

بررسی دوام وارفتگی خاک‌های مارنی در شرایط اسیدی و بازی از منظر ریزساختاری

محمد امیری^{۱*}، رعنا صالحیان^۲

۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه هرمزگان

amirii@hormozgan.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۳۰

چکیده

رفتار مهندسی و دوام خاک‌های مارنی در شرایط خشک و مرطوب کاملاً متفاوت است و سبب ایجاد چالش در پروژه‌های عمرانی می‌شود. خاک‌های مارنی به طور گسترده‌ای در نقاط مختلف جهان قابل مشاهده‌اند. از طرفی بسیاری از صنایع تولید کننده آلاینده روی خاک‌های مارنی قرار دارند و معمولاً آلودگی ناشی از این صنایع سبب تغییر pH و ایجاد شرایط اسیدی و قلیایی در خاک مارن می‌شود. بر این اساس هدف این پژوهش مطالعه تاثیر pH اولیه، بر دوام خاک‌های مارنی از منظر ریزساختاری است. در این راستا، با اضافه نمودن اسید هیدروکلریک (HCl) و قلیای سدیم هیدروکسید (NaOH) با غلظت ۱ مولار، خاک‌های مارنی با pHهای اولیه متفاوت تهیه شد. تغییرات شاخص دوام وارفتگی به وسیله تهیه تصاویر SEM، آنالیز XRF، آزمایش دوام و جذب آب و مقاومت فشاری محصور نشده مورد بررسی قرار گرفت. از مهم‌ترین نتایج مقاله حاضر دوام و پایداری خاک‌های مارنی با $pH \leq 4$ اولیه در مقابل رطوبت است. بر اساس نتایج تصاویر SEM و آنالیز XRF تشکیل منیزیم کلرید در ساختار پالی‌گورسکایت و سیپولایت موجب پایداری خاک‌های مارنی با $pH \leq 4$ اولیه شده است. همچنین مقاومت اولیه خاک مارن بر دوام وارفتگی تأثیری ندارد.

واژه‌گان کلیدی: خاک مارنی، pH، ریزساختار، وارفتگی، SEM

۱- مقدمه

کریستالی فیبری شکل است. پالی‌گورسکایت به واسطه ساختار ویژه خود، دارای حد روانی بالا، قابلیت نگهداری آب و جذب زیاد در مقایسه با سایر کانی‌های رسی است. پالی‌گورسکایت، به عنوان کانی تأثیرگذار بر تورم خاک‌های مارنی شناخته شده است [8-10]. در شرایط اسیدی، کانی‌های پالی‌گورسکایت به صورت دسته‌ای از کانی‌های فیبری و زنجیره‌ای مشاهده می‌شود. با پیشروی pH از محیط اسیدی به قلیایی، خوشه فیبرهای زنجیری پالی‌گورسکایت از یکدیگر فاصله می‌گیرند و جدا می‌شوند [11].

خاک‌های مارنی شامل ترکیبی از کانی‌های رسی مانند کائولینیت، پالی‌گورسکایت و سیپولایت، کانی‌های غیر رسی همچون کوارتز و کربنات هستند [1, 2]. تورم و وارفتگی خاک مارن در تماس با آب منجر به ایجاد مشکلاتی در پروژه‌های ژئوتکنیکی شده است [3-6]. از سوی دیگر کانی پالی‌گورسکایت و سیپولایت موجود در این خاک به دلیل ساختار زنجیره‌ای و فیبری شکل به لحاظ ساختاری و رفتاری با دیگر کانی‌های رسی متفاوت هستند [7]. کانی پالی‌گورسکایت یک آلومینیوم منیزیم هیدراته با ساختار

سپیولایت نوعی کانی هشت وجهی سه‌تایی سرشار از Mg با ساختار ۲:۱ است. این کانی و مشتقات آن در بی‌ثباتی خاک مارن نقش به‌سزایی دارد [8, 13]. بر اساس مطالعات *Ouhadi* و *Yong* (۲۰۰۳)، کانی سپیولایت نیز مانند کانی پالی‌گورسکایت دارای پتانسیل بالای تورم است و موجب ایجاد تورم در خاک مارن می‌شود [8].

پایداری کانی سپیولایت وابسته به غلظت و پایداری Mg و Si است. بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات *Mulders* و *Oelkers* (۲۰۲۰)، انحلال کانی سپیولایت با پایداری غلظت یون-های Mg و Si در نظر گرفته می‌شود. بر اساس مطالعات صورت گرفته انحلال سپیولایت در هر دو محیط اسیدی و قلیایی ناسازگار است و روند مشخصی را دنبال نمی‌کند [13-15].

با افزایش pH از مقدار ۱ تا ۸ میزان انحلال پذیری کانی کائولینیت کاهش می‌یابد. بر این اساس در محیط اسیدی میزان انحلال کائولینیت بیش‌تر است [16]. در شرایط اسیدی، شسته شدن کاتیون‌ها می‌تواند به تدریج سبب افزایش فاصله بین لایه‌های کائولینیت و ضعیف شدن نیروهای بین لایه‌ای شود. به طور کلی ساختار کائولینیت مقاومت خوبی در برابر حمله اسیدی دارد [17]. ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مارن به مقدار کربنات موجود در این خاک نیز وابسته است و این ویژگی‌ها با تغییر مقدار کربنات خاک تغییر می‌کند [18-20]. نقش کربنات در کنترل بافت و ساختار خاک، به مقدار آن بستگی دارد و تأثیر آن بر ویژگی‌ها فیزیکی و شیمیایی خاک، وابسته به اندرکنش آن در حضور آب است. از رایج‌ترین کانی‌های کربناتی یافت شده در خاک مارن، کلسیت یا کربنات کلسیم ($CaCO_3$) و دولومیت است [21]. کانی‌های کربناتی درمقایسه با کانی‌های سیلیکا قابل حل هستند و مهم‌ترین جز حل‌شونده در فاز محلول خاک است [22, 23].

دوام وارفتگی، یکی از مهم‌ترین خواص مهندسی خاک مارن است. از آنجایی که هوازدگی می‌تواند بر خواص اولیه خاک‌ها تأثیر گذار باشد و به سرعت آن‌ها را تغییر دهد، پارامتر دوام وارفتگی، میزان حساسیت خاک نسبت به فرسایش و هوازدگی را مشخص می‌کنند [24].

دوام وارفتگی، شاخصی برای تعیین مقاومت در برابر تخریب و

وارفتگی در مقابل آب شناخته می‌شود. مطالعات گذشته، حاکی از آن است که پارامترهایی مانند تخلخل و نفوذپذیری، خواص آب مورد استفاده در آزمایش، مقاومت خاک در برابر تورم و تخریب، اندازه و وزن نمونه‌ها و تعداد سیکل‌های آزمایش بر این شاخص تأثیرگذار خواهد بود [25].

