ارزیابی تأثیر افزودن بنتونیت بر خصوصیات رفتاری خاک‌های ریزدانه

مریم هادی، رسول اجل‌لوئیان؛ دانشگاه اصفهان، گروه زمین‌شناسی
امیرحسین صادقپور*؛ دانشگاه کاشان

تاریخ: دریافت ۹۱/۷/۹ **پذیرش** ۹۲/٤/۱۸

چکیده

افزودن بنتونیت به خاک رس برای افزایش خصوصیات پلاستیسیته آن، یکی از راه‌کارهای ممکن برای تأمین رس تماسی در پروژه‌های سد خاکی است؛ اما بنتونیت مصرفی از طرفی باعث افزایش شاخص خمیری خاک شده و از طرف دیگر، برخی اثرات منفی در مخلوط خاک رس برجای می‌گذارد. بنا بر این برای تأمین رس تماسی با این روش، لازم است تغییرات همهٔ خصوصیات ژئوتکنیکی مخلوط رس- بنتونیت ارزیابی شود. در پژوهش حاضر تأثیر افزودن بنتونیت بر ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک‌های ریزدانه منابع قرضهٔ سد خاکی چشمه زنه بررسی شده است. برای این منظور، نمونه‌های رس با درصدهای مختلف بنتونیت از ۵ درصد تا ۲۰ درصد آزمایش شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن بنتونیت به نمونه‌های ریزدانه، علاوه بر کاهش ضریب نفوذپذیری، سبب کاهش ضریب تحکیم، دانسیته خشک حداکثر، ظرفیت باربری و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک می‌شود. از طرفی رطوبت بهینه، شاخص خمیری، چسبندگی، زمان ۵۰ درصد تحکیم وشاخص تورم خاک افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش واگرایی نشان می‌دهد که افزودن بیش از ۱۰ درصد بنتونیت به خاک سبب ایجاد نشانه‌هایی از واگرایی در مخلوط می‌گردد. با توجه به تأمین خصوصیات پلاستیسیته مورد نظر برای رس تماسی با اختلاط ۱۰ درصد بنتونیت با خاک رس منطقه از یک طرف و اهمیت بحث واگرایی برای مصالح هسته سد از طرف دیگر، بر اساس نتایج به‌دست آمده در این تحقیق، درصد بهینه بنتونیت برای این منظور معادل ۱۰ درصد تعیین و پیشنهاد شد.

واژه‌های کلیدی: خاک ریزدانه، بنتونیت، هسته رسی، رس تماسی، شاخص خمیری

* **نویسنده مسئول** sadeghpour@kashanu.ac.ir

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

مقدمه

در سدهای خاکی، برای آب‌بندی هر چه بهتر محل تماس هسته با پی سنگی سد، از لایه‌ای رسی با نام رس تماسی[۱]، با شاخص خمیری زیاد استفاده می‌شود. این لایه، از طرفی سبب اتصال هرچه بهتر مصالح هسته سد و سنگ بستر شده و از طرف دیگر، علاوه بر تأمین تغییر شکل‌پذیری مناسب در هنگام نشست‌های پی، باعث کنترل جریان نشت آب از مرز تماس هسته با پی می‌شود. بر اساس بررسی‌های انجام شده فوستر و همکاران [۱] تا سال ۱۹۸٦، ۳۱٪ تخریب سدهای خاکی و سنگریزه‌ای بزرگ، به‌علت وقوع پدیدهٔ رگاب از درون بدنهٔ سد، ۱۵٪ به‌دلیل رگاب درون پی و ۲٪ به‌دلیل وقوع این پدیده از خاک‌ریز به پی اتفاق افتاده است. به‌طورکلی در حالی که پدیدهٔ رگاب، دلیل اصلی ٤۸٪ تخریب‌ها در سدهای خاکی ثبت شده، فقط ۲٪ آن به‌علت وقوع زلزله و مابقی آن به‌علت روگذری آب و ناپایداری شیروانی‌های آن گزارش شده است و این موضوع، اهمیت توجه به پدیده را بیش‌تر نشان می‌دهد. بر اساس نتایج بررسی‌های انجام شده برای دلایل تخریب سدهای خاکی در دو دهه گذشته، یکی از دلایل اصلی تخریب و یا ایجاد مشکلات اساسی در سد دیکو[۲] در سال ۱۹۹۷، سد چانسزا[۳] با ارتفاع ۱۵ متر در لهستان در سال ۱۹۹٤و سد واک بننت[٤] با ارتفاع ۱۸۳ متر در کانادا در سال ۱۹۹٦، مسئلهٔ رگاب است که گزارش‌های مفصل دلایل تخریب آن‌ها منتشر شده است [۲].

استفاده از رس تماسی مناسب، در کاهش وقوع این پدیدهٔ مخرب از محل تماس هسته با پی بسیار مؤثر است. به‌همین منظور بر اساس تجربیات به‌دست آمده، توصیه شده است که این رس، این ویژگی‌ها را داشته باشد [۳]:

- حد روانی(**LL**)، در محدودهٔ ۳۰ – ۲۵ درصد.
- شاخص خمیری (**PI**)، ۱۵–۱۲ درصد (حداکثر تا ۳۰٪).
- درصد ذرات عبوری از الک نمره ۲۰۰ ، بیش‌تر یا مساوی با ۵۰ درصد.

