بررسی تأثیر نانوکائولینیت بر خصوصیات مقاومتی خاک لس سیلتی شهرستان کلاله (استان گلستان)

رسول یازرلو[۱]، امین جمشیدی*[۲]، سید عبدالقادر امان‌زاده[۳]، ابوذر اسفندیاری پور[٤]

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد گنبدکاوس، گروه مهندسی عمران،
۲. دانشگاه لرستان، گروه زمین‌شناسی،
۳. مؤسسهٔ آموزش عالی شمس گنبد کاوس، گروه مهندسی عمران،
٤. دانشگاه آزاداسلامی، واحد گرگان، گروه مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ۹۷/۱۲/۲۰ پذیرش ۹۸/۰۵/۰٦

چکیده

در این پژوهش تأثیر نانوکائولینیت بر خصوصیات مقاومتی خاک لس سیلتی بررسی شده است. برای این منظور نمونه‌ای خاک لس سیلتی از شهرستان کلاله استان گلستان تهیه و آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و برش مستقیم به‌منظور تعیین خصوصیات مقاومتی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی روی آن انجام شد. آزمایش‌ها برای نمونهٔ خاک در حالت طبیعی (بدون افزودن نانوکائولینیت) و نمونه‌های با ۰/۵، ۱ و ۱/۵، ۲، ۳ و ٤ درصد وزنی نانوکائولینیت انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نانوکائولیت تا ۲ درصد، باعث افزایش در مقاومت فشاری تک‌محوری از ۱/۱۲ به ۱/۱۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، مدول الاستیسیته از ۱۵/۸۹ به ۱۸/۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و چسبندگی از ۰/۰۹ به ۰/۱٦ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع شده است. با این حال افزودن بیش از ۲ درصد نانوکائولینیت باعث تغییرات محسوسی در خصوصیات مقاومتی نشده است. علاوه بر این افزایش نانوکائولینیت تأثیر محسوس افزایشی یا کاهشی روی زاویهٔ اصطکاک داخلی نداشته و مقدار آن با تغییرات نانوکائولینیت تقریباً ثابت مانده است. بر اساس نتایج حاصل می‌توان از افزودن نانوکائولینیت تا ۲ درصد وزنی برای بهبود خصوصیات مقاومتی خاک‌های لسی شهرستان کلاله استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: لس سیلتی، نانوکائولینیت، خصوصیات مقاومتی.

*نویسنده مسئول jamshidi.am@lu.ac.ir

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

مقدمه

خاک لس یک نهشته بادی همگن با جورشدگی خوب، متخلخل و به‌رنگ زرد نخودی کم‌رنگ و یا قهوه‌ایاست. اندازهٔ ذرات لس اغلب در حد سیلت و همراه کمی رس و گاهی ماسه است. این رسوبات با فقدان لایه‌بندی و جورشدگی یکنواخت، در صحرا شناخته می‌شوند. ترکیب لس‌ها عمدتاً کوارتز، فلدسپار، کلسیت، دولومیت، میکا، کانی‌های آهن و منیزیم‌دار و مواد رسیاست. علاوه بر سیمان رسی و کربنات کلسیم موجود در لس‌ها، ممکن است نمک‌های مختلف به‌صورت جامد و نیمه‌جامد روی سطح ذرات قرار گرفته باشند.

بیش از ٤٠٧ هزار هکتار از مساحت استان گلستان، یعنی بیش از ۳۲ درصد از کل سطح استان را انواع خاک لس با ویژگی‌های رسوب‌شناسی و ژئوتکنیکی متمایز پوشانده است [۱]. ساختار و اسکلت لس‌ها در نواحی مختلف، کاملاً با هم متفاوت است و تشخیص آن‌ها از یک‌دیگر به راحتی امکان‌پذیر است.

خاک لس از جمله خاک‌های مسئله‌دار محسوب شده که باید قبل از اجرای پروژه در آن، نسبت به اصلاح یا بهبود برخی از مشخصات ژئوتکنیکی آن اقدام کرد. در بسیاری از پروژه‌ها که در سطح استان گلستان اجرا شده به‌دلیل نبود توجه کافی به این موضوع با مشکلات فراوانی مواجه شده‌اند. این موضوع در برخی مناطق روستایی که روی این خاک احداث شده‌اند، نمود بیش‌تری داشته است. مخاطراتی مانند رمبندگی، فرونشست، واگرایی، فرسایش‌پذیری و زمین لغزش در لس‌های گلستان گزارش شده است. شکل‌های ۱ و ۲ فرسایش و ایجاد فروچاله در لس‌های استان گلستان را نشان می‌دهد. میان انواع مختلف لس‌ها در استان گلستان، لس‌های سیلتی با توجه به گستردگی زیاد آنها و قرار گرفتن بسیاری از روستاها روی آن، و گزارش‌های زیادی که از مخاطرات آن ثبت شده، باید بیش‌تر به آنها توجه شود.

یکی از روش‌های به‌سازی رفتار مکانیکی خاک و بهبود خواص ژئوتکنیکی آن به‌منظور کاهش مخاطرات زمین‌شناسی، استفاده از مواد افزودنی است. به‌علت ساختار ریزدانه خاک‌های لسی، کاربرد نانوذرات کارایی بیش‌تری را ایجاد می‌کند. نانو مواد به‌عنوان موادی تعریف می‌شوند که میکرو اختارهایی هستند که حداقل یک بعد آن‌ها در مقیاس نانومتر است. در

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

مقیاس نانو، خصوصیات الکترونیکی، مغناطیسی، اپتیکی و شیمیایی تغییر می‌یابد [۲]. مشخصه اصلی نانوذرات، اندازه کوچک، توزیع دانه‌بندی با یک سطح پایین آگلومراته شدن و قابلیت پخش زیاد است. این ویژگی‌های منحصر به‌فرد نانوذرات سبب شده است که فناوری نانو در عمده علوم وارد شده و بسیاری از مشکلات مربوط را حل کند. خوشبختانه علم مهندسی ژئوتکنیک نیز از این قاعده مثتثنی نمانده و در سال‌های اخیر تلاش‌های فراوانی برای کاربرد این فناوری نوین در شاخه‌های مختلف ژئوتکنیک شده است.

شکل ۱. تهدید و تخریب راه‌ها در اثر فرسایش لس‌های شهرستان کلاله، استان گلستان

شکل ۲. فروچاله‌های مسیر راه مراوه تپه بعد از سه راهی قرناوه، شهرستان، کلاله استان گلستان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

تاکنون تحقیقاتی در ارتباط با به‌سازی انواع خاک‌های مختلف با مواد افزودنی مانند سیمان، قیر، خاکستر، آهک و انواع مختلف نانو ذرات انجام شده است. امروزه استفاده از مواد افزودنی نانو ذرات به‌دلیل کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی نسبت به سایر مواد افزودنی کاربرد گسترده‌تری در بهبود کیفیت خاک‌های مسئله دار پیدا کرده است.

