



ارزیابی تاثیر استفاده از نانوذرات آهن بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به فلز کادمیوم

میکائیل کاظم زاده، پژمان ذوقی، امیرعلی زاد*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۳۰
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

کلمات کلیدی:

آلودگی خاک
کادمیوم
نانوذرات آهن
صفر ظرفیتی
تثبیت
کائولینیت

خلاصه: امروزه آلودگی خاک‌ها و آب‌های زیرزمینی توسط آلاینده‌های سمی و خطرناک، به عنوان یک معضل زیست‌محیطی در گستره وسیعی مطرح شده است. آلوده‌شدن خاک‌ها به فلزات سنگین به‌ویژه کادمیوم علاوه بر آثار زیان‌بار بر سلامت انسان‌ها و اکولوژی زمین، باعث ایجاد تغییر در خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها می‌شود. روش‌های مختلفی برای احیاء خاک‌های آلوده به کادمیوم وجود دارند که یکی از این روش‌ها، تثبیت این فلز سمی در خاک توسط نانوذرات آهن صفر ظرفیتی است. هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر فلز سنگین کادمیوم بر برخی ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک با استفاده از آزمایش‌های حدود اتربرگ، مقاومت فشاری و تراکم و تثبیت این آلودگی در خاک و بررسی ویژگی‌های مذکور خاک تثبیت‌شده با استفاده از نانوذرات آهن است. به‌همین منظور، ابتدا نمونه‌های خاک پایه متشکل از ۶۵، ۶۰ و ۷۰٪ رس کائولینیت و به ترتیب ۳۵، ۴۰ و ۳۰٪ ماسه برای بررسی تاثیر کائولینیت در آزمایشگاه ساخته شد. برای تاثیر بررسی غلظت کادمیوم، نمونه‌های خاک پایه با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm کادمیوم نیترات آلوده شدند. در انتها برای تثبیت نمونه‌های خاک آلوده، نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به نمونه‌های مذکور اضافه گردید. نتایج نشان‌دهنده تاثیر بسیار بالای تغییر در مقدار کائولینیت و کادمیوم و وجود نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک است. با افزایش غلظت کادمیوم، میزان کادمیوم جذب‌شده توسط نانوذرات آهن به‌مقدار چشمگیری کاهش یافت. هم‌چنین، نتایج آزمایش‌های تک‌محوری انجام‌شده نشان داد که تنش تک‌محوری نمونه‌های با نانوذرات آهن به‌ترتیب ۴۵/۶، ۶۳، ۶۷/۱ و ۶۷/۷٪ در مقایسه با نمونه‌های مشابه آلوده به کادمیوم بدون نانوذرات آهن افزایش یافته است.

۱- مقدمه

خاک‌های آلوده مطرح شده است [۱۲]؛ این فرآیندها به طور گسترده‌ای برای از بین بردن آلودگی‌های آلی و یون‌های فلزات سنگین از آب و فاضلاب و خاک‌های آلوده مورد استفاده واقع شده‌اند [۱۳]. تاثیر استفاده از ذرات نانو بر خاک‌های آلوده با آلاینده‌های مختلف در پژوهش‌های مختلفی در گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. دو و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی کاهش و تثبیت کروم را در بقایای سنگ معدن با استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با کاهش pH از ۱۱/۷ تا ۷، غلظت کروم آبشویی شده در محدوده ۳۴۵-۳۵۸ میلی گرم بر لیتر قرار گرفت، یعنی بیش از ۹۰ درصد کروم محلول در بقایای معدنی شسته شد [۱۴]. آن و ژائو (۲۰۱۲) تثبیت آرسنیک را در خاک ماسه‌ای با استفاده از نانوذرات اکسید آهن- منگنز تثبیت شده با پلی ساکارید بررسی نمودند. نتایج نشان داد ظرفیت جذب نانوذرات پوشش یافته در مقایسه با نانوذرات بدون پوشش اختلاف قابل توجهی دارد، در عین حال استفاده از پوشش، ذرات را

خاک در بسیاری از سازه‌ها نقش اساسی و سهمی ویژه در اقتصاد پروژه در مرحله مطالعه، طراحی، ساختمان و نگهداری دارد و استفاده از خاک در اکثر پروژه‌های عمرانی اجتناب‌ناپذیر است. اگر خاک مورد استفاده شرایط لازم را برای احداث سازه از لحاظ پارامترهای مقاومتی و زیست‌محیطی نداشته باشد، یکی از راه‌های استفاده بهینه از خاک، اصلاح کردن و بهبود پارامترهای نامطلوب موجود در آن جهت احداث سازه است. برای بهبود و اصلاح خاک‌های آلوده از جنبه پارامترهای ژئوتکنیکی و مقاومتی روش‌های متفاوتی وجود دارد که در گذشته در پژوهش‌های مختلف مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند [۱-۱۱]. از آنجا که جداسازی فلزات سنگین از خاک و رسوبات دشوار و هزینه‌بر است، جذب سطحی به وسیله ذرات نانو و یا تثبیت فلزات سنگین با ذرات نانو در خاک به‌عنوان روشی نوین جهت تثبیت

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: a.zad@iauctb.ac.ir



زمان واکنش تاثیر قابل توجهی بر جذب کادمیوم دارند و حدود ۰.۸٪ از کادمیوم را می توان از خاک ها حذف کرد [۲۲]. چن و همکاران (۲۰۱۹) برای بررسی اثر مقادیر مختلف نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بر اصلاح خاک رسی آلوده به سرب مجموعه ای از آزمایشات برش پره، سه محوری و ادنومتر را انجام دادند. نتایج آزمایش ها نشان داد که شاخص پلاستیسیته به تدریج با افزایش نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، کاهش می یابد [۲۳]. واساروسوس و همکاران (۲۰۲۰) در مطالعه ای تثبیت کادمیوم، مس، نیکل و سرب در نمونه های خاک آلوده مصنوعی با استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی و ماندگاری آنها در یک دوره یک ساله را مورد ارزیابی و مقایسه قرار دادند. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که بیشترین بازده تثبیت برای فلز مس بود [۲۴]. گو و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی اثر و مکانیسم نانوذرات آهن صفر ظرفیتی سولفید شده بر روی جدا کردن کادمیوم از خاک آلوده را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که pH تاثیر ناچیزی بر تثبیت کادمیوم در خاک دارد [۲۵]. لی و همکاران (۲۰۲۱) حذف آرسنیک از خاک لوم رسی ماسه ای (Sandy clay loam) اصلاح شده با آهن صفر ظرفیتی همراه با روش جداسازی مغناطیسی خشک مورد بررسی قرار دادند. مشخص شد که ۲۰٪ از کل آرسنیک را می توان از خاک اصلاح شده با میزان ۲٪ نانوذرات آهن صفر ظرفیتی جدا کرد [۲۶]. باراگانو و همکاران (۲۰۲۱) جداسازی مغناطیسی مرطوب آرسنیک را از خاک که با نانوذرات آهن محور اصلاح شده بود، بررسی کردند. نویسندگان به این نتیجه رسیدند که اصلاح خاک با نانو ذرات، رفع و جداسازی آرسنیک را با جداسازی مغناطیسی مرطوب در میدان مغناطیسی پایین، افزایش می دهد [۲۷]. صادقی و همکاران (۲۰۲۱) در پژوهشی به بررسی اثر مدت زمان، دما و رطوبت بر اصلاح خاک آلوده به کروم با نانوذرات آهن صفر ظرفیتی پرداختند. نتایج نشان داد که منابع نانو قادر به حذف قابل توجهی (بیش از ۹۰٪) کروم از خاک آلوده بودند [۲۸]. دانیلا و جانوسویس (۲۰۲۲) در پژوهشی به بررسی میزان تاثیر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بر حذف و پاکسازی فلزهای مس، کادمیوم و نیکل از خاک ماسه ای آلوده پرداختند. نتایج نشان داد که نانوذرات آهن صفر ظرفیتی میزان فلزات موجود در فرم قابل تبادل را کاهش داده است [۲۹]. علیپور و همکاران (۲۰۲۲) تثبیت خاک مارل تبریز با استفاده از نانوسیلیکا و نانوالومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که نانوسیلیکا تاثیر بیشتر در افزایش CBR نمونه ها در مقایسه با نانوالومینیوم داشت [۳۰]. هرش و همکاران (۲۰۲۳) در یک مطالعه مروری، مطالعات گذشته در زمینه استفاده از نانوذرات مختلف در زمینه ژئوتکنیک را بررسی

قابل انتقال در خاک و قادر به انتشار کامل در آب می نماید [۱۵]. سینگ و همکاران (۲۰۱۲) برای بررسی اثر استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی در کاهش کروم ۵ ظرفیتی از خاک آلوده، نانوذرات آهن در غلظت های ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱۰ و ۰/۱۵ گرم در لیتر به خاک آلوده را مورد استفاده قرار دادند. به طور کلی نتایج نشان داد که غلظت ۰/۱۰ گرم بر لیتر بهترین کارایی را در حذف کروم داشت [۱۶]. ریحانی تبار و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهشی اثر چند جاذب آهنی را بر تثبیت کروم در خاک ماسه ای بررسی کردند و بر اساس نتایج این پژوهش، راندمان جاذب های مورد استفاده جهت تثبیت کروم بدین ترتیب بدست آمد: نانوذرات آهن صفر پوشش یافته با نشاسته < نانوذرات آهن صفر بدون پوشش < نانوذرات مگنتیت < میکرو ذرات آهن صفر < میکرو ذرات مگنتیت [۱۷]. پاکباز و علیپور (۲۰۱۲) تاثیر مدت زمان عمل آوری و درصد وزنی سیمان بر مشخصات ژئوتکنیکی خاک رسی تثبیت یافته با سیمان را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که وزن مخصوص حد روانی خاک با افزایش میزان سیمان، افزایش یافته بود [۱۸]. نصیری و همکارانش در سال ۲۰۱۳ در مطالعه ای جداسازی کادمیوم از خاک با استفاده از نانوذرات تثبیت شده ی آهن صفر مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که جداسازی کادمیوم از محلول آبی توسط نانوذرات آهن صفر با غلظت جذب کننده رابطه مستقیم و با غلظت اولیه ی کادمیوم رابطه عکس دارد [۱۹]. بوته و همکاران (۲۰۱۸) با تلفیق روش نانوذرات آهن صفر ظرفیتی و شستشوی مغناطیسی خاک، به بررسی رفتار خاک های آلوده به فلزات سنگین مختلف (مانند سرب و مس) پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن نانو ذرات آهن به خاک به ویژه برای ذرات بزرگ تر (۱۲۵ - ۲۰۰۰ میکرومتر) باعث بهبود راندمان شستشوی خاک شد [۲۰]. محمدیون و همکاران (۲۰۱۸) تاثیر استفاده از نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی تثبیت یافته با پلی اکریلیک اسید بر مخلوطی از خاک ماسه ۱۶۱ فیروزکوه و رس کائولینیت مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که بیشترین میزان حذف (۱۰۰٪) کادمیم در شرایط زیر بدست آمد: غلظت نانوسیال = ۵۰۰ ppm، pH=۶/۵، زمان تماس = ۲۴ ساعت و نسبت جرم خاک آلوده (gr) به حجم نانوسیال (mL) = ۱:۱۵۰ [۲۱]. تانگ و همکاران (۲۰۱۹) در یک مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از آزمایش های (XRD) X-ray diffraction patterns و (SEM) im-scanning electron microscope ages به بررسی تاثیر استفاده از نانوذرات آهن صفر ظرفیتی بر روی خاک آلوده به کادمیم پرداختند. نتایج نشان می دهد که مقدار نانوذرات آهن صفر ظرفیتی، سطح غلظت اولیه و