از آن‌جا که در برخی پروژه‌ها، امکان دسترسی به منبع قرضه‌ای با این خصوصیات مناسب به‌منظور استفاده در لایهٔ رس تماسی وجود ندارد، از راهکارهای مختلفی برای تأمین مصالح این لایه استفاده می‌شود.

۱. Contact Clay ۲. Dychow ۳. Chancza ۴. Wac Bennent

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

یکی از این راهکارها، اختلاط خاک منبع قرضهٔ رسی محل، با بنتونیت است که با این روش، شاخص خمیری رس موجود افزایش می‌یابد. بنتونیت، کانی رسی از خانوادهٔ مونت موریلونیت با خصوصیات انبساطی است که در اثر هوازدگی خاکسترهای آتشفشانی به‌وجود می‌آید. واحدهای ساختاری این رس، شامل دو صفحه چهار وجهی سیلیکا است که یک صفحه هشت وجهی آلومینا را در بر گرفته‌اند. بنتونیت، به‌دلیل داشتن خصوصیات منحصر به‌فرد خود می‌تواند در زمینهٔ افزایش شاخص خمیری خاک‌های منبع قرضه در سدهای خاکی مفید واقع شود.

در پژوهش‌های انجام شده سیما و هارسولسو، تأثیر استفاده از ۷ گونه مختلف بنتونیت بر خصوصیات نفوذپذیری ۵ نوع خاک با دانه‌بندی‌های متفاوت بررسی شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که با افزایش درصد بنتونیت، ضریب نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد به‌طوری‌که، میزان این کاهش به مشخصات خاک پایه و بنتونیت مصرفی بستگی زیادی دارد [٤]. میشار و همکاران، تأثیر خواص فیزیکی و شیمیایی بنتونیت شامل حد روانی، انبساط آزاد و درصد یون سدیم قابل تبادل را بر پارامترهای تحکیم خاک (C_V, C_C, t_{50}) ارزیابی کردند. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که با افزایش حد روانی، انبساط آزاد و درصد یون قابل تبادل بنتونیت، شاخص تراکم (C_C) و زمان ۵۰ درصد تحکیم (t_{50}) افزایش و ضریب تحکیم (C_V) کاهش می‌یابد [۵]. محققان دیگر تأثیر بنتونیت بر پارامترهای ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری در ماسه‌های بادی ریزدانه، بررسی کردند. نتایج این تحقیقات نشان داده‌اند که بنتونیت، سبب کاهش مقادیر ضریب تحکیم و ضریب نفوذپذیری مخلوط می‌شود [٦].

گودودا و همکاران در تحقیقات دیگری، ارزیابی تأثیر بنتونیت بر مشخصات تراکمی و پارامترهای مقاومت برشی مخلوط‌های خاک_ بنتونیت بررسی کردند [۷]. نتایج بررسی این محققان نشان داده است که استفاده از بنتونیت، سبب کاهش دانسیته خشک حداکثر و زاویهٔ اصطکاک داخلی مخلوط وافزایش رطوبت بهینه و چسبندگی آن می شود [۷]. نتایج تحقیقات باغبانیان و همکاران بر روی تأثیر افزودن بنتونیت بر خصوصیات خاک ریزدانه، نشان داد که

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

افزودن بنتونیت باعث افزایش شاخص خمیری و رطوبت بهینه تراکمی مخلوط شده وضریب نفوذپذیری و دانسیته خشک حداکثر را کاهش می‌دهد [۸].

در *پژوهش‌های خوشخو* و همکاران، پدیدهٔ فرسایش داخلی در سدهای خاکی و تأثیر نوع کانی خاک‌های رسی بر این پدیده ارزیابی شد [۹]. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از بنتونیت، نه تنها تأثیر منفی از نظر فرسایش‌پذیری و تخریب سدهای خاکی ندارد، بلکه استفاده از این ماده به‌میزان مناسب، می‌تواند در کنترل فرسایش داخلی سدهای خاکی نیز مفید باشد.

بررسی کلی نتایج اغلب تحقیقاتی که به‌منظور بررسی تأثیرات بنتونیت بر پارامترهای مهندسی خاک‌های مختلف انجام شده، نشان می‌دهد که افزایش بنتونیت به خاک‌ها، سبب افزایش در خصوصیاتی چون حد روانی، شاخص خمیری، انبساط آزاد، درصد رطوبت بهینه، چسبندگی خاک، شاخص تراکم‌پذیری، ضریب تورم، زمان ۵۰٪ تحکیم می‌شود. از طرف دیگر بنتونیت سبب کاهش دانسیته خشک حداکثر، ضریب تحکیم، زاویهٔ اصطکاک داخلی و هدایت هیدرولیکی مخلوط‌ها می‌شود. میزان تأثیر در خصوصیات مهندسی مخلوط‌های خاک – بنتونیت، تابعی از درصد و نوع بنتونیت استفاده شده، خواص فیزیکی و شیمیایی آن، و نوع خاک پایه است.