قاضی‌زاده گزارش کرده است که نانورس مونتموریلونیت اصلاح شده حدروانی را به‌طور چشم‌گیری افزایش داده است [۳]. از این‌رو، افزودن نانورس مونتموریلونیت اصلاح شده موجب افزایش دامنهٔ خمیری خاک شده است. هم‌چنین افزودن ۸ درصد وزنی مونتموریلونیت به خاک رسی، دامنهٔ خمیری خاک را حدود ٦٨ درصد افزایش داده است که در سدهای خاکی با هسته رسی بسیار مفید است. این محققان هم‌چنین مقادیر مختلف مونتموریلونیت بر مقاومت فشاری تک‌محوری خاک رسی را بررسی کردند که نتایج نشان‌دهندهٔ افزایش معنادار این پارامتر است. با افزایش مونتموریلونیت مقاومت فشاری تک‌محوری یک افزایش ۳٤/۲ درصد نسبت به حالت بدون افرودنی پیدا کرده است. هم‌چنین اثر افزودن نانوسیلیس بر مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مکعبی خاک رس که با سیمان تثبیت شده‌اند، بررسی شده است. نتایج بیان‌گر افزایش محسوس در مقاومت نمونه‌های مکعبی با مقادیر ۰/۵، ۱ و ۲ درصد نانو سیلیس است. خسروانی مقدم و قربانی [٤] به بررسی تأثیر افزودنی نانورس روی رس لای‌دار شهر رشت پرداخته و مشاهده کرده که با افزودن مقدار نانورس، حدخمیری خاک مورد نظر افزایش کمی داشته است ولی حد روانی و دامنه خمیری افزایش چشم‌گیری داشته است. هم‌چنین نتایج نشان داد که افزودن نانورس باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و افزایش مقاومت در برابر تغییر شکل خاک مورد نظر شده است. بهروز ساروکلائی، دربارهٔ افزودن نانو مواد دیگری از قبیل نانو سیلیس و نانو آلومینیوم روی خاک لس برای یافتن بهترین درصد اختلاط این مواد با خاک لس برای بهبود مقاومت فشاری تک‌محوری آن تحقیقاتی انجام داده است [۵]. قاضی‌زاده به بررسی رفتار هیدرومکانیکی و برشی خاک‌های فروریزشی (مطالعهٔ موردی خاک لس گرگان) با استفاده از دستگاه سه محوری با قابلیت اعمال و کنترل مکش ساختاری روی نمونه‌های بازسازی شده لس گرگان پرداخته است [٦]. نتایج این محقق نشان داد در اکثر موارد، نمونه‌ها رفتار مشابه با خاک‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

پیش تحکیم یافته از خود نشان داده‌اند و نمونه‌های بازسازی شده لس گرگان، قابلیت فروریزش زیادی دارند به‌طوری‌که تحت تأثیر دو عامل جذب آب و اعمال بار، فروریزش چشم‌گیری در آن‌ها مشاهده شده است. مجدی و همکاران به بررسی تأثیر نانوکائولینیت بر روی خصوصیات مهندسی خاک رسی CL پرداخته‌اند و به این نتیجه رسیدند که افزودن نانوکائولینیت باعث بهبود برخی از خصوصیات مهندسی خاک CL شده است [۷]. طبرسا تأثیر کانی رسی مونت موریلونیت روی تعدادی از خصوصیات ژئوتکنیکی یک خاک ریزدانه نرم را بررسی کرد [۸]. نتایج این محقق نشان داد که مونت موریلونیت تأثیر به‌سزایی در بهبود خصوصیات ژئوتکنیکی خاک مورد نظر دارد. تایپودا و همکاران به بررسی تأثیر نانوذرات دی کلرید کلسیم، اکسید کلسیم و نیترات پتاسیم روی خواص خاک پرداختند [۹]. نتایج آنها حاکی از افزایش مقاومت برشی، کاهش نفوذپذیری و کاهش تراکم‌پذیری تحت افزودن نانوذرات بوده است. طاها و طاها تأثیر افزودن انواع مختلف نانوذرات شامل نانو آلومینیوم، نانو مس و نانو رس را بر رفتار تورمی و انقباضی خاک‌های مختلف ریزدانه بررسی کردند [۱۰]. نتایج آنها نشان داد که افزودن نانو رس دارای تأثیر نامحسوسی روی مقادیر رطوبت بهینه و وزن مخصوص خشکبیشینهٔ نمونه‌ها بوده است و هم‌چنین با افزودن نانورس شاخص خمیری و حد انقباض خاک زیاد می‌شود. نتایج پژوهش‌های مجید و همکاران نشان داد که افزودن نانومواد به خاک منجر به کاهش حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری نمونه‌ها شده است [۱۱]. با توجه به اهمیت به‌سازی خاک‌های مسئله‌دار و لزوم تقویت آنها و ارزیابی رفتار آن ها ناشی از تثبیت و اصلاح خواص خاک، تأثیر افزودن نانومواد مختلف از قبیل نانوسیلیس، نانوآلومینیوم، نانورس و نانومس بر خواص ژئوتکنیکی خاک‌ها بررسی شده است. نتایج حاصل از این پژوهش‌ها حاکی از تأثیر بسیار مهم نانوذرات بر رفتار رمبندگی خاک‌ها بوده است [۱۲].

بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد که پژوهشی در ارتباط با تأثیر نانو کائولینیت بر روی خصوصیات مقاومتی خاک لس سیلتی استان گلستان انجام نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر نانوکائولینیت بر خصوصیات مقاومتی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی لس سیلتی شهرستان کلاله استان گلستان پرداخته شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

منشأ زمین‌شناسی لس‌های استان گلستان

محققان، برای منشأ لس‌های استان گلستان سه نظریه تپه‌های ساحلی دریای خزر، هوازدگی محلی و بیابان قره قوم مختلف بیان کرده‌اند. در نظریهٔ اول که اخروی و امینی بیان کردند، اعتقاد بر این است که بادهای گرم و خشک شمالی در زمین‌های دشت سیلابی رودخانه‌های اترک و جیحون در مدخل دریای خزر باعث حرکت ذرات به‌سمت شرق و جنوب شده است [۱۳].

اساس نظریهٔ دوم بر این استوار است که در اثر آب و هوای معتدل تا گرم و مرطوب، هوازدگی شیمیایی شدید در سنگ بستر باعث ایجاد خاک برجا شده و تحت تأثیر عوامل فرسایش و خزش تغییر شکل داده و به‌سوی ارتفاعات پایین‌تر و جلگه انتقال یافته‌اند [۱٤]. این دو نظریه به‌علت نداشتن دلایل علمی قانع‌کننده به‌وسیلهٔ بیش‌تر زمین‌شناسان و محققان پذیرفته نشده است ولی به‌صورت محلی آثار دو نظریه مذکور را می‌توان دید. بادرفت‌های حواشی تالاب‌های آلاگل و آلماگل و تپه ماهورهای شمال آققلا و جنوب اینچه‌برون، برخان‌های نسبتاً بزرگی هستند که با نظریه اول هم‌خوانی دارد و در واقع این‌ها را نمی‌توان لس نامید.

نظریهٔ سوم بنا به شواهد فراوان مورد قبول اکثریت است. ریبن معتقد است در پایان آخرین پس‌روی یخچال‌ها، رسوبات بادی از سرزمین ترکمنستان و ازبکستان از منطقه گیت تورگی قزاقستان نشأت گرفته (به نقل ۱۳) و پس از گذشتن از بیابان قره قوم ترکمنستان و ایجاد تپه‌های ماسه‌ای وسیعی روی آن سرزمین، مقادیر زیادی از ذرات ریز و سیلتی به‌طرف جنوب و جنوب‌غرب منتقل شدند. این طوفان پس از برخورد با ارتفاعات کپه داغ و دامنهٔ شمالی البرز در جنوب گرگان ته‌نشین شده است.

مواد و روش پژوهش

برای انجام پژوهش حاضر ابتدا نمونه خاک لس سیلتی از شهرستان کلاله استان گلستان تهیه شد. به نمونهٔ خاک ۰/۵، ۱ و ۱/۵، ۲، ۳ و ٤ درصد وزنی نانوکائولینیت اضافه شد. نمونه خاک در حالت طبیعی (بدون مواد افزودنی) و با ماده افزودنی برای آزمایش‌های مقاومت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

فشاری تک‌محوری و برش مستقیم آماده‌سازی شدند. خصوصیات مقاومتی نمونه خاک شامل مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته (بر اساس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری) و چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی (بر اساس آزمایش برش مستقیم) در حالت طبیعی و با مواد افزودنی تعیین شدند. داده‌های به‌دست آمده تجزیه و تحلیل شدند. تأثیر نانوکائولینت روی خصوصیات مقاومتی نمونهٔ خاک لس سیلتی بررسی شد.