جدول ۱. مشخصات فیزیکی خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش

Table 1. Physical characteristics of sandy soil used in this research

ویژگی	چگالی ویژه	ضریب یکنواختی	نفوذپذیری (m/s)	رطوبت بهینه (%)	وزن خشک حداکثر (kN/m ³)
مقدار	۲/۶۴	۱/۵۹	۵×۱۰ ^{-۵}	۱۲/۶	۱۶

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاک ماسه‌ای مورد استفاده در این پژوهش بر اساس داده‌های XRF

Table 2. Chemical characteristics of sandy soil used in this research based on XRF data

فرمول کانی	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	L.O.I ¹
مقدار	۹۷/۵ %	۰/۸۵ %	۰/۹۵ %	۰/۱۹ %	۰/۲۷ %	۰/۲۴ %	۰/۱۰ %

¹ Loss on Ignition

۲- مواد و مصالح

خاک مورد استفاده در این پژوهش ترکیبی از ماسه و رس کائولینیت می باشد. ماسه مورد استفاده در این پژوهش ماسه شکسته شماره ۱۶۱ شرکت تأمین ماسه ریخته گری منطقه فیروزکوه است که ماسه‌ای سیلیسی با دانه بندی یکنواخت است. مشخصات فیزیکی ماسه مورد استفاده در جدول ۱ و مشخصات شیمیایی به دست آمده از آزمایش XRF در جدول ۲ ارائه شده است. خاک رس مورد استفاده در این پژوهش خاک کائولینیت^۱ مربوط به شرکت صنایع خاک چینی ایران با کد ZMK2 است. کانی کائولین دارای نفوذپذیری بیشتری نسبت به سایر کانی‌های رسی است. همچنین پتانسیل دسترسی نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی به آلاینده کادمیوم در خاک حاوی کائولینیت بیشتر از سایر کانی‌های رسی است؛ زیرا کانی‌های دیگر دارای لایه مضاعف بزرگتری نسبت به کائولینیت هستند و در نتیجه قابلیت جذب کادمیوم بیشتری را دارند. بر روی خاک رس مورد استفاده آزمایشات XRF و XRD انجام گرفت که نتایج آزمایشات فوق در جدول ۳ و ۴ ارائه شده است. همچنین مشخصات فیزیکی این خاک در جدول ۵ ارائه شده است.

کردند و بیان داشتند که نانوذرات آهن و نانوذرات هیدراته آهن، حدود ۵۰٪ میزان آلودگی را در خاک‌های آلوده به گازوئیل کاهش می‌دهند [۳۱]. تاکنون مطالعات بسیاری در ارتباط با تثبیت فلزات سنگین با استفاده از نانوذرات مختلف انجام شده است؛ اما در میان پژوهش‌های انجام شده گذشته، تاثیر استفاده از نانوذرات آهن بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌های آلوده به فلز سنگین کادمیوم به میزان محدودی بررسی شده است. از این رو در این پژوهش، به بررسی تثبیت خاک‌های تشکیل شده از کائولینیت و ماسه آلوده به فلز کادمیوم با استفاده از نانوذرات آهن پرداخته شد. تاثیر غلظت کادمیوم به عنوان آلاینده و میزان کائولینیت موجود در خاک بررسی خواهد شد. در این راستا، نمونه‌های خاک با درصد کائولینیت مختلف با غلظت‌های مختلف کادمیوم (۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm) آلوده گردید. سپس نمونه‌های آلوده به کادمیوم با استفاده از نانوذرات آهن تثبیت خواهند شد. در نهایت، بر روی نمونه‌های ساخته شده آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و تک‌محوری انجام شد تا تاثیر استفاده از ذرات نانو بر پارامترهای ژئوتکنیکی خاک آلوده به کادمیوم مورد مطالعه قرار گیرد.

1 Kaolinite (Al₂Si₂O₅(OH)₄)

جدول ۳. آنالیز شیمیایی خاک رس مورد استفاده بر اساس داده‌های XRF

Table 3. Chemical analysis of used clayey soil based on XRF data

L.O.I	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	فرمول کانی
۰/۱±۰/۰۵	۰/۳±۰/۰۰۵	۰/۳۵±۰/۰۰۵	۰/۴±۰/۰۰۵	۱/۵±۰/۰/۲	۰/۰۴±۰/۰/۰۱	۰/۴۵±۰/۰/۰۵	۱±۰/۱۵	۱±۰/۷۴	مقدار

جدول ۴. آنالیز شیمیایی خاک رس مورد استفاده بر اساس XRD

Table 4. Chemical analysis of used clayey soil based on XRD

سایر	کلسیت	کوارتز	کائولینیت	نام کانی
۰/۱±۰/۰۴	۰/۵±۰/۰۳	۰/۲±۰/۰۵۲	۰/۲±۰/۰۴۱	مقدار

جدول ۵. مشخصات فیزیکی خاک رس مورد استفاده در این پژوهش

Table 5. Physical characteristics of clayey soil used in this research

pH	رطوبت بهینه (%)	چگالی خشک حداکثر (g/cm ³)	شاخص خمیری (%)	حد روانی (%)	حد خمیری (%)	چگالی ویژه	ویژگی
۹/۲۶	۲۱	۱/۶۹	۱۹	۴۵	۲۶	۲/۵۹	مقدار

جدول ۶. آنالیز شیمیایی کادمیوم مورد استفاده

Table 6. Chemical analysis of used cadmium

نام ترکیب	نیتрат کادمیوم	کلرید	سولفات	کلسیم	مس	آهن	سدیم
مقدار	$\geq 99\%$	$\leq 0.001\%$	$\leq 0.002\%$	$\leq 0.005\%$	$\leq 0.001\%$	$\leq 0.001\%$	$\leq 0.005\%$

آزمایش فوق باید در شرایط خلأ انجام شود تا مانع از ورود گاز اکسیژن به داخل محلول شود؛ زیرا اکسیژن موجب اکسید شدن نانو ذرات آهن سنتز شده می‌گردد که سبب کاهش کارایی این ذرات می‌شود. برای خشک کردن نانو ذرات آهن سنتز شده از روش‌های مختلفی استفاده شد که در این روش‌ها، نانو ذرات اکسید شده و به رنگ قهوه‌ای تبدیل گشتند. در نهایت، روش مناسب برای خشک کردن آن‌ها به این صورت بود که نخست فاز مایع بالایی موجود در ظرف محتوی نانو ذرات را توسط پیپت خارج می‌گردد تا کم‌ترین مقدار مایع در آن موجود باشد. سپس ظرف محتوی محلول حاوی نانوذرات را به مدت ۲۴ ساعت تحت شرایط خلأ در داخل یک مکعب شیشه‌ای قرار داده شد تا در دمای محیط خشک شود. در نهایت نانو ذرات تولیدی به صورت ذرات بسیار ریز سیاه رنگ در ته ظرف تشکیل می‌گردد. در نهایت، برای استفاده از نانوذرات به عنوان جاذب در خاک باید آن را به شکل سوسپانسیون (به حالت تعلیق) در آورده و سپس با خاک آلوده ترکیب کرد [۳۳، ۳۴]. برای تهیه محلول تثبیت شده نانو، مقدار مشخصی از نانوذره آهن صفر ظرفیتی، کربوکسی متیل سلولز (CMC) و آب مقطر ترکیب شد و برای یک ساعت بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شد تا برای استفاده آماده شود.

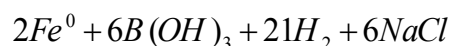
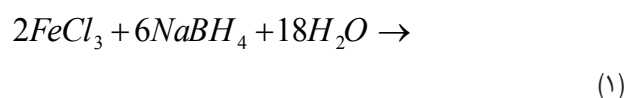
۳- آماده سازی نمونه ها و آزمایش های انجام شده

به منظور بررسی تأثیر میزان رس موجود در خاک بر روی پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، خاک کائولینیت با سه درصد وزنی ۶۰٪، ۶۵٪ و ۷۰٪ با خاک ماسه‌ای با صورت خشک در دمای اتاق مخلوط گشته است.

به منظور آماده سازی نمونه های خاک آلوده به کادمیوم، محلول مادری

در این پژوهش از ترکیب نیترات کادمیوم^۱ به منظور آلوده سازی خاک استفاده شده است. مشخصات نیترات کادمیوم مورد استفاده در جدول ۶ ارائه شده است.