مطالعات پیشین در زمینه وارفتگی سنگ‌ها و خاک‌های کربناتی در شرایط اسیدی و قلیایی حاکی از آن است که این خاک‌ها در محیط اسیدی نسبت به وارفتگی و تخریب، حساسیت بیشتری دارند. در محیط اسیدی انحلال کربنات کلسیم ($CaCO_3$) بسیار سریع‌تر از حمله اسید به بارهای آزاد (CO_3) اتفاق می‌افتد. همین امر سبب کاهش دوام خاک در شرایط اسیدی خواهد شد. در محیط قلیایی نیز نسبت به محیط اسیدی وارفتگی کمتری در این خاک‌ها رخ می‌دهد و نسبت به شرایط طبیعی وارفتگی بیش‌تری را از خود نشان می‌دهند [26].

خاک مارنی به دلیل داشتن درصد کربنات زیاد و کانی رسی پالی‌گورسکایت، سپیولایت و کائولینیت و همچنین قابلیت تورم بالا و خاصیت وارفتگی، مقاومت و دوام کم در مجاورت رطوبت، در اجرای سازه‌های مهندسی، مشکلاتی را سبب می‌شود. در بسیاری از مناطق ایران به واسطه منشأ دریایی می‌توان رگه‌های مختلفی از خاک مارن را مشاهده نمود. ویژگی‌های رفتاری خاک-های مارنی در محیط‌های اسیدی و بازی به صورت کامل متفاوت است. این تغییر رفتار در پروژه‌های ژئوتکنیکی چالش‌های بزرگی را ایجاد می‌کند. از این رو در این مقاله به بررسی دوام و وارفتگی خاک مارن در محیط اسیدی و قلیایی پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده در این پژوهش، نمونه خاک مارنی غرب شهر بندرعباس است. علت این انتخاب، حضور صنایع مختلف و احداث سازه‌های حساس روی بستر مارنی و احتمال تغییر pH خاک مارنی در طی زمان است. بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد خاک ($USCS$) خاک مارن از نوع خاک رس با خاصیت خمیری کم (CL) است و ۹۸٪ وزنی آن از الک ۲۰۰ عبور می‌کند. در جدول (۱) برخی از ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک مارن ارائه شده است [27].

در جدول (۲) آنالیز شیمیایی (XRF) خاک مارنی جنوب ایران ارائه شده است، بر اساس آنالیز ارائه شده میزان اکسید کلسیم موجود در خاک مارنی طبیعی ۱/۵/۹۱٪ گزارش شده است. لازم به ذکر است، نمونه‌ها با دستگاه فلوئورسانس اشعه ایکس مدل PW1410 ساخت شرکت PHILIPS هلند، مورد آزمایش قرار گرفتند.

جدول ۱. برخی ویژگی‌ها ژئوتکنیکی نمونه خاک مارنی جنوب ایران

Geotechnical Properties	Quantity measured	References for method of measurement
Clay Fraction < 5 ϕ m (%)	87.9	ASTM D422-63 [28]
pH (1:10; soil: water)	8.5	ASTM D4972 [29]
EC (1:10; soil: water) (mS/cm)	6.45	ASTM D1125-95 [30]
Carbonate content (%)	31	Hesse, 1971 [31]
Strength Parameters		
Cohesion (kPa)	14	ASTM D3080 [32]
Friction angle (ϕ°)	16.7	
Unconfined Compression Strength (kPa)	870	ASTM D2166 [33]
Liquid limit (%)	46	ASTM D4318 [34]
Plastic limit (%)	25	ASTM D4318 [34]
Plasticity index (%)	21	ASTM D4318 [34]
Maximum dry density (kN/m ³)	16.5	ASTM D698 [35]
Optimum water content (%)	16	ASTM D698 [35]
Coefficient of Permeability (m/s)	1.2×10^{-06}	ASTM D5084 [36]
G _s	2.65	ASTM D854 [37]
Classification	CL	ASTM D3282 [27]
Color	Green	
Soil composition	Palygorskite, Kaolinite, Calcite, Dolomite, Quartz	Ichimura and Manning, 2004 [38]

Table 1. Some geotechnical characteristics of southern marl samples in Iran

جدول ۲. مشخصات شیمیایی نمونه خاک مارنی جنوب ایران بر اساس آنالیز XRF

Composition (%)	LOI	Cl	P ₂ O ₅	SO ₃	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Product Type												
Natural Marl	23.63	1.15	0.14	0.67	15.91	0.44	3.21	6.02	1.57	4.42	9.22	33.26

Table 2. Chemical properties of southern marl samples in Iran based on XRF analysis

کرده و سوسپانسیون آب و خاک به نسبت ۱:۵ (۵ آب مقطر: ۱ خاک) ساخته شده است. سوسپانسیون حاصل توسط هم‌زن به مدت ۳ ساعت هم‌زده و بعد از آن به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد. سپس برای تثبیت pH نمونه‌های خاک مارنی در pHهای ۲، ۴، ۶ و ۱۱، محلول‌های NaOH و HCL ۱ مولار با استفاده از پیپت به صورت قطره قطره به مخلوط آب-خاک اضافه شد. برای ایجاد شرایط اسیدی در خاک به ازای کاهش هر واحد pH مدت ۲ ساعت و برای ایجاد شرایط قلیایی در خاک نیز به ازای افزایش هر واحد pH مدت ۱ ساعت زمان صرف شد. پس از گذشت حدود ۱۰ روز، pH نمونه‌ها در pH مورد نظر تثبیت و پس از آن

نمونه خاک مارنی مورد استفاده در این پژوهش دارای pH اولیه ۸/۵ بوده که به عنوان pH طبیعی خاک مارنی در نظر گرفته می‌شود. برای ایجاد شرایط اسیدی و قلیایی از محلول سدیم هیدروکسید (NaOH^۱) و محلول هیدروکلریک اسید (HCL^۲) تهیه شده از شرکت تجاری مرک (Merck) استفاده شده است. مقدار pH نهائی نمونه پس از اضافه کردن محلول‌های اسیدی و قلیایی، به عنوان pH تثبیت شده نامیده می‌شود. به منظور تثبیت pH اولیه خاک مارنی، خاک خشک عبوری از الک ۴۰ را جدا

1. Sodium Hydroxide
2. Hydrogen Chloride

فرآیند آب‌شویی و اضافه کردن اسید و قلیا به صورت یک روز در میان بر روی خاک انجام شد. این مراحل به صورت روزانه به مدت حدوداً ۴ ماه تکرار شد تا زمانی که pH نمونه‌ها مجدداً به مدت ۷۲ ساعت در pH مورد نظر ثابت ماند.

برای خشک کردن، نمونه‌ها در ظروف شیشه‌ای ریخته و درون گرمخانه با دمای ۶۰ درجه سلسیوس قرار داده شد. پس از خشک شدن نمونه‌ها مجدداً pH نمونه‌ها بر اساس استاندارد ($ASTM D4972$) با نسبت ۱ به ۱۰ (۱ خاک: ۱۰ آب مقطر) به مدت ۳ ساعت توسط لرزاننده الکتریکی هم زده شد و نمونه‌ها به مدت ۹۶ ساعت به منظور همگن شدن کامل سیستم و انجام تبادل کاتیونی لازم نگهداری شده است. پس از گذشت این مدت زمان، مقدار pH با استفاده از دستگاه pH سنج مدل *Lovibond SensoDirect 150* اندازه‌گیری شده است [29].

