

مطالعه آزمایشگاهی تاثیرات باران‌های اسیدی و قلیایی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک ریزدانه

مصطفی مومنی^۱، رسول اجل لوئیان*^۲، میثم بیات^۳

پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۲۱

دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۰۸

چکیده

در مطالعه پیش رو تاثیرات باران‌های اسیدی و قلیایی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک رس با پلاستیسیته پایین مربوط به نواحی شمال شرقی اصفهان مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این مطالعه آزمایشگاهی جهت بازسازی فرآیند اندرکنش میان باران مصنوعی و خاک از یک سیستم نفوذ آب در خاک خاص استفاده شده است. بدین صورت که نمونه‌های بازسازی شده در قالب‌ها، تحت نفوذ باران‌های اسیدی و قلیایی در pH ها و سال‌های بارش مختلف قرار گرفتند. آزمون‌های حدود اتربرگ، ضریب نفوذپذیری خاک، آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا و مقاومت فشاری محصور نشده نمونه خاک با pH مختلف جهت بررسی تغییرات مکانیکی خاک نسبت به خاک با درجه اسیدیته خنثی (pH=7) انجام شده است. با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده اثر نفوذ آب با pH های مختلف بر روی رفتار مکانیکی خاک مورد نظر بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که بطور کلی با اسیدی تر شدن یا قلیایی تر شدن هر چه بیشتر آب نفوذی مقادیر حدود اتربرگ (حد روانی و شاخص خمیری) نسبت به نمونه با درجه اسیدیته خنثی افزایشی در حدود ۶٪ در شاخص خمیری و ۱۱٪ در حد روانی را نشان داده است و میزان نفوذپذیری خاک نیز نسبت به نمونه با pH=7 افزایشی چشمگیری داشته است و در مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده و شاخص باربری کالیفرنیا نیز روندی کاهشی مشاهده شده است به گونه‌ای که کاهش در برخی از این مقادیر نسبت به نمونه با باران خنثی به بیش از ۵۰٪ می‌رسد.

واژگان کلیدی: باران اسیدی، خصوصیات ژئوتکنیکی، خاک رس، آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا، مقاومت فشاری محصور نشد

۱. کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۲. عضو هیات علمی گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، rasajl@sci.ui.ac.ir، ۰۳۱۳۷۹۳۲۱۹۰

۳. عضو هیات علمی گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

۱. مقدمه

حدود ۸۰ درصد از مجموع آلاینده‌های موجود در اتمسفر اعم از ذرات معلق و گازها از طریق نزولات آسمانی به سطح زمین فرود می‌آیند (بیگی و احمدی آسور، ۱۳۸۶). بارش به عنوان یک چرخه طبیعی قابل توجه برای پاک‌سازی آلاینده‌های اتمسفری مانند گازها و ذرات موجود در اتمسفر عمل می‌کند. لذا آلودگی بارش بوسیله آلاینده‌های اتمسفری یک نگرانی عمده در مقیاس جهانی و منطقه‌ای به وجود آورده است. بارش اسیدی نتیجه خود پالایی جو است. یعنی هستک‌های (Nucleoli) تراکمی تشکیل دهنده ابرها، ذرات معلق و گازهای محلول در هوا را جذب کرده و با شروع بارش، آلاینده‌ها از هوا کره جدا می‌شوند. البته تمامی گازهای محلول جدا نمی‌شوند. در مقابل موادی نظیر دی اکسید گوگرد و اکسیدهای نیتروژن توسط بخار آب جذب شده و تبدیل به اسید سولفوریک و اسید نیتریک می‌گردند. بیش از ۶۰ درصد اسیدیته بارش اسیدی مربوط به اسید سولفوریک و تا ۳۰ درصد سهم اکسیدهای نیتروژن است. این آلاینده‌ها در اثر فعل و انفعالات شیمیایی یا فتوشیمیایی هواکره نیز به اسید سولفوریک و اسید نیتریک و اسید کلریدریک تبدیل می‌شوند که به ذرات غبار و دود برخورد نموده و به شکل غبار اسیدی خشک، نزدیک منبع انتشارشان، سقوط می‌کنند. یکی از اثرات مهم باران اسیدی، اثر آن بر خاک است که به شکل‌های متفاوت از قبیل شستشوی کاتیون‌های مغذی، آزاد سازی عناصر سمی و اسیدی شدن خاک رخ می‌دهد. میزان تاثیر باران اسیدی بر خاک به نوع و خواص آن خاک بستگی دارد که باعث ایجاد تغییرات مخربی بر خواص مهندسی خاک از جمله افزایش تراکم پذیری، تغییر در خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. حساسیت خاک‌ها نسبت به باران اسیدی توسط چند عامل تعیین می‌شود که مهم‌ترین آنها عبارتند از: وجود یا نبود کربنات‌ها در خاک، ظرفیت کلی بافری (CEC) (Cations exchange capacity) کاتیونی یا ظرفیت تبادل خاک که عمدتاً توسط محتوای رس و مواد آلی خاک تعیین می‌شود و نوع سیستم مدیریتی که بر خاک اعمال می‌شود، خواه در آن زراعت صورت گیرد و کوددهی

انجام شود و خواه به وسیله سیلاب تجدید شود (بیگی و احمدی آسور، ۱۳۸۶). برای اولین بار در سال ۱۸۴۵ داکروس (Dacros, 1845) به باران اسیدی پی برد و در اواسط قرن نوزدهم میلادی یک شیمیدان انگلیسی به نام آنگوس اسمیت (Smithe, 1958) به باران اسیدی و جزئیات آن برای اولین بار اشاره کرد (قدوسیان، ۱۳۵۸). باران‌های اسیدی آسیب‌های جبران ناپذیری بر مناطق زیادی از کره زمین وارد کرده اند. بخشی پور و همکاران (Bakhsipour et al., 2016) به تاثیرات باران‌های اسیدی بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌های رسوبی پرداختند. آنها دو نمونه خاک رس با پلاستیسیته پایین و بالا را تحت آزمایش‌های حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان دهنده افزایش در مقادیر حدود اتربرگ نمونه‌ها و کاهش مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده خاک مورد بررسی بعد از آغشته شدن به آب‌های اسیدی است. گراچف و همکاران (Gratchev and Towhata, 2011) نیز در تحقیقات خود توانست با بررسی پارامترهای مقاومتی خاک رس با پلاستیسیته بالا از قبیل شاخص فشردگی خاک به ایجاد کاهش محسوسی در تراکم پذیری خاک‌های دارای کائولینیت در محیط‌های اسیدی پی ببرد. در مطالعه آزمایشگاهی دیگر از بخشی پور و همکاران (Bakhsipour et al., 2016) اثر طولانی مدت باران اسیدی بر برخی خواص مهندسی دو نمونه خاک رس حاوی کائولینیت و لای از جمله حدود اتربرگ، مقاومت فشاری محصور نشده، شاخص فشردگی و ضریب تحکیم یک بعدی را بررسی کردند که نتایج حاکی از تاثیرات قابل توجه سیال نفوذی اسیدی در برخی رفتار مکانیکی از قبیل کاهش در مقاومت فشاری محصور نشده و افزایش در پوکی نمونه خاک مورد مطالعه است. همچنین یانگ جونگ دو و همکاران (Du et al., 2014) با بررسی رفتار آبشویی خاک‌های تثبیت شده با سیمان در pH های مختلف از طریق آزمایشات نفوذپذیری موفق شدند تاثیرات مقادیر مختلف pH بر کاهش مقاومت این نوع خاک را اثبات کنند. در تحقیقات اولیه در مورد این موضوع کامون و همکاران (Kamon et al., 1997) به بررسی باران اسیدی در pH های اسیدی ۲ تا ۵/۶ بر