در این پژوهش برای تهیه نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی، از روش کاهش شیمیایی فریک کلرید^۲ توسط سدیم بوروهیدرید^۳ در شرایط خلأ استفاده می‌شود [۳۳]. برای ساخت محلول ۰/۱ مولار NaOH، مقدار ۲ گرم از آن را در ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر دی‌یونیزه حل شد. سپس ۳/۰۲۶۵ گرم سدیم بوروهیدرید به ۵۰۰ میلی‌لیتر از محلول ۰/۱ مولار سود اضافه گردید (۰/۱۶ مولار سدیم بوروهیدرید در ۰/۱ مولار سود). سپس، این محلول به صورت قطره قطره به محلولی که از اضافه کردن ۱۳/۵۱۵ گرم فریک کلرید هگزا هیدراته^۴ به محلول ۱ درصد وزنی نشاسته (محلول ۰/۱ مولار فریک کلرید هگزا هیدراته در محلول ۱ درصد وزنی نشاسته) تهیه شده بود، اضافه شد. این اضافه شدن در حضور یک همزن مغناطیسی که بدون جرقه الکتریکی است، استفاده می‌شود؛ زیرا در حین آزمایش گاز هیدروژن با شدت زیادی آزاد می‌شود که در صورت جرقه باعث انفجار می‌گردد. پس از ۳۰ دقیقه انجام این آزمایش، فریک کلرید احیا گشته و ذرات سیاه رنگ نانو ذرات آهن صفر ظرفیتی مطابق معادله زیر تشکیل می‌گردد:



- 1 Cadmium nitrate (Cd(NO₃)₂)
- 2 Ferric Chloride (FeCl₃)
- 3 Sodium borohydride (NaBH₄)
- 4 Ferric Chloride Hexahydrate (FeCl₃6H₂O)



(ب)



(الف)

شکل ۱. مخلوط کردن نمونه‌ها با استفاده از دستگاه همزن مغناطیسی، (الف) نمونه‌های آلوده شده به کادمیوم، (ب) محلول نانو ذره تثبیت شده با CMC

Fig. 1. Mixing samples using a magnetic stirrer

ظرفیتی و CMC که حاوی میزان ۴ درصد وزنی خاک، نانوذره است به خاک‌های آلوده اضافه شده و بعد از مدت ۲ ساعت روی همزن مغناطیسی در شرایط آزمایشگاهی به مدت ۲۴ ساعت نگهداری شد؛ همچنین به منظور برآورد pH مورد نظر (۷/۰۷) از اسید HNO_3 و باز NaOH استفاده شد. بعد از آن نمونه‌ها در آون گذاشته شد تا به صورت کامل خشک شوند. در نهایت بر روی کلیه نمونه‌ها آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم و تک محوری بر اساس استانداردهای ارائه شده در جدول ۸ انجام گردید. هم چنین، به منظور اندازه‌گیری غلظت قابل جذب کادمیوم در خاک نمونه‌های تهیه شده، آزمایش جذب اتمی به روش استخراج با EDTA^1 استفاده شد. در این روش به خاک‌های ۵ گرمی آلوده شده به کادمیوم، ۵۰ میلی‌متر محلول ۰/۱ مولار EDTA اضافه گردیده و به مدت یک ساعت روی همزن مغناطیسی قرار داده. در نهایت پس از عبور دادن از کاغذ صافی واتمن ۴۲، از محلول استخراج شده به منظور اندازه‌گیری مقدار کادمیوم جذب نشده با دستگاه جذب اتمی استفاده شد.

با حل کردن ۰/۱۴ گرم از کادمیوم نیترات حاوی ۴ آب در ۱ لیتر آب مقطر ساخته شد و مقادیر ۱، ۲، ۴ و ۶ سی‌سی از این محلول که در ۵ گرم خاک به ترتیب به اندازه ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm کادمیوم به عنوان آلودگی اضافه می‌کند، به صورت جداگانه به هر سه ترکیب خاک K60، K65 و K70 اضافه گردید و به مدت ۴۸ ساعت توسط دستگاه همزن مغناطیسی با سرعت ثابت هم زده شد تا رطوبت و آلودگی در خاک به طور یکنواخت پخش شود. در شکل ۱، تصویری از نمونه خاک آلوده شده به کادمیوم و نانوذرات تثبیت‌شده با CMC قرارداده‌شده بر روی همزن مغناطیسی نمایش داده شده است.

سپس، نمونه‌های آلوده به مدت ۲۴ ساعت در شرایط آزمایشگاهی قرار داده شد. در نهایت نمونه‌ها در آون گذاشته شد تا به صورت کامل خشک شوند. در جدول ۷، نحوه نام گذاری نمونه‌های خاک مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌های این پژوهش ارائه شده است:

در این پژوهش از این مقادیر بهینه برای تثبیت کادمیوم استفاده شده است. به همین منظور سوسپانسیون ساخته شده از ترکیب نانوذرات آهن صفر

1 Ethylenediamine tetraacetic acid

جدول ۷. نحوه نام گذاری نمونه ها

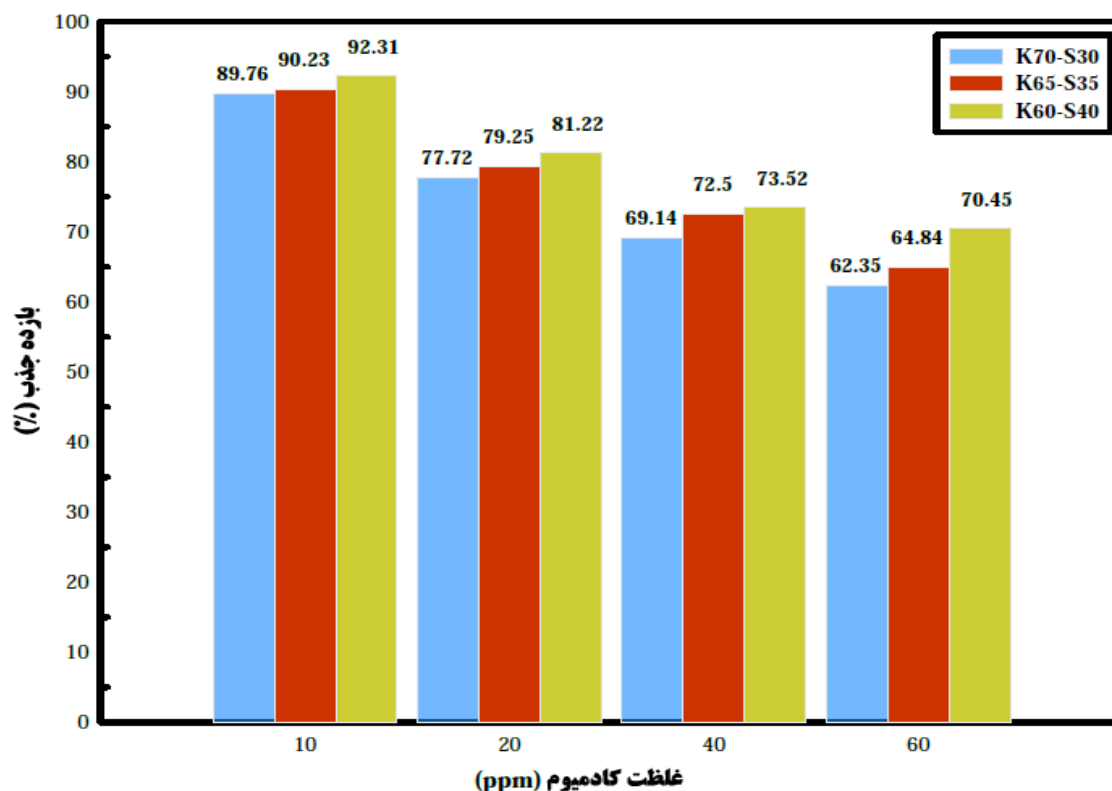
Table 7. Name of the samples

نام نمونه	ترکیبات نمونه		
	کادمیوم (Cd)	ماسه (S)	کائولینیت (K)
K60S40	-	٪۴۰	٪۶۰
K65S35	-	٪۳۵	٪۶۵
K70S30	-	٪۳۰	٪۷۰
K60S40Cd10	۱۰ ppm	٪۴۰	٪۶۰
K60S40Cd20	۲۰ ppm	٪۴۰	٪۶۰
K60S40Cd40	۴۰ ppm	٪۴۰	٪۶۰
K60S40Cd60	۶۰ ppm	٪۴۰	٪۶۰
K65S35Cd10	۱۰ ppm	٪۳۵	٪۶۵
K65S35Cd20	۲۰ ppm	٪۳۵	٪۶۵
K65S35Cd40	۴۰ ppm	٪۳۵	٪۶۵
K65S35Cd60	۶۰ ppm	٪۳۵	٪۶۵
K70S30Cd10	۱۰ ppm	٪۳۰	٪۷۰
K70S30Cd20	۲۰ ppm	٪۳۰	٪۷۰
K70S30Cd40	۴۰ ppm	٪۳۰	٪۷۰
K70S30Cd60	۶۰ ppm	٪۳۰	٪۷۰

جدول ۸. آزمایش های انجام شده و شماره استاندارد آزمایش ها

Table 8. Conducted tests and the standard number of test conduction

شماره استاندارد	نام آزمایش
ASTM (D-1557)	تراکم پروکتور اصلاح شده
ASTM (D-2166)	تک محوری
ASTM (D-4318)	حد روانی
ASTM (D-4318)	حد خمیری



شکل ۲. تغییرات بازده جذب نمونه های خاک در برابر غلظت کادمیوم

Fig. 2. Changes in adsorption efficiency of soil samples against cadmium concentration

مشابه نیز نشان داده اند که در غلظت های پایین تر آلاینده ها، ذرات رس به دلیل افزایش ضخامت لایه دوگانه تمایل به پراکندگی دارند. از این رو، سایت های تماس موجود برای جذب در حداکثر حالت خود هستند. با افزایش غلظت آلاینده، مکان های جذب با آلاینده اشباع می شوند و با افزایش غلظت آلاینده، بازده جذب کاهش می یابد [۵۳، ۶۳].