مصالح استفاده شده

۱. نمونه خاک

خاک استفاده شده در این پژوهش از روستای تمر قره قوزی شهرستان کلاله در استان گلستان که در انواع خاک‌های لسی استان از نوع خاک لس سیلتی محسوب می‌شود، تهیه شده است. خاک استفاده شده براساس طبقه‌بندی روش متحد CL-ML (رس و لای با روانی کم) است. نمونهٔ خاک بررسی شده، در آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان گلستان مورد آزمایش‌های ژئوتکنیکی و تجزیهٔ XRF قرار گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و ژئوتکنیکی خاک بررسی شده

شاخص خمیری	حد خمیری (٪)	حد روانی (٪)	وزن مخصوص ذرات	ردهٔ خاک	رنگ ظاهری
۷	۱۹	۲۶	۲/۶۷	CL-ML	زرد نخودی
	زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)	چسبندگی (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	رطوبت بهینه (٪)	وزن واحد حجم خشک حداکثر (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقاومت فشاری تک محوری (کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب)
	۲۲/۸	۰/۰۹	۱۲/۱	۱/۹۷	۱/۱۲

جدول ۲. نتایج تجزیهٔ XRF روی نمونهٔ خاک لس سیلتی

ترکیب	SiO_2	Al_2O_3	CaO	L.O.I	Fe_2O_3	K_2O	SO_3	Na_2O	TiO_2	MnO	P_2O_5
٪	۵۰/۸۵	۱۳/۶۴	۹/۴۲	۹/۳۸	۴/۸۲	۴/۴۳	۴/۰۷	۱/۴۵	۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۱۹

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

۲. نانوکائولینیت

نانوکائولینیت استفاده شده با روش آسیاب گلوله‌ای و طی مکانیسم خردکردن تهیه شده است. پودر کائولینیت اولیه از کارخانه کاشی تبریز تهیه شده که به دلیل فرآوری شدن، درجهٔ خلوص خیلی زیاد (تقریباً ۹۸ درصد) داشت. نتایج تجزیهٔ XRF روی پودر نانوکائولینیت در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. نتایج تجزیهٔ XRF روی نمونه خاک لس سیلتی

MgO	CaO	K2O	L.O.I	Al_2O_3	SiO_2	Traces
۰/۶۳	۱/۳٤	۳/۵۵	۱۹/۸۰	۳۰/٤۳	٤۲/۲۲	F, Na, Mn

آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده روی نمونه خاک

۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

ابتدا نمونه خاک لس سیلتی بدون هیچ‌گونه افزودنی برای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و برش مستقیم آماده شد. سپس به نمونهٔ خاک ۰/۵، ۱ و ۱/۵، ۲، ۳ و ٤ درصد نانوکائولینیت برحسب وزن خشک خاک، اضافه و آزمایش‌ها، برای هر نمونه به‌صورت جداگانه انجام شد. برای آماده‌سازی نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها ابتدا مقادیر نانوکائولینیت برحسب درصدهای مذکور به نمونهٔ خاک اضافه و خاک با هم‌زن برقی با دور کند به‌مدت حداقل ۲۰ دقیقه هم‌زده شده تا نمونه همگن ایجاد شود سپس نمونه حداقل به‌مدت ٤۸ ساعت داخل محفظه‌های پلاستیکی برای انجام واکنش‌های شیمیایی قرار داده شد.

۲. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

منظور از این مقاومت تنش فشاری است که نمونه استوانه‌ای شکلی از خاک را در شرایط غیرمحصور تحت بارگذاری ساده به گسیختگی برساند. در این تعریف مقاومت فشاری تک‌محوری به‌صورت تنش فشاری بیشینه برای گسیختگی نمونه خاک تعریف می‌شود. در این پژوهش آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری مطابق با استاندارد (ASTM D2166) روی ۵ نمونه انجام شد [۱۵]. برای بازسازی نمونه‌های آزمایش تک‌محوری، ابتدا نمونه‌های خاک چنان‌که در قسمت قبلی عنوان شد آماده شدند و بلافاصله در قالب مخصوص

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

تک‌محوری با ابعاد ۳/۷۸ در ۷/۵٦ سانتی‌متر بازسازی شده‌اند. تلاش بسیاری به‌منظور ساختن نمونه‌هایی که از لحاظ وزن، تراکم و ارتفاع مشابه باشند صورت گرفت. بدین‌منظور خاک در ۵ لایه تقریباً مساوی در درون قالب ریخته شده و با چکش و سنبه در قالب متراکم شده است. در پایان ساختن نمونه و خارج‌کردن آن وزن نمونه کنترل شده و اگر اختلاف زیادی (بیش از ۵٪) با مقدار محاسبه شده داشته است آن نمونه خراب شده و دوباره ساخته شده است تا نمونهٔ مورد نظر بازسازی شود. در شکل ۳ یک نمونه از خاک تهیه شده و دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. آزمایش روی نمونه خاک بدون نانوکائولینیت و نمونه‌های با ۰/۵، ۱ و ۱/۵، ۲، ۳ و ٤ درصد کائولینیت انجام شد. قطر و طول نمونه‌ها به‌ترتیب ۳/۷۸ و ۷/۵٦ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. طی انجام آزمایش، بارگذاری تا لحظه گسیختگی نمونه‌ها ادامه داده شد و مقادیر تنش و کرنش نمونه‌ها در زمان‌های مختلف ثبت شد و نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ها ترسیم شد. در شکل‌های ٤ تا ۱۰ نمودارهای تنش-کرنش برای نمونه‌های مختلف خاک نمایش داده شده است. بر اساس این نمودارها، مقاومت فشاری تک‌محوری (qu) و مدول الاستیسیته (E) تعیین شدند که به‌طور خلاصه در جدول ٤ ارائه شده‌اند.

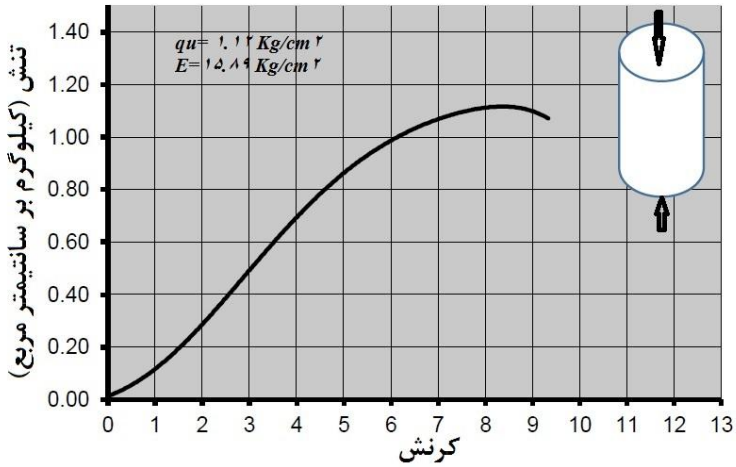
الف

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

ب

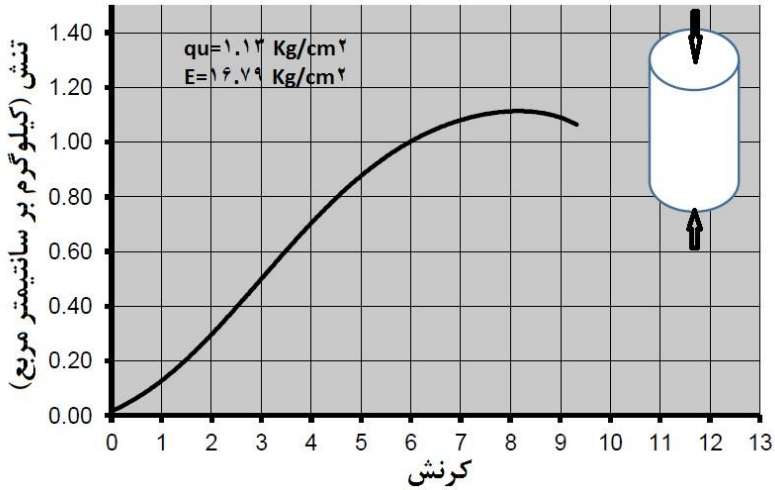
شکل ۳. الف)یکی از نمونه‌های آماده سازی شده برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، ب) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری



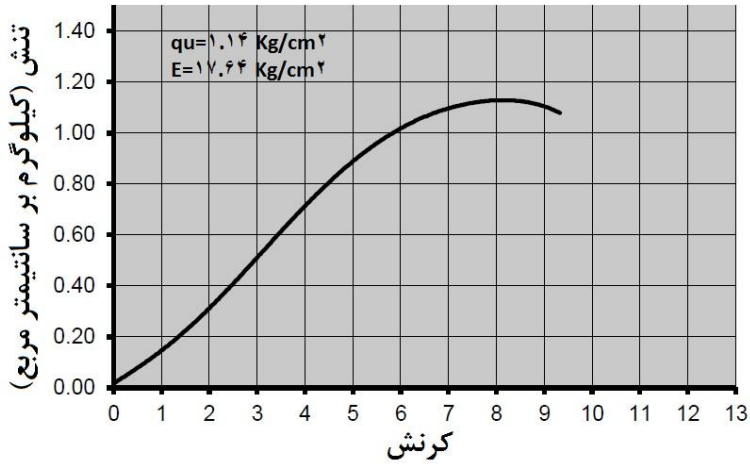
شکل ٤. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک بدون نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

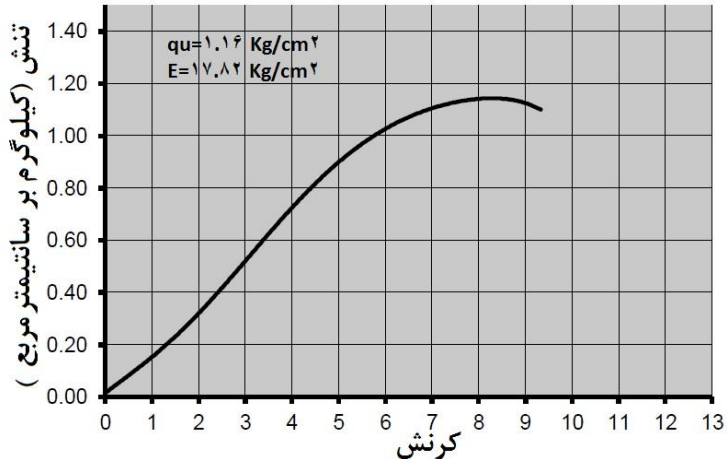


شکل ۵. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک با ۰/۵ درصد نانوکائولینیت

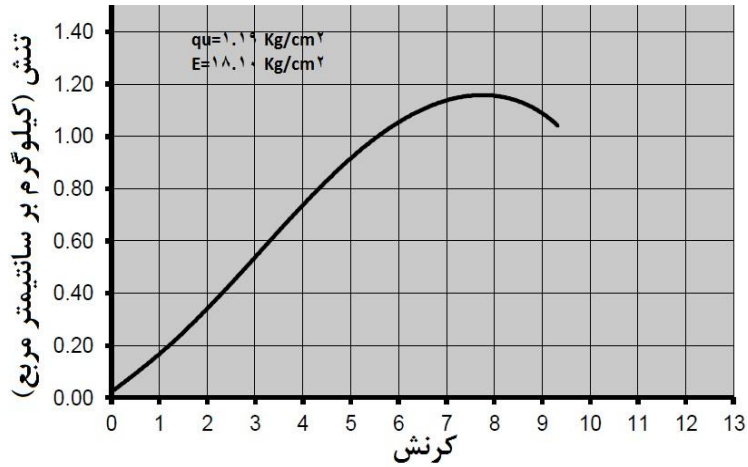


شکل ٦. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک با ۱ درصد نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]



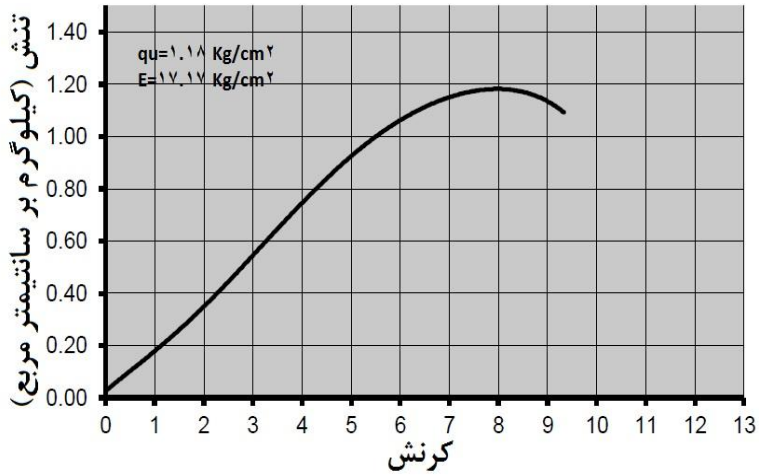
شکل ۷. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک با ۱/۵ درصد نانوکائولینیت



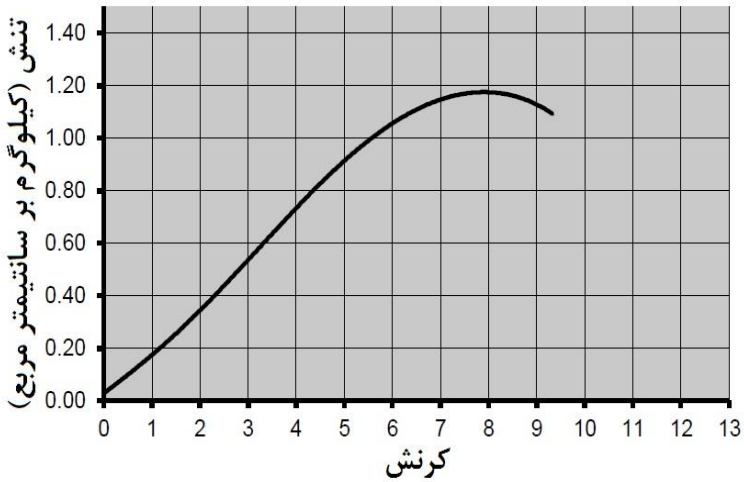
شکل ۸. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک با ۲ درصد نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]



شکل ۹. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک با ۳ درصد نانوکائولینیت



شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش در آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه خاک با ٤ درصد نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