آزمایش نفوذپذیری و آزمون حدود اتربرگ بر روی نمونه‌ها با شرایط متفاوت سیال نفوذی انجام شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱-۲. خصوصیات خاک مورد آزمایش

در این پژوهش یک نمونه خاک رس طبیعی با پلاستیسیته پایین انتخاب شده است. محل نمونه برداری خاک مورد نظر واقع در امامزاده شاهزاده حسن در شمال شرق شهر اصفهان و در طول جغرافیایی $51^{\circ} 51'$ و عرض جغرافیایی $32^{\circ} 45'$ و در ارتفاع $1543/5$ واقع شده است. این مکان در مجاورت ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید بهشتی است که این ایستگاه از نوع ایستگاه هواشناسی سینوپتیک (فرودگاهی) بوده که موارد زیر در آن اندازه گیری می‌گردد: دما، رطوبت، فشار دریا و سطح ایستگاه. برخی از خصوصیات خاک مورد استفاده در جدول-های ۱ و ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است که خاک رس استفاده شده در این تحقیق بر اساس طبقه‌بندی خاک به روش متحد به عنوان خاک رس با حالت خمیری پایین (CL) طبقه بندی شده است. همچنین با هدف شناسایی املاح و عناصر تشکیل دهنده خاک و درصد تجمع هرکدام از این عناصر آزمایش XRF (X-ray fluorescence spectroscopy) (طیف سنجی فلئورسانس پرتو ایکس)، که یکی از روش‌های آنالیز عنصری است انجام شده است. این آزمون حاوی اطلاعات بسیار ارزشمندی از نوع و درصد کانی‌های موجود در خاک مورد آزمایش است. نتایج آزمون XRF تجمع بالای سیلیسیم و کلسیم را نسبت به سایر عناصر موجود در خاک را نشان می‌دهد. این امر بیانگر قدرت بالای بافرکنندگی خاک منطقه و در نتیجه عدم تاثیرپذیری احتمالی در بازه‌های مختلف اسیدی و قلیایی خواهد بود.

خصوصیات ژئوتکنیکی خاک تثبت شده با سیمان و آهک پرداخته و به تفاوت در خصوصیات مقاومتی خاک و ایجاد تغییرات چشمگیر در ساختار خاک ترکیب شده با درصد‌های مختلف سیمان و آهک بوسیله انجام آزمون‌هایی از قبیل مقاومت فشاری محصور نشده قبل و بعد از آغشتگی به مایع اسیدی پی بردند.

شهر اصفهان به عنوان یک کلان شهر صنعتی نیز از معضل تاثیرات باران‌های اسیدی و قلیایی بر خاک منطقه مبرا نبوده و وجود مناطق صنعتی متعدد مانند ذوب آهن، فولاد مبارکه، پتروشیمی و... باعث تولید باران‌های اسیدی و قلیایی در این منطقه می‌شود. از این رو با در نظر گرفتن گسترش شهر اصفهان و مناطق صنعتی حومه آن مانند ذوب آهن که در طی فرآیند تولید محصولات خود منجر به تولید و آزادسازی مقادیر قابل توجه گازهای اسیدی و قلیایی در اتمسفر منطقه می‌گردند که این گازها با وارد شدن به فرآیند طبیعی بارش در فصل‌های بارندگی سبب ایجاد باران با pH های مختلف می‌شوند، لذا بررسی آثار مخرب این نوع نزولات بر خاک جهت کمک به شناخت بیشتر آثار مخرب بارش‌های مذکور امری ضروری است. با توجه به موارد ذکر شده، در حال حاضر بارش باران‌های اسیدی و اثرات حاصل از آن، به عنوان یکی از مهمترین معضلات ناشی از رشد و گسترش تکنولوژی، شهر نشینی و فراوانی جوامع صنعتی مورد توجه محققین قرار گرفته است. هدف از این پژوهش بررسی تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی و رفتار مکانیکی خاک رس با پلاستیسیته کم در معرض سیال اسیدی-قلیایی با سیستم شبیه‌سازی باران مصنوعی بر روی نمونه‌های خاک در pH و دوره‌های زمانی مختلف است. در این فرآیند با اضافه کردن درصد‌های مختلفی از اسید و قلیا به آب مقطر، باران اسیدی و قلیایی با pH های مختلف بدست آورده شده و سپس نمونه‌ها در قالب بازسازی شده و سیال با pH مورد نظر در دبی‌های متفاوت به نمونه اضافه شده است و در نهایت آزمایش‌های ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) (California Bearing Ratio)، آزمون مقاومت فشاری محصور نشده (Unconfined Compressive Strength) (UCS)،

جدول ۱. مواد تشکیل دهنده خاک بر اساس نتیجه آزمایش XRF

Concentration (W/W%)	Compound
26.70	SiO ₂
24.35	CaO
8.52	Al ₂ O ₃
5.90	Fe ₂ O ₃
5.27	MgO
2.19	K ₂ O
0.849	Na ₂ O
0.601	TiO ₂
0.600	SO ₃
0.423	Cl
0.190	P ₂ O ₅
0.166	SrO
0.098	MnO
0.044	BaO
0.028	CuO
0.020	ZnO
0.008	Rb ₂ O
24.05	LOI*
100.01	Total

هواشناسی استان اصفهان برای اعمال تاثیر مدت زمان بارش بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک بازه‌های زمانی یک سال، ده سال و بیست سال بارش برای سه بازه pH مختلف در نظر گرفته شده است. برای این منظور میزان محلول باران اسیدی و قلیایی شبیه سازی شده (Artificial acid (or alkaline) rain) (AAR) بر اساس رابطه ۱ ارائه شده توسط کامون محاسبه گردیده است:

$$AAR = 1/3 \times R_{ave} \times A \quad (1)$$

که در این رابطه R_{ave} برابر متوسط بارش سالانه منطقه نمونه برداری بر حسب میلی متر در سال و A سطح مقطع نمونه بر حسب سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. بر اساس این رابطه کامون بر این عقیده است که حدود دو سوم از کل میزان بارندگی در سطح مشخصی از خاک، به صورت آب‌های سطحی جریان پیدا کرده و به زمین نفوذ نمی‌کنند (Kamon et al., 1997). بنابراین با توجه به میانگین بارش شهر اصفهان (۱۲۰ mm/year) و سطح مقطع نمونه های کوبیده شده در قالب CBR (۱۸۱/۴۵ cm²) میزان محلول باران مصنوعی برای نمونه‌ای با بارش معادل یک، ده و بیست سال بارش به ترتیب برابر ۷۲۰، ۷۲۰۰ و ۱۴۴۰۰ میلی لیتر در pH های مختلف