به منظور تعیین تاثیر pH بر ویژگی‌ها ریزساختاری و مورفولوژی خاک مارنی، آزمایش‌های فلورسانس اشعه ایکس (XRF^3) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM^4) انجام شد.

به منظور تعیین مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک خاک مارنی با pH های اولیه متفاوت در حالت خشک و اشباع، آزمایش فشاری محدود نشده ($ASTM D 2166$) به روش کرنش کنترل و با سرعت بارگذاری 0.1 mm/s انجام شده است. برای آماده سازی نمونه‌ها، خاک عبوری از الک ۴۰ با وزن مخصوص بیشینه و درصد رطوبت بهینه، در قالب‌هایی با ابعاد 5×9.5 سانتی‌متر، در ۳ لایه کوبیده و نمونه‌ها برای رسیدن به حالت تعادل به مدت ۷۲ ساعت در ظروف پلاستیکی با رطوبت ثابت نگهداری شدند. در مرحله آخر نیز مقاومت نمونه‌ها در هر دو حالت قبل از غرقاب شدن و پس از غرقاب شدن اندازه‌گیری شد [33].

به منظور بررسی دوام وارفتگی خاک مارنی در حالت اشباع، آزمایش تعیین دوام و جذب آب ($ASTM C67$) انجام شده است. به همین منظور، نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل با وزن مخصوص و درصد رطوبت بهینه ساخته شد (مشابه آزمایش UCS) و به مدت ۷۲ ساعت در ظروف پلاستیکی در بسته نگهداری و عمل آوری

شد. پس از آن، نمونه‌ها به منظور ارزیابی دوام و جذب آب، به مدت ۲۴ ساعت در حوضچه آب قرار داده شدند و نمونه‌ها به طور کامل در معرض آب قرار گرفتند و جذب آب برای نمونه‌های پایدار در مقابل آب، اندازه‌گیری شد [39].

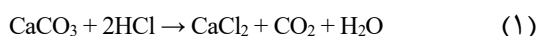
برای تهیه تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) از هر نمونه خاک پودر شده مقدار ۱ گرم با دقت 0.001 گرم وزن شده. برای ایجاد رسانایی و آماده‌سازی نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش از پوشش دهی طلا استفاده می‌شود. دستگاه مورد استفاده در این آزمایشگاه *TESCAN vega3* است.

۳- بحث و بررسی نتایج

۳-۱- تاثیر تغییرات pH اولیه بر میزان کربنات خاک

مارنی و آنالیز XRF

بر اساس نتایج آنالیز XRF ، میزان اکسید کلسیم و اکسید منیزیم موجود در خاک مارنی طبیعی به ترتیب 15.91% و 7.02% است. در نمونه با pH اولیه ۴ این مقادیر به ترتیب 15.49% و 1.91% رسیده است و در نمونه با pH اولیه ۲ میزان آن‌ها به ترتیب به میزان 15.25% و 1.92% است در واقع در شرایط اسیدی اکسید کلسیم و منیزیم کاهش می‌یابد (شکل ۱). نتایج حاصل نشان می‌دهد که کربنات موجود در خاک مارنی به واسطه HCl از ساختار خاک خارج شده، اکسید منیزیم موجود در خاک کاهش پیدا کرده است و مقدار کمی یون منیزیم در ساختار خاک باقی مانده است، در حالی که شرایط قلیایی و میزان $NaOH$ تاثیری در میزان کربنات موجود در خاک مارنی ندارد. در نمونه خاک مارنی اسیدی، کربنات کلسیم و کربنات منیزیم موجود در خاک بر اساس روابط (۱ و ۲) با قرارگیری در مجاورت هیدروکلریک اسید (HCl)، میان یون کلر (Cl^-) و کاتیون‌های کلسیم (Ca^{2+}) و منیزیم (Mg^{2+}) پیوند ایجاد می‌کند و ترکیبات کلسیم کلرید ($CaCl_2$) و منیزیم کلرید ($MgCl_2$) تشکیل می‌شود. منیزیم کلرید منجر به ایجاد یک ریز ساختار می‌شود و این امر احتمالاً به دلیل قدرت یونی محلول و افزایش غلظت یون Mg^{2+} تبادلی اتفاق می‌افتد و باعث فلوکوله شدن نمونه‌ها نیز می‌شود [40].

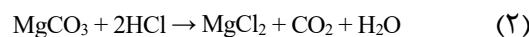


هنگامی که پالی گورسکایت در آب پراکنده می‌شود، تاثیر نیروهای الکترواستاتیک و پیوندهای هیدروژنی میان نانو ذرات سبب ایجاد ساختار ژله‌ای نامنظم، معلق و ضخیمی می‌شود [11, 42, 43].

سپیولایت نیز از نظر ساختاری و شیمیایی مشابه با پالی گورسکایت است و الیاف آن به طور موازی در امتداد یکدیگر قرار می‌گیرند به جز این که اندازه سلول واحد سپیولایت در مقایسه با پالی گورسکایت کمی بزرگ‌تر است [44-46].

پایداری کانی سپیولایت وابسته به غلظت و پایداری Mg و Si است. در کانی سپیولایت انحلال‌پذیری بر اساس غلظت Mg با pH رابطه‌ای خطی دارد. این در حالی است که انحلال‌پذیری سپیولایت بر اساس غلظت Si از این رابطه خطی پیروی نمی‌کند. بر اساس مطالعات صورت گرفته انحلال سپیولایت در هر دو محیط اسیدی و قلیایی ناسازگار است و روند مشخصی را دنبال نمی‌کند [13-15].

در pH اولیه ۱۱ (شکل ۲-ح) مشاهده می‌شود که با افزایش pH خاک در محیط قلیایی، ساختار خاک نسبت به نمونه خاک مارنی طبیعی حالتی پراکنده به خود می‌گیرد که دلیل آن افزایش میزان یون هیدروکسید و در نتیجه افزایش بار منفی روی کانی‌های رسی است.



