح پی وسیع استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی

تحکیم پذیری، فازبندی، مقاومت برشی، مواد بستری، دریاچه ارومیه

مقدمه

کیلومتر و متوسط عمق ۶ متر است و کم ارتفاع‌ترین بخش حوضه را تشکیل می‌دهد و به‌عنوان مخزن خروجی برای زهکشی طبیعی آب مازاد سطحی و زیرزمینی در طبیعت پیرامون خود عمل می‌کند (Dadmehr, 2014). از لحاظ زمین‌شناسی، دریاچه ارومیه ناحیه‌ای فرونشسته زمین‌ساختی و به عبارتی جزو تشکیلات گرابنی (Graben) است که در نتیجه فعالیت گسل تبریز در شرق و گسل زرينه‌رود در غرب ایجاد شده است. اطراف این دریاچه را کوه‌های

دریاچه ارومیه واقع در شمال غرب ایران، بزرگ‌ترین دریاچه شور کشور و یکی از دریاچه‌های فوق‌اشباع نمک در دنیا شناخته می‌شود که از این نظر مشابه دریاچه بزرگ نمک آمریکاست. مساحت حوضه آبریز دریاچه ارومیه بین ۵۰۰۰ تا ۵۲۰۰۰ کیلومترمربع و مساحت پیکره آبی آن حدود ده درصد خود حوضه است (Yasi, 2017). متوسط طول دریاچه ۱۴۰ کیلومتر و عرضی بین ۲۰ تا ۵۰

توجه به این حجم از نمک ورودی به دریاچه و حجم بالای تبخیر سالانه از سطح دریاچه، که بین ۰/۹۸ تا ۱/۲ متر است، منحنی تجمعی میزان نمک‌های باقیمانده در دریاچه حالت صعودی دارد و تراز دریاچه به سرعت در حال کاهش است (Amini et al., 2010).

در سال‌های اخیر دلایل مختلف طبیعی و انسانی موجب به هم خوردن تعادل و توازن بین ترم‌های ورودی و خروجی دریاچه شده و تراز آب به شدت کاهش یافته است؛ هم‌اکنون دریاچه ارومیه بحرانی‌ترین وضعیت خود را می‌گذراند. سطح تراز آب دریاچه به میزان حدود ۶ متر کاهش پیدا کرده و تراز آب دریاچه به حدود ۱۲۷۱/۳۸ متر رسیده است. این در حالی است که حداکثر تراز دریاچه ارومیه در سال‌های ۱۳۷۳ تا ۱۳۷۵، ۱۲۷۷/۹ متر بوده است (Amirataee & Zeinalzadeh, 2016). تغییر اقلیم و به ویژه افزایش تبخیر در سال‌های اخیر، اگرچه خود عاملی است در کاهش تراز آب دریاچه، اما علت اصلی خشک شدن دریاچه ارومیه نیست؛ دخالت‌های انسانی از عوامل مهم کاهش تراز آب دریاچه است (Soudi et al., 2019)؛ احداث میان‌گذر شهید کلانتری، که استان آذربایجان غربی و شرقی را به هم متصل می‌کند، یکی دیگر از عواملی است که موجب به هم خوردن تعادل دمایی دریاچه، حبس دما در دو طرف میان‌گذر، افزایش شوری و تبخیر و همچنین تخریب اکوسیستم غنی دریاچه، به سبب جریان نداشتن آب، شده است (Hemmati et al., 2021; Soudi et al., 2019).

در سال‌های اخیر گام‌های فراوانی برای احیای دریاچه ارومیه برداشته شده است که اهم آنها شامل مواردی است مانند: تسهیل و افزایش حجم آب ورودی به دریاچه ارومیه، کنترل و کاهش برداشت آب سطحی و زیرزمینی، راهکارهای حفاظتی و

مرتفع با ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر فراگرفته است. دریاچه ارومیه نسبتاً جوان است به طوری که پس از آخرین فعالیت یخچالی و بر اثر فعالیت‌های تکتونیکی به صورت فعلی درآمده است و بین سپر عربستان، ارومیه، ترکیه و ایران قرار دارد (Mackenzie, 1972).

ترکیب شیمیایی شوراب دریاچه ارومیه از نوع سدیم-کلرید-سولفات است (Shahrabi, 1981). همه ساله به طور میانگین حدود ۵/۵ میلیون تن املاح مختلف وارد دریاچه ارومیه می‌شود؛ حدود ۳۵ تا ۴۰ متر از رسوبات نرم و آبدار کف دریاچه به طور مستقیم روی سنگ کف آن قرار گرفته است (Aflaki, 2004). حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد رسوبات دریاچه ارومیه را رسوبات شیمیایی و بیوشیمیایی تشکیل می‌دهند که شامل گل‌های آراگونیتی، دانه‌های پوشش‌دار، پلت‌های دفعی آرتمیا و کانی‌های تبخیری هستند. بیشتر نهشته‌های دریاچه از نوع شیمیایی است. رسوبات شیمیایی به ترتیب فراوانی عبارت‌اند از: نمک طعام، گچ، آراگونیت و به ندرت کلسیت و برخی از ایلیت‌های آهکی (Shahrabi, 1981). مهم‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه عبارت‌اند از: زرینه رود، سیمینه رود، مهاباد چای، گادارچای، باراندوز چای، شهرچای، روضه چای، نازلو چای، زولاچای، تسوج چای، آجی چای و صوفی چای که برخی فصلی و برخی دائمی‌اند که پس از عبور از داخل سازندهای مختلف زمین‌شناسی اطراف دریاچه منشأ اصلی مواد شیمیایی داخل دریاچه هستند. ویژگی‌های سنگ‌شناسی این سازندها گویای یون‌های موجود در رسوبات بستر دریاچه است. از میان رودهای ذکر شده، آجی چای از رسوبات نمکی نئوژن شرق تبریز عبور می‌کند و حدود ۵۸ درصد از نمک دریاچه را تأمین می‌کند (Aghanabati, 2006). با