۳. آزمایش برش مستقیم

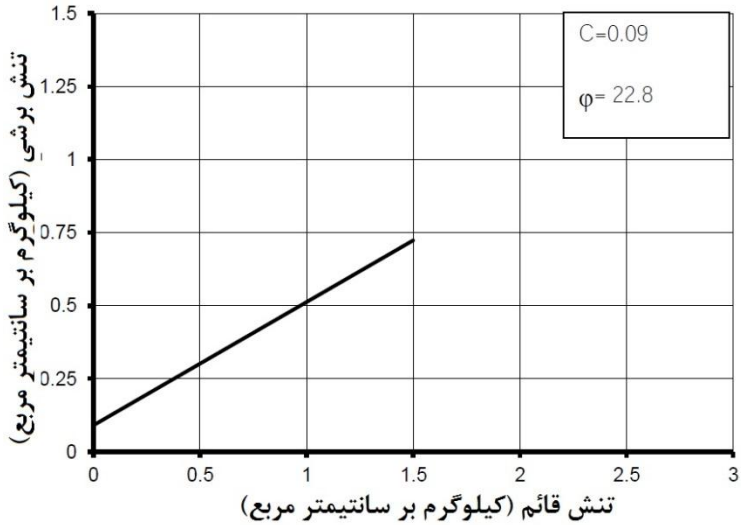
آزمایش برش مستقیم مطابق استاندارد (ASTM D3080) روی ۵ نمونه انجام شد [۱۵]. این استاندارد ارائه‌دهندهٔ روشی برای تعیین مقاومت برشی یک خاک در شرایط تحکیم یافته زهکشی شده (CD) در دستگاه برش مستقیم است. برای بازسازی نمونه‌های آزمایش برش مستقیم نمونه‌ها در قالب مخصوص آزمایش برش مستقیم با ابعاد ۲×۱۰×۱۰ سانتی‌متر بازسازی شده و با کمک نمونه درآور مخصوص، به داخل جعبه برش انتقال داده شده است. لازم به ذکر است که تلاش بسیاری به‌منظور یکنواخت بودن تودهٔ خاک و کنترل تراکم خاک درون قالب صورت گرفت. با توجه به این‌که در آزمایش برش مستقیم نمونه از وسط و در سطح افقی برش می‌خورد، سطح مشترک هر یک از لایه‌ها نباید از وسط قالب بگذرد و هم‌چنین پس از متراکم کردن هر لایه به‌منظور چفت و بست لایه‌ها، سطح هر لایه با کاردک خراش داده شد و لایهٔ بعدی ریخته و متراکم شده است.

آزمایش برش مستقیم با ایجاد تغییر شکل در نمونه خاک تحت شرایط کرنش کنترل شده روی یک صفحه از پیش تعیین شده (به واسطهٔ عمل‌کرد دستگاه برش) انجام می‌شود. عموماً سه یا تعداد بیش‌تری نمونه تحت بارگذاری‌های قائم متفاوت آزمایش می‌شود تا تأثیر این عامل روی مقاومت برشی و جابه‌جایی مشخص شده و در نتیجه پارامترهای مقاومتی پوش گسیختگی موهر تعیین می‌شود. در این پژوهش تعداد سه نمونه برای هر بار آزمایش، بازسازی شده و تحت بارگذاری‌های قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع قرار گرفته و آزمایش برش مستقیم روی آنها انجام شده است. شکل ۱۱ مرحلهٔ آماده‌سازی نمونه و دستگاه آزمایش برش مستقیم استفاده شده را نشان می‌دهد. نمودارهای تنش قائم-تنش برشی برای نمونه‌های خاک در شکل‌های ۱۲ تا ۱۸ نشان داده شده است که از این نمودارها مقدار چسبندگی (c) و زاویهٔ اصطکاک داخلی (ϕ) استخراج شده است. هم‌چنین در جدول ٤ پارامترهای چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه‌های خاک در حالت‌های بدون نانوکائولینیت و با درصدهای مختلف نانوکائولینیت ارائه شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

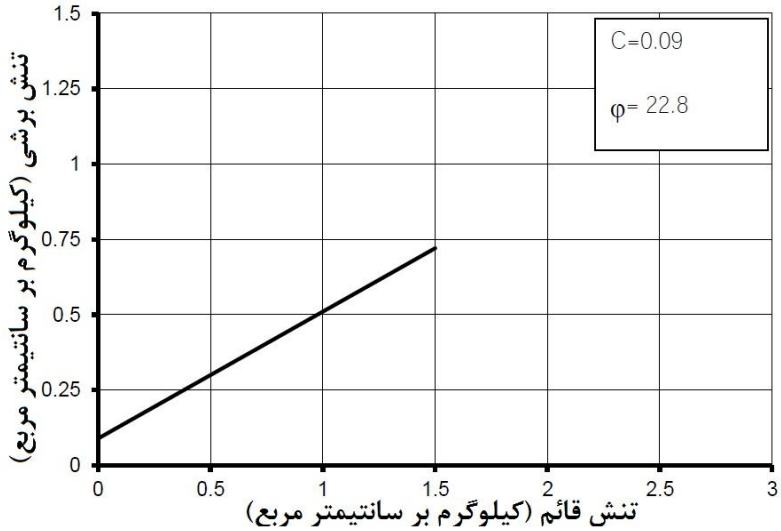
شکل ۱۱. الف)یکی از نمونه‌های آماده‌سازی شده برای آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری، ب) دستگاه آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری



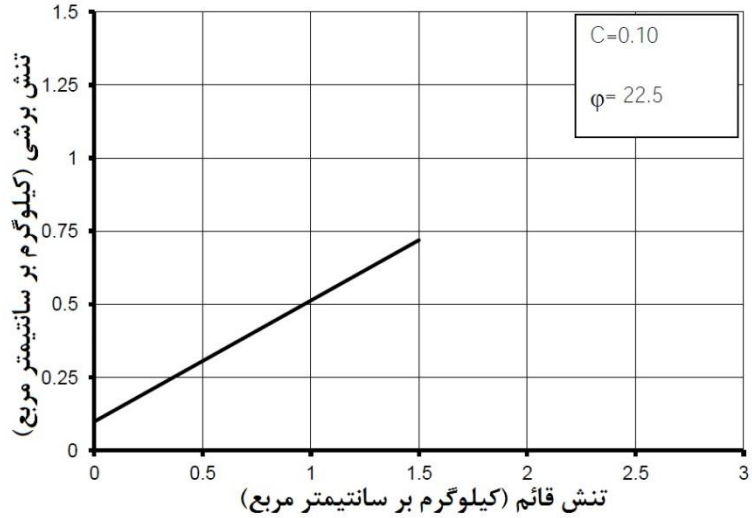
شکل ۱۲. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک بدون نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]



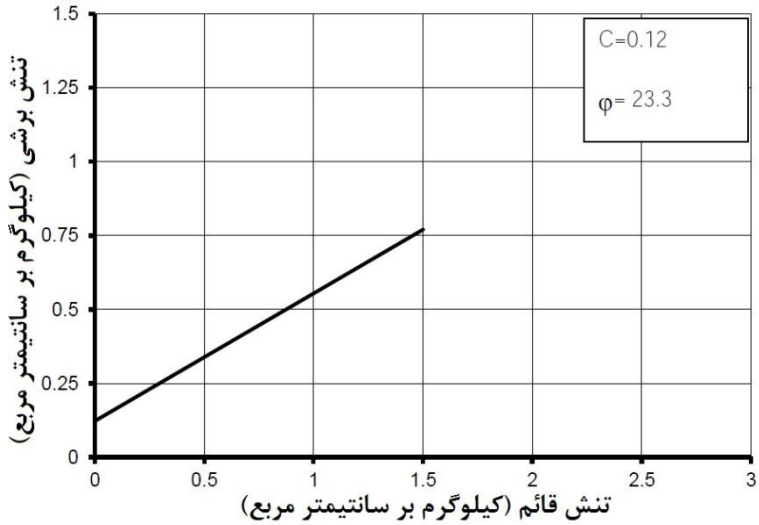
شکل ۱۳. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک با ۰/۵ درصد نانوکائولینیت