۴-۲- حدود اتربرگ

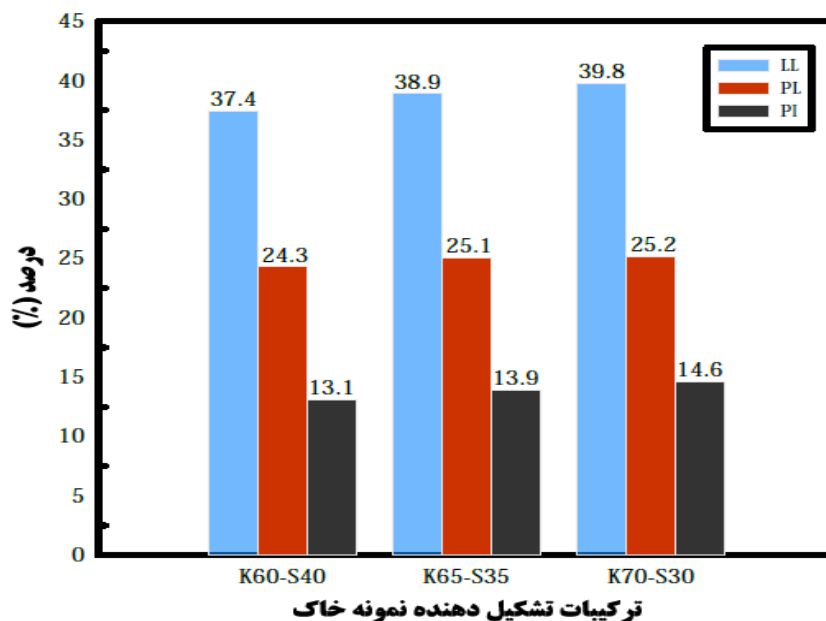
۴-۲-۱- حدود اتربرگ خاک پایه و خاک آلوده

نتایج به دست آمده از آزمایشات حدود اتربرگ صورت گرفته بر روی نمونه های خاک پایه بدون آلاینده در شکل ۳ ارائه شده است. تحلیل نتایج شکل فوق نشان می دهد که با افزایش میزان کاتولینیت در نمونه های خاک پایه حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری خاک پایه افزایش یافته است.

۴- نتایج آزمایش ها

۴-۱- آزمایش جذب اتمی

در شکل ۲، نتایج آزمایش جذب اتمی انجام شده بر روی نمونه های خاکی مختلف ارائه شده است. نتایج آزمایش بر روی هر سه نمونه خاک (با ترکیب مختلف رس و ماسه) نشان می دهد که با افزایش غلظت کادمیوم، درصد جذب کادمیوم توسط نانوذرات به مقدار قابل توجهی کاهش می یابد. از همین رو غلظت ۱۰ ppm با بیشترین درصد جذب برابر با ۹۲/۳۱، ۹۰/۲۳ و ۸۹/۷۶ به ترتیب برای سه نوع خاک با درصد کاتولینیت ۶۰، ۶۵ و ۷۰٪ به عنوان غلظت بهینه کادمیوم در این مطالعه در نظر گرفته شد. همچنین نتایج نشان می دهد که افزایش مقادیر رس در ترکیب خاک تا حدودی موجب کاهش بازدهی جذب کادمیوم می شود که بیشترین حالت مربوط به خاک ۰۴S-۰۶K با ۰۶ درصد وزنی کاتولینیت بوده است. پژوهش های



شکل ۳. حدود اتربرگ نمونه های خاک پایه بدون آلاینده

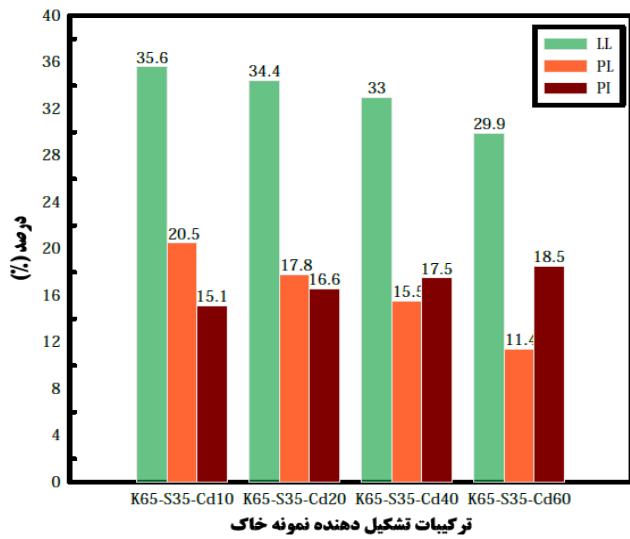
Fig. 3. Atterberg Limits of base soil without contamination

احاطه کرده و به مولکول‌های آب اجازه توسعه لایه آب دوگانه را نمی‌دهند؛ از سوی دیگر، واکنش شیمیایی شکل گرفته بین کانی‌های تشکیل دهنده خاک و آلاینده‌های فلز سنگین، باعث کاهش ضخامت لایه‌ی مضاعف ورقه‌های رسی می‌شود. با کاهش سطح در معرض آب ذرات رس، میزان جذب آب توسط ذرات رس کاهش یافته و تمایل خاک برای جذب خواص پلاستیک بیشتر، کمتر می‌شود. در نتیجه حد روانی و حد خمیری خاک آلوده به کادمیوم در مقایسه با خاک پایه بدون آلاینده کاهش می‌یابد.

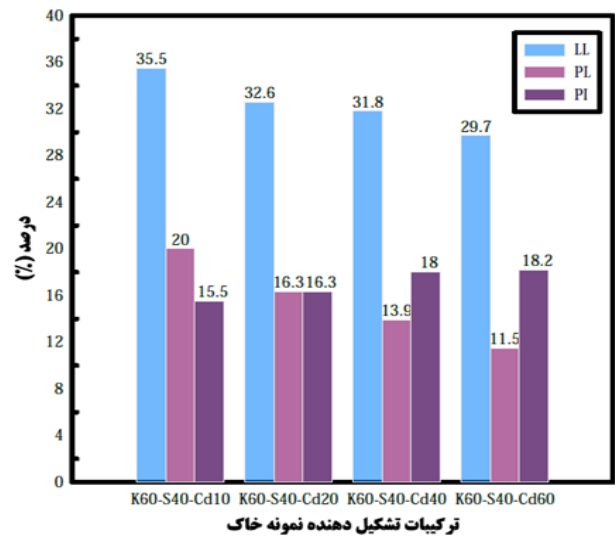
۴-۲-۲- حدود اتربرگ خاک آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن درنهایت، پس از افزودن نانوذرات آهن به نمونه‌های خاک آلوده به کادمیوم با غلظت‌های مختلف، بر روی نمونه‌های ذکر شده آزمایش‌های حدود اتربرگ صورت گرفت که نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزودن نانوذرات آهن به خاک آلوده به کادمیوم، حد روانی و حد خمیری خاک‌های آلوده با افزایش غلظت آلاینده کاهش یافته‌اند. مقایسه میان نتایج شکل ۵ و شکل

بنابراین، حداکثر میزان حد روانی، حد خمیری و نشانه خمیری مربوط به نمونه‌های خاک پایه متشکل از ۷۰٪ رس کائولینیت و ۳۰٪ ماسه می‌باشد. با توجه به اینکه ماسه مورد استفاده دارای خاصیت خمیری بسیار پایینی است و ظرفیت جذب آب بسیار کمتری نسبت به کائولینیت دارد؛ بنابراین نتایج به دست آمده دور از انتظار نیست.

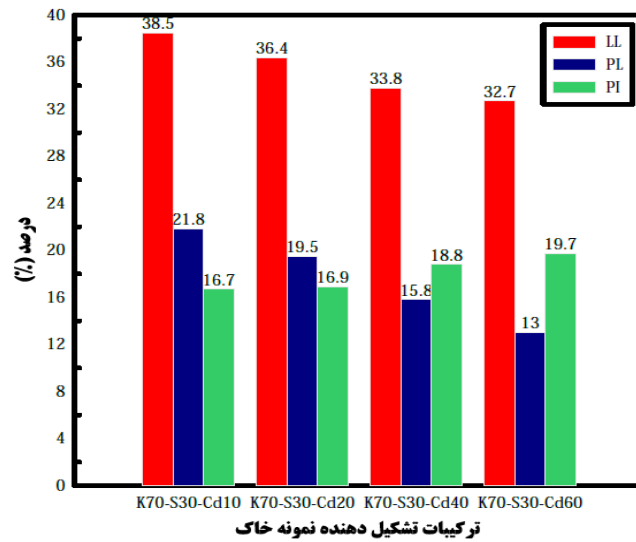
سپس، آزمایشات حدود اتربرگ بر روی نمونه‌های خاک پایه آلوده‌شده با کادمیوم انجام گرفت که نتایج آزمایشات فوق در شکل ۴ نمایش داده شده است. مقایسه میان نتایج ارائه شده در شکل ۴ نشان می‌دهد که در کلیه نمونه‌های خاک آلوده شده با کادمیوم، با افزایش غلظت آلاینده حد روانی و حد خمیری نمونه‌ها کاهش یافته اما از سوی دیگر، نشانه خمیری نمونه‌ها افزایش یافته است. همچنین، مقایسه میان نتایج شکل ۳ و ۴ نشان می‌دهد که با اضافه شدن کادمیوم به خاک، حد روانی و حد خمیری خاک آلوده به کادمیوم در مقایسه با خاک پایه بدون کادمیوم کاهش یافته اما نشانه خمیری نمونه‌های خاک آلوده به کادمیوم در مقایسه با خاک آلوده نشده افزایش یافته است. با مخلوط‌شدن آلاینده با خاک، ذرات آلاینده ذرات خاک را