آب ورودی در سطح زیاد و عمق کم باعث تبخیر آن می‌شود. در صورتی که مقدار آب ورودی در سطح کمتری ذخیره شود که دارای عمق بیشتر و دمای کمتر و تبخیر کمتری باشد، با اضافه شدن ورودی آب در سال‌های متمادی احیای دریاچه تسریع خواهد شد. در واقع به دلیل ماهیت هموار بستر دریاچه ارومیه با شیب حدود 0.03% از بخش جنوبی به بخش شمالی، آب ورودی به دریاچه در بستر پخش می‌شود. در سال‌های اخیر با وجود اجرای طرح‌های مختلف در سطح حوضه باهدف افزایش میزان ورودی آب به دریاچه ارومیه، افزایش تراز آب در دریاچه از میزان تبخیر سالانه کمتر بوده است و روند کاهشی در سال‌های اخیر مجدداً رخ داده است. از این رو محدود کردن سطح پخش آب ورودی در دریاچه و در نتیجه کاهش تبخیر، ذخیره آن برای چند سال متمادی میسر می‌شود و می‌توان سرعت احیای آن را افزایش داد.

هدف این پژوهش امکان‌سنجی تفکیک بستر دریاچه از دیدگاه ژئوتکنیکی و مشکلات اجرایی بر اساس سناریوهای مکانی است.

از آنجایی که خاک لجنی بستر دریاچه ارومیه سرشار از مواد آلی است، بنابراین مشکلات خاک‌های آلی و نرم مانند مقاومت برشی بسیار کم و نشست-پذیری بسیار زیاد را دارد لذا به منظور انتخاب نوع سازه مناسب برای تفکیک موقت بستر دریاچه ارومیه به چند بخش لازم است مشخصات فیزیکی و مکانیکی مواد بستری دریاچه ارومیه به درستی شناسایی گردد. بدین ترتیب، در این تحقیق بر اساس مطالعات میدانی و آزمایش‌های صورت گرفته، خصوصیات مواد بستری دریاچه شناسایی شده است.

کاهش اثرها، کنترل و کاهش مصرف آب در بخش کشاورزی و طرح‌های انتقال آب از خارج حوضه (Soudi et al., 2017). با توجه به اینکه این راهکارها برای احیای دریاچه ارومیه تاکنون موفق‌آمیز نبوده است، بنابراین بررسی گزینه مدیریت سطح دریاچه و احیای مرحله‌ای آن در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است که آخرین طرح مصوب است. ایده اصلی مدیریت سطح دریاچه ارومیه ناشی از اقداماتی است که برای احیای برخی از دریاچه‌های بحرانی در سطح جهان مدنظر است (مانند دریاچه آرال یا گریت سالت لیک). با احداث دایک، دریاچه آرال به دو قسمت شمالی و جنوبی تقسیم شد که این کار باعث افزایش عمق آب و کاهش سطح تبخیر شده و غلظت نمک در قسمت شمالی به شدت کاهش یافته است (Michline, 2016; Badescu & Cathcart, 2011). صمدزاده و همکاران

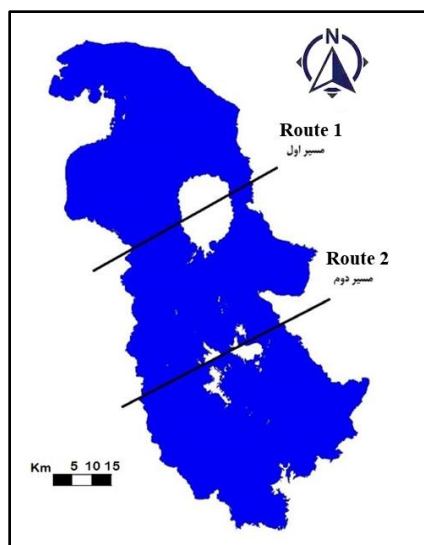
(Samadzadeh et al., 2018) به شبیه‌سازی هیدرولیکی تأثیر احداث دایک‌ها در کاهش سطح تبخیر دریاچه ارومیه پرداختند و پس از مدل کردن مخزن دریاچه ارومیه به کمک نرم‌افزار GIS، نمودارهای حجم-سطح دریاچه را در ترازهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار SURFER محاسبه کردند. این محققان با محاسبه تبخیر، دبی جریان‌های سطحی و زیرزمینی وارده به دریاچه، میزان بارش و سایر عوامل تأثیرگذار، بیلان هیدرولوژیکی دریاچه را به روش پویایی سیستم‌ها با استفاده از نرم‌افزار VENSIM مدل کردند. در این زمینه سه سناریوی مکانی برای محل احداث دایک‌ها پیشنهاد دادند و تأثیر هر یک از دایک‌ها را در جهت کاهش سطح تبخیر و بیلان هیدرولوژیکی بررسی کردند. در واقع، به دلیل بستر هموار دریاچه، پخش

مواد و روش‌ها

مسیرهای تقسیم‌بندی

در این تحقیق، مطالعات روی دو مسیری صورت گرفته است که در تحقیقات صمدزاده و همکاران (Samadzadeh et al., 2018) در خصوص انتخاب مکان‌های مناسب برای احیای فازبندی بر اساس آورد حوضه پیشنهاد شده بود. مسیر اول در امتداد جزایر اسپیر و کبودان، به فاصله یک کیلومتر از ساحل غربی و شرقی به طرف مرکز دریاچه است. این مسیر به ترتیب در مختصات جغرافیایی ۴۱۳۴۹۵۳.۴۹ شرقی و ۵۲۷۹۲۱.۴۶ شمالی قرار دارد و انتهای مسیر در شرق دریاچه در امتداد خط مستقیم در مختصات ۴۱۵۴۷۱۳.۸۸ شرقی و ۵۶۵۷۹۷۷.۸ شمالی واقع شده است. طول این فاصله در بستر دریاچه در حدود ۲۹ کیلومتر است. با توجه به مشکلات موجود در پیمایش بستر دریاچه نمونه‌های مختلف از مواد بستری دریاچه از عمق نیم متری اخذ گردید. دلیل انتخاب عمق سطحی، تمرکز بر شناسایی خصوصیات لایه سطحی باهدف