هدف این تحقیق، بررسی امکان استفاده از بنتونیت، برای تهیه خاک رس تماسی در پروژهٔ سد خاکی چشمه زنه شهرکرد است. این سد خاکی با هسته رسی و با ارتفاع ٤۲ متراز پی، در فاصلهٔ ۲۰ کیلومتری جنوب غربی شهرکرد در حال احداث است. بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که خاک رسی مناسب به‌منظور استفاده در لایه رس تماسی در محدوده طرح وجود ندارد. ارزیابی هم‌زمان اثرات مثبت و منفی افزودن بنتونیت به خاک رس، به‌منظور تهیهٔ رس تماسی برای استفاده در هسته سد و هم‌چنین تعیین میزان بهینه بنتونیت برای این منظور، در نتایج تحقیقات موجود دیده نمی‌شود و این موضوع، جنبهٔ اصلی تمایز این تحقیق با سایر تحقیقات موجود در این زمینه است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که اگر چه افزودن بنتونیت به خاک ریزدانه، باعث افزایش ویژگی‌های خمیری مخلوط خاک می‌شود، اما باعث ایجاد برخی ویژگی‌های منفی در خاک نیز می‌گردد که تابع مشخصات خاک ریزدانه و بنتونیت

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

مصرفی است. بنا بر این، با توجه به نوع مصالح این پروژه و موضوع تهیهٔ رس تماسی مناسب، در این تحقیق تغییرات ویژگی‌های مخلوط با افزودن بنتونیت، بررسی شده است و با توجه به تغییرات مثبت و منفی افزودن بنتونیت بر خاک رس، میزان بهینه بنتونیت مورد نیاز برای این کار نیز تعیین شده است. بنا بر این، هدف دیگر این تحقیق، بررسی میزان بهینه بنتونیت مورد نیاز برای تهیهٔ رس تماسی با ویژگی‌های خاص، برای استفاده در ناحیهٔ اتصال هسته با پی در پروژهٔ مذکور است.

روش تحقیق

در پژوهش اخیر، ۵ نمونه خاک بررسی شده‌اند. نمونهٔ A۱ رس تماسی موجود در منبع قرضه، A۲ رس به‌کار رفته در پتوی رسی آب‌بند است و نمونه‌های B۱، B۲ و B۳ رس‌های معمولی به‌کار برده شده در هستهٔ سد چشمه زنه هستند.

نمونه‌های A۱ و A۲، بدون افزودن رس بنتونیت و نمونه‌های B۱، B۲ و B۳ با افزودن درصدهای وزنی مختلف (۰، ۵، ۱۰، ۱۵ . ۲۰ ٪) از پودر بنتونیت خشک، بررسی شده‌اند. آزمون‌های انجام شده در این تحقیق، شامل این آزمون‌ها است که همگی بر اساس استاندارد ASTM انجام شده است [۱۰]:

دانه‌بندی (ASTM D٤۲۲)، حدود آتربرگ (ASTM. D٤۳۱۸)، تعیین وزن مخصوص (ASTM. D۸٥٤)، تراکم استاندارد (ASTM. D٦۹۸)، تعیین واگرایی (شامل آزمون کرامب (ASTM. D٦٥۷۲)، پین هول (ASTM. D٤٦٤۷) و هیدرومتری دوگانه (ASTM. ٤۲۲۱ D)، آزمون‌های تعیین مقاومت خاک (شامل برش مستقیم (ASTM. D۳۰۸۰) و ظرفیت باربری کالیفرنیا (ASTM. D۱۸۸۳)، تحکیم (ASTM. D۲٤۳٥) و نفوذپذیری (ASTM. D۲٤۳٤).

نتایج و بحث

ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بنتونیت

به‌منظور شناخت خصوصیات پایهٔ بنتونیت استفاده شده، آزمون‌های دانه‌بندی، حدود آتربرگ، وزن مخصوص و هم‌چنین برای شناخت ترکیب کانی‌شناسی، آزمون آنالیز شیمیایی

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

انکسار اشعه ایکس (XRD)، بر روی دو نمونه تصادفی از این رس صورت گرفت. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی این نمونه‌ها را به‌طور خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی رس بنتونیت

فعالیت (A)	طبقه‌بندی یونیفاید	درصد عبوری از الک ۲۰۰	PI (%)	PL (%)	LL (%)	G_s
۱/٦٤	CH	۸۰/٦	۱۳۲	۳۵/۵	۱٦۷/۵	۲/۱۱

نتایج آزمون‌های فیزیکی و آنالیز شیمیایی انجام شده نشان می‌دهد، بنتونیت استفاده شده از نوع سدیم‌دار است که بخش غالب آن را کانی سیلیس (SiO_2) (٦۰-۵۰٪) و سپس مونت موریلونیت سدیم‌دار (۱۷-۱۵٪) تشکیل می‌دهد. با توجه به شاخص خمیری به‌دست آمده، این بنتونیت در طبقه‌بندی یونیفاید، در گروه CH (رس با شاخص خمیری زیاد) و از نظر شاخص اکتیویته (AC) نیز در ردهٔ خیلی فعال قرار می‌گیرد.

آزمون‌های طبقه‌بندی مهندسی خاک

تعیین وزن مخصوص

با نظر به این که اکثر محاسبات وزنی و حجمی و محاسبات آزمون هیدرومتری، نیازمند دانستن مقادیر وزن مخصوص خاک‌ها است، آزمایش تعیین وزن مخصوص روی تمامی نمونه‌های اصلی انجام شده است. برای هر نمونه خاک، این آزمون سه بار تکرار شده و مقدار میانگین به‌عنوان وزن مخصوص خاک ارائه شده است (جدول ۲). چنان‌که نتایج این آزمون نشان می‌دهد، هر ۵ نمونه خاک دارای وزن مخصوص جامد در محدودهٔ ۲/٦ الی ۲/٦۵ هستند.