شکل ۱. منحنی تغییرات میزان کربنات خاک مارنی در pH های اولیه متفاوت

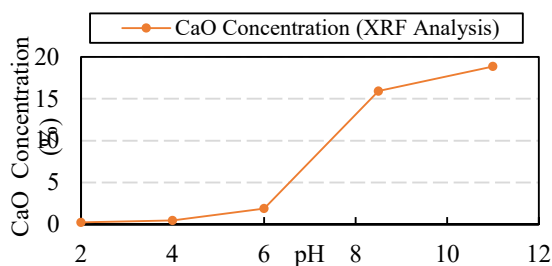


Fig. 1. Changing the Carbonate content of marl soil at different initial pHs

۲-۳- بررسی ریخت‌شناسی خاک مارنی در pH های اولیه متفاوت و تصاویر میکروسکوپ الکترونی (SEM)

کانی شناسی و چگونگی قرار گیری ذرات در خاک می‌تواند بر دو پارامتر مقاومت و دوام خاک مارنی تاثیرگذار باشند [41]. بر اساس تصاویر SEM ارائه شده در شکل (۲)، ساختمان پراکنده خاک مارنی طبیعی و اتصال ذرات رس در مجاورت آب و توده‌های سفید رنگ کربنات کلسیم به واسطه اثر پوششی که روی ذرات رس ایجاد کرده، قابل مشاهده است. با توجه به تصاویر SEM کانی‌های فیبری شکل پالی گورسکایت، سپیولایت در نمونه خاک مارنی طبیعی قابل مشاهده است (شکل ۲-ج).

با کاهش pH اولیه، میزان کانی کلسیت کاهش می‌یابد و در نمونه با pH اولیه ۲ (شکل ۲-الف) به صورت کامل از بین می‌رود. که این امر به دلیل انحلال کربنات در مجاورت اسید و شسته شدن یون‌های Ca^{2+} حاصل در طی فرآیند آبشویی است. به طور کلی در محیط اسیدی، ساختمان خاک به حالت فلوکوله تغییر یافته است. منیزیم کلرید منجر به ایجاد یک ریز ساختار می‌شود و این امر احتمالاً به دلیل قدرت یونی محلول و افزایش غلظت یون Mg^{2+} تبدلی اتفاق می‌افتد و باعث فلوکوله شدن نمونه‌ها نیز می‌شود [40]. در محیط اسیدی، کانی پالی گورسکایت به صورت خوشه‌ای از کانی‌های فیبری شکل مشاهده می‌شود و هر چه pH در محیط اسیدی افزایش می‌یابد، خوشه فیبرهای زنجیری پالی گورسکایت نیز از یکدیگر فاصله می‌گیرند و جدا می‌شوند. فرمول شیمیایی کانی پالی گورسکایت به صورت

$Si_8O_{20}(Al_2Mg_2)(OH)_2(OH_2)_4 \cdot 4H_2O$ گزارش می‌شود [11].

شکل ۲. تصویر SEM از نمونه‌های (الف) نمونه‌ی pH=۲، (ب) نمونه‌ی pH=۴، (ج) نمونه‌ی pH=۶، (چ) خاک مارنی طبیعی، (ح) نمونه‌ی pH=۱۱

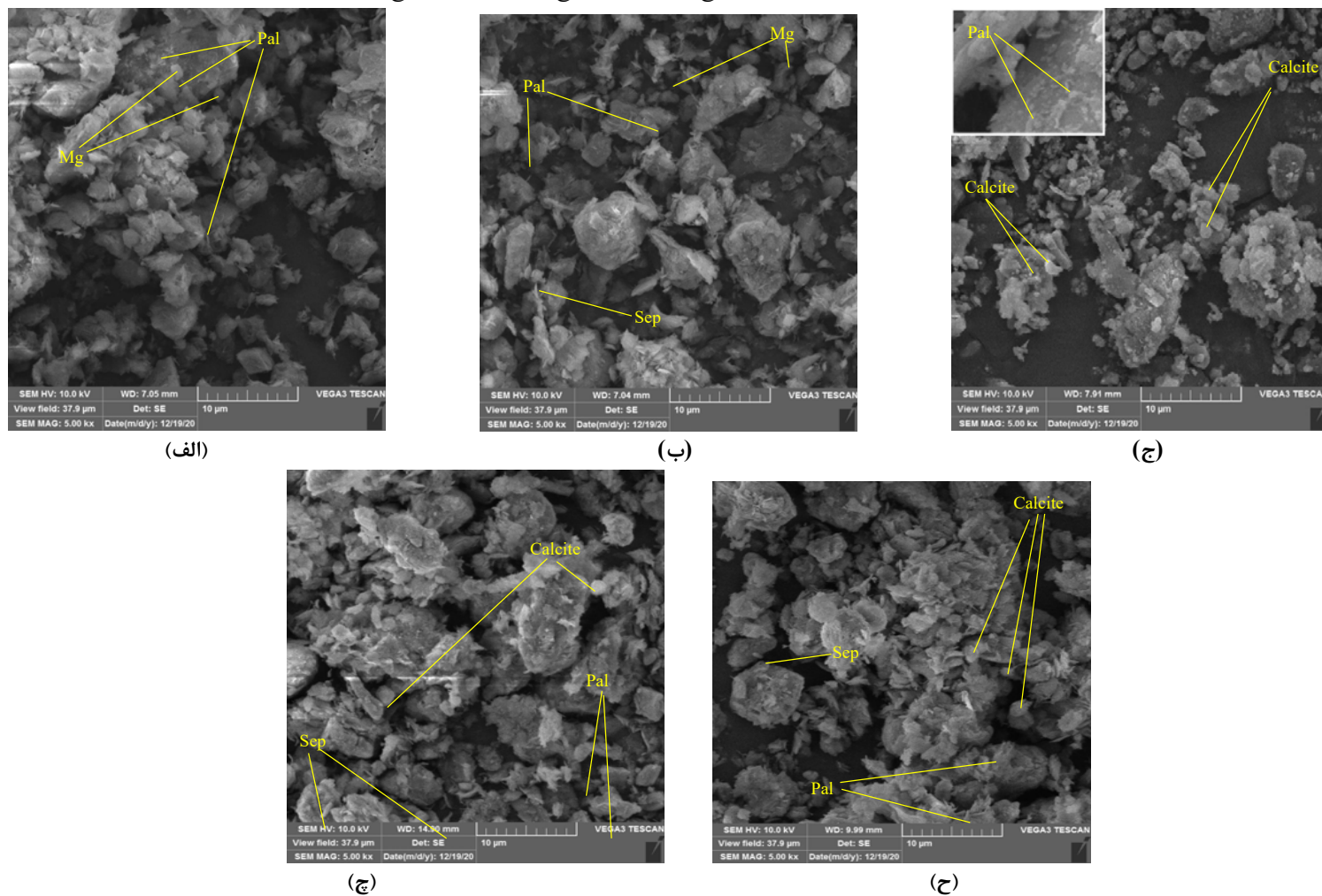


Fig. 2. SEM image of samples of marl soil at different initial pHs

۳-۳- بررسی دوام وارفنگی خاک مارنی در pH های اولیه متفاوت

به منظور بررسی پایداری خاک مارنی در شرایط قرارگیری در حالت مرطوب، آزمایش دوام و جذب آب انجام شد. شکل (۳-الف و ۳-ب) نمونه‌های غرقاب شده برای آزمایش وارفنگی در محیط اسیدی و قلیایی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود با پیشروی pH به ناحیه اسیدی میزان دوام نمونه خاک در مقابل آب افزایش می‌یابد و نمونه‌های با pH اولیه ۲ و ۴ در برابر آب پایدار باقی می‌مانند. نتایج حاکی از آن است که، نقش بخش رسی در این پدیده نسبت به میزان کربنات موجود در خاک از اهمیت بیشتری برخوردار است.