به کارگیری سازه سبک مانند دیواره‌های سپری است. بدین ترتیب از سه نقطه از سمت ساحل غرب دریاچه به سمت جزایر و از فاصله‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ متر از ساحل دریاچه نمونه‌برداری شد. مسیر دوم در امتداد پل شهید کلانتری (در قسمت بازشدگی پل) در مختصات جغرافیایی ۴۱۸۲۶۳۶.۳ شرقی و ۵۳۲۴۳۰.۳ شمالی قرار دارد و انتهای مسیر در شرق دریاچه در امتداد خط میان‌گذر در مختصات ۴۱۸۳۲۴۵.۵ شرقی و ۵۳۳۵۳۵.۵ شمالی در نظر گرفته شده است. طول سازه موردنیاز برای بستن پل شهید کلانتری در این مورد حدود ۱۲۰۰ متر خواهد بود. از آنجایی که در این بخش عمق آب برای برداشت نمونه زیاد بود و این کار با تجهیزات موجود میسر نبود، در امتداد میان‌گذر شهید کلانتری و از بخش جنوبی در سه نقطه مختلف شامل دونقطه در بخش غربی و یک نقطه در بخش شرقی پل انتخاب شد. مشابه مسیر اول، عمق نمونه‌برداری در این بخش نیز نیم متر در کف بستر انتخاب گردید. مسیرهای تقسیم‌بندی در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- مسیرهای موردبررسی برای تقسیم‌بندی بستر دریاچه به منظور فازبندی احیا

Fig.1- The studied routes to divide Lake Urmia for phasing restoration

روش اجرای آزمایش‌ها

به منظور شناسایی رسوبات بستر دریاچه ارومیه، پس از نمونه برداری‌های لازم در مسیرهای ۱ و ۲ ارائه شده از بستر دریاچه در شکل ۱، آزمایش‌های مورد نیاز به منظور استخراج داده‌های ورودی مدل‌های عددی به شرح زیر و بر اساس استانداردهای مربوطه اجرا شد.

دانه بندی خاک به روش شستشویی و هیدرومتری (ASTM D 422-63)، تعیین وزن مخصوص حقیقی (Gs) (یک بار با استفاده از آب و خاک شسته شده و بار دیگر با استفاده از نفت و خاک شور دریاچه) (ASTM D854) وزن مخصوص ظاهری (از تست شماره D استاندارد (1975-BS1377)، درصد رطوبت طبیعی خاک (ASTM D2216-98)، تعیین حدود اتربرگ (یک بار با خاک شور و آب دریاچه و بار دیگر با خاک شسته شده و آب مقطر) و طبقه بندی خاک (ASTM D4318) و (ASTM D427-04)، آزمایش‌های مقاومت برشی خاک (آزمایش برش پره‌ای (ASTM D2573) و آزمایش تک محوری (ASTM D2166-87))، آزمایش تحکیم (ASTM D2435)، آزمایش تعیین هدایت هیدرولیکی خاک به روش بار افتان (ASTM D5084). خلاصه نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

نکته قابل توجه در این آزمایش‌ها، نحوه خشک کردن نمونه به علت وجود بلورهای نمک، مواد آلی و سایر مواد معدنی مانند خاک رس بود. این خاک‌ها شامل آب مولکولی یا آب هیدراتاسیون ضعیفی هستند که می‌تواند در دمای استاندارد (۱۱۰ درجه سانتی‌گراد) از بین برود و در نتیجه باعث تغییراتی در مشخصه خاک شود از جمله حدود اتربرگ، اندازه دانه‌ها و وزن مخصوص ظاهری. از طرفی، به علت وجود انواع

املاح در این نوع خاک‌ها، نمک‌ها در اثر گرمای زیاد ته نشین می‌شوند یا در اثر جذب آب به صورت کریستالی درمی‌آیند و به قسمت بیرونی ذرات خاک می‌چسبند و مانع از خروج تمام رطوبت می‌شوند، که در نهایت باعث افزایش حجم خشک خاک می‌شوند که نتیجه آن بروز خطاهایی در آزمایش‌هاست. بنابراین، به منظور برآورد درصد رطوبت خاک به روش وزنی و خشک شدن در کوره بر اساس استاندارد آمریکا (ASTM D2216-87)، نمونه‌ها به مدت ۱۲ روز در دمای کمتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شدند.

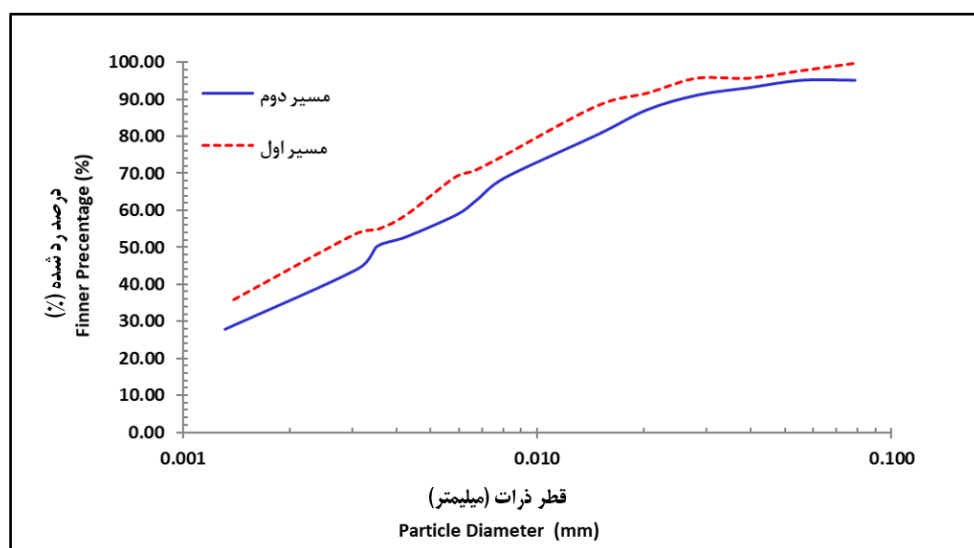
برای تعیین حدود اتربرگ اگر هدف تعیین درصد رطوبت حد روانی، حد خمیری و حد انقباض خاک در محل باشد، از خاک شور استفاده می‌شود، ولی در تعیین بافت خاک باید آزمایش‌ها بعد از شستشو و جداسازی نمک‌ها صورت پذیرند (Frydman et al, 2008). بنابراین، به منظور درک صحیح از آنچه در محل و بستر دریاچه رخ می‌دهد، آزمایش با خاک شور و با آب دریاچه نیز اجرا شد.