جدول ۲. وزن مخصوص نمونه‌های بررسی شده

نام نمونه	A۱	A۲	B۱	B۲	B۳
GS	۲/٦٤	۲/٦	۲/٦۲	۲/٦۱	۲/٦۳

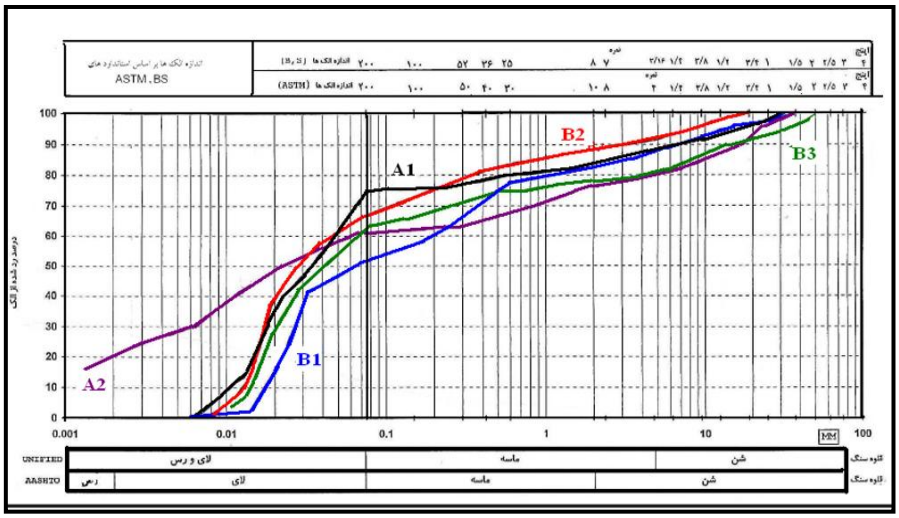
دانه‌بندی

به‌منظور بررسی مشخصات پایه نمونه‌های بررسی شده، آزمون‌های رده‌بندی خاک، شامل دانه‌بندی و حدود آتربرگ بر روی آن‌ها صورت گرفت. نمودار دانه‌بندی این ۵ نمونه خاک، در

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

شکل ۱ نشان داده شده است. در همهٔ نمونه‌ها، بیش از ۵۰ درصد نمونه از الک نمره ۲۰۰ عبور کرده، که سهم زیاد ذرات رس در نمونه‌های بررسی شده را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود، نمونه A۲ نسبت به نمونه‌های دیگر دانه‌بندی گسترده‌تر و درصد ریزدانه بیش‌تری دارند.



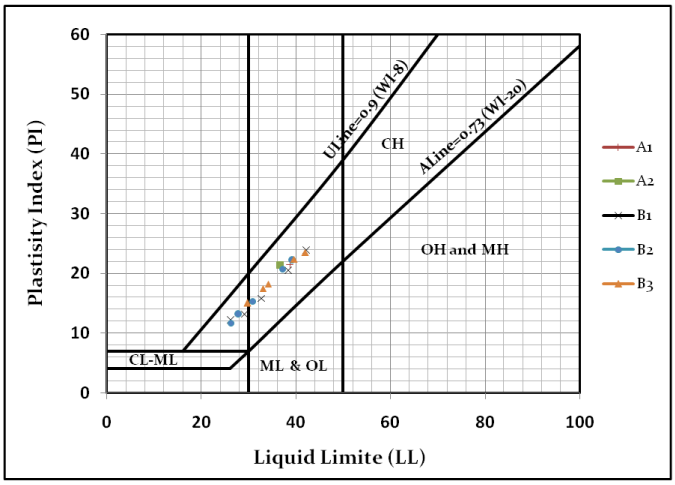
شکل ۱. نمودار دانه‌بندی نمونه‌های مختلف

حدود آتربرگ

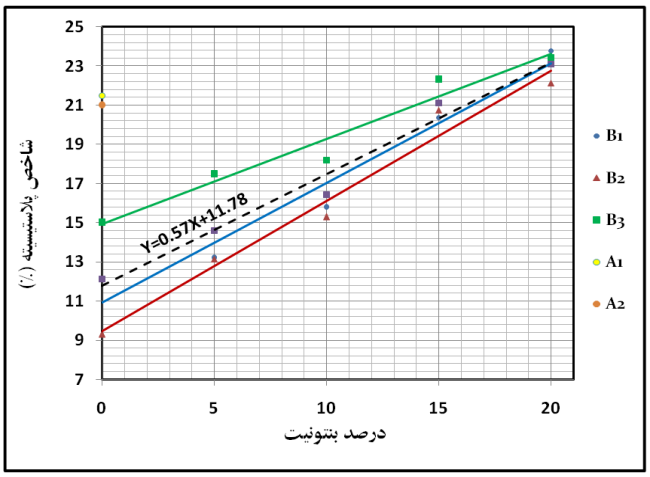
آزمون حدود آتربرگ، بر روی دو نمونه رس تماسی و نمونه‌های B با درصدهای مختلف وزنی بنتونیت، صورت گرفته است. بر اساس رطوبت حد روانی و شاخص خمیری، موقعیت این نمونه‌ها درنمودار کاساگراند، در شکل ۲ ارائه شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود، همهٔ نمونه‌ها در ردهٔ CL (رس با شاخص خمیری کم) قرار می‌گیرند.