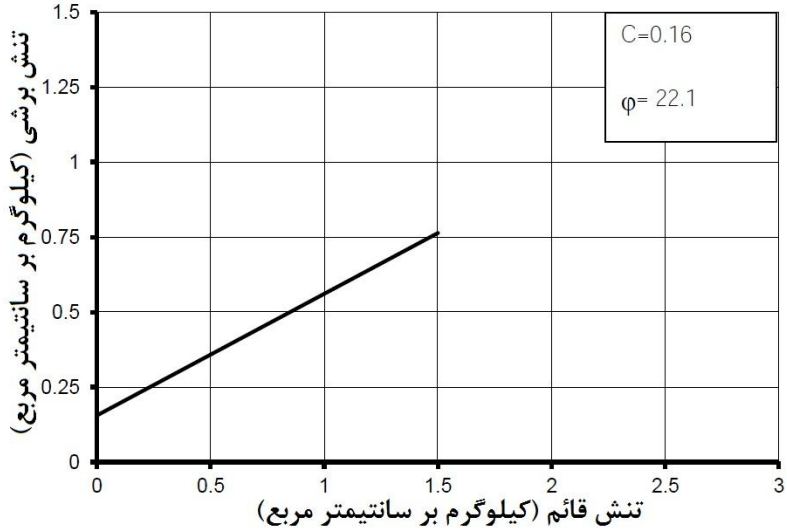
شکل ١٤. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک با ۱ درصد نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

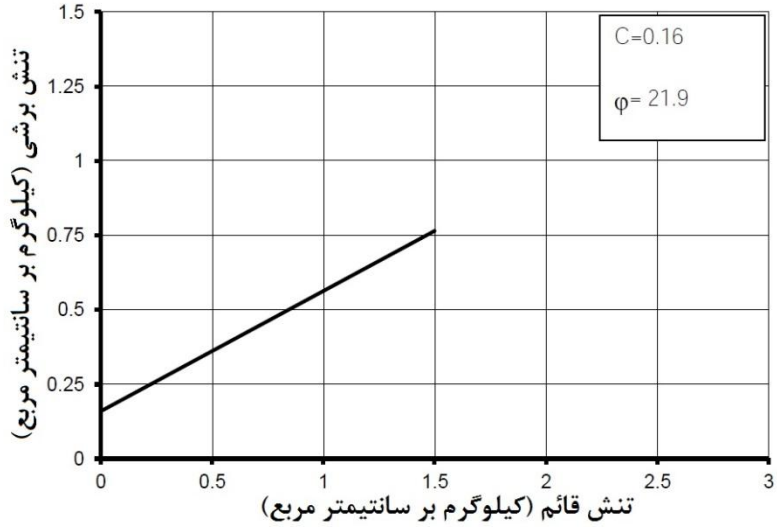


شکل ۱۵. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک با ۱/۵ درصد نانوکائولینیت

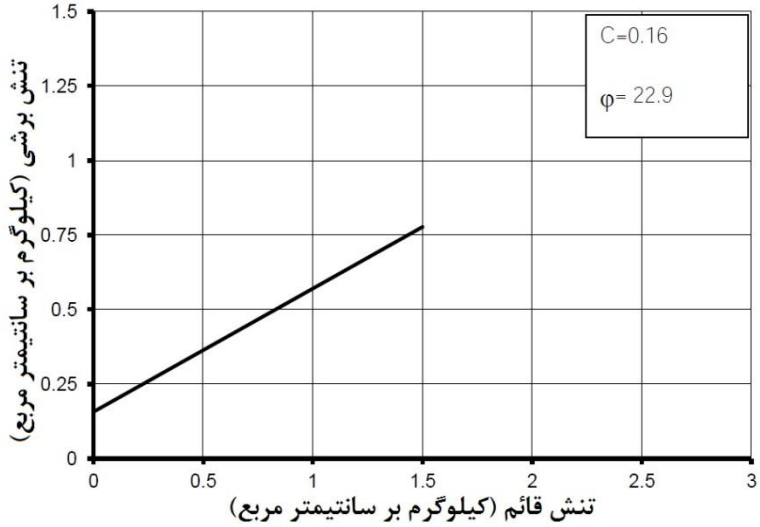


شکل ۱۶. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک با ۲ درصد نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]



شکل ۱۷. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک با ۳ درصد نانوکائولینیت



شکل ۱۸. نمودار نتایج آزمایش برش مستقیم برای نمونه خاک با ٤ درصد نانوکائولینیت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

جدول ٤. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری و برش مستقیم روی نمونه‌های خاک

نانو کائولینیت (٪)	آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری		آزمایش برش مستقیم	
	مقاومت فشاری تک محوری (Kg/cm^2)	مدول الاستیسیته (Kg/cm^2)	چسبندگی (Kg/cm^2)	زاویهٔ اصطکاک داخلی (درجه)
۰	**۱/۱۲** (۱/۱۲۳–۱/۱۱۲)	**۱۵/۸۹** (۱۶/۲۰–۱۵/۷۷)	**۰/۰۹** (۰/۰۹٤–۰/۰۸٦)	**۲۲/۸** (۲۲/۸٤–۲۲/۷۵)
۰/۵	**۱/۱۳** (۱/۱۳۲–۱/۱۲٦)	**۱٦/۷۹** (۱٦/۹۸–۱٦/٤۵)	**۰/۰۹** (۰/۰۹۹–۰/۰۹۵)	**۲۲/۸** (۲۲/۸۷–۲۲/۷٤)
۱	**۱/۱٤** (۱/۱٤٤–۱/۱۳٦)	**۱۷/٦٤** (۱۷/۷۳–۱۷/۳۵)	**۰/۱۰** (۰/۱۱٤–۰/۱۰۰)	**۲۲/۵** (۲۲/٦۲–۲۲/٤۵)
۱/۵	**۱/۱٦** (۱/۱۷۲–۱/۱۵۳)	**۱۷/۸۲** (۱۷/۹۱–۱۷/۷۵)	**۰/۱۲** (۰/۱۳۱–۰/۱۱۷)	**۲۲/۷** (۲۲/۷۷–۲۲/٦۳)
۲	**۱/۱۹** (۱/۱۹۸–۱/۱۷٦)	**۱۸/۱۰** (۱۸/۷۵–۱۷/۷۵)	**۰/۱٦** (۰/۱٦٤–۰/۱۵۱)	**۲۲/۵** (۲۲/٦۱–۲۲/٤٤)
۳	**۱/۱۸** (۱/۱۸۳–۱/۱۷۸)	**۱۷/۱۷** (۱۷/٦٤–۱۷/۰۰)	**۰/۱٦** (۰/۱٦٦–۰/۱۵۳)	**۲۲/٤** (۲۲/۵٤–۲۲/۳۰)
٤	**۱/۱۸** (۱/۱۸۷–۱/۱۷٦)	**۱٦/٤۹** (۱٦/۸۷–۱٦/۰۲)	**۰/۱٦** (۰/۱٦۲–۰/۱۵۱)	**۲۲/۹** (۲۳/۱۰–۲۲/۷۵)

* اعداد داخل پرانتز مقادیر حداقل و حداکثر یک ویژگی هستند.