ب) K65S35Cd



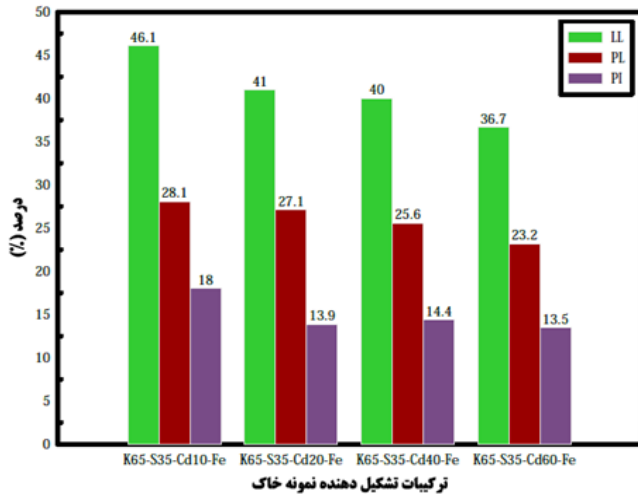
الف) K60S40Cd



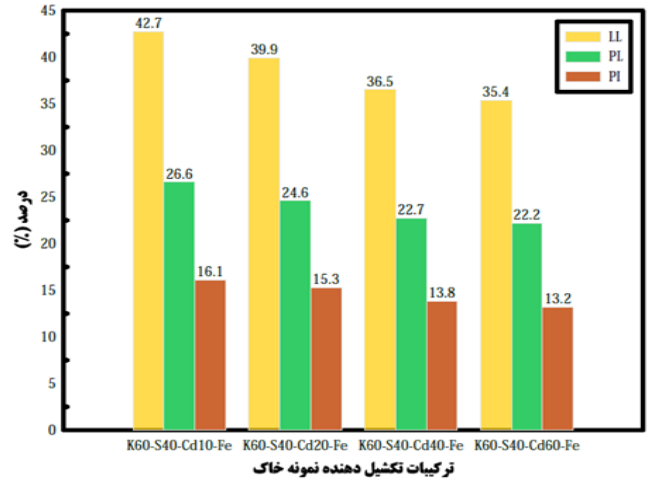
ج) K70S30Cd

شکل ۴. حدود اتبرگ نمونه های خاک آلوده به کادمیوم

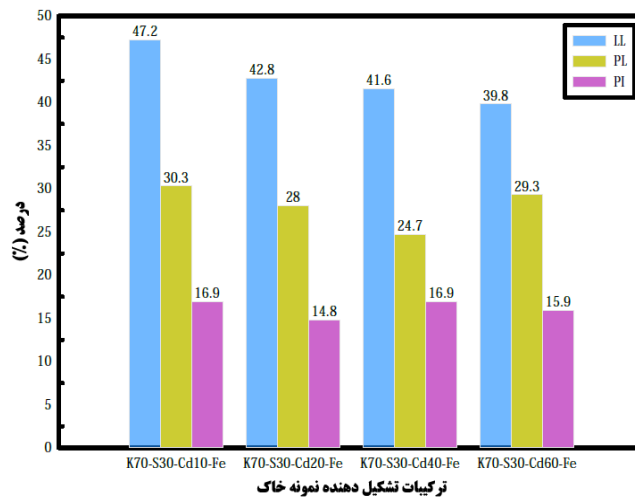
Fig. 4. Atterberg Limits of soil samples contaminated with cadmium



ب) K65S35Cd-Fe



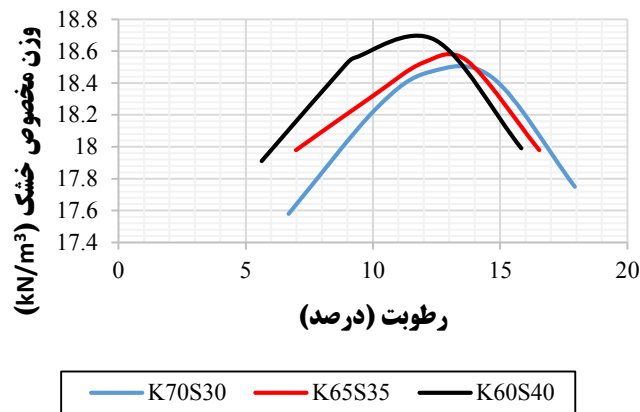
الف) K60S40Cd-Fe



ج) K70S30Cd-Fe

شکل ۵. حدود اتربرگ نمونه های خاک آلوده به کادمیوم تثبیت شده با نانوذرات آهن

Fig. 5. Atterberg limits of soil samples contaminated with cadmium immobilized with iron nanoparticles



شکل ۶. نمودار تراکم نمونه های خاک پایه بدون آلاینده

Fig. 6. Compaction curve of the base soil sample without contaminants

نتایج به دست آمده از آزمایش های تراکم انجام شده بر روی بر روی نمونه های خاک پایه در شکل ۶ ارائه شده اند. تحلیل نتایج شکل فوق نشان می دهد که با افزایش میزان رس کاتولینیت از ۶۰ به ۶۵ و از ۶۵ به ۷۰، وزن مخصوص خشک نمونه ها به ترتیب ۰/۱ و ۰/۳٪ کاهش یافته است. همچنین، درصد رطوبت بهینه نمونه های خاکی پایه با افزایش میزان رس کاتولینیت از ۶۰ به ۶۵ و از ۶۵ به ۷۰ به ترتیب ۸/۷٪ و ۱۲/۷٪ افزایش یافته بود. این می تواند به دلیل بهتر پرکردن فضاهای خالی بین ماسه ها و ایجاد یک خاک خوب دانه بندی شده باشد که محققان در پژوهش های قبلی نیز به نتیجه ای مشابه اشاره داشته اند [۳۷].

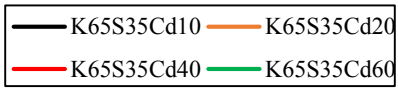
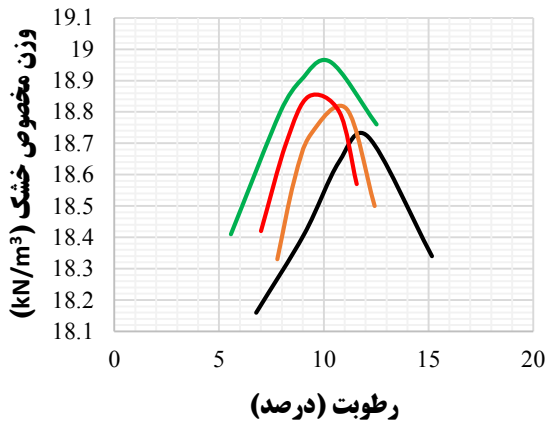
نتایج آزمایش های تراکم صورت گرفته بر روی نمونه های خاک آلوده به کادمیوم در شکل ۷ نشان داده شده اند. می توان مشاهده کرد که با افزایش غلظت کادمیوم در نمونه ها روند کلی مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه به ترتیب افزایشی و کاهش یافته است. با افزایش غلظت آلاینده، ضخامت لایه آب دوگانه احاطه کننده ذرات رس کاهش می یابد؛ با کاهش ضخامت لایه آب دوگانه، منجر به نزدیکی ذرات به یکدیگر شده و در نتیجه، ظرفیت ذخیره آب و رطوبت بهینه خاک کاهش یافته است. همچنین، با کاهش ضخامت لایه آب دوگانه، در نتیجه در انرژی ثابت تراکم، خاک مورد نظر آسان تر متراکم می شوند و وزن مخصوص خاک افزایش می یابد. همچنین، مقایسه میان نتایج ارائه شده در شکل ۷ نشان دهنده این موضوع بود که هنگامی که غلظت آلاینده ثابت باشد، افزایش میزان

۴ نشان دهنده این بود که افزودن نانوذرات آهن به خاک آلوده منجر به رشد چشمگیر حدود اتربرگ نمونه های خاک آلوده شده است. همچنین، تفسیر نتایج شکل ۵ نشان می دهد که با افزایش میزان کاتولینیت خاک های آلوده تثبیت شده با نانوذرات آهن، حد روانی و حد خمیری نمونه ها افزایش یافته است که ناشی از افزایش کانی کاتولینیت در نمونه های خاک می شود. با افزودن نانوذرات آهن به خاک آلوده به کادمیوم، واکنش شیمیایی شکل گرفته بین نانوذرات آهن و خاک آلوده به کادمیوم باعث کاهش میزان آلودگی خاک می گردد. با کاهش میزان آلودگی خاک، ضخامت لایه آب دوگانه خاک آلوده تثبیت شده با نانوذرات آهن در مقایسه با ضخامت لایه آب دوگانه خاک آلوده بدون تثبیت کننده افزایش می یابد. افزایش ضخامت لایه دوگانه باعث می شود که فاصله ذرات از هم بیشتر شده و تمایل خاک برای جذب خواص پلاستیک بیشتر، افزایش می یابد. در نتیجه حد روانی و حد خمیری خاک آلوده به کادمیوم در مقایسه با خاک پایه بدون آلاینده افزایش یافته است.

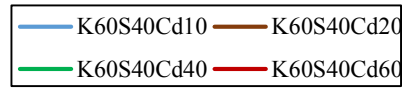
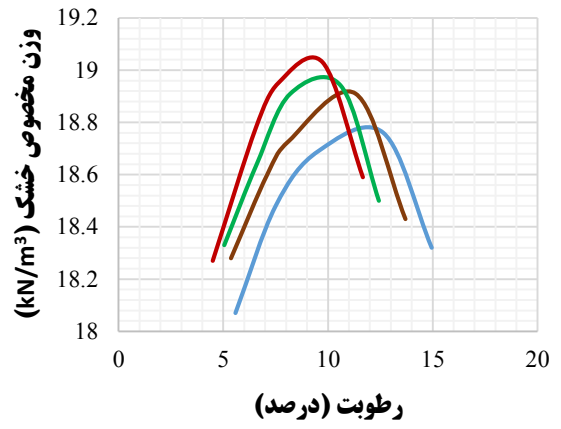
۴-۳- تراکم

۴-۳-۱- تراکم خاک پایه و خاک آلوده

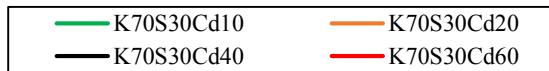
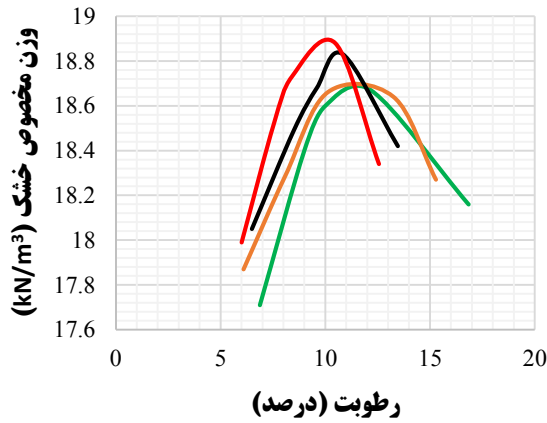
در این پژوهش، آزمایش تراکم استاندارد در قالبی به حجم ۹۴۴ سانتی متر مکعب که توسط وزنه ۲/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۳۰ سانتی متری رها می گردد، انجام شد. در این آزمایش سه لایه خاک به ضخامت ۳/۵ سانتی متر (یک سوم ارتفاع قالب) و هر لایه خاک با ۲۵ ضربه متراکم شد