در شکل ۳ که بر اساس نتایج حاصل، ترسیم شده است، بین درصد بنتونیت و شاخص خمیری خاک، رابطه‌ای تقریباً خطی دیده می‌شود. به‌طوری‌که با افزایش ۵ تا ۲۰ ٪ بنتونیت، شاخص خمیری نمونه‌ها تا حدود دو برابر افزایش یافته است که علت اصلی آن شاخص خمیری و خواص کانی‌شناسی منحصر به فرد بنتونیت است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]



شکل ۲. نمایش محدودهٔ خاک‌ها در نمودار کاساگراند



شکل ۳. رابطهٔ درصد بنتونیت و شاخص خمیری نمونه‌ها

شاخص خمیری نمونه‌های A در مقایسه با نمونه‌های B بیش‌تر است، به‌گونه‌ای که به‌طور تقریبی معادل شاخص خمیری مخلوط خاک‌های B، با ۱۵درصد بنتونیت است. نمودار نقطه چین در شکل ۳، میانگین تغییرات شاخص خمیری برای درصدهای مختلف از بنتونیت را نشان می‌دهد.

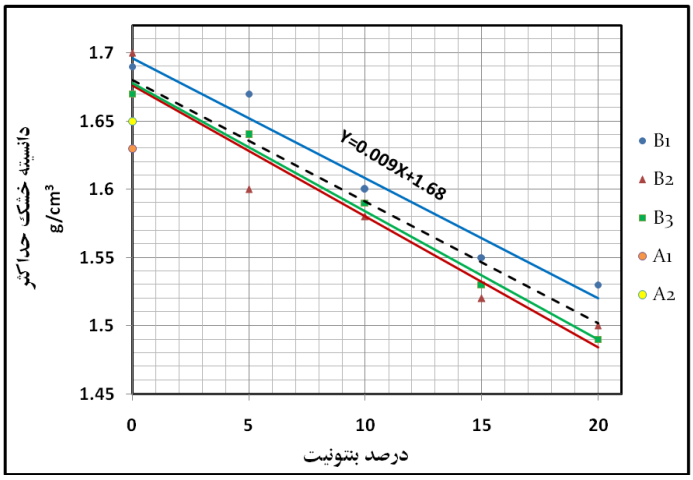
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

تراکم استاندارد

بر اساس نتایج حاصل از این آزمون، در نمونه B_1، B_2 و B_3، دانسیتهٔ خشک حداکثر با افزایش ۵ تا ۲۰ درصدی بنتونیت به خاک، به‌ترتیب حدود ۹/۵، ۱۲ و ۱۱ درصد کاهش و رطوبت بهینه در حدود ۲۵، ٤۰ و ۳۹ درصد افزایش نشان می‌دهد. نمونه‌های A، به‌دلیل شاخص خمیری بیش‌تر در مقایسه با سه نمونه B، از رطوبت بهینه بیش‌تر و دانسیته تراکمی کم‌تری برخوردارند.

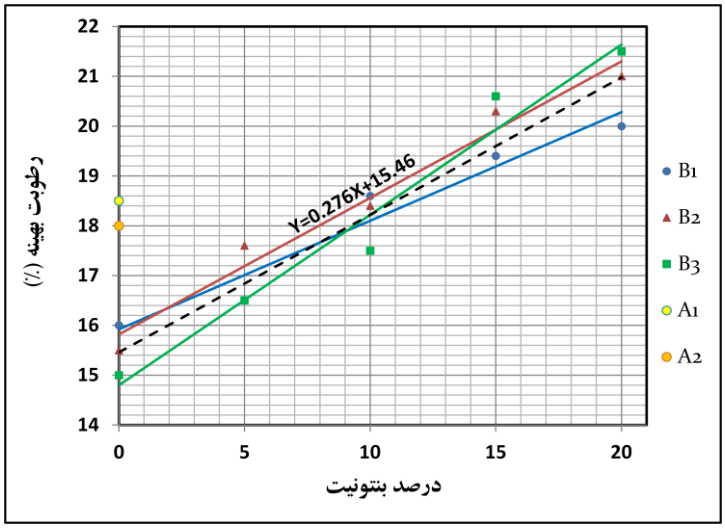
با افزایش درصد بنتونیت، به‌دلیل خاصیت انبساطی و شاخص خمیری زیاد این رس، شاخص خمیری مخلوط‌ها نیز افزایش می‌یابد در نتیجه میزان جذب آب با بنتونیت بیش‌تر شده و درصد رطوبت در رین وضعیت، افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد که از طرفی، بنتونیت افزوده شده به خاک سبب افزایش شاخص خمیری نمونه‌ها و در نتیجه جذب آب بیش‌تر با مخلوط خاک می‌گردد. این آب اضافی، مانع از آن می‌شود که انرژی اعمالی به خاک با چکش تراکم، صرف متراکم نمودن آن گردد. از طرف دیگر بنتونیت موجود در مخلوط، در تماس با آب انبساط یافته و با پر کردن فضاهای خالی خاک (به‌دلیل سبک‌تر بودن نسبت به خاک)، سبب کاهش دانسیته مخلوط‌ها می‌شود. در شکل‌های ٤ و ۵ رابطه درصد بنتونیت با دانسیته خشک حداکثر و رطوبت بهینه مشاهده می‌شود.