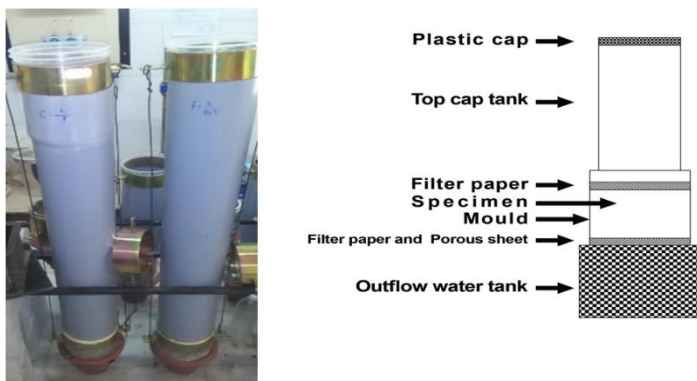
۲-۲. نحوه عمل آوری محلول باران مصنوعی

در این تحقیق به منظور بازسازی فرآیند باران مصنوعی با درجه اسیدی یا قلیایی مشابه با باران منطقه مورد نظر طبق گزارشات ارائه شده سازمان هواشناسی این منطقه، محلول‌های باران مصنوعی با pH های ۳ و ۵/۶ و ۷/۶ آماده شده است. واکنش پذیری بالای کانی های رسی و قدرت بالای اسیدیته در pH=3، خنثی در نظر گرفته شدن باران در pH=5.6 و همچنین قلیایی بودن باران استان اصفهان در سالیان اخیر در pH=7.6 شاخصه های اصلی انتخاب این سه بازه از میزان pH بوده اند. در این راستا برای دستیابی به باران های اسیدی با pH های ۳ و ۵/۶ مقادیری از اسید نیتریک (HNO₃) و اسید سولفوریک (H₂SO₄) را به نسبت ارائه شده در گزارشات سازمان هواشناسی این استان با آب مقطر خالص ترکیب کرده تا pH مورد نظر حاصل گردد و همچنین با اضافه کردن مقادیری آمونیوم سولوشن (NH₄⁺) به آب مقطر با اسیدیته خنثی که محلول قلیایی با قدرت بالا بشمار می‌رود، محلول باران مصنوعی با pH=7.6 فراهم آمده است.

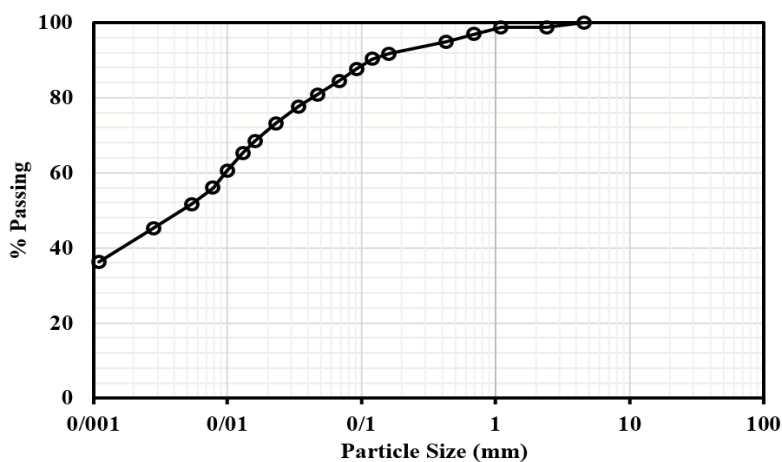
پس از آن با در نظر گرفتن متوسط بارش سالانه در شهر اصفهان (۱۲۰ mm/year) بر اساس گزارشات سازمان

معادل سازی بارش برای سال‌های بارشی متفاوت بوجود خواهد آمد.

خواهد بود. گفتنی است که هدف اصلی از انتخاب سه دوره بارشی معادل یک، ده و بیست سال بارش نشان دادن تاثیرات درازمدت این پدیده بر خاک است که به واسطه رابطه (۱) امکان



شکل ۱. سیستم نفوذ آب در خاک



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی خاک

جدول ۲. ویژگی‌های فیزیکی خاک استخراج شده [۱۱]

Physical properties	Amounts	Standard
G_s	2.74	ASTM-D 854-14
Soil type: USCS	CL	ASTM-D 422-63
pH	7.4	ASTM- D 4972-13
ω (%)	3.7	ASTM-D 2216-10
LL (%)	27.7	ASTM-D 4318-17
PL (%)	18.56	ASTM-D 4318-17
PI (%)	9.14	ASTM-D 4318-17
γ_{dmax} (gr/cm ³)	1.83	ASTM-D 698-12e2
ω_{opt} (%)	16.8	ASTM-D 698-12e2

۳-۲. نحوه شبیه سازی باران مصنوعی

می‌باشند، آزمایش‌های حدود اتربرگ انتخاب شده است. این آزمون بر روی نمونه‌های تحت تاثیر باران مصنوعی، معادل یک، ده و بیست سال بارش و با مقادیر pH های مختلف (۳ و ۵/۶ و ۷/۶) انجام شده است. برای این منظور پس از آنکه نمونه‌های خاک تحت تاثیر باران مصنوعی قرار گرفتند، از قالب‌ها خارج شده و در کیسه‌های پلاستیکی برای مدت سه روز نگهداری شدند. پس از آن آزمون حدود اتربرگ مطابق ASTM بر نمونه‌های خاک انجام شد. سپس میزان نفوذپذیری نمونه‌های خاک پس از قرار گیری در معرض باران مصنوعی، بوسیله آزمون نفوذپذیری با بار افتان بدست آمده است. به همین منظور پس از آن که نمونه‌ها تحت باران مصنوعی در pH های مختلف و جریان‌های بارشی گوناگون قرار گرفتند، مجدداً به وسیله آب مقطر اشباع شده و تحت بار آبی به ارتفاع یک متر برای مدت سه روز برای هر کدام از نمونه‌ها قرار گرفتند. پس از مدت مذکور ارتفاع ثانویه آب بر نمونه‌ها اندازه گیری شد تا بر اساس ASTM میزان نفوذپذیری هر کدام از نمونه‌ها پس از قرارگیری تحت باران مصنوعی محاسبه گردد. نتایج حاصل از این آزمون می‌تواند ما را به درک عمیق تری از این امر برساند که با افزایش میزان نفوذپذیری پس از قرارگیری خاک تحت تاثیر باران‌های مصنوعی در بازه‌های زمانی و اسیدیته مختلف، خاک دچار تغییرات اساسی در ساختار گردیده و آبشویی صورت گرفته در نمونه‌ها سبب ایجاد ساختاری به مراتب ضعیف‌تر در خاک شده است. از طرفی در برخی مسائل نیز از رس‌ها جهت آب بند نمودن بدلیل نفوذپذیری پایین استفاده می‌شود که نشان دهنده اهمیت بالای ضریب نفوذ پذیری در خاک‌های ریزدانه است و این متغیر نیز در آزمایش نفوذپذیری مورد مطالعه قرار گرفته است.

آزمون CBR یا نشانه باربری کالیفرنیا جهت تعیین ظرفیت باربری خاک‌های زیر پی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این آزمون پس از آن که نمونه‌های بازسازی شده در قالب‌های CBR در معرض باران مصنوعی در pH های ۳ و ۵/۶ و ۷/۶ و جریان‌های بارشی معادل سال‌های بارش مختلف قرار گرفتند، به وسیله دستگاه CBR و بر طبق استاندارد ASTM تحت بارگذاری قرار گرفتند. این آزمون تحت بارگذاری با سرعت ۱/۲۷mm/min انجام شده است. در آخر آزمون مقاومت

پس از آن که نمونه‌های خاک تحت رطوبت بهینه در قالب‌های CBR متراکم شدند، برای بازسازی فرآیند درهم‌کنش شیمیایی میان خاک و باران یک سیستم نفوذپذیری مطابق شکل ۱ ساخته شده است در این سیستم پس از بازسازی خاک در قالب‌ها در بالا و پایین آن فیلتر کاغذی و سنگ متخلخل برای جلوگیری از شسته شدن خاک بوسیله محلول باران در نظر گرفته شده است. در بالای نمونه‌ها لوله‌هایی با ارتفاع یک متر و قطر دهانه ۱۵/۱ سانتی متر جهت ایجاد بار آبی بر روی خاک و در پایین نمونه‌ها ظروفی برای جمع آوری آب خروجی از نمونه‌ها بکار گرفته شده است.