بحث

۱. نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

شکل‌های ۱۹ و ۲۰ به‌ترتیب تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌ها را بر حسب درصدهای مختلف نانوکائولینیت مصرفی نشان می‌دهد چنان‌که از این شکل‌ها پیدا است مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته با افزایش مقدار نانوکائولینیت روند افزایشی داشته و بعد از ۲ درصد نانوکائولینیت، افزایش میزان نانو تأثیری زیادی بر مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته را نشان نمی‌دهد. مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک در حالت طبیعی (بدون نانوکائولینیت) به‌ترتیب برابر با ۱/۱۲ و ۱۵/۸۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع است و در حالتی که ۲ درصد نانوکائولینت به خاک افزوده شده است مقادیر این خصوصیات به حداکثر مقدار و به‌ترتیب برابر با ۱/۱۹ و ۱۸/۱۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع شده‌اند. با افزایش نانوکائولینیت از ۲ تا ٤ درصد یک روند کاهشی در مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته رخ داده که در مقدار ٤ درصد نانوکائولینیت مقادیر این خصوصیات به حداقل مقدار خود به‌ترتیب برابر با ۱/۱۸ و ۱٦/۹٤ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع رسیده‌اند. افزودن تا ۲ درصد نانوذرات منافذ ریز خاک را پر کرده و افزایش جذب سطحی آب سبب افزایش میزان چسبندگی ساختار خاک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته خاک شده است. علاوه بر این با توجه به اندازهٔ بسیار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

کوچک نانوکائولینیت، این مواد توانایی نفوذ به داخل نانوحفرات طبیعی موجود در ساختار خاک را داشته بنابراین این موضوع نیز می‌تواند از علل تغییر در مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته باشند. از این می‌توان نتیجه گرفت که مقدار نانوکائولینیت بهینه برای افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته ۲ درصد وزنی خاک است و کم‌تر یا بیش‌تر هر چند باعث تغییراتی در این خصوصیات می‌دهد ولی نتایج مطلوبی را نمی‌دهد.

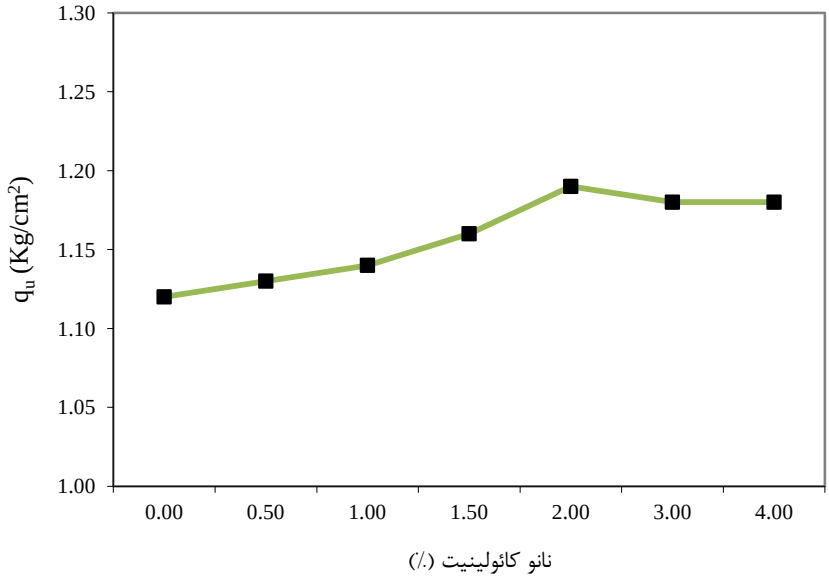
۲. نتایج آزمایش برش مستقیم

شکل ۲۱ تغییرات میزان چسبندگی را بر حسب درصد نانوکائولینیت برای نمونه‌ها نشان می‌دهد. در حالت طبیعی خاک (بدون نانوکائولینیت) مقدار چسبندگی برابر با ۰/۰۹ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و با افزایش میزان نانوکائولینت از ۰/۵ تا ۲ درصد مقدار چسبندگی یک روند افزایشی از خود نشان می‌دهد که به‌ترتیب برابر با ۰/۰۹ و ۰/۱٦ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب بوده است و از ۲ تا ٤ درصد، تغییرات چسبندگی ثابت و برابر با ۰/۱٦ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب بوده است. میزان چسبندگی از علت افزایش چسبندگی را می‌توان به این دلیل دانست که نانوذرات با جذب سطحی آب کمک زیادی به چسبندگی خاک کرده و چسبندگی نیز متاثر از واکنش‌های شیمیایی و بارالکتریکی سطحی ذرات است. در واقع با توجه به این‌که سطح ذرات نمونه خاک دارای بار الکتریکی منفی است؛ در مواجهه با آب مولکول‌های آن را هیدراته می‌کند و به‌صورت یونی در می‌آورد و با آب وارد واکنش می‌شود و پیوندهای یونی با آن تشکیل می‌دهد. افزایش نانوکائولینیت به خاک واکنش‌پذیری آن را با آب افزایش می‌دهد که این به‌نوبهٔ خود باعث افزایش پیوندهای یونی و در نتیجه افزایش چسبندگی می‌شود.

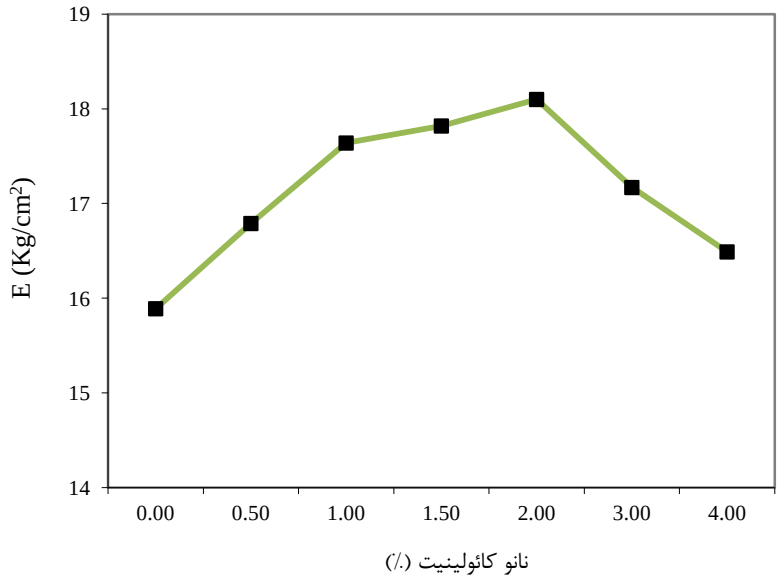
در شکل ۲۲ روند تغییرات نمونه خاک لس سیلتی با افزایش مقدار نانوکائولینیت را نشان می‌دهد. چنان‌که از این شکل مشاهده می‌شود افزودن نانوکائولینیت تأثیر زیادی بر زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک نگذاشته است و مقدار زاویهٔ اصطکاک داخلی در محدوده ۲۲ تا ۲۳ درجه ثابت مانده است. دلیل بی‌تأثیر بودن نانوکائولینیت روی زاویهٔ اصطکاک داخلی را این‌گونه می‌توان توضیح داد که شکل ذرات (گوشه‌دار بودن یا گردشده) کنترل‌کنندهٔ زاویهٔ اصطکاک داخلی است و برای افزایش آن باید ذرات به‌خوبی باهم قفل و بست شوند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

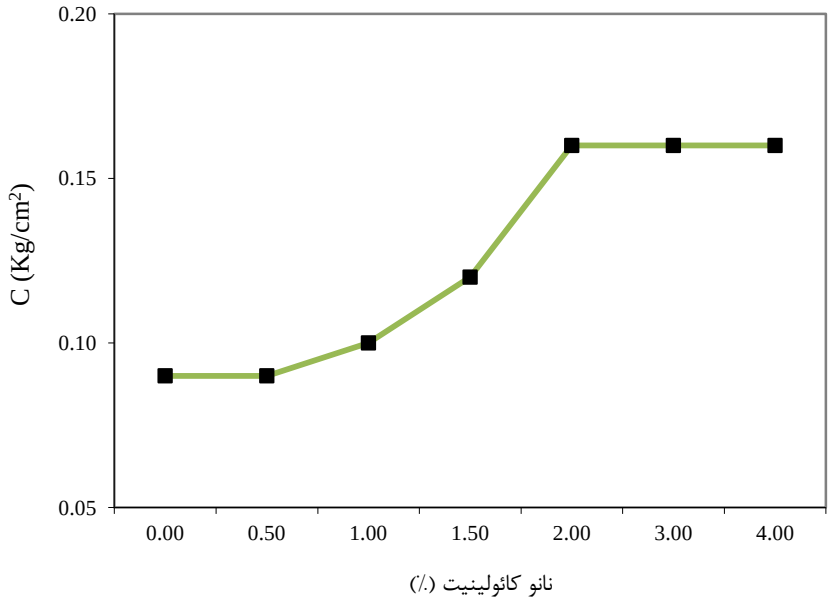


شکل ۱۹. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری با درصد کائولینیت افزوده شده به نمونهٔ خاک