شکل ٤. رابطه درصد بنتونیت و دانسیته خشک نمونه‌ها

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]



شکل ۵. تأثیر افزایش درصد بنتونیت بر رطوبت بهینه

ارزیابی تأثیر بنتونیت بر پتانسیل واگرایی نمونه‌ها

معیار شیمیایی شرارد

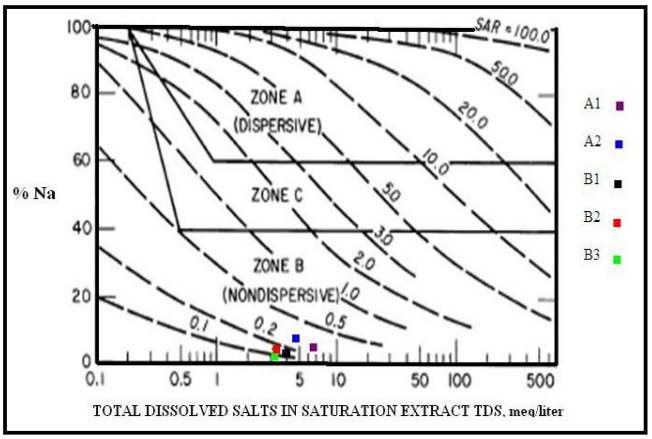
از میان روش‌هایی که برای تعیین پتانسیل واگرایی خاک‌ها به‌کار می‌رود، در این پژوهش آزمون شیمیایی بر اساس معیار شیمیایی شرارد بر روی ۵ نمونه اصلی و آزمون کرامب، پین هول و هیدرومتری دوگانه بر روی نمونه‌های اصلی و نمونه‌های مخلوط شده با بنتونیت صورت گرفته است.

در روش معیار شیمیایی شرارد، پارامترهای TDS[۱]، P.S[۲] و SAR[۳] که اساس تعیین پتانسیل واگرایی هستند با تعیین غلظت نمک‌های محلول در خاک تعیین می‌شوند [۱۱]. با پیاده کردن پارامترهای فوق در نمودار معیار شیمیایی شرارد در شکل ٦، مشاهده می‌شود که هر ۵ نمونهٔ اصلی در ناحیهٔ غیر واگرا قرا ر می‌گیرند.

۱. Total Dissolved Salts ۲. Percent of Sodium ۳. Sodium Adsorption Ratio

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]



شکل ٦. ارزیابی پتانسیل واگرایی نمونه‌ها در نمودار شرارد

آزمون کرامب

نتایج آزمون کرامب که بر روی قطعات مکعبی نمونه‌ها و مخلوط آن‌ها با درصدهای مختلف از بنتونیت انجام شد، بیان‌گر این است که هر ۵ نمونهٔ اصلی به‌همراه مخلوط خاک‌های B با ۵ و ۱۰ درصد وزنی پودر بنتونیت، در زمان‌های تعیین شده (۲ دقیقه، یک و شش ساعت)، فاقد واکنش است و هیچ‌گونه محلول کلوئیدی در اطراف نمونه‌های مکعبی آن‌ها تشکیل نشده است. بر این اساس، نمونه‌های مذکور فاقد واگرایی هستند که با نتایج به‌دست آمده از آزمون شیمیایی مطابقت کامل دارد. این در حالی است که نمونه‌های مکعبی خاک‌های B حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی بنتونیت، به‌ترتیب واکنش خفیف و متوسط نشان داده‌اند که حاکی از واگرایی ضعیف تا متوسط آن‌ها در تماس با آب مقطر است.

آزمون پین‌هول

آزمون پین‌هول به‌روش B (ارزیابی کدری رنگ آب خروجی و قطر سوراخ با عبور جریان آب) و تحت سه هد ۵۰، ۱۸۰ و ۳۸۰ میلی‌متر ستون آب انجام شد. قبل از انجام آزمون، هر نمونهٔ خاک با دانسیته و رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمون تراکم استاندارد، در قالب مخصوص این آزمایش متراکم شده است. نتایج این آزمون، گویای این مطلب است که در ۵ نمونهٔ اصلی و مخلوط خاک‌های B با ۵ و ۱۰ درصد وزنی پودر بنتونیت، آب خروجی از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

نمونه تحت هر سه هد مذکور، شفاف استو قطر سوراخ بدون تغییر (یک میلی‌متر) باقی‌مانده و یا به مقدار بسیار جزیی افزایش پیدا کرده است. این شرایط، حاکی از عدم واگرایی این خاک‌ها در تماس با آب است. با مطابقت نتایج این آزمون با نتایج آزمون شیمیایی و آزمون کرامب، صحت نتایج فوق تأیید می‌شود. این در حالی است که در نمونه‌های حاوی ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی بنتونیت، علاوه بر افزایش کدری آب، قطر سوراخ نیز با افزایش هد آب، افزایش می‌یابد که بیان‌گر واگرایی متوسط (SD) این نمونه‌ها است. در این مورد نیز نتایج حاصل با نتایج آزمون کرامب مطابقت دارد.

با توجه به آن که غالباً در پدیدهٔ واگرایی، کاتیون سدیم نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند لذا، می‌توان چنین استنباط کرد که افزودن درصدهای زیاد (۱۵ و ۲۰ درصد) از بنتونیت سدیم‌دار به خاک، سبب افزایش میزان کاتیون سدیم (Na^+) در خاک می‌گردد. کاتیون سدیم به‌دلیل شعاع هیدراسیون بزرگ، در تماس با آب سبب افزایش نیروی دافعه و کاهش اندرکنش بین ذرات رسی و در نهایت، افزایش پتانسیل واگرایی و پراکندگی خاک در آزمون‌های کرامب و پین‌هول می‌گردد.