۴-۲. نحوه قرارگیری در معرض باران مصنوعی

نمونه‌های خاک جهت انجام آزمایش طبق ASTM در پنج لایه و هر لایه با ۵۶ ضربه متراکم شده تا بیشترین دانسیته خشک (MDD)، تحت رطوبت بهینه (OMC) خاک حاصل گردد. سپس نمونه‌ها تحت نفوذ باران مصنوعی در pH های مختلف (۳، ۵/۶ و ۷/۶) و جریان‌های بارشی مختلف معادل یک، ده و بیست سال بارش به مدت ۳۰ روز تحت باران مصنوعی قرار گرفتند. به گونه‌ای که درون لوله‌های نصب شده بر هر کدام از نمونه‌های تحت نفوذ بارش معادل یک سال ۷۲۰ میلی لیتر، بارش معادل ده سال ۷۲۰۰ میلی لیتر و برای بارش معادل بیست سال ۱۴۴۰۰ میلی لیتر از مایع‌های اسیدی یا بازی در pH های ۳، ۵/۶ و ۷/۶ بصورت جداگانه ریخته شد و نمونه‌ای با pH خنثی ۷ و سال بارشی معادل ۲۰ سال (نمونه شاهد) به عنوان معیار سنجش تغییرات سایر نمونه‌ها قرار داده شد.

۵-۲. روش‌های آزمایش

آزمون حدود اتربرگ یک معیار تعریف شده برای تعیین میزان رطوبت خاک است و کاربردهای ویژه‌ای در تعیین نوع خاک دارد. بررسی تغییرات حدود اتربرگ نمونه‌های خاک پس از قرار گرفتن تحت تاثیر باران‌های مصنوعی می‌تواند باعث ایجاد تصویری واضح‌تر از تاثیرات باران‌های اسیدی و قلیایی بر مواد مغذی خاک و ایجاد هرگونه تغییرات احتمالی در ساختار خاک شود. در واقع از آنجا که خصوصیات خمیری و حدود اتربرگ پارامتر مهمی در کنترل رفتار خاک‌های چسبنده

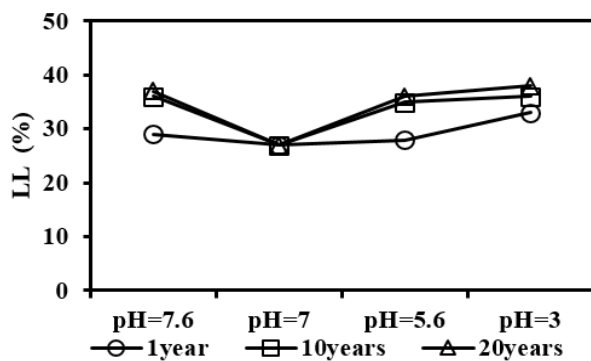
یابد. بر اساس مقادیر بدست آمده حدود روانی در تمامی نمونه‌هایی که دچار آلودگی اسیدی و یا قلیایی قوی شده‌اند نسبت به نمونه خنثی (نمونه با $pH=7$) روندی افزایشی داشته است به گونه‌ای که در برخی از نمونه‌ها اختلاف حد روانی نسبت به نمونه خنثی بیش از ۱۱٪ بوده است. مقادیر بدست آمده برای حدود روانی نشان می‌دهد که نمونه‌ی دارای بیشترین میزان آلودگی اسیدی ($pH=3$) و بیشترین میزان آبهوشویی (بیست سال بارش) دارای بیشترین مقدار حد روانی (۳۸٪) و نمونه‌ای که از دید سازمان هواشناسی دارای باران خنثی ($pH=5.6$) و کمترین میزان آبهوشویی (معادل یک سال بارش) است پس از نمونه با $pH=7$ دارای کمترین میزان حد روانی (۲۸٪) است. به همین ترتیب نمونه‌های با $pH=7.6$ پس از نمونه‌های با $pH=3$ دارای بیشترین میزان حد روانی (۳۷٪) هستند که این مقادیر با افزایش جریان بارشی معادل، از یک سال به بیست سال افزایش داشته است. در مورد شاخص خمیری نمونه‌های با $pH=7$ و آلوده به باران اسیدی و قلیایی نیز همین روند حاکم است (شکل ۳-ب) به گونه‌ای که نمونه‌ای که بیشترین میزان دور شدگی از مقادیر باران خنثی را دارند (یعنی نمونه‌های تحت باران با $pH=3$ و $pH=7.6$) دارای بیشترین میزان شاخص خمیری (۱۴٪) است که این مقادیر با در نظر گرفتن افزایش آبهوشویی در نمونه‌ها (از یک سال به بیست سال بارش) نیز افزایش بیشتری خواهد داشت به گونه‌ای که در نمونه‌های با $pH=3$ میزان این تغییرات از ۱۱٪ به بیش از ۱۴٪ با افزایش سال بارش از یک سال به ده سال رسیده است.

فشاری محصور نشده بر روی نمونه‌های خاک انجام شد. این آزمون بر طبق ASTM بر روی سه مغزه از هر نمونه انجام شد و تنها مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌هایی که حداکثر ۵٪ نسبت به میانگین مقادیر بدست آمده انحراف داشته‌اند مورد قبول واقع شدند. در نهایت نمودارهای تنش-کرنش، مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده (q_u) و مقاومت برشی زهکشی نشده (c_u) هر کدام از نمونه‌ها بدست آمده است. در آخر گفتنی است که هدف اصلی از انتخاب آزمون‌های CBR و مقاومت فشاری محصور نشده (UCS) بررسی رفتارهای مقاومتی خاک در هر یک از حالت‌های محصور شدگی و عدم محصور شدگی بصورت جداگانه قبل و بعد از فرارگیری تحت تاثیر باران‌های اسیدی و قلیایی در بازه‌های زمانی مختلف بوده است.

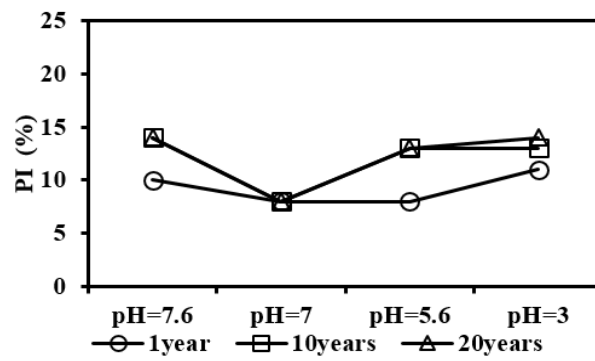
۳. بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱. نتایج آزمون حدود اتربرگ

شکل ۳ نتایج آزمون حدود روانی و شاخص خمیری نمونه‌های خاک با توجه به تاثیرات pH در pH های ۳، ۵/۶ و ۷/۶ و سال‌های بارش معادل یک و ده و بیست سال بارش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۳-الف قابل مشاهده است، مقادیر حدود روانی تمامی نمونه‌ها با افزایش میزان اسیدی یا قلیایی بودن نمونه‌ها برای تمامی سال‌های بارشی افزایش می‌-



(الف)