نتایج و بحث

با توجه به اینکه بیش از ۹۵ درصد از خاک مورد آزمایش از الک شماره ۲۰۰ عبور کرد، برای دانه بندی خاک از روش هیدرومتری استفاده شد. منحنی دانه بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. قسمت عمده نمونه‌های مورد بررسی از نوع لای است به همین منظور برای شناخت رفتار و رده بندی خاک، ویژگی‌های خمیری نمونه‌ها نیز بررسی شد. بررسی منحنی دانه بندی دو مسیر نشان دهنده ریزدانه تر بودن ذرات مسیر اول نسبت به مسیر دوم است. در واقع، به دلیل نزدیک بودن مسیر دوم به مصب رودخانه‌ها، ذرات این بخش درشت تر از ذرات

میان‌گذر دچار تغییرات شدیدی شده (Hemmati *et al.*, 2021) لذا به احتمال زیاد لایه‌های ایینی و عمیق بستر دریاچه توزیع اندازه متفاوتی دارند.

مسیر اول است؛ از این رو ذرات درشت‌تر قبل از رسیدن به بخش‌های میانی ته‌نشین می‌شوند. هرچند چرخش آب دریاچه ارومیه، نسبت به سال‌های قبل از احداث آن، به دلیل ساخت



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی خاک در دو مسیر

Fig. 2- Particle size distribution for the bed materials of both routes

میزان ماده فعال آلی از نمونه‌های اخذشده در مسیرهای موردنظر تعیین شد. میزان مواد آلی خاک با استفاده از روش مستقیم افت حرارتی (احتراق خشک یا والکلی بلک)، مطابق استاندارد ASTM D2974 مشخص شد. آزمایش‌های مربوط به این بخش میزان ماده آلی را در مسیر اول ۳/۵۴ و در مسیر دوم ۴/۶۷ درصد ارائه داده‌است. با توجه به این میزان ماده آلی، خاک‌های بستر دریاچه در این بخش و در لایه مورد مطالعه جزو خاک‌های آلی قابل طبقه‌بندی است و از لحاظ بستر برای سازه‌های مهندسی می‌تواند جزو خاک‌های مشکل‌آفرین دسته‌بندی شود (Huang *et al.*, 2009) ولی میزان ماده آلی موجود در محدوده مورد مطالعه که تا شعاع محدودی از ساحل دریاچه بوده، جزو خاک‌های آلی معدنی قابل دسته‌بندی‌اند و محدوده مطالعه با نقشه

رطوبت و رفتار خمیری خاک

حدود اتربرگ در این پژوهش یک بار بعد از شستشوی خاک و جداسازی نمک‌ها و با استفاده از آب مقطر و بار دیگر با خاک شور و با استفاده از آب دریاچه ارومیه برآورد شد که در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۱ مشاهده می‌شود که حدود اتربرگ خاک شسته شده بیشتر است تا خاک شور. همچنین، حد روانی نمونه‌های شسته شده در حد رطوبت طبیعی خاک است. ولی در خاک شور حد روانی بسیار کمتر از رطوبت طبیعی خاک است. واضح است که وجود املاح در خاک باعث کاهش حد روانی آن می‌شود. خاک‌ها بر اساس حدود اتربرگ حاصل از خاک شسته شده و با استفاده از سیستم طبقه‌بندی متحد طبقه‌بندی شدند. در این سیستم، به منظور تعیین نوع خاک،

آب شور دریاچه ارومیه قرار داشته باشد، رفتار خاک OH و در صورت ورود آب شیرین به بستر رفتار خاک نوع OL را دارد.

با توجه به مشکلات مهندسی مربوط به خاک‌های آلی، هر دو مسیر ازلحاظ ژئوتکنیکی برای پی سازه‌هایی مانند دایک‌های خاکی نامناسبند (Rahimi & Abbasi, 2014).

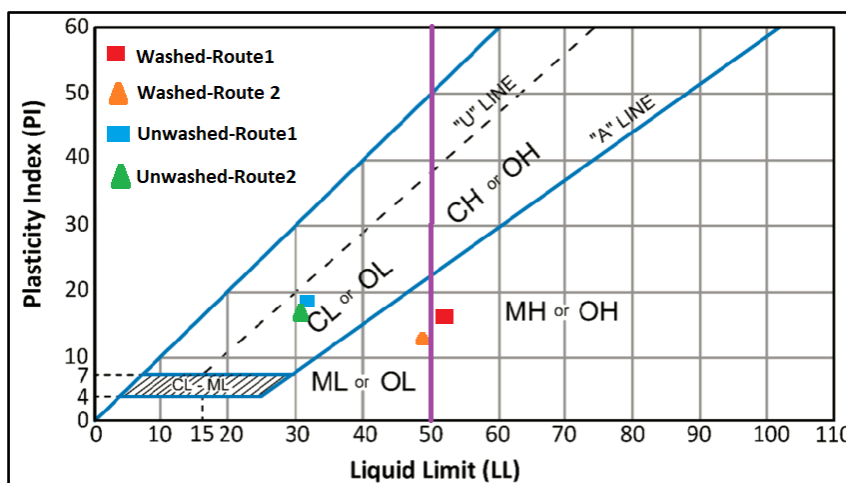
پراکندگی خاک‌های آلی در دریاچه‌ها مطابقت دارد که رحیمی و عباسی (Rahimi & Abbasi, 2014) ارائه داده‌اند.