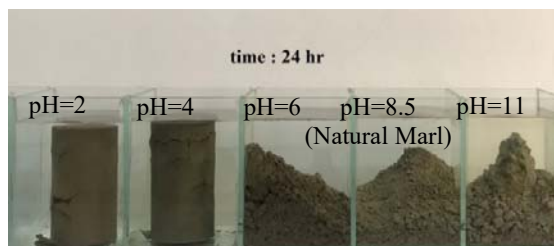
به منظور اندازه گیری میزان جذب آب نمونه‌ها، آزمایش جذب آب روی دو نمونه با pH اولیه ۲ و ۴ انجام شد و مقدار جذب آب در نمونه با pH اولیه ۴، ۲۵٪ و در pH اولیه ۲، ۲۷٪ است که دلیل آن می‌تواند افزایش تخلخل و تشکیل ساختار فلوکوله در این نمونه‌ها باشد (شکل ۳-ج). منیزیم کلرید تولید شده ناشی از قرار گرفتن خاک در مجاورت اسید منجر به ایجاد یک ریز ساختار می‌شود و این امر احتمالاً به دلیل افزایش غلظت یون Mg^{2+} تبادل‌یافتگی می‌افتد و باعث فلوکوله شدن نمونه‌ها می‌شود [40]. به طور کلی در محیط اسیدی، ساختمان خاک به صورت اتصال لبه به وجه ذرات ($E-F^5$) خواهد بود. افزایش غلظت یون هیدروژن باعث ایجاد بار مثبت در لبه پولک‌های رسی شده که منجر به جذب آن‌ها به سطح حاوی بار منفی پولک‌های دیگر می‌شود. در این حالت، ذرات رسی به یکدیگر نزدیک شده و ساختار خاک مجتمع می‌شود (شکل ۲). [47, 48]

کانی شناسی و چگونگی قرارگیری ذرات در خاک بر دو پارامتر مقاومت و دوام خاک مارنی تأثیرگذار خواهد بود [41]. با توجه به نتایج حاصل از آنالیز XRF ، انحلال اکسید منیزیم در خاک و ایجاد یون منیزیم کلرید در مجاورت اسید و باقی ماندن یون منیزیم در ساختار کانی‌های پالی‌گورسکایت و سیپولایت در نمونه‌های با pH اولیه ۲ و ۴ و بر اساس تصاویر SEM

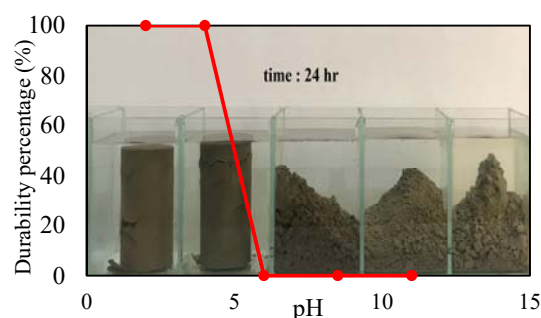
XRF ، این دو نمونه را نسبت به سایر نمونه‌ها متمایز کرده است. چگونگی قرارگیری صفحات چهار وجهی و هشت وجهی دو کانی پالی‌گورسکایت و سیپولایت سبب ایجاد کانال‌هایی در ساختار آن‌ها و این کانال‌ها با ماده‌ای که آب ژئولیت نامیده می‌شود پر شده‌اند. این کانال‌های عریض نتیجه حضور ساختار OCD^6 در ساختمان پالی‌گورسکایت و سیپولایت است [49]. محیط اسیدی می‌تواند تغییرات مهمی را در ساختار و خواص جذبی کانی‌های ژئولیتی به وجود آورد که سبب تأثیر روی خواص جذبی کانی‌های رسی پالی‌گورسکایت و سیپولایت می‌شود [50]. بر اساس مطالعات *Savage* و همکاران (۲۰۰۷) کانی‌های ژئولیت بیشتر تمایل به شکل‌گیری در pH های پایین دارند. Al و Si یون‌های تأثیر گذار در شکل‌گیری ژئولیت‌ها هستند. پایداری ژئولیت‌ها به میزان زیادی به فعالیت سیلیکا در فاز مایع بستگی دارد که بر اساس آنالیز XRF مشاهده شد در نمونه‌های اسیدی میزان سیلیکا افزایش قابل توجهی داشته است [51, 52].

به طور کلی در محیط اسیدی با تجزیه کربنات کلسیم و منیزیم و تبدیل به کلرید کلسیم و کلرید منیزیم یون‌های کلسیم و منیزیم به ویژه یون‌های منیزیم وارد ساختار پالی‌گورسکایت و سیپولایت شده و این امر می‌تواند باعث استحکام و مقاومت در برابر وارفنگی شود. با توجه به این که در ساختمان پالی‌گورسکایت و سیپولایت یون منیزیم، آلومینا و سیلیکات مشاهده می‌شود و از آن جایی که حضور یون منیزیم در ساختار این دو کانی سبب ایجاد اتصالاتی قوی از طریق نیروی الکترواستاتیک، نگهداری ذرات در کنار یکدیگر و افزایش میزان ویسکوزیته می‌شود، این امر می‌تواند دلیلی بر پایداری خاک در مقابل آب و افزایش دوام وارفنگی خاک باشد [53]. از طرفی، هنگامی که پالی‌گورسکایت در آب پراکنده می‌شود، تأثیر نیروهای الکترواستاتیک و پیوندهای هیدروژنی میان نانو ذرات سبب ایجاد ساختار ژله‌ای نامنظم، معلق و ضخیمی می‌شود [11].

شکل ۳-الف. نمونه‌های غرقاب شده برای آزمایش دوام وارفتگی پس از گذشت ۲۴ ساعت



شکل ۳-ب. منحنی درصد وارفتگی نمونه‌های مارنی در pH های اولیه متفاوت



شکل ۳-ج. منحنی درصد جذب آب نمونه‌های مارنی در pH های ۲ و ۴

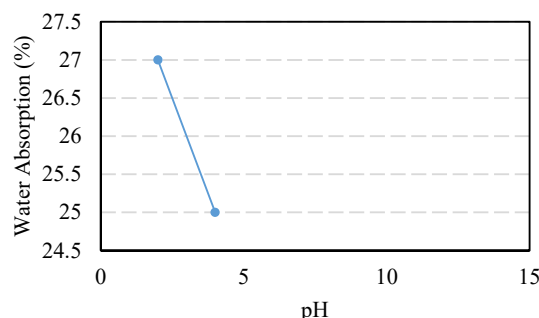


Fig. 3. Flooded samples, variant percentage curve of marl samples at different initial pHs for durability test after 24 hours and Water absorption percentage at pH 2 and 4

۳-۴- بررسی تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارنی در pH های اولیه متفاوت

در ادامه به منظور بررسی تاثیر pH اولیه، محتوای کربنات و نوع کانی رسی بر رفتار مقاومتی خاک، آزمایش مقاومت فشاری محصور نشده روی نمونه‌ها انجام شد.

مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک طبیعی برابر با ۸۷/۴ kPa است. مقاومت فشاری در pH های ۶ و ۴ به ترتیب ۶۳/۶ kPa و ۳۰/۶ kPa و به میزان ۶۹٪ و ۶۴٪ کاهش یافته و به میزان ۳۰/۶ kPa و ۶۳/۶ kPa رسیده است. از دلایل این کاهش مقاومت می‌توان به کاهش

میزان کربنات در خاک اشاره کرد (شکل ۴). بر اساس نتایج حاصل از آنالیز XRF شکل (۱) و تصاویر SEM شکل (۲) مشاهده شد با کاهش pH و در محیط اسیدی، میزان کانی‌های کربناتی موجود در خاک انحلال می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش میزان غلظت یون H^+ در آب منفذی خاک و به دلیل آب‌شویی انجام شده روی نمونه‌های خاک مارنی، یون‌های Ca^{2+} ، از ساختار خاک شسته و خارج شده است. بنابراین خاک مارنی مقاومت کم‌تری در محیط اسیدی از خود نشان می‌دهد [54].

در نمونه با pH اولیه ۲ مقاومت خاک نسبت به نمونه با pH اولیه ۴ افزایش یافته و به مقدار ۳۷۱/۲ kPa رسیده است. بر اساس نتایج XRF جدول (۴) با افزایش غلظت اسید و کاهش pH، SiO_2 موجود در خاک افزایش و Fe_2O_3 و Al_2O_3 کاهش می‌یابد و دلیل افزایش مقاومت خاک در این pH نسبت به نمونه با pH اولیه ۴ را می‌توان به این موضوع نسبت داد [55]. مقاومت فشاری نمونه خاک مارنی با pH=۱۱ اولیه برابر با ۵۷۵/۶ kPa است. با توجه به این امر که پالی‌گورسکایت در شرایط قلیایی پایدار است، ترکیبات این کانی دارای تاثیر واگرایی بر روی خاک است و می‌تواند تاثیر کاهنده در مقاومت فشاری خاک داشته باشد [56].

حضور یون‌هایی مانند Ca^{2+} ، Al^{3+} و Fe^{3+} باعث ایجاد اتصالاتی قوی بین ذرات خاک می‌شوند و این کاتیون‌ها در فرایند آب‌شویی از خاک شسته می‌شوند. بنابراین، حضور و عدم حضور این یون‌ها روی خواص مهندسی خاک تاثیرگذار است به طوری‌که در نمونه خاک مارنی در هر دو محیط اسیدی و قلیایی، شسته شدن میزان بالای یون Ca^{2+} ، از خاک می‌تواند تاثیر کاهنده بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک داشته باشد [54]. بر اساس نتایج حاصل، مقاومت فشاری محصور نشده با افزایش و کاهش pH، روندی نزولی داشته است.

در بخش پایانی نیز نمونه‌های پایدار در مقابل آب (نمونه با pH اولیه ۲ و ۴) پس از ۲۴ ساعت غرقاب شدن تحت آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده (UCS) قرار گرفتند. برخلاف پایداری آن‌ها در مقابل آب، این دو نمونه مقاومت قابل توجهی

۳. با توجه به حضور یون منیزیم، آلومینا و سیلیکات در ساختمان پالی گورسکایت و سیپولایت و از آن جایی که حضور یون منیزیم در ساختار این دو کانی سبب ایجاد اتصالاتی قوی از طریق نیروی الکترواستاتیک، نگهداری ذرات در کنار یکدیگر و افزایش میزان ویسکوزیته می-شود، این امر می-تواند دلیلی بر پایداری خاک در مقابل آب و افزایش دوام وارفنگی خاک باشد.

۴. با افزایش میزان غلظت یون H^+ در آب منفذی خاک و با توجه به آبشویی انجام شده روی نمونه‌های خاک مارنی، یون‌های Ca^{2+} ، از ساختار خاک شسته و خارج شده است. بنابراین خاک مارنی مقاومت کمتری در شرایط اسیدی از خود نشان داده است. به نحوی که در pH اولیه ۴ مقاومت فشاری محصور نشده با کاهش ۶۵٪ به 263.58 kPa رسیده است.

۵. یون‌هایی مانند Ca^{2+} ، Al^{3+} و Fe^{3+} که باعث ایجاد اتصالاتی قوی بین ذرات خاک می-شوند در فرایند آبشویی از خاک خارج می-شوند. بنابراین، حضور و عدم حضور این یون‌ها روی خواص مهندسی خاک تاثیرگذار است و در هر دو محیط اسیدی و قلیایی، شسته شدن میزان بالای یون Ca^{2+} ، از خاک می-تواند تاثیر کاهنده بر مقاومت فشاری محدود نشده خاک داشته باشد. بر اساس نتایج حاصل، مقاومت فشاری محصور نشده با افزایش و کاهش pH روندی نزولی داشته است.

۶. بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و آزمایش وارفنگی می-توان بیان نمود که مقاومت اولیه خاک تاثیر بر وارفنگی ندارد. به نحوی که خاک مارنی با مقاومت اولیه 871.44 kPa در مقابل آب ناپایدار است.

۷. بر اساس نتایج SEM، کانی پالی گورسکایت به صورت خوشه‌ای از کانی‌های فیبری شکل مشاهده می-شود، با کاهش pH این خوشه فیبرهای زنجیری پالی گورسکایت از یکدیگر فاصله می-گیرند اما این ساختار پایدار است.

نداشتند و مقاومت آن‌ها در مقایسه با نمونه‌های غرقاب نشده بیش از ۸۰٪ کاهش یافته و به حدود 43 kPa رسیده است، به طور کلی بر اساس نتایج آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده و آزمایش وارفنگی می-توان بیان نمود که مقاومت اولیه خاک تاثیر بر وارفنگی ندارد [24].