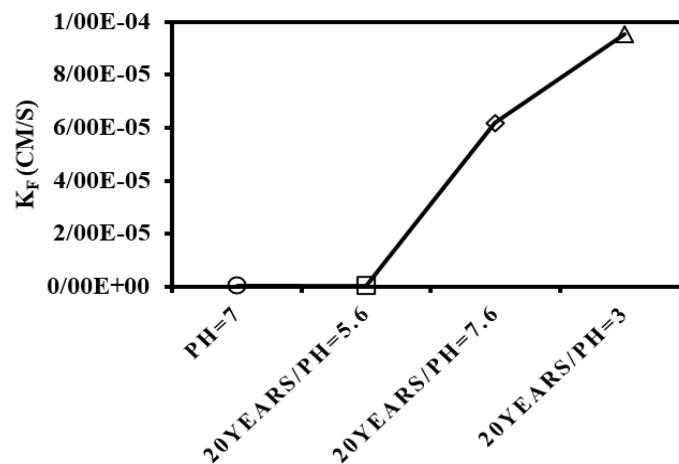


(ب)

شکل ۳. مقادیر حدود اتربرگ نمونه‌ها الف- حد روانی ب- شاخص خمیری

۳-۲. نتایج آزمون نفوذپذیری

آزمایش نفوذپذیری بر روی نمونه‌ها با سال بارش بیست سال مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌هایی که از مقادیر خنثی ($\text{pH}=7$) دور شده و به مقادیر قلیایی‌تر ($\text{pH}=7.6$) یا مقادیر اسیدی‌تر ($\text{pH}=3$) سوق پیدا کرده‌اند دارای نفوذپذیری بالاتری هستند. این موضوع با نتایج بدست آمده بخشی پور و همکاران (Bakhsipour et al., 2016) بر روی خاک رسوبی کاملاً مطابقت دارد از طرفی نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که بیشترین میزان نفوذپذیری در نمونه با $\text{pH}=3$ اتفاق افتاده است ($k=9.52 \times 10^{-5}$) و پس از آن به ترتیب نمونه‌های با $\text{pH}=7.6$ ($k=6.18 \times 10^{-5}$) و $\text{pH}=5.6$ ($k=4.91 \times 10^{-7}$) نسبت به نمونه خنثی ($k=4.42 \times 10^{-7}$) دارای بیشترین میزان نفوذپذیری هستند.



شکل ۴. ضریب نفوذ پذیری نمونه‌ها

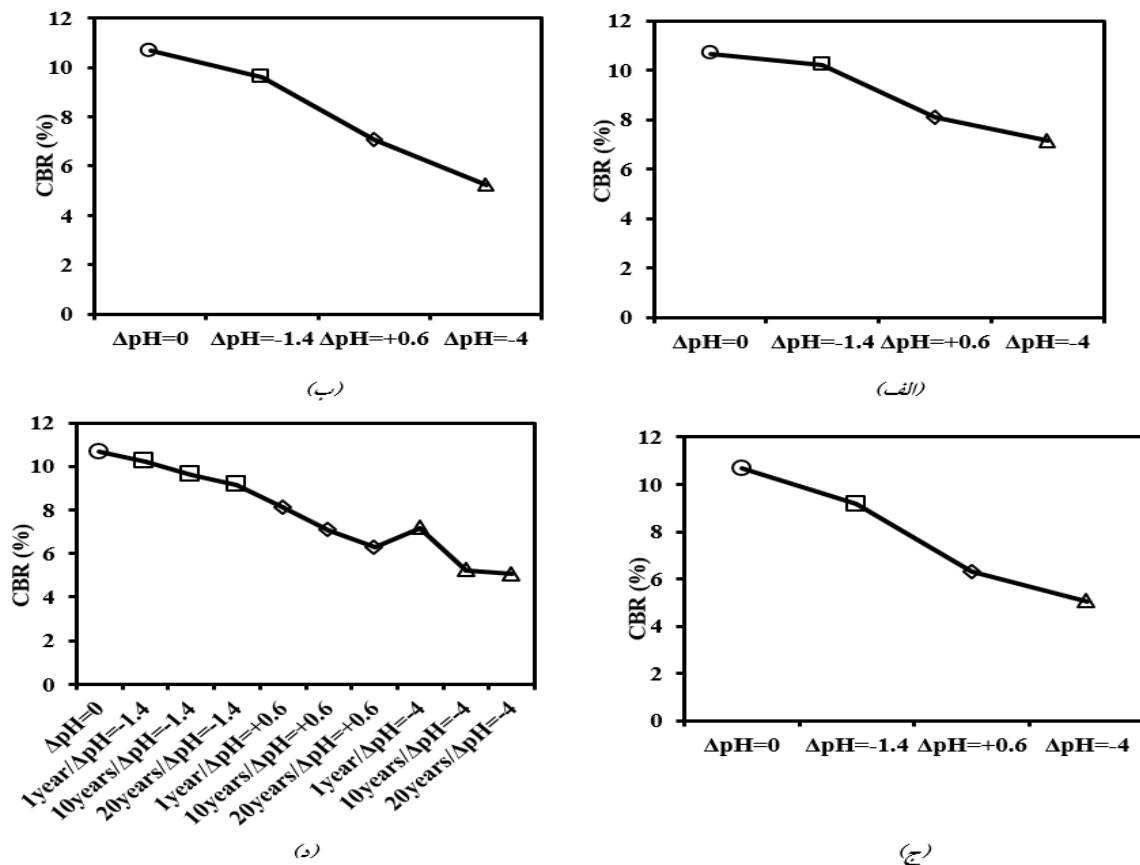
و تحلیل آنها مشاهده می‌شود که با افزایش سال بارش از یک سال به بیست سال، کاهش مقادیر ظرفیت باربری خاک از مقدار $10/66$ برای نمونه با pH خنثی به مقدار $5/06$ برای نمونه با pH شدت اسیدی ۳ و بارش معادل بیست سال قابل مشاهده است. همچنین مقادیر این کاهش با دور شدن از مقادیر خنثی (قلیایی‌تر شدن و اسیدی‌تر شدن) افزایش چشمگیرتری خواهند داشت. نتایج نشان می‌دهد که کاهش در مقادیر CBR خاک دارای روندی خطی است بطوریکه بیشترین میزان کاهش در نمونه با $\text{pH}=3$ و در بیست سال بارش ($\text{CBR}=5.06$) و کمترین میزان کاهش پس از نمونه خنثی در نمونه با $\text{pH}=5.6$ و در یک

۳-۳. نتایج آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا

نتایج آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا نمونه‌های خاک در pH های مختلف ۳، ۵/۶ و ۷/۶ نسبت به pH مرجع ۷ و سال‌های بارشی معادل یک، ده و بیست سال بارش می‌باشد که در شکل ۵ ارائه شده است. در این شکل محور افقی نمودار حاصل تفاضل pH مرجع در حالت خنثی یعنی ۷ از pH های مختلف ۳، ۵/۶ و ۷/۶ است که تحت عنوان ΔpH نمایش داده شده است تا بتوان میزان انحراف pH نمونه‌های مختلف را نسبت به نمونه خنثی (نمونه با $\text{pH}=7$) بهتر به تصویر کشید. با توجه به شکل ۵ و بر اساس مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشات CBR

های اسیدی در همان ده سال ابتدایی بارندگی است. در صورتی که تاثیرات باران‌های قلیایی و باران‌های اسیدی ضعیف با گذشت زمان‌های طولانی تر قابل مشاهده است. این نکته بیان شده با یافته‌های کامون و همکاران (Kamon et al., 1997) و همچنین سونیل و همکاران (Sunil et al., 2006) کاملا تطابق دارد.