ب) K65S35Cd



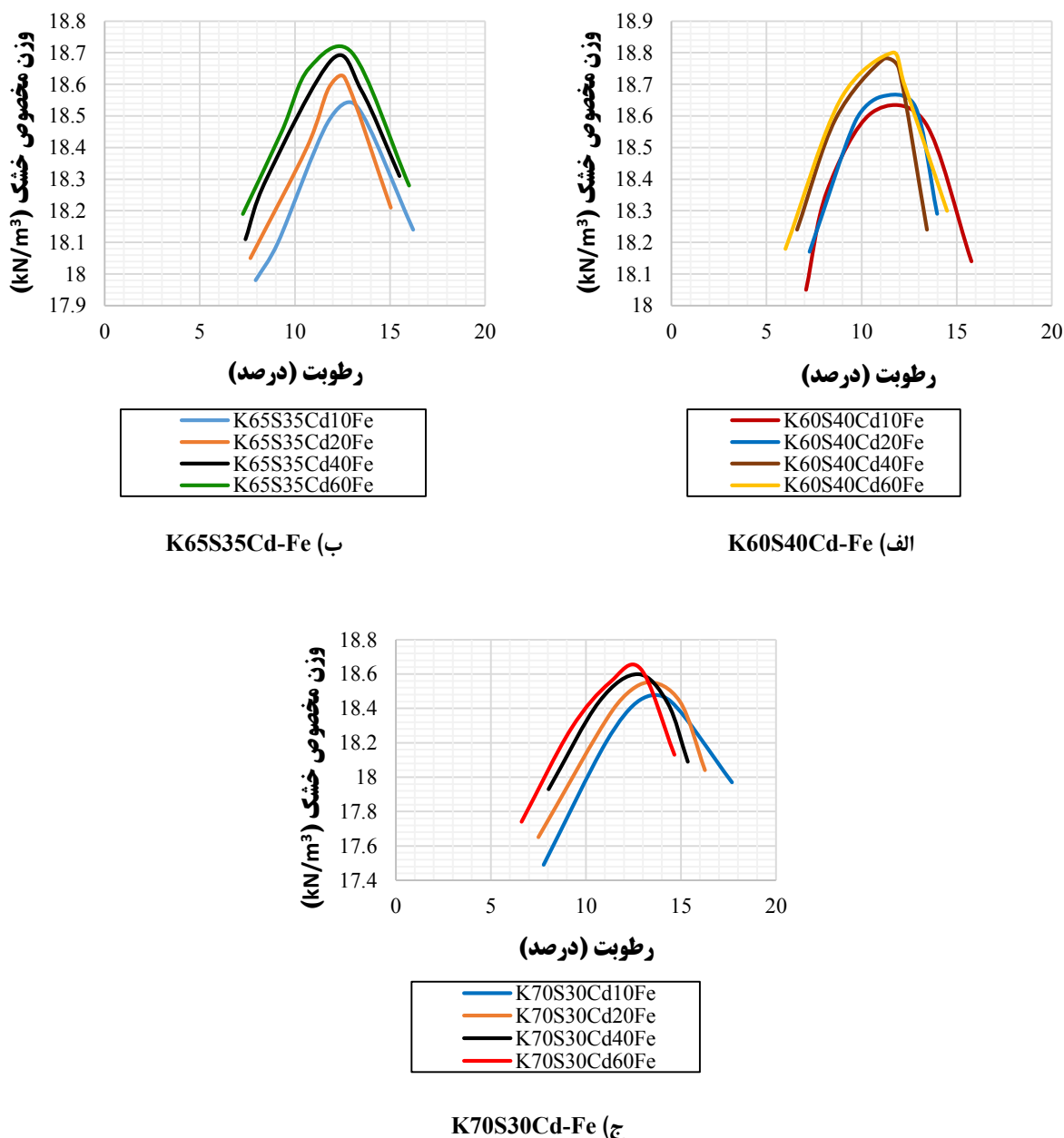
الف) K60S40Cd



ج) K70S30Cd

شکل ۷. نمودار تراکم نمونه‌های خاک پایه آلوده به کادمیوم

Fig. 7. Compaction curve of soil samples contaminated with cadmium

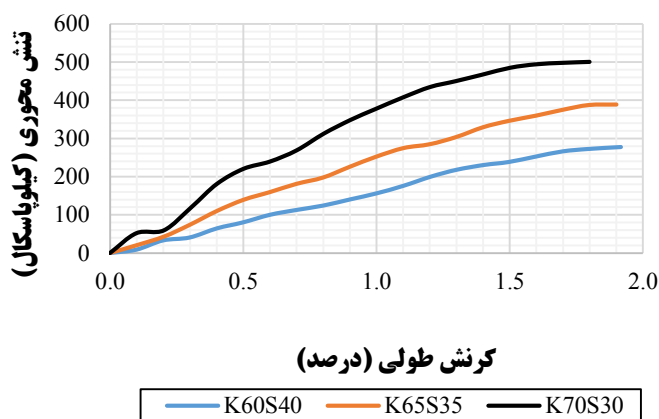


شکل ۸. نمودار تراکم نمونه‌های خاک پایه آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن

Fig. 8. Compaction curve of soil samples contaminated with cadmium immobilized with iron nanoparticles

۴-۳-۲- تراکم خاک آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن در نهایت، بر روی نمونه‌های خاک آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن آزمایش تراکم انجام شد که نتایج آن در شکل ۸ ارائه شده است. تحلیل نتایج شکل ۸ نشان می‌دهد که افزودن نانوذرات آهن به نمونه‌های خاک آلوده منجر به کاهش وزن مخصوص نمونه‌های آلوده به کادمیوم همراه با

کاتولینیت نمونه‌های خاک آلوده منجر به کاهش وزن مخصوص خشک نمونه‌ها و افزایش درصد رطوبت بهینه آن‌ها می‌گردد؛ به طوری که حداکثر وزن مخصوص خشک و حداقل درصد رطوبت بهینه مربوط به نمونه‌های با ۶۰٪ رس و ۴۰٪ ماسه بود.



شکل ۹. نمودار تنش- کرنش نمونه‌های بدون آلاینده

Fig. 9. Stress-Strain curve of the base soil sample without contaminants

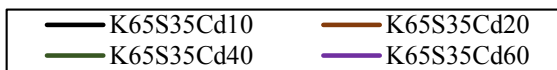
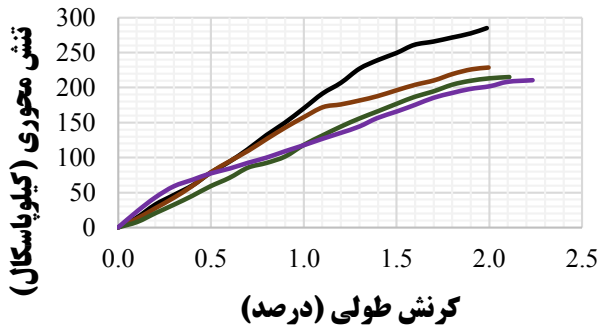
۴-۴- تک‌محوری

۴-۴-۱- مقاومت تک‌محوری خاک پایه و خاک آلوده

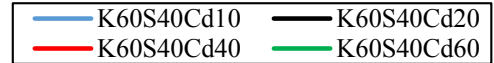
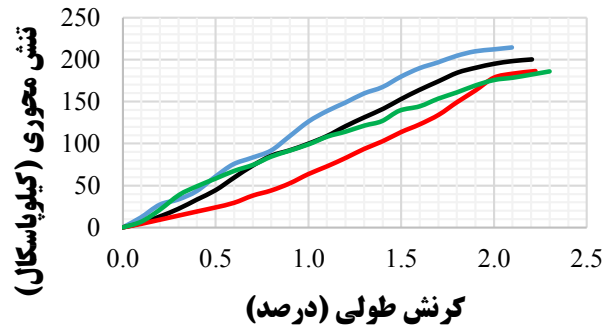
در این پژوهش آزمایش فشاری تک‌محوری محدود نشده به صورت کنترل کرنش بر روی کلیه نمونه‌های خاک انجام شد. برای هر مرحله، نمونه‌هایی با رطوبت یکسان ۲۰٪ تهیه شد و به منظور هواگیری در پنج لایه داخل قالب مخصوص با ابعاد ۹۶×۴۸ میلی‌متر کوبیده شدند تا تأثیر ابعاد و رطوبت در تمامی نمونه‌ها یکسان شود. هم‌چنین، آزمایش تا زمانی ادامه یافت که با افزایش کرنش مقادیر نیرو کاهش یابد و یا اینکه کرنش به مقدار ۱۵٪ برسد. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تک‌محوری انجام شده بر روی نمونه‌های خاک پایه بدون آلودگی در شکل ۹ ارائه شده است. با توجه به این شکل می‌توان گفت که با افزایش مقدار کاتولینیت، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی در تمامی نمونه‌ها به ترتیب بیشتر و کمتر شده است به طوری که بیشترین تنش تک‌محوری حداکثر متعلق به خاک K70 (دارای بیشترین مقدار کاتولینیت) است، در حالی که بیشترین مقدار کرنش گسیختگی متعلق به خاک K60 است.