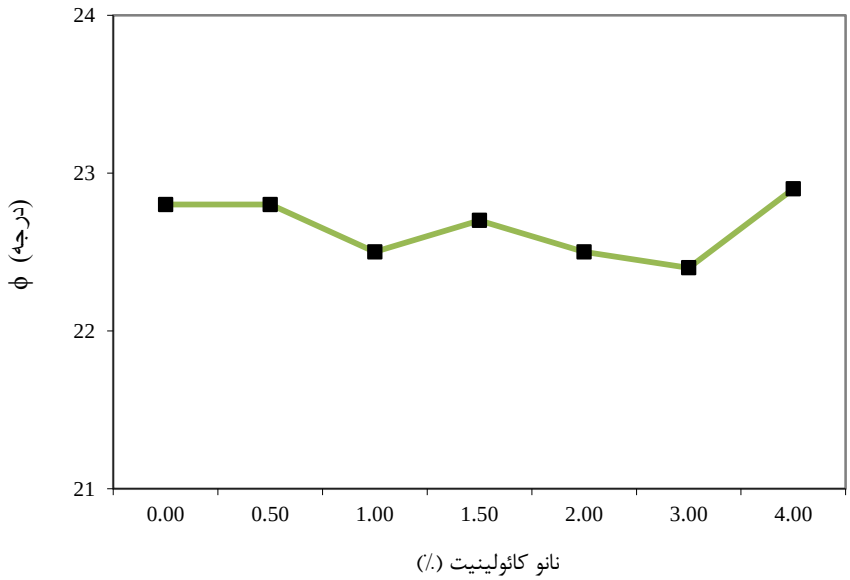


شکل ۲۰. تغییرات مدول الاستیسیته با درصد کائولینیت افزوده شده به نمونه خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]



شکل ۲۱. تغییرات چسبندگی با درصد کائولینیت افزوده شده به نمونهٔ خاک



شکل ۲۲. تغییرات زاویهٔ اصطکاک داخلی با درصد کائولینیت افزوده شده به نمونهٔ خاک

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر نانو کائولینیت روی خصوصیات مقاومتی یک نمونه خاک لس سیلتی از شهرستان کلاله در استان گلستان پرداخته شد و این نتایج به‌دست آمد:.

- نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری نشان می‌دهد که افزودن تا حد ۲ درصد وزنی نانوکائولینیت به خاک خشک، سبب افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته خاک لس سیلتی استان شده که این مورد را می‌توان به‌دلیل ایجاد قفل و بست مناسب بین ذرات نانو و ذرات خاک و افزایش چسبندگی دانست.
- نتایج آزمایش برش مستقیم نشان داد که افزودن نانوکائولینیت تا حد ۲ درصد وزنی به خاک خشک، سبب افزایش چسبندگی دانه‌های خاک و بالطبع افزایش مقاومت برشی خاک شده است. از آن‌جا ه منشأ چسبندگی در خاک‌های ریزدانه بیش‌تر از بارهای الکتریکی و پیوندهای شیمیایی دانه‌های موجود در آن‌ها به ویژه کانی‌های رسی است و هم‌چنین باتوجه به این حقیقت که نانوکائولینیت دارای سطح ویژه بالا و فعالیت زیاد در خاک است، وجود این ماده در خاک موجب تقویت پیوندهای شیمیایی موجود بین دانه‌های خاک شده و به این ترتیب با افزایش درصد آن به خاک، چسبندگی خاک افزایش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش میزان نانوکائولینیت تغییر چندانی در زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک لس‌سیلتی استان ایجاد نکرده است. لازم به ذکر است که نتایج حاصل برای خاک لس سیلتی شهرستان کلاله است و قابل تعمیم به سایر خاک‌های لسی استان گلستان نیست.

منابع

۱. رضایی ح.، "بررسی اثر تراکم دینامیکی و بارهای استاتیکی بر مقاومت برشی لس‌های استان گلستان". رسالهٔ دکتری رشته زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۲).

2. Zhang G., "Soil Nanoparticles and Their Influence on Engineering Properties of Soils", Advances in measurement and modeling of soil behavior, ASCE (2007).

۳. قاضی ح.، "بررسی تأثیر مصالح در ابعاد نانو بر خواص مهندسی-ژئوتکنیکی خاک"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۸۹.

٤. خسروانی ع.، قربانی ع.، "بررسی اثر نانورس بر خواص مهندسی خاک‌های چسبنده"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران (۱۳۹۰).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]

۵. به‌روزساروکلایی آ.، "بررسی ویژگی‌های رفتاری و مقاومتی خاک‌های لسی تثبیت شده با نانومواد، مطالعهٔ موردی لس گرگان"، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد دانشگاه صنعتی اصفهان دانشکدهٔ مهندسی عمران (۱۳۹۲).

٦. قاضی‌زاده ش.، "بررسی رفتار هیدرومکانیکی و برشی خاک‌های فروریزشی با استفاده از دستگاه سه‌محوری با قابلیت اعمال و کنترل مکش ساختاری، مطالعهٔ موردی لس گرگان"، پایان‌نامهٔ کارشناسی‌ارشد دانشگاه صنعتی شریف دانشکده مهندسی عمران (۱۳۹۲).

۷. مجدی م.، ارومیه‌ای ع.، نیکودل م. ر.، "بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک رسی با استفاده از نانو ذرات کائولینیت"، فصلنامهٔ علوم زمین ۱۰۹ (۱۳۹۷) ۲۲۸-۲۲۱.

۸. طبرسا ع.ر.، "تأثیر افزودن نانو رس روی رفتار ژئوتکنیکی خاهای ریزدانه نرم"، نشریهٔ زمین شناسی مهندسی ۱۱(۱۳۹٦) ۲٤٦-۲۲۵.

9. Taipodia J., Dutta J., Dey A. K., "Effect of nanoparticles on properties of soil", Proc of Indian Geotechnical Conference, December, Kochi (2011).

10. Taha M. R., Taha O. E., "Influence of nano-material on the expansive and shrinkage soil behavior", Journal of Nanoparticle Research Vol. 14(10) (2012) 1-13.

11. Majeed Z. H., Taha M. R., Jawad I. T., "Stabilization of soft soil using nanomaterils", Research Journal of Appiled Sience, Engineering and Technology Vol. 8 (4) (2014) 503-509.

12. Iranpour B., Haddad A., "The influence on nanomaterials on collapsible soil treatment", Engineering Geology Vol. 205 (2016) 40-53.

13. Okhravi, R. Amini, A., "Characteristics and Provenance of the Loess Deposits of the Gharatikan Watershed in Northeast Iran", Global and Planetary Change Vol. 28 (2001)11-22.

14. Pashaei, A., "Study of Chemical and Physical and Origin of Loess Deposits in Gorgan and Dasht Area", Earth Science Vol. 23 (1996) 67-78.

15. ASTM., "Annual Book of ASTM Standards", ASTM International, West Conshohocken (2007).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1399.14.3.6.8]