شکل ۴. منحنی تغییرات مقاومت فشاری محدود نشده خاک مارنی در pH های اولیه متفاوت قبل و بعد از غرقاب شدن نمونه‌ها

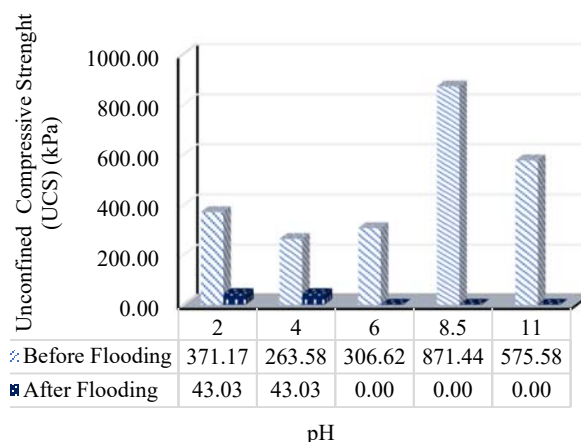


Fig.4. Unconfined compressive strength curve of marl soil at different initial pHs before and after flooding of samples

۴- نتایج

بر اساس نتایج آنالیز SEM ، XRF ، آزمایش دوام و مقاومت فشاری محدود نشده انجام شده روی نمونه‌های خاک مارنی، نتایج اخذ شده در این تحقیق را می-توان به شرح ذیل خلاصه نمود:

۱. منیزیم کلرید تولید شده ناشی از قرار گرفتن خاک در مجاورت اسید منجر به ایجاد یک ساختار پایدار می-شود و این امر احتمالاً به دلیل قدرت یونی محلول و افزایش غلظت یون Mg^{2+} تبدیلی اتفاق می-افتد و باعث فلوکوله شدن نمونه‌ها نیز می-شود.

۲. در شرایط اسیدی با تجزیه کربنات کلسیم و منیزیم و تبدیل آن‌ها به کلرید کلسیم و کلرید منیزیم، یون‌های کلسیم و منیزیم به ویژه یون‌های منیزیم وارد ساختار کانی-های پالی گورسکایت و سیپولایت شده که می-تواند باعث استحکام و مقاومت در برابر وارفنگی شود.

۵- منابع

- [11] Cui, J.; Zhang, Z.; Han, F., Effects of pH on the gel properties of montmorillonite, palygorskite and montmorillonite-palygorskite composite clay. *Applied Clay Science* **2020**, *190*, 105543.
- [12] Galán, E., Properties and applications of palygorskite-sepiolite clays. *Clay minerals* **1996**, *31* (4), 443-453.
- [13] Mulders, J. J.; Oelkers, E. H., An experimental study of sepiolite dissolution rates and mechanisms at 25° C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2020**, *270*, 296-312.
- [14] Post, J. E.; Bish, D. L.; Heaney, P. J., Synchrotron powder X-ray diffraction study of the structure and dehydration behavior of sepiolite. *American Mineralogist* **2007**, *92* (1), 91-97.
- [15] Mitchell, J. K.; Soga, K., Fundamentals of Soil Behavior, John Wiley&Sons. Inc., New York **1993**, 422.
- [16] Carroll-Webb, S. A.; Walther, J. V., A surface complex reaction model for the pH-dependence of corundum and kaolinite dissolution rates. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **1988**, *52* (11), 2609-2623.
- [17] Zhou, Y.; Cheng, H.; Wei, C.; Zhang, Y., Effect of acid activation on structural evolution and surface charge of different derived kaolinites. *Applied Clay Science* **2021**, *203*, 105997.
- [18] Tsiambaos, G., Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. *Engineering Geology* **1991**, *30* (3-4), 357-369.
- [19] Amiri, M.; Kalantari, B.; Dehghanii, M.; Porhonor, F.; Papi, M.; Salehian, R.; Taheri, S., Microstructural Investigation of Changes in Engineering Properties of Heated Lime-Stabilized Marl Soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers- Ground Improvement* **2021**.
- [20] Mahooti, A.M. and Katebi, H., *Classification of Carbonated Soils from Geotechnical Point of View (Case study: Marly Soils of Tabriz)*. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2016. **48**(3).
- [21] Ouhadi, V.; PourZafarani, M., Influence of Temperature on Unconfined Compressive Strength and Water Absorption of Sand-Bentonite Mixture in the Presence of Carbonate. *Modares Civil Engineering journal* **2014**, *14* (1), 147-157.
- [22] Jordán, M.; Boix, A.; Sanfeliu, T.; De la Fuente, C., Firing transformations of
- [1] García-Valero, A.; Martínez-Martínez, S.; Faz, A.; Rivera, J.; Acosta, J., Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Use of natural alkaline material. *Journal of Water Process Engineering* **2020**, *33*, 101064.
- [2] Amiri, M. and R. Salehian, *Microstructural Evaluation of the Effect of Initial pH on Geotechnical and Geoenvironmental Characteristics of Marl Soils*. Arabian Journal for Science and Engineering **2022**.
- [3] Benyahia, S.; Boumezbeur, A.; Lamouri, B.; Fagel, N., Swelling properties and lime stabilization of N'Gaous expansive marls, NE Algeria. *Journal of African Earth Sciences* **2020**, 103895.
- [4] Aiban, S. A.; Wahhab, H. I. A.-A.; Al-Amoudi, O. S. B.; Ahmed, H. R., Performance of a stabilized marl base: a case study. *Construction and building materials* **1998**, *12* (6-7), 329-340.
- [5] Asakereh, A.; Zarei, H.; Amiri, M., Microstructural Study of Soil Stabilization of the Southern Marl Using Lime and Nano-SiO₂. *Modares Civil Engineering journal* **2019**.
- [6] Amiri, M.; Dehghani, M.; Javadzadeh, T.; Taheri, S., *Effects of lead contaminants on engineering properties of Iranian marl soil from the microstructural perspective*. Minerals Engineering, 2022. **176**: p. 107310.
- [7] Wei, X.; Sun, Y.; Pan, D.; Niu, Z.; Xu, Z.; Jiang, Y.; Wu, W.; Li, Z.; Zhang, L.; Fan, Q., Adsorption properties of Na-palygorskite for Cs sequestration: Effect of pH, ionic strength, humic acid and temperature. *Applied Clay Science* **2019**, *183*, 105363.
- [8] Ouhadi, V.; Yong, R., The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure. *Engineering geology* **2003**, *70* (3-4), 365-375.
- [9] Ye, H.; Chen, F.; Sheng, Y.; Sheng, G.; Fu, J., Adsorption of phosphate from aqueous solution onto modified palygorskites. *Separation and Purification Technology* **2006**, *50* (3), 283-290.
- [10] Zhang, J.; Wang, J.; Wu, Y.; Wang, Y.; Wang, Y., Preparation and properties of organic palygorskite SBR/organic palygorskite compound and asphalt modified with the compound. *Construction and Building Materials* **2008**, *22* (8), 1820-1830.