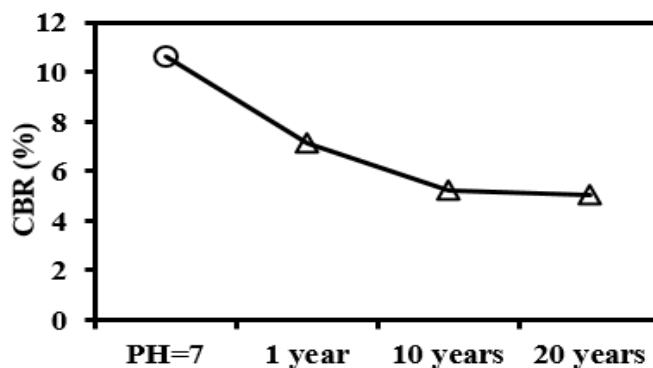
سال بارش (CBR=10.22) اتفاق افتاده است که نشانده افت بیش از ۵۰٪ نسبت ظرفیت باربری کالیفرنیا خاک است. علاوه بر این از مقایسه بارش‌های یک سال، ده سال و بیست سال نتیجه گیری می‌شود که بجز موارد بسیار اسیدی (pH=3)، روند تغییرات CBR نمونه‌ها در سال‌های بارشی مختلف روندی ثابت و خطی بوده که این اتفاق نشان دهنده تاثیرات عمده باران



شکل ۵. نمودار CBR نمونه‌ها بر حسب pH الف- یک سال بارش ب- ده سال بارش ج- بیست سال بارش د- مقایسه تمامی نمونه‌ها در pH ها و سال‌های بارش مختلف

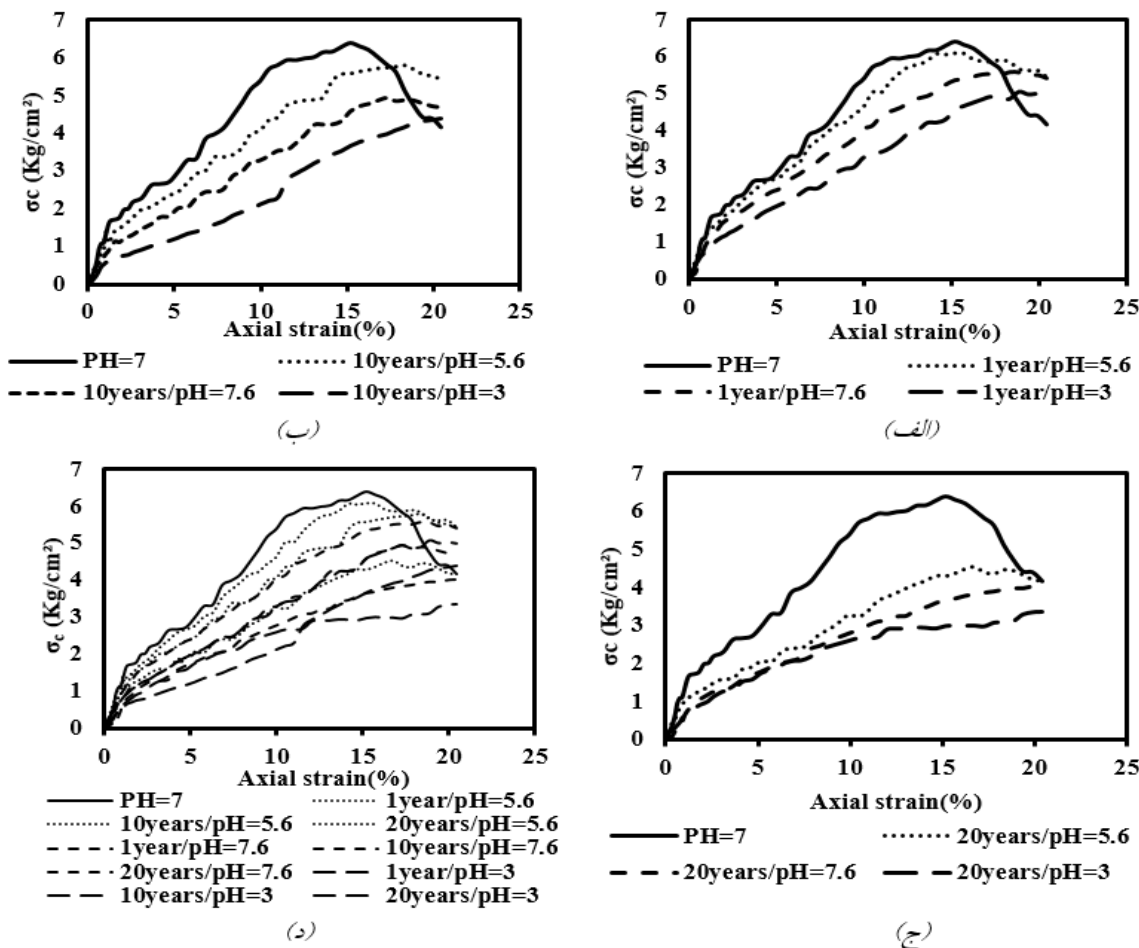
کاهش مقاومت خاک را تشدید می‌کند به گونه‌ای که مقادیر CBR نمونه با pH=3 از ۷/۱۶ در مدت بارش معادل یک سال به مقدار ۵/۰۶ در مدت بارش معادل بیست سال کاهش یافته است.

علل نتیجه مشاهده شده را اینطور می‌توان بیان نمود که افزایش مقدار pH، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده ساختار خاک مانند کلسیم، آلومینیوم، آهن، ... از خاک شسته شده و ساختار خاک ضعیف‌تر می‌گردد. از طرف دیگر، افزایش مدت زمان بارش نیز مقادیر بیشتری از این عناصر را از خاک شسته و روند



شکل ۶. نمودار CBR نمونه ها در pH=3 و بر حسب سال بارش

۳-۴. نتایج آزمون مقاومت فشاری محصور نشده



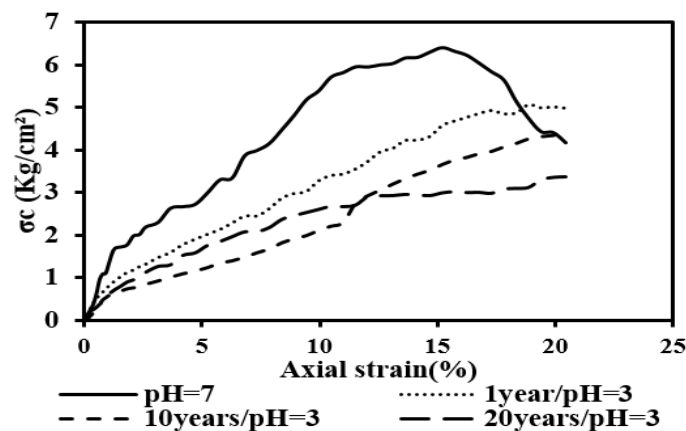
شکل ۷. نمودار تنش- کرنش نمونه‌ها بر حسب pH الف- یک سال بارش ب- ده سال بارش ج- بیست سال بارش د- مقایسه تمامی نمونه‌ها در pH ها و سال‌های بارش مختلف

معادل یک، ده و بیست سال بارش در شکل ۷ ارائه شده است. بر اساس مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشات مقاومت فشاری