بر اساس مقدار مواد آلی تعیین‌شده، شکل ۳ بر اساس دو روش حدود خمیرایی، نوع مواد بستری را طبق طبقه‌بندی متحد خاک نشان می‌دهد. بر این اساس، در شرایطی که خاک بستری در تماس با

جدول ۱- حدود آتبرگ مواد بستری دریاچه ارومیه در دو مسیر متفاوت بر اساس دو روش مختلف

Table 1- Aterberg limits of bed materials of Lake Urmia for the studied routes with two difference methods

حدود آتبرگ Aterberg Limits					نمونه Specimen	روش آزمایش Test Method
رطوبت Water Content $\omega\%$	PI%	SL%	PL%	LL %		
---	16.45	17.45	35.71	52.16	مسیر اول	شسته
---	12.65	29.40	36.74	49.39	مسیر دوم	Washed
51.2	19.20	12.7	13.12	32.32	مسیر اول	آب شور
49.7	18.89	10.3	12.71	30.60	مسیر دوم	Unwashed



شکل ۳- طبقه‌بندی مواد بستری بر اساس سیستم متحد و مشخصات خمیری حاصل از آب شور و آب مقطر

Fig. 3- Classification of bed materials based on Unified method by plasticity indexes by using saltwater and desilted water

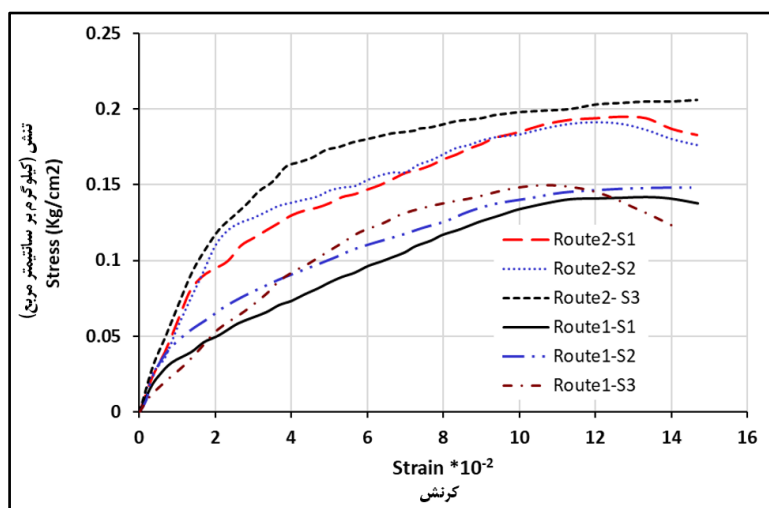
سازه‌های آبی برای اجرای احیای فازبندی این دریاچه است. در انتخاب نوع سازه مورد استفاده برای تقسیم‌بندی بستر دریاچه ارومیه به بخش‌های

مقاومت برشی

مقاومت برشی مواد بستری دریاچه ارومیه یکی از مهم‌ترین فاکتورهای خاک در امکان به‌کارگیری

نشان‌دهنده تغییر شکل کمتر بخش‌های جنوبی در اثر بارگذاری‌های خارجی نسبت به بخش‌های شمالی است. همچنین، نقاط پیک مربوط به نمودارهای نمونه‌های مسیر جنوبی ۳۰ درصد بیشتر از نقاط گسیختگی است که در منحنی‌های تنش- کرنش نمونه‌های مسیر شمالی دیده می‌شوند. بررسی منحنی‌های مربوط نشان‌دهنده مقاومت کمتر مواد بستری در بخش‌های میانی دریاچه ارومیه نسبت به بخش‌های جنوبی و نزدیک جزایر اسپیر و کبودان است. نکته قابل توجه حاصل از آزمایش تک‌محوری این است که مقاومت برشی خاک در هر دو مسیر طبق جدول ۲ در حدود ۶ KPa و ۶ KPa است و از این رو به لحاظ تقسیم‌بندی جزو خاک‌های نرم قرار می‌گیرد (CUR, 1996). هر چند مقاومت برشی مواد بستری مسیر دوم (جنوب دریاچه) از مقاومت برشی دوبرابری نسبت به بخش زیر میان‌گذر برخوردار است. ساخت سازه روی چنین خاک‌هایی نیازمند تمهیدات خاص خواهد بود (Kang, 2006).

مختلف، ظرفیت باربری مصالح بستری دریاچه ارومیه مهم‌ترین نقش را دارد. از این رو پارامترهای مقاومت برشی نیز تعیین گردید. با توجه به سست بودن مصالح بستری و اینکه بخش عمده مواد تشکیل‌دهنده بستری از مواد آلی فعال تشکیل شده است، نمونه‌های دست‌نخورده با استفاده از نمونه‌گیر دوجداره، تهیه و برای اجرای آزمایش‌های تک‌محوری به کار گرفته شد. در شکل ۴، نتیجه آزمایش‌های تک‌محوری اجرا شده روی نمونه‌های اخذ شده در امتداد مسیرهای اول و دوم نشان داده شده است. شماره نمونه‌ها به ترتیب از سمت ساحل به بخش‌های میانی دریاچه است. همان‌طوری که در این شکل مشخص است، شیب منحنی تنش-کرنش مربوط به محور دوم و بخش‌های جنوب دریاچه بیشتر است که دلیل آن اندازه ذرات درشت‌تر مواد بستری در بخش جنوبی نسبت به بخش‌های شمالی‌تر است. به این ترتیب، مدول یانگ مربوط به مواد بستری قسمت جنوبی دریاچه بیشتر از مواد بستری بخش‌های شمالی دریاچه است. این موضوع



شکل ۴- منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمایش تک‌محوری روی نمونه‌های مسیر یک و دو

Fig. 4- Stress-Strain curve achieved from uniaxial test on the specimens of two routes

دست‌نخورده از مواد بستری به صورت دست‌نخورده در سیلندرهای پلی‌اتیلنی به قطر ۱۵ سانتی‌متر تهیه