سپس، بر روی نمونه‌های آلوده به کادمیوم بدون نانوذرات آهن آزمایش تک‌محوری انجام شد که نتایج این آزمایش‌ها در شکل ۹ ارائه شده است. نتایج شکل ۱۰-الف نشان‌دهنده این موضوع بود که در نمونه‌های با ۶۰٪ رس کاتولینیت، با افزایش غلظت کادمیوم به ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm تنش

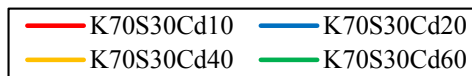
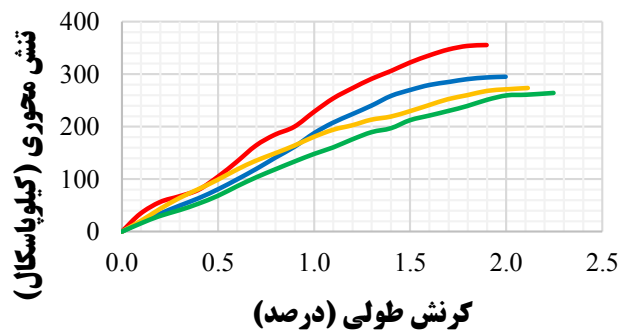
افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های بدون نانوذرات آهن شده است. بیشترین میزان افزایش درصد رطوبت بهینه در نمونه‌های تثبیت‌شده با نانوذرات آهن در مقایسه با نمونه‌های بدون نانوذرات آهن در نمونه‌های با ۶۰٪ رس مربوط به نمونه آلوده شده با ۲۰ ppm کادمیوم بود که درصد رطوبت بهینه نمونه‌های تثبیت‌شده با نانوذرات آهن در مقایسه با نمونه مشابه بدون نانوذرات آهن ۴۳٪ افزایش یافته بود. در نمونه‌های با ۶۵ و ۷۰٪ رس، بیشترین میزان افزایش درصد رطوبت بهینه نمونه‌های خاک به ترتیب مربوط به نمونه‌های ۴۰ ppm و ۲۰ ppm تثبیت‌شده با نانوذرات آهن بود که درصد رطوبت بهینه نمونه‌های مذکور در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون نانوذرات آهن به ترتیب ۲۹٪ و ۳۰/۱٪ افزایش یافته بود. یکی از دلایل افزایش درصد رطوبت نمونه‌های آلوده به کادمیوم تثبیت یافته با نانوذرات آهن را می‌توان ناشی از شکل‌گیری واکنش پوزولانیک بین رس حاضر در خاک و نانوذرات آهن دانست. از دیگر دلایل افزایش درصد رطوبت و کاهش وزن مخصوص خشک نمونه‌های آلوده تثبیت‌شده با نانوذرات آهن در مقایسه با نمونه‌های آلوده بدون تثبیت‌کننده، می‌توان به افزایش ضخامت لایه آب دوگانه اشاره داشت؛ افزایش ضخامت لایه آب دوگانه باعث دورتر شدن ذرات از هم شده و ظرفیت نگهداری آب نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه افزایش فاصله ذرات از هم و افزایش ظرفیت نگهداری آب، درصد رطوبت بهینه خاک افزایش و وزن مخصوص خشک حداکثر کاهش یافته است.



ك65S35Cd (ب)



ك60S40Cd (الف)



ك70S30Cd (ج)

شکل ۱۰. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های خاک پایه آلوده به کادمیوم

Fig. 10. The Stress-Strain curve of soil samples contaminated with cadmium

نانوذرات آهن و نمونه‌های خاک آلوده به کادمیوم می‌شود. این واکنش‌ها منجر به افزایش چسبندگی نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های آلوده به کادمیوم بدون نانوذرات آهن می‌شوند. در نتیجه، حداکثر تنش تک‌محوری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. به طور متضاد، افزایش غلظت آلاینده به کاهش چسبندگی نمونه‌ها منجر می‌شود و در نتیجه، تنش تک‌محوری نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تاثیر نانوذرات آهن صفر ظرفیتی به‌عنوان تثبیت‌کننده در بهبود خواص ژئوتکنیکی خاک‌های رسی آلوده به کادمیوم مورد مطالعه قرار گرفت. تاثیر نوع خاک پایه و غلظت کادمیوم بر نمونه‌های آلوده و تثبیت‌شده با استفاده از آزمایش‌های حدود ات‌برگ، تراکم و تک‌محوری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که:

(۱) نتایج آزمایش جذب اتمی نشان داد که با افزایش غلظت کادمیوم، درصد جذب کادمیوم توسط نانوذرات به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین، افزایش مقادیر رس در ترکیب خاک تا حدودی موجب کاهش بازدهی جذب کادمیوم می‌گردد.

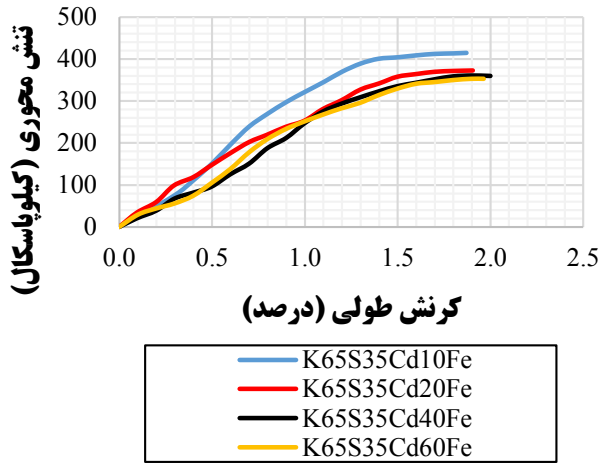
(۲) نتایج آزمایش حدود ات‌برگ بیانگر این است که با افزایش غلظت کادمیوم، مقادیر حدود ات‌برگ کاهش می‌یابد. کاهش حدود ات‌برگ نمونه (۳) نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش تراکم نشان داد که با افزایش درصد کاتولینیت در نمونه‌ها، مقادیر مربوط به حداکثر وزن مخصوص خشک با کاهش و رطوبت بهینه با افزایش روبرو می‌شوند. این می‌تواند به دلیل بهتر پرکردن فضاهای خالی بین ماسه‌ها و ایجاد یک خاک خوب دانه‌بندی شده باشد. همچنین، با افزایش غلظت کادمیوم در نمونه‌ها روند کلی مقادیر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه به ترتیب افزایشی و کاهش‌ی بوده است. از طرف دیگر با اضافه کردن نانوذرات آهن صفرظرفیتی، وزن مخصوص خشک خاک مجدداً کاهش و رطوبت بهینه آن افزایش می‌یابد که احتمالاً به دلیل احیاء یون‌های کادمیوم و در نتیجه آن افزایش ضخامت لایه مضاعف است.

(۴) نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان بیانگر این بود که با افزایش مقدار کاتولینیت، مقاومت فشاری و کرنش گسیختگی در تمامی نمونه‌ها به ترتیب بیشتر و کمتر شده است. این می‌تواند به دلیل خوب دانه‌بندی شدن خاک در اثر پر شدن فضای خالی بین دانه‌های ماسه توسط ذرات ریزتر رس باشد. همچنین با افزایش مقادیر غلظت کادمیوم، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش و مقادیر کرنش گسیختگی نیز افزایش

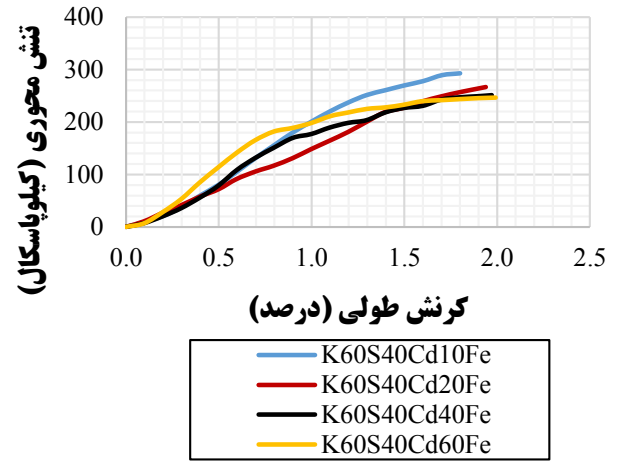
تک‌محوری نمونه‌ها به‌ترتیب ۲۲/۷، ۲۷/۹، ۳۲/۸۵ و ۳۳/۰۳٪ کاهش یافته است. تحلیل نتایج شکل ۱۰-ب بیانگر این موضوع است که با افزایش غلظت کادمیوم به ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm در نمونه‌های با ۶۵٪ رس کاتولینیت، تنش تک‌محوری نمونه‌ها به‌ترتیب ۲۶/۸، ۴۱/۲، ۴۴/۷ و ۴۵/۹٪ کاهش یافته است. در نهایت شکل ۱۰-ج نشان‌دهنده این موضوع بود که تنش تک‌محوری نمونه‌ها با افزایش غلظت کادمیوم به ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm در نمونه‌های با ۷۰٪ رس کاتولینیت به‌ترتیب ۲۹/۱، ۴۱، ۴۵/۳ و ۴۷/۱٪ کاهش یافته است. با افزایش مقادیر غلظت کادمیوم، مقادیر مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش و مقادیر کرنش گسیختگی نیز افزایش می‌یابد. کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های آلوده به کادمیوم در مقایسه با نمونه‌های بدون آلاینده را می‌توان بر اثر کاهش ضخامت لایه دوگانه دانست. افزودن کادمیوم به خاک بدون آلاینده باعث کاهش ضخامت لایه آب دوگانه شده و در همین راستا، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش یافته است.

۴-۴-۲- مقاومت تک‌محوری خاک آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن

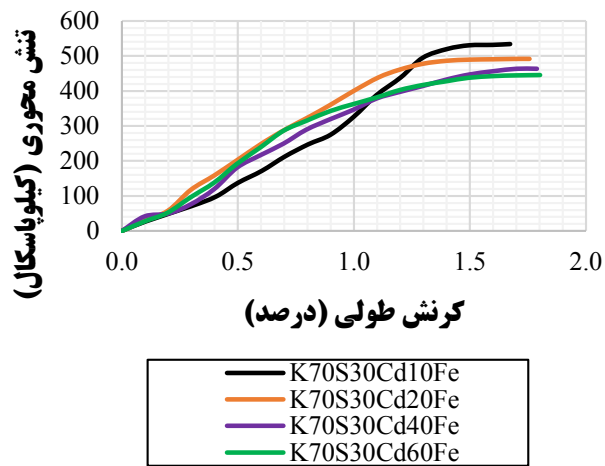
در انتها، بر روی نمونه‌های آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن آزمایش تک‌محوری انجام شد که نتایج آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقایسه میان نتایج شکل ۱۱-الف و ۱۰-الف نشان می‌دهد که در نمونه‌های متشکل از ۶۰٪ رس کاتولینیت آلوده به کادمیوم با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm با افزودن نانوذرات آهن تنش تک‌محوری نمونه‌ها به‌ترتیب ۳۶/۴، ۳۳/۴، ۳۵ و ۳۲/۵٪ در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون نانوذرات آهن افزایش یافته بود. تحلیل نتایج ارائه‌شده در شکل ۱۱-ب و ۱۰-ب بیانگر این بود که در نمونه‌های متشکل از ۶۵٪ رس کاتولینیت آلوده به کادمیوم با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm تنش تک‌محوری نمونه‌های با نانوذرات آهن به‌ترتیب ۴۵/۶، ۶۳، ۶۷/۱ و ۶۷/۷٪ در مقایسه با نمونه‌های مشابه آلوده به کادمیوم بدون نانوذرات آهن افزایش یافته بود. در نهایت، تفسیر نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۱۱-ج و ۱۰-ج نشانگر این بود که در نمونه‌های متشکل از ۷۰٪ رس کاتولینیت آلوده به کادمیوم با غلظت‌های ۱۰، ۲۰، ۴۰ و ۶۰ ppm با افزودن نانوذرات آهن تنش تک‌محوری نمونه‌ها به‌ترتیب ۵۰/۲، ۶۶/۵، ۶۹/۲ و ۶۸/۵٪ در مقایسه با نمونه‌های مشابه بدون نانوذرات آهن افزایش یافته بود. با اضافه شدن نانوذرات آهن مقاومت فشاری خاک بهبود پیدا کرده و حتی در مقادیر کم کادمیوم از حالت بدون آلودگی نیز بهتر می‌شود. افزودن نانوذرات آهن به نمونه‌های آلوده به کادمیوم، باعث وقوع واکنش‌های تبادل کاتیونی بین



ب) K65S35Cd-Fe



الف) K60S40Cd-Fe



ج) K70S30Cd-Fe

شکل ۱۱. نمودار تنش-کرنش نمونه‌های خاک پایه آلوده به کادمیوم تثبیت‌شده با نانوذرات آهن

Fig. 11. The Stress-Strain curve of soil samples contaminated with cadmium immobilized with iron nanoparticles

4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, IEEE, 2010, pp. 1-4.