آزمون هیدرومتری دوگانه

آزمون هیدرومتری بر روی نمونه‌های اصلی و نمونه‌های حاوی بنتونیت، یک بار بدون استفاده از ماده پراکنده ساز کالگن و بار دیگر با استفاده از این ماده جداکننده صورت گرفت. نسبت ذرات ریزتر از ۵ میکرون، در حالت اول به درصد ذرات ریزتر از ۵ میکرون، در حالت دوم به‌عنوان درصد واگرایی محاسبه می‌گردد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، درنمونه‌های فاقد بنتونیت (A۱، A۲، B۱، B۲ و B۳)، درصد واگرایی طبق معیار دکر و دونیگان از ۳۵ درصد کم‌تر است و نمونه‌ها به‌صورت غیرواگرا طبقه‌بندی شده‌اند. [۱۲]. درحالی که در تمامی نمونه‌های دارای بنتونیت، درصد واگرایی از مرز مذکور فراتر رفته که نشان می‌دهد وجود بنتونیت، سبب واگرایی این مخلوط‌ها شده است. عدم تطابق نتایج این آزمون با آزمون‌های واگرایی قبلی، به این صورت توجیه می‌شود:

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی، رس بنتونیت استفاده شده در مخلوط‌ها از نوع سدیم‌دار است. در آزمون هیدرومتری ساده (بدون استفاده از ماده پراکنده ساز کالگن) کاتیون سدیم موجود در رس بنتونیت، نقش کاتیون سدیم موجود در مادهٔ پراکنده سازکالگن (هگزامتافسفات سدیم) را ایفا می‌کند. با توجه به نقش کاتیون سدیم در پراکندگی ذرات خاک، یون سدیم موجود در بنتونیت، سبب می‌گردد تا در حالتی که حتی ماده پراکنده ساز اضافه نمی‌شود، از منعقد شدن و ته نشست هر چه بیش‌تر ذرات بسیار ریز، جلوگیری شده و مقدار چشم‌گیری از این ذرات خاک پس از ۱۲۰ دقیقه (مدت زمان انجام آزمایش هیدرومتری)، هم‌چنان معلق باشند. بنا بر این درصد ذرات ریز تر از ۵ میکرون در حالت اول به‌صورت کاذب افزایش یافته و باعث می‌شود تا درصد واگرایی محاسبه شده بیش از مقدار واقعی شده و بدین‌ترتیب نمونه‌ها واگرا معرفی شوند. نتایج به‌دست آمده از آزمون‌های شیمیایی، کرامب، پین‌هول و هیدرومتری دوگانه برای تعیین پتانسیل واگرایی نمونه‌ها، نشان می‌دهد که ۵ نمونهٔ اصلی و مخلوط نمونه‌های B با ده درصد و کم‌تر از رس بنتونیت، در تماس با آب، واگرایی نیستند در حالی که در نمونه‌های B، با ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی بنتونیت، پدیده واگرایی رخ می‌دهد.

بررسی مقاومت برشی مخلوط‌های خاک – بنتونیت

در این تحقیق، از دو آزمایش برش مستقیم و ظرفیت باربری کالیفرنیا برای بررسی مقاومت برشی نمونه‌های رس تماسی و بررسی تأثیر بنتونیت بر مقاومت برشی مخلوط‌های خاک – بنتونیت استفاده شد.

آزمون برش مستقیم

آزمون برش مستقیم بر روی نمونه‌های A۱، A۲، B۱ و مخلوط این خاک با ۱۰ و ۲۰ درصد وزنی پودر بنتونیت، در قالبی به قطر ٦ و ارتفاع ۲سانتی‌متر، با سرعت تند ۰/۵۹ میلی‌متر بر دقیقه، تحت سربارهای ۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع و در شرایط کاملاً اشباع انجام شد. بر روی مخلوط‌های حاوی ۵ و ۱۵ درصد وزنی پودر بنتونیت، این آزمون در قالبی با ابعاد ۱/۸۸×۵×۵ سانتی‌متر و با سرعت متوسط ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه، تحت سربارهای

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

۰/۵، ۱ و ۲ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، در شرایط رطوبت طبیعی صورت گرفت. شایان ذکر است که در هر دو حالت، نمونه خاک قبل از انجام آزمون، با دانسیته و درصد رطوبت به‌دست آمده از آزمون تراکم استاندارد، متراکم شده‌اند. نتایج به‌دست آمده از این آزمون در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. پارامترهای مقاومت برشی نمونه‌ها در شرایط اشباع و رطوبت طبیعی

نمونه	چسبندگی (C) Kg/Cm^2	زاویهٔ اصطکاک داخلی (φ) (درجه)
	شرایط اشباع	
A_1	۰/۰۷	۱۵
A_2	۰/۰۶	۱٤
B_1	۰/۰۳	۲۷
B_1+۱۰%	۰/۱۸	۱۳
B_1+۲۰%	۰/۲۱	۱۰
	شرایط رطوبت طبیعی	
B_1+۵%	۰/۱٦	۳۲
B_1+۱۵%	۰/۳۱	۲۱

با توجه به نتایج حاصل، در هر دو شرایط، با افزایش درصد محتوای بنتونیت، زاویهٔ اصطکاک داخلی کاهش و میزان چسبندگی خاک افزایش می‌یابد. افزایش تا ۲۰ درصد وزنی پودر خشک بنتونیت به نمونه اولیه در حالت اشباع، سبب افزایش ۷ برابری میزان چسبندگی و کاهش حدود ٦۰ درصدی زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه B_1 شده است.