- [36] ASTM D5084, Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2016.
- [37] ASTM D854, Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2014.
- [38] Ichimura, A.; Manning, B., Bruker D8 ADVANCE Powder XRD Instrument Manual and Standard Operating Procedure (SOP). *San Francisco State University, August 2004*.
- [39] C67, A., Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2014.
- [40] Bahloul, O.; Abbeche, K.; Bahloul, A., Microstructure and geotechnical characteristics of a highly plastic clay treated by magnesium chloride. *Mining Science 2019*, 26.
- [41] Gökçeoğlu, C.; Ulusay, R.; Sönmez, H., Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology 2000*, 57 (3-4), 215-237.
- [42] Nasedkin, V.; Boeva, N.; Garbuzova, I.; Kovalchuk, M.; Vasiliev, A., The crystal structure and chemistry of several palygorskite samples with different geneses. *Crystallography Reports 2009*, 54 (5), 884.
- [43] Neaman, A.; Singer, A., Possible use of the Sacalum (Yucatan) palygorskite as drilling muds. *Applied clay science 2004*, 25 (1-2), 121-124.
- [44] Krekeler, M. P.; Guggenheim, S., Defects in microstructure in palygorskite-sepiolite minerals: a transmission electron microscopy (TEM) study. *Applied Clay Science 2008*, 39 (1-2), 98-105.
- [45] Guggenheim, S.; Adams, J.; Bain, D.; Bergaya, F.; Brigatti, M. F.; Drits, V.; Formoso, M. L.; Galán, E.; Kogure, T.; Stanjek, H., Summary of recommendations of nomenclature committees relevant to clay mineralogy: report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006. *Clays and Clay minerals 2006*, 54 (6), 761-772.
- cretaceous clays used in the manufacturing of ceramic tiles. *Applied Clay Science 1999*, 14 (4), 225-234.
- [23] Dellisanti, F.; Valdré, G., Study of structural properties of ion treated and mechanically deformed commercial bentonite. *Applied Clay Science 2005*, 28 (1-4), 233-244.
- [24] Mišćević, P.; Vlastelica, G., Durability characterization of marls from the region of Dalmatia, Croatia. *Geotechnical and geological engineering 2011*, 29 (5), 771-781.
- [25] Ankara, H.; Kandemir, S. Y.; Çiçek, F., Compression of Slake Durability Index (SDI) Values of Sphere and Rounded Marl Samples. *Procedia Earth and Planetary Science 2015*, 15, 93-98.
- [26] Singh, T.; Sharma, P.; Khandelwal, M., Effect of pH on the physico-mechanical properties of marble. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment 2007*, 66 (1), 81-87.
- [27] ASTM D3282, Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2015.
- [28] ASTM D422, Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2007.
- [29] ASTM D4972, Standard Test Method for pH of Soils. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2001.
- [30] ASTM D1125-95, Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2009.
- [31] Hesse, P. R. *A textbook of soil chemical analysis*; 1971.
- [32] ASTM D3080, Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2004.
- [33] ASTM D2166, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil. ASTM International: West Conshohocken, PA, 2006.
- [34] ASTM D4318, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000.
- [35] ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)). ASTM International West Conshohocken, PA, 2012.

- [52] Savage, D.; Walker, C.; Arthur, R.; Rochelle, C.; Oda, C.; Takase, H., Alteration of bentonite by hyperalkaline fluids: a review of the role of secondary minerals. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2007**, 32 (1-7), 287-297.
- [53] Çınar, M.; Can, M.; Sabah, E.; Karagüzel, C.; Çelik, M., Rheological properties of sepiolite ground in acid and alkaline media. *Applied clay science* **2009**, 42 (3-4), 422-426.
- [54] Momeni, M.; Bayat, M.; Ajalloeian, R., Laboratory investigation on the effects of pH-induced changes on geotechnical characteristics of clay soil. *Geomechanics and Geoengineering* **2020**, 1-9.
- [55] Barrios, M. S.; González, L. F.; Rodríguez, M. V.; Pozas, J. M., Acid activation of a palygorskite with HCl: Development of physico-chemical, textural and surface properties. *Applied Clay Science* **1995**, 10 (3), 247-258.
- [56] Neaman, A.; Singer, A., Flocculation of homoionic sodium palygorskite, palygorskite-montmorillonite mixtures and palygorskite containing soil clays. *Soil science* **1999**, 164 (12), 914-921.
- [46] Kyzas, G.; Mitropoulos, A., *Advanced Low-Cost Separation Techniques in Interface Science*. Academic Press: 2019.
- [47] Essington, M., *Soil and water chemistry: an integrative approach*. CRC press: 2015.
- [48] Tombácz, E.; Csanaky, C.; Illés, E., Polydisperse fractal aggregate formation in clay mineral and iron oxide suspensions, pH and ionic strength dependence. *Colloid and Polymer Science* **2001**, 279 (5), 484-492.
- [49] Murray, H. H., Palygorskite and Sepiolite Applications. *Developments in Clay Science* **2006**, 2, 131-140.
- [50] Alvarez, A.; Santaren, J.; Esteban-Cubillo, A.; Aparicio, P., Current industrial applications of palygorskite and sepiolite. In *Developments in clay science*, Elsevier: 2011; Vol. 3, pp 281-298.
- [51] Shao, H.; Kosakowski, G.; Berner, U.; Kulik, D. A.; Mäder, U.; Kolditz, O., Reactive transport modeling of the clogging process at Maqarin natural analogue site. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2013**, 64, 21-31.

Investigating the Durability of Marl Soils in Acidic and Alkaline Conditions from a Microstructural Point of View

M. Amiri^{1*}, R. Salehian²

1*. Associate Professor, University of Hormozgan, Faculty of Engineering, Bandar Abbas, Iran.

2. Master Student, University of Hormozgan, Faculty of Engineering

Abstract:

Background and Objective: Marl soils with their complex behavior can be found in different parts of the world, such as Spain, the United States, Italy, Britain, France, Canada, and the Gulf states. In Iran, also, Marls can be located in abundance in the marginal zones of the East Azerbaijan Province, Persian Gulf, Hormozgan, and Qeshm Island. Marl soils' engineering behavior and durability in dry and wet conditions are entirely different and cause challenges in construction projects. Marl-like soils are widely observed in different parts of the world. The behavioral characteristics of marl typically depend on the distribution and size of the particles and their plastic properties. Under dry conditions, the deformation of marl soil is due to the breakdown of particles and creating a new structure. However, when this type of soil is exposed to moisture, the aggregate bond will degrade and cause swelling in the soil and, at the same time, a change in its hardness and strength; on the other hand, many polluting industries are located on marl soils. Usually, the pollution caused by these industries changes the pH and creates acidic and alkaline conditions in marl soils. Therefore, this study aims to study the effect of initial pH on the durability of marl soils from a microstructural perspective.

Materials and methods: In this regard, marl soils with different initial pHs were prepared by adding 1 M sodium alkali hydroxide (NaOH) and hydrochloric acid (HCl). Changes in geotechnical and geoenvironmental characteristics were investigated by macrostructural experiments (Atterberg Limits, permeability, and unconfined compressive strength, durability, and water absorption testing) as well as microstructural experiments (Laser diffraction particle size analysis (PSA), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (XRF), carbonate percentage determination, and scanning electron microscopy (SEM) images) and the effect of initial soil pH change on marl engineering behavior was investigated.

Results and discussions: One of the most important results of the present paper is the durability and stability of marl soils with initial $\text{pH} \leq 4$ against moisture. Based on the SEM images and XRF analysis results, the formation of magnesium chloride in the structure of palygorskite and sepiolite has caused the stability of marl soils with initial $\text{pH} \leq 4$. Also, the initial strength of marl soil does not affect the durability of indentation.

Key Words: Marl, Durability, pH, Microstructure, Slake, SEM.