- [10] B. Alpaslan, M.A. Yukselen, Remediation of lead contaminated soils by stabilization/solidification, *Water, Air, and Soil Pollution*, 133(1) (2002) 253-263.
- [11] A. Zad, M. Kazemzadeh, Stabilization of Lead and Zinc Nitrate-Contaminated Low Plasticity Clayey Soil Using Metakaolin Geopolymer, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, (2023) 1-25.
- [12] D. Reible, D. Lampert, D. Constant, R.D. Mutch Jr, Y. Zhu, Active capping demonstration in the Anacostia River, Washington, DC, *Remediation Journal: The Journal of Environmental Cleanup Costs, Technologies & Techniques*, 17(1) (2006) 39-53.
- [13] Y.-H. Chen, F.-A. Li, Kinetic study on removal of copper (II) using goethite and hematite nano-photocatalysts, *Journal of colloid and interface science*, 347(2) (2010) 277-281.
- [14] J. Du, J. Lu, Q. Wu, C. Jing, Reduction and immobilization of chromate in chromite ore processing residue with nanoscale zero-valent iron, *Journal of hazardous materials*, 215 (2012) 152-158.
- [15] B. An, D. Zhao, Immobilization of As (III) in soil and groundwater using a new class of polysaccharide stabilized Fe-Mn oxide nanoparticles, *Journal of hazardous materials*, 211 (2012) 332-341.
- [16] R. Singh, V. Misra, R.P. Singh, Removal of Cr (VI) by nanoscale zero-valent iron (nZVI) from soil contaminated with tannery wastes, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 88(2) (2012) 210-214.
- [17] A. Reyhanitabar, L. Alidokht, A. Khataee, S. Oustan, Application of stabilized Fe₀ nanoparticles for remediation of Cr (VI)-spiked soil, *European journal of soil science*, 63(5) (2012) 724-732.
- [18] M.S. Pakbaz, R. Alipour, Influence of cement addition on the geotechnical properties of an Iranian clay, *Applied Clay Science*, 67 (2012) 1-4.
- [19] J. Nasiri, A. Gholami, E. Panahpour, Removal of cadmium from soil resources using stabilized zero-valent

می‌یابند. از سوی دیگر مشاهده شد که با اضافه شدن نانوذرات آهن مقاومت فشاری خاک بهبود پیدا کرده و حتی در مقادیر کم کادمیوم از حالت بدون آلودگی نیز بهتر می‌شود.

منابع

- [1] M. Kazemzadeh, A.A. Zad, P. Latifi, Stabilization of clay soils contaminated with zinc nitrate & lead nitrate using metakaolin geopolymer, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(12) (2023) 16-16.
- [2] M. Kazemzadeh, A. Zad, M. Yazdi, A. Chamani, Stabilization of Lead and Zinc Contaminated Clay Soils with Metakaolin, *Civil Infrastructure Researches*, 8(2) (2023) 69-83.
- [3] Y. Chu, S. Liu, F. Wang, G. Cai, H. Bian, Estimation of heavy metal-contaminated soils' mechanical characteristics using electrical resistivity, *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15) (2017) 13561-13575.
- [4] Y. Chu, S.-y. Liu, G.-j. Cai, H.-l. Bian, A study in the micro-characteristic and electricity properties of silt clay contaminated by heavy metal zinc, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2(14) (2016) 556-559.
- [5] S. Contessi, L. Calgaro, M.C. Dalconi, A. Bonetto, M.P. Bellotto, G. Ferrari, A. Marcomini, G. Artioli, Stabilization of lead contaminated soil with traditional and alternative binders, *Journal of hazardous materials*, 382 (2020) 120990.
- [6] P. Ghadir, N. Ranjbar, Clayey soil stabilization using geopolymer and Portland cement, *Construction and Building Materials*, 188 (2018) 361-371.
- [7] M. Karkush, T. Al-Taher, Geotechnical evaluation of clayey soil contaminated with industrial wastewater, *Archives of civil engineering*, 63(1) (2017).
- [8] G. Resmi, S.G. Thampi, S. Chandrakaran, Impact of lead contamination on the engineering properties of clayey soil, *Journal of the Geological Society of India*, 77(1) (2011) 42-46.
- [9] J. Zhu, L. Fang, Z. Nie, X. Gao, Ecological risk assessment of heavy metal in urban area soil, in: 2010

- Aguado, M.A. Marina, C. Sierra, Adsorption onto Fe-based nanoparticles and recovery from soils by means of wet high intensity magnetic separation, *Chemical Engineering Journal*, 408 (2021) 127325.
- [28] A. Sadeghi, M. Ataabadi, M.H. Abolhasani, Chromium removal from a contaminated soil using nano zero-valent iron and magnetite affected by temperature and moisture, *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 30(5) (2021) 610-621.
- [29] V. Danila, T. Januševičius, Removal of Cd, Cu, Ni, and Pb from Nanoscale Zero-Valent Iron Amended Soil Using 0.1 M Acetic Acid Solution, *Environmental and Climate Technologies*, 26(1) (2022) 406-414.
- [30] R. Alipour, A.A. Heshmati R, J. Karimiazar, N. Esazadefar, E. Asghari-Kalajahi, S.H. Bahmani, Resistance and swelling of Tabriz marl soils stabilised using nano-silica and nano-alumina, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, (2022) 1-14.
- [31] H. Harsh, A.A.B. Moghal, R.M. Rasheed, A. Almajed, State-of-the-art review on the role and applicability of select nano-compounds in geotechnical and geoenvironmental applications, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48(4) (2023) 4149-4173.
- [32] Y.-P. Sun, X.-q. Li, J. Cao, W.-x. Zhang, H.P. Wang, Characterization of zero-valent iron nanoparticles, *Advances in colloid and interface science*, 120(1-3) (2006) 47-56.
- [33] W. Wang, M. Zhou, Degradation of trichloroethylene using solvent-responsive polymer coated Fe nanoparticles, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 369(1-3) (2010) 232-239.
- [34] Q. Wang, H. Qian, Y. Yang, Z. Zhang, C. Naman, X. Xu, Reduction of hexavalent chromium by carboxymethyl cellulose-stabilized zero-valent iron nanoparticles, *Journal of contaminant hydrology*, 114(1-4) (2010) 35-42.
- [35] R.N. Yong, A.-M.O. Mohamed, B.P. Warkentin, iron nanoparticles, *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 3(6) (2013) 338-341.
- [20] C. Boente, C. Sierra, D. Martínez-Blanco, J.M. Menéndez-Aguado, J. Gallego, Nanoscale zero-valent iron-assisted soil washing for the removal of potentially toxic elements, *Journal of Hazardous Materials*, 350 (2018) 55-65.
- [21] M. Mohamadiun, B. Dahrazma, S.F. Saghravani, A.K. Darban, Removal of cadmium from contaminated soil using iron (III) oxide nanoparticles stabilized with polyacrylic acid, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 26(2) (2018) 98-106.
- [22] Q. Tang, P. Shi, Z. Yuan, S. Shi, X. Xu, T. Katsumi, Potential of zero-valent iron in remediation of Cd (II) contaminated soil: from laboratory experiment, mechanism study to field application, *Soils and Foundations*, 59(6) (2019) 2099-2109.
- [23] Y.-Z. Chen, W.-H. Zhou, F. Liu, S. Yi, Exploring the effects of nanoscale zero-valent iron (nZVI) on the mechanical properties of lead-contaminated clay, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(10) (2019) 1395-1405.
- [24] S. Vasarevičius, V. Danila, T. Januševičius, Immobilisation of cadmium, copper, lead, and nickel in soil using nano zerovalent iron particles: Ageing effect on heavy metal retention, *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(10) (2020) 1-11.
- [25] Y. Guo, X. Li, L. Liang, Z. Lin, X. Su, W. Zhang, Immobilization of cadmium in contaminated soils using sulfidated nanoscale zero-valent iron: Effectiveness and remediation mechanism, *Journal of Hazardous Materials*, 420 (2021) 126605.
- [26] J. Li, Y. Zhang, F. Wang, L. Wang, J. Liu, Y. Hashimoto, M. Hosomi, Arsenic immobilization and removal in contaminated soil using zero-valent iron or magnetic biochar amendment followed by dry magnetic separation, *Science of The Total Environment*, 768 (2021) 144521.
- [27] D. Baragaño, J.L.R. Gallego, J.M. Menéndez-

Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 29(3) (2020) 340-354.

[37] G. Lees, M. Abdelkater, S. Hamdani, Effect of the clay fraction on some mechanical properties of lime-soil mixtures, Highway Engineer, 29(11) (1982).

Principles of contaminant transport in soils, Elsevier Science Publishers, 1992.

[36] M. Nazari Heris, S. Aghajani, M. Hajjalilue-Bonab, H. Vafaei Molamahmood, Effects of lead and gasoline contamination on geotechnical properties of clayey soils,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Kazemzadeh, P. Zoghi, A. Ali zad, Evaluating the effect of using iron nanoparticles on geotechnical parameters of soils contaminated with cadmium, Amirkabir J. Civil Eng., 55(12) (2024) 2343-2364.

DOI: 10.22060/ceej.2023.22337.7954