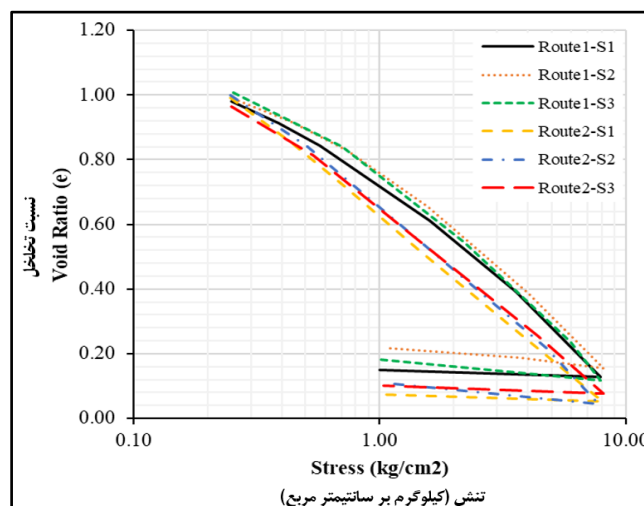
به منظور کسب اطمینان از نتایج حاصل از آزمایش‌های برش تک‌محوری، نمونه‌های

در این شکل مشخص است، تخلخل اولیه مربوط مواد بستری هر دو مسیر تقریباً در یک محدوده بین ۰/۹ تا ۱/۰۱ قرار دارد. بررسی منحنی‌ها و مقایسه شیب نمودارها نشان‌دهنده لایه‌های عادی تحکیم-یافته بدون تنش پیش‌تحکیمی است که علت موضوع فرآیندی است که در تشکیل لایه‌ها در اثر رسوب‌گذاری‌های آهسته رخ داده است. هر چند در سال‌های اخیر به دلیل خشکی دریاچه و بیرون آمدن بخش‌های ساحلی و محدوده مطالعاتی در این تحقیق خارج از آب دریاچه، لایه‌های مورد مطالعه بیشتر تحت تاثیر شرایط جوی و بارندگی‌ها قرار داشته و درواقع بافرزون داخلی را در حوضه دریاچه تشکیل داده و ممکن است نسبت به لایه‌های رسوبی بخش‌های میانی از خصوصیات متفاوتی برخوردار باشد. البته این موضوع جزو طبیعت دریاچه‌هاست و از سمت ساحل به سمت بخش‌های میانی درصد مواد آلی کاسته می‌شود. به این ترتیب خصوصیات مکانیکی مواد رسوبی از دیدگاه ژئوتکنیکی و پی سازه‌های آبی نامطلوب خواهد بود.

گردید و به آزمایشگاه ثالث (آزمایشگاه ژئوتکنیک و مکانیک خاک گروه آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران) ارسال و آزمایش‌های برش پره‌ای استاندارد روی این نمونه‌ها اجرا شد. گزارش‌های دریافتی مبنی بر مقاومت برشی آزمایش‌های برش پره‌ای تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایش تک‌محوری نشان داد. جدول ۲، نتایج حاصل از آزمایش‌های برش را به همراه پارامترهای مقاومت برشی ارائه می‌کند. در کل، نتایج حاصل از این بخش از بررسی نشان‌دهنده لایه‌های بسیار سست و ضعیف در بستر دریاچه است که برای احداث دایک‌های خاکی ظرفیت مقاومت کافی ندارند.

خصوصیات تحکیم‌پذیری

به منظور بررسی خصوصیات تحکیم‌پذیری و برآورد میزان تغییر شکل‌پذیری درائر بارگذاری‌های احتمالی، آزمایش‌های تحکیم روی نمونه‌های اخذشده از نقاط مشخص‌شده در مسیرهای اول و دوم اجرا شد. شکل ۵ نتایج به‌دست آمده از این بخش از آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که



شکل ۵- نتایج آزمایش تحکیم استاندارد روی نمونه‌های محوره‌ای یک و دو

Fig. 5- Oedometer test results conducted on the samples from the studied routes

مقایسه شیب منحنی‌های دو مسیر نشان می‌دهد که مسیر اول قابلیت فشردگی بیشتری دارد که علت

جدول ۲ نتایج ضریب فشردگی و ضریب تورمی را برای نمونه‌های مسیرهای مورد مطالعه نشان می‌دهد.

تقسیم‌بندی کیفی شاخص تراکم (Behnia & Tabatabai, 2005) ضریب‌های فشردگی رسوبات بستر دریاچه در محدوده رس‌های متوسط تا رس‌های شل قرار می‌گیرد. مقایسه مقادیر ضریب‌های تورمی C_s در نمونه‌ها نشان‌دهنده خصوصیات تورمی بسیار پایین مواد بستری دریاچه ارومیه است که به دلیل ماهیت آلی مواد بستری است.

اصلی این موضوع بالا بودن اندازه ذرات درشت و درصد کم ماده آلی در مسیر دوم نسبت به مسیر اول است. درواقع، به دلیل اینکه منشأ رسوبات دریاچه آوردهای رودخانه‌ها ست و عمده رودخانه‌ها در بخش جنوبی دریاچه قرار گرفته‌اند این پدیده رخ می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مقادیر ضریب‌ها بسیار نزدیک به هم‌اند و هر دو مسیر از لحاظ خصوصیات تحکیم‌پذیری تقریباً شرایط یکسانی دارند. طبق

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد بستری دریاچه ارومیه در مسیرهای مورد مطالعه

Table 2- Physical and mechanical properties of Lake Urmia bed materials at both routes

ماده آلی Organic Matters (%)	مقاومت فشاری Strength (kPa)	(KP)q _u	مدول الاستیسیته Elastic Modulus (KN/m ²)	تحکیم Coundolidation		مقاومت برشی Shear Strength C _u (KP)		وزن مخصوص Specific Gravity		Gs (gr/cm ³)		مسیر ها The Routes
				ضریب تراکم Compaction Coefficient	ضریب تورم Swelling Coefficient	تک محوری Uniaxial	برش پرهای Vane shear	$\gamma_{sat}(\frac{KN}{m^3})$	$\gamma_{unsat}(\frac{KN}{m^3})$	نشسته با نفت Unwashed-Oil	شسته Washed	
3.54	13.73		245.1	0.74	0.062	6	6.68	17.1	11.3	2.67	2.65	مسیر اول Route1
4.67	18.62		528	0.62	0.011	11.2	9.8	17.3	11.6	2.68	2.61	مسیر دوم Route2