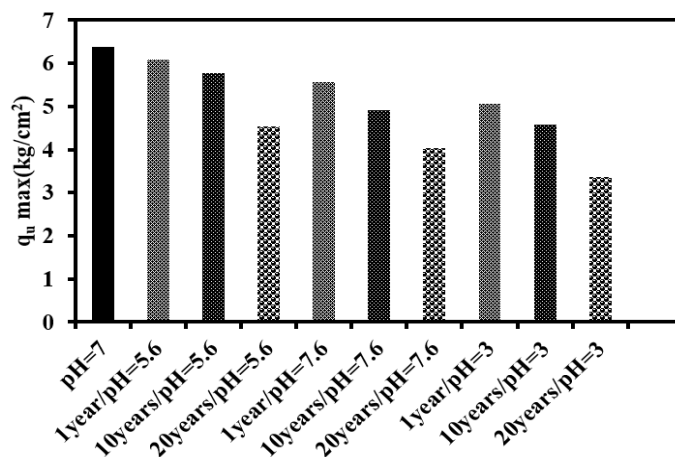
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری محصور نشده نمونه‌های خاک در pH های مختلف ۳، ۵/۶ و ۷/۶ و سال‌های بارشی

شکل ۸ نتایج بدست آمده در این بخش با نتایج حاصل از تحقیقات بخشی پور و همکاران (Bakhsipour et al., 2016) و همچنین گراچوف و تواتا (Gratchev and Towhata, 2011) کاملاً مطابقت دارد. نتایج نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش در مقاومت فشاری محصور نشده نمونه با pH=3 و بیست سال بارش ($q_u=3.37$) و کمترین میزان کاهش مطابق شکل ۹ پس از نمونه با pH=7 در نمونه با pH=5.6 و در یک سال بارش ($q_u=6.09$) اتفاق افتاده است.

محصور نشده و تحلیل آنها مشاهده می‌شود که با دور شدن از مقادیر خنثی و افزایش میزان pH باران مصنوعی و یا با قلیایی شدن هرچه بیشتر باران شبیه سازی شده کاهش بیشتری در مقاومت فشاری خاک ایجاد خواهد شد. همچنین با افزایش میزان بارندگی از یک سال به بیست سال میزان کاهش‌های شدیدتری در مقادیر مقاومتی خاک قابل مشاهده است به گونه‌ای که در نمونه با pH=3 مقادیر بیشینه مقاومت فشاری محصور نشده (q_u) از ۵/۰۶ به مقدار ۳/۳۷ کاهش یافته است. مطابق



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش نمونه‌ها در pH=3 و بر حسب سال بارش



شکل ۹. مقادیر بیشینه مقاومت فشاری محصور نشده

خصوصیات مهندسی خاک پس از قرارگیری در معرض باران اسیدی یا قلیایی کمک شایانی کند. در منطقه اصفهان بیشتر ناخالصی‌های موجود در هوا (HNO_3 , H_2SO_4 , NH_4^+) به

۳-۵. بحث در مورد نتایج آزمایش

درک مناسب از ترکیب شیمیایی خاک، باران و اقلیم منطقه اصفهان می‌تواند به شفاف سازی دلایل ایجاد تغییرات در

صورت نهشت‌های تر بر زمین ریزش می‌کنند. میزان بارندگی در استان اصفهان بسته به حوزه بارش بین ۹۷ تا ۴۴۷ میلی متر در سال متغیر است. باتوجه به سامانه‌های بارشی ورودی به آسمان استان، مناطق صنعتی غرب و جنوب غرب بیشترین میزان بارندگی و مناطق کویری شرق و شمال شرق استان کمترین میزان بارش را به خود اختصاص داده اند. در این بخش با استناد بر یافته‌های محققین پیشین و بدون انجام آنالیزهای آزمایشگاهی نتایج قابل قبولی حاصل گردید. هرچقدر میزان بارش بیشتر باشد به همان نسبت میزان نفوذ باران در خاک و آبخویی خاک بالاتر خواهد بود (Sunil et al., 2006). برای شرایط آب و هوایی استان اصفهان کاتیون‌های محلول در آب همچون Ca^{+} ، Na^{+} ، K^{+} و Mg^{2+} به راحتی از لایه‌های بالایی خاک شسته شده و به قسمت‌هایی از خاک که دارای مقادیر بالاتری Al و Fe هستند انتقال می‌یابند. حضور عناصری از قبیل Al^{3+} و Fe^{3+} سبب ایجاد پیوندهای قوی میان ذرات رس می‌گردد که با افزایش میزان جریان بارش این عناصر نیز از لایه‌های بالایی خاک شسته شده و سبب می‌گردد خاک دارای ساختاری ضعیف‌تر شود. بنابراین حضور یا عدم حضور عناصر مذکور تاثیر بسزایی بر مقاومت خاک خواهد داشت به گونه ای که پس از قرار گیری در معرض باران اسیدی یا قلیایی و شسته شدن مقادیر بالایی از عناصر Ca^{+} ، Al^{3+} و Fe^{3+} از خاک، کاهش مقادیر مقاومت فشاری محصور نشده و ظرفیت باربری خاک و همچنین افزایش حدود اتربرگ و ضریب نفوذپذیری خاک اتفاق می‌افتد (Ola, 1978). همچنین می‌توان گفت که با افزایش میزان اسیدیته باران مصنوعی یون‌های هیدروژن جایگزین یون‌های Al^{3+} و Fe^{3+} شده و سبب می‌گردند تا ساختار اصلی خاک دچار فروپاشی شود. از طرفی حضور مواد اسیدی از قبیل H_2SO_4 و HNO_3 که به عنوان اکسید کننده‌های قوی شناخته می‌شوند سبب ایجاد اکسیدهای از قبیل Fe_2O_3 و Al_2O_3 در خاک شده و به این ترتیب عناصر اصلی تشکیل دهنده خاک به صورت ذهاب از خاک خارج می‌شوند (Mitchell, 1993). از طرف دیگر، طبق گزارشات ارائه شده خاک منطقه اصفهان به دلیل دارا بودن مقادیر بالای املاح قلیایی (ضربه گیرها یا مواد

بافر) مانند کلسیم (بر طبق گزارشات آزمون XRF) دارای قدرت بالای قلیایی است. همچنین بر طبق گزارشات سازمان هواشناسی استان اصفهان بارش‌های قلیایی در سال‌های متوالی در سطح استان اتفاق افتاده است که این امر خود سبب ایجاد خاصیت قلیایی و قلیا کنندگی در خاک می‌شود (Wang and Siu, 2006) (van Olphen, 2005). با توجه به شیمی کلوئیدی خاک‌های رسی می‌توان این موضوع را اذعان داشت که فرآیند های مبادله‌ای میان یون‌های موجود در خاک سبب ایجاد تغییرات در ضخامت لایه دوگانه میان ذرات رس می‌شود. به این صورت که در حضور محلول باران مصنوعی عناصر فعالی از قبیل سدیم جایگزین عنصر کلسیم شده و سبب می‌گردند تا با جذب چند برابری مولکول‌های آب در اطراف ذره‌های رسی ضخامت لایه دوگانه میان ذرات رس افزایش یابد. قابل ذکر است که اگر چه با افزایش ضخامت لایه دوگانه به دلیل حضور کانی‌هایی از قبیل کائولینت، تغییرات چندانی در ساختار و خصوصیات فیزیکی خاک به وجود نخواهد آمد اما این افزایش فاصله میان ذرات رسی سبب کاهش نیروهای جاذبه و اندروالسی که عامل اصلی نگهداری ذرات رس در کنار یکدیگر به شمار می‌روند خواهد شد (Sridharan et al., 2002) (Sridharan et al., 1988) این امر سبب خواهد شد تا مقاومت خاک کاهش یافته و تغییرات اساسی در حدود اتربرگ و نفوذپذیری خاک رخ دهد (Gratchev and Sassa, 2009) (Gratchev and Towhata, 2015).