در شرایط رطوبت طبیعی، افزایش ۱۰ درصد پودر بنتونیت به خاکی که ۵ ٪ بنتونیت داشته است، به‌طور تقریبی موجب افزایش ۲ برابری چسبندگی و کاهش ۳۵ درصدی زاویهٔ اصطکاک داخلی می‌شود.

بنتونیت اضافه شده به خاک با افزایش بخش ریزدانه خاک[1] و در نتیجه افزایش شاخص خمیری، سبب ازدیاد میزان چسبندگی مخلوط می‌گردد. هر چه درصد استفاده از این رس بیش‌تر باشد میزان چسبندگی نیز بیش‌تر خواهد شد.

۱. Clay Fraction

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

با توجه به قرار گیری خاک‌های مورد استفاده در رده ی CL، کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه‌ها می‌تواند به این دلایل باشد:

۱. با افزودن بنتونیت، به‌دلیل افزایش بخش ریزدانه خاک و غلبه آن بر بخش درشت دانه‌تر، رفتار مکانیکی خاک، بیش‌تر با همین بخش کنترل می‌شود. با کاهش اثر بخش دانه‌ای ، پارامتر زاویهٔ اصطکاک داخلی که از مشخصات خاک‌های دانه‌ای و درشت‌تر است، کاهش می‌یابد.

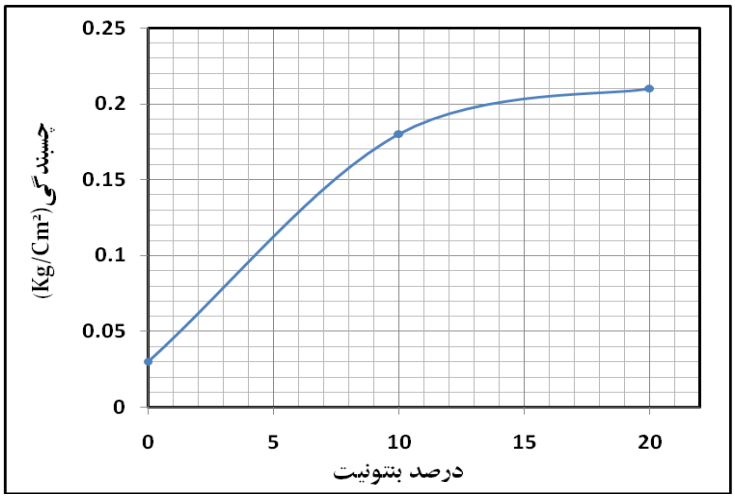
۲. بنتونیت موجود در مخلوط در حین تماس با آب، به‌دلیل خاصیت ژل‌شدگی یا تیکسوتروپی، نقش ماده‌ای روغنی را در بین ذرات خاک بازی می‌کند و در نهایت سبب افزایش سهولت حرکت ذرات خاک بر روی یک‌دیگر و کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی می‌گردد.

۳. در مخلوط‌های حاوی درصدهای بیش‌تر از بنتونیت، به دلیل کاهش دانسیتهٔ خشک حداکثر، میزان تراکم خاک کاهش یافته و در نتیجه میزان تماس ذرات با یک‌دیگر و قفل‌شدگی آن‌ها در هم کم‌تر شده و زاویهٔ اصطکاک داخلی نیزکاهش می‌یابد.

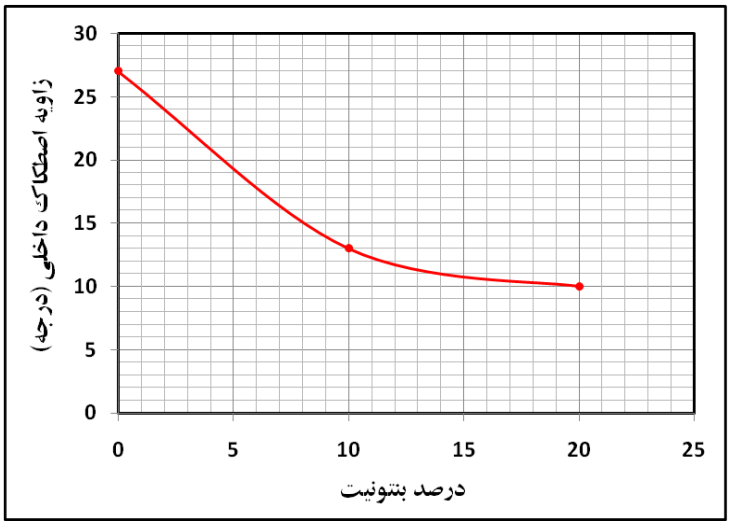
دو نمونهٔ رس تماسی بررسی شده، چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک تقریباً مشابهی دارند و در مقایسه با نمونهٔ فاقد بنتونیت، به‌دلیل شاخص خمیری بیش‌تر، چسبندگی بیش‌تر و زاویهٔ اصطکاک کم‌تری دارند. شکل‌های ۷ و ۸ ، رابطهٔ درصد بنتونیت با پارامترهای مقاومتی خاک (C و φ) در شرایط اشباع را نشان می‌دهند. چنان‌که در دو شکل دیده می‌شود، افزایش درصد بنتونیت، به‌ترتیب سبب افزایش چسبندگی و کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی مخلوط‌ها می‌شود. علاوه بر