تقسیم‌بندی است. با این حال در تماس با آب شور دریاچه در حالت طبیعی و در تماس با آب شیرین به ترتیب به صورت نوع OL و OH تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲- خاک بستر دریاچه ارومیه از لحاظ سفتی و قوام در محدوده رس‌های نرم است و مقاومت برشی بسیار پایینی دارد. با این حال در دو مسیر متفاوت مطالعه‌شده برای فازبندی دریاچه ارومیه، مسیر و بستر سمت جنوبی‌تر، نسبت به بخش‌های شمالی، مقاومت برشی بالاتری دارد. در مسیر جنوبی‌تر، بین جزایر اسپیر و کبودان مقاومت برشی مواد

نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های پایه‌ای شناسایی و مکانیک خاک صورت گرفته و نتایج ارائه شده در این تحقیق درباره خصوصیات ژئوتکنیکی مواد بستر به‌منظور انتخاب و نوع سازه و طراحی آن در فازبندی و تقسیم‌بندی موقت دریاچه به بخش‌های مختلف متناسب با آورد حجمی رودخانه‌ها باهدف ایجاد عمق‌های مناسب و کاهش تبخیر در دو مسیر مختلف، مواردی به شرح زیر قابل نتیجه‌گیری است:

۱- مواد بستری دریاچه عمدتاً از مواد ریزدانه تشکیل شده است که در محدوده خاک‌های آلی قابل

دریاچه ارومیه در دو مسیر جنوبی در امتداد جزایر اسپیر و کبودان و مسیر شمالی در امتداد جاده میان‌گذر، به طور کلی می‌توان گفت که خصوصیات ژئوتکنیکی در بخش جنوبی برای اجرای سازه تفکیک بستر مانند شمع‌های سپری بهتر است. با این حال، طول مسیر در این بخش به مراتب بیشتر از طول مسیر شمالی است. بدین ترتیب برای انتخاب مسیر مناسب برای اجرای فازبندی لازم است تحقیقات بیشتری با احتساب حجم ورودی جریان، ملاحظات اقتصادی و هیدرولیکی در نظر گرفته شود. با توجه به عمق بالای دریاچه در بخش میان‌گذر، ارتفاع سازه در این بخش به مراتب بیشتر از ارتفاع سازه در بخش جنوبی خواهد بود.

بستری دو برابر مقاومت برشی بخش میان‌گذر دریاچه ارومیه است.

۳- نتایج آزمایش تحکیم و ضریب‌های فشردگی حاصل از این آزمایش‌ها در مواد بستری دریاچه ارومیه نشان‌دهنده قابلیت فشردگی نسبتاً بالای رسوبات دریاچه است و مقادیر این ضریب‌ها در محدوده رس متوسط تا رسیل قرار دارند. از این رو استفاده از سازه‌های سنگین مانند خاکریزهای ساحلی برای تفکیک بستر دریاچه، علاوه بر باقی ماندن مشکلات در حذف آن‌ها بعد از احیا، با مشکلات نشست قابل توجه روبه‌رو خواهد شد.

با توجه به خصوصیات مقاومت برشی و تغییر شکل‌پذیری ارائه‌شده در خصوص مواد رسوبی

مراجع

- Aghanabati, S.A., 2007. Geology of IRAN. Geological Survey & Mineral Exploration of Iran.
- Aflaki, e., 2004. Geotechnical studies of orumieh lake bed sediments. Sharif Journal of Civil Engineering. 20 (27). 46-58
- Amini, A., Shahoseini, M., Mohammadi, A., Shahrabi, M., 2010. Sedimentological Characteristics and Origin of Urmia Lake Deposits Along the Shahid-kalantari Highway. Scientific Quarterly Journal, Geosciences. 19 (74). 57-68
- Amirataee, B. and Zeinalzadeh, K., 2016. Trends analysis of quantitative and qualitative changes in groundwater with considering the autocorrelation coefficients in west of Lake Urmia, Iran. Environmental Earth Sciences, 75(5), p.371.
- Badescu, V. and Cathcart, R.B., 2011. Aral Sea partial restoration. I. A Caspian water importation macroproject. International Journal of Environment and Waste Management, 7(1-2), pp.142-163.
- Dadmehr, R., 2014, Urmia University: A Multidisciplinary Project for Restoration of Lake Urmia Hydraulic behavior of water resources systems within alluvial plains adjacent to Urmia Lake and water reclamation of the lake, International Conference on Lake Urmia Rescue-16-19 February - Urmia-Iran
- Eslami, A., Akbarimehr, D., Aflaki, E. and Hajitaheriha, M.M., 2020. Geotechnical site characterization of the Lake Urmia super-soft sediments using laboratory and CPTu records. Marine Georesources & Geotechnology, 38(10), pp.1223-1234.
- Frydman, S., and charraikh, j. goretsky, I. 2008, geotechnical properties of evaporate soils of the dead sea area. Engineering geology 101, 236-244
- Hemmati, M., Ahmadi, H., Hamidi, S.A. and Naderkhanloo, V., 2021. Environmental effects of the causeway on water and salinity balance in Lake Urmia. Regional Studies in Marine Science, 44, p.101756.
- Huang, P.T., Patel, M., Santagata, M.C. and Bobet, A., 2009. Classification of organic soils. Technical report No. JTRP-2008/2, Federal Highway Administration.