۴. نتیجه گیری

با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌های حدود اتربرگ، نفوذپذیری، ظرفیت باربری کالیفرنیا و تک محوری بر روی خاک رسی تحت سیال نفوذی اسیدی، خشتی و قلیایی، نتایج زیر قابل استنتاج است"

۱- به طور کلی با افزایش میزان درجه اسیدی یا قلیایی آب نفوذی و افزایش مدت زمان نفوذ خصوصیات خاک دچار تغییرات شده که از جمله این تغییرات می‌توان به کاهش در خصوصیات مقاومتی و ظرفیت باربری خاک اشاره کرد.

۵- در ارتباط با تاثیرات سیال اسیدی و قلیایی بر خصوصیات خاک‌ها می‌توان گفت که با افزایش میزان ناخالصی سیال و دور شدن آن از مقادیر خنثی تاثیرات گسترده‌ای بر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک قابل مشاهده است که این میزان از تاثیرات با گسترش صنعتی شدن جوامع در طی سال-های آتی افزایش محسوس‌تری خواهد داشت.

سپاسگزاری

با تشکر فراوان از خانم دکتر بخشی پور عضو هیات علمی دانشگاه بنگلور هند بابت راهنمایی بسیار مفید ایشان در زمینه روند انجام آزمایشات و خانم دکتر عزتیان کارمند سازمان هواشناسی استان اصفهان که اطلاعات بسیار ارزشمندی از وضعیت آلاینده‌های استان را به اینجانب عرضه داشتند.

۲- با دور شدن از مقادیر خنثی و افزایش یا کاهش میزان pH آب نفوذی، مقادیر حدود اتربرگ و ضریب نفوذپذیری خاک افزایش خواهند یافت. همچنین با افزایش مدت زمان نفوذ میزان این افزایش رشد قابل توجه‌تری خواهد داشت.

۳- با افزایش میزان آغشته شدن خاک به باران‌های اسیدی یا قلیایی میزان پوکی یا تخلخل خاک افزایش خواهد یافت که این امر به سبب تاثیرات این نوع آلودگی بر مواد اصلی تشکیل دهنده خاک و شستشوی پیوندهای خاک است. همچنین میزان افزایش تخلخل خاک یا افزایش نفوذپذیری با افزایش مدت زمان نفوذ روندی افزایشی خواهد داشت.

۴- افزایش فاصله میان ذرات رسی به عنوان علت اصلی بروز تغییر در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک سبب کاهش نیروهای جاذبه و اندروالسی که عامل اصلی نگهداری ذرات رس در کنار یکدیگر به شمار می‌روند خواهد شد.

علاوه بر این، این عامل با افزایش میزان آبشویی و نفوذ باران‌های اسیدی یا قلیایی تاثیرات مخرب‌تری بر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک خواهد داشت.

منابع

- بیگی، ح.، احمدی آسور، ا.، ۱۳۸۶. بهداشت هوا و روش‌های مبارزه با آلاینده‌های محیطی و صنعتی، انتشارات اندیشه رفیع.
- قدوسیان، م.، ۱۳۵۸. آلودگی هوا (منابع، اثرات و روش‌های کنترل)، انتشارات دانشگاه تهران.
- ابدی، ع.، ۱۳۷۱. بررسی آلاینده‌های هوای شهر تهران، واحد بهداشت محیط، وزارت بهداشت و درمان آموزش پزشکی.
- بانک اطلاعات اداره کل هواشناسی و محیط زیست استان اصفهان، ۱۳۸۷. ایستگاه هواشناسی شهرهای مبارکه، لنجان، شهرضا.
- سازمان هواشناسی کل استان اصفهان، ۱۳۹۳. بررسی آلودگی هوای شهر اصفهان با روش آنالیز آب باران. بانک اطلاعات اداره کل هواشناسی و محیط زیست استان اصفهان. ۴-۱۲۰.

- Bakhshipour Z, Asadi A, B. K. Huat B, Sridharan A, Kawasaki S, 2016, Effect of Acid Rain on Geotechnical Properties of Residual Soils, Soils and Foundations, 56(6):1008-1019.
- Gratchev I, Towhata I, 2011, Compressibility of Natural Soils Subjected to Long-Term Acidic Contamination, Environ Earth Sci, 64:193-200, DOI 10.1007/s12665-010-0838-2.
- Bakhshipour Z, Asadi A, B. K. Huat B, Sridharan A, 2016, Long-Term Intruding Effects of Acid Rain on Engineering Properties of Primary and Secondary Kaolinite Clays, Int. J. of Geosynth. And Ground Eng, 2:21, DOI 10.1007/s40891-016-0059-1.
- Du Y, Li Wei M, R. Reddy K, Liu Z, Jin F, 2014, Effect of Acid Rain PH on Leaching Behaviour of Cement Stabilized Lead-Contaminated Soil, Journal of Hazardous Materials, 271, 131-140.
- Kamon M, Ying C, KATSUM T, 1997, Effect of Acid Rain on PHysic-Chemical and Engineering Properties of Soils, Soils and Foundations, Vol.37 No.4, 23-32.
- ASTM Standard Test Method for physical properties of soil, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.

- Kamon, M., YING, C., Katsumi, T., 1997, Effect of acid rain on Physical-chemical and engineering properties of soils. *Soils Found.* 37, 4.
- ASTM D698-12e2, 2012, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D4318-17, 2017, Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D2434-68, 2006, Standard Test Method for Permeability, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D1883-16, 2016, Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D2166-16, 2016, Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- DU Y, Jiang N, Shen S, Jin F, 2012, Experimental Investigation of Influence of Acid Rain on Leaching and Hydraulic Characteristics of Cement-based Solidified/Stabilized Contaminated Clay, *Journal of Hazardous Materials*, 225- 226.
- Sunil B.M, Nayak S, Shrihari .S, 2006, Effect of PH on the geotechnical properties of laterite, *Engineering Geology*, 85, 197-203.
- Ola, S., 1978, Geotechnical properties and behaviour of some stabilized Nigerian lateritic soils. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 11 (2), 145-160.
- Mitchell K., 1993, *Fundamental of Soil Behavior*, p. 406: John Wiley and Sons.
- van Olphen H., 2005, *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*, New York: wiley.
- Wang, Y.-H., Siu, W.-K., 2006, Structure characteristics and mechanical properties of kaolinite soils. I. Surface charges and structural characteriza- tions. *Can. Geotech. J.* 43 (6), 587-600.
- Sridharan, A., El-Shafei, A., Miura, N., 2002, Mechanisms controlling the undrained strength behavior of remolded Ariake marine clays. *Mar. Georesources Geotechnol.* 20 (1), 21-50.
- Sridharan, A., Rao, S., Murthy, N., 1988, Liquid limit of kaolinitic soils. *Geotechnique* 38 (2), 191-198.
- Gratchev I, Towhata I, 2015, Compressibility of Soils Containing Kaolinite in Acidic Environments, *KSCE Journal of Civil Engineering*, DOI: 10.1007/s12205-015-0141-6.
- Gratchev, I.B., Sassa, K, 2009, Cyclic behavior of fine-grained soils at different PH values, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 135 (2), 271-279.