- Kang, Y. I., 2006. Stress –Strain- Strength properties of In-Situ Deep Mixed Clays. PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Mackenzie, D. P., 1972. Active tectonics of the mediterranean region, geophys. J. R. Astorn . soc., 30: 109-185.
- Michlin, ph., 2016. The future aral sea: hope and despair, environmental earth sciences.9.
- Samadzadeh Fahim, R., Zarghami, M. and Nourani, V., 2018. The Hydraulic Simulation of the Effects of New Dikes to Reduce the Evaporation Area; Case study: Urmia Lake, Iran. Iran-Water Resources Research, 14(2), pp.264-268.
- Rahimi, H., Abbasi, N., 2014. Geotechnical Engineering, Problematic Soils, University of Tehran Press, 3608
- UCR (Center for civil engineering research and codes). 1996. Building on Soft Soils, A. A Balkema Pub. Co., Rotterdam.
- Shahrabi, M, 1981, Holocene Lacustrine facies and enviroment of hypersaline lake urmieh, N.W.Iran. Dip.Arb. ander ETH Zurich, Switzerland. 75pp
- Soudi, M., Ahmadi, H., Yasi, M. and Hamidi, S.A., 2017. Sustainable restoration of the Urmia Lake: History, threats, opportunities and challenges. European Water, 60(1), 341-347
- Soudi, M., Ahmadi, H., Yasi, M. and Hamidi, S.A., 2019, May. Water Balance of Urmia Lake and Estimation of the Volume of the Losses and Yields in Buffer Zone. In World Environmental and Water Resources Congress 2019: Hydraulics, Waterways, and Water Distribution Systems Analysis (166-177).
- Standard Test Methods for One_Dimentional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading, 2003. Designation: D2435/D2435M-11.
- Standard Test Methods for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method, 2004. Designation: D427_04.
- Standard Practice for Classification of Soil for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), 2000. Designation: D2487.
- Standrad Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, 2000. Defination: D2166.
- Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-size Analysis and Determination of soil Constants, 2003. Defination: D421-85.
- Standrad Test Method for Particle-Size Analysis of soils, 2003. Defination: D422-63.
- Standrad Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, 2002. Defination: D854.
- Standrad Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, 1999. Difination: D2216-87.
- Standard Test Method for Moisture, Ash, and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils, 2000. Defination: D2974.
- Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils, 2000. Defination: D4318.
- Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter, 2001. Difination: D5084.
- Methods of test for soils for civil engineering purposes, 1991, BS 1377:1975
- Yasi, M., 2017. Management of rivers and dams in supplying and delivering water to Urmia Lake. Strategic Research Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources, 2(1), pp.59-76.

Investigation on the Geotechnical Properties of Lake Urmia Bed Materials: with the Stepped Restoration Perspective

S. Rostami, H. Ahmadi* and N. Agh

* Corresponding Author: Associated professor, Department of water engineering, Urmia University, Urmia, Iran. Email: hojjat.a@gmail.com

Received: 6 October 2021, Accepted: 1 December 2021

Introduction

Drying almost the whole of Lake Urmia is one of the main environmental crises of Iran nowadays. Despite great efforts to restoration of the lake since 2014, owing to the limitation of inlet flow to the lake, insignificant success has been reached. Actually, in the basin of Lake Urmia, the evaporation rate is very high and based on the reported data it is over 1000 mm annually, while the precipitation is about 330 mm. Hence, the pure evaporation height from the surface of the lake is higher than the lake water level rising during recent years. Therefore, in order to overcome the shortage of inlet flow to Lake Urmia, the evaporation area as well the surface of the water body must be equivalent to the evaporation rate. Samadzadeh et al. (2018), reported that by the construction of new dikes inside the lake, consequently by dividing the lake into some smaller parts and restore each part separately one by one, the lake could be restored with the available inflow of the feeder rivers of the lake. However, difficulties of construction of causeway through Lake Urmia confirmed that the sedimentary bed materials of the lake are classified as problematic material from a point of geotechnical view (Eslami et al., 2020). Henceforward, dividing the lake into smaller phases is not possible by using ordinary methods like earthen dikes which have been used in the restoration of the Aral Sea. In this regard, we explored the geotechnical properties of bed materials of Lake Urmia to choose a compatible method with the environment of the lake as well as the proper hydraulic structures to divide Lake Urmia into smaller regions proportional to annual discharges of its basin rivers.

Materials and Method

Lake Urmia is one of the largest hypersaline lakes located northwest of Iran. The area of the lake and its basin are about 5000 and 52000 km². During the past two decades the lake has been faced with an intense drawing of water level, and almost the lake has vanished. Based on the published investigation regarding phases restoration of Lake Urmia, two different routes have been suggested by Samadzadeh et al., (2018) based on water balances of the lake. Therefore, we also followed the proposed routes to investigate the geotechnical properties of the bed materials. The first route complies with the constructed causeway. In this route, almost the total of the distance from the west to the east shore has been blocked by road dike, except the bridge with a span of around 1200m. The second route is located in the southern region of the lake and it started from Rashakan on the west coast to the east direction which intersects Espir and Kaboodan islands. The length of the current route is about 19 km. For each route, three points with a distance of 200 m from each other (from the west coast) in the form of disturbed and undisturbed specimens have been prepared. Identification tests, shear strength tests include vane shear test, uniaxial shear test, and consolidation test have been carried out. In order to study the effect of salt and fresh water on the mechanical and physical properties of the bed and sedimentary material, some tests such as Aterberg limits have been conducted by using fresh and saltwater separately.

Results and Discussion

Based on the achieved results of laboratory tests, the bed materials of Lake Urmia in both routes were classified as OH and OL while treated with fresh and saltwater based on the Unified soil classification system, respectively. Also, shear strength tests showed a low strength of about 12 kg/cm² for the bed materials of route 2 while the half is for the first route in direction of the causeway at the northern part of the lake. The content of organic materials was detected 3.54 and 4.67 for the first and second studied routs respectively. Odometer tests results revealed that the bed materials of the studied routs could be classified as soft or very soft soils. Therefore, construction of any heavy structure such as a levee to divide or isolate the lake is almost impossible with the ordinary techniques, however, light and thin structures like sheet piles could be a good alternative to the aim.

Keywords: Bed Materials, Consolidation, Phasing, Shear strength, Lake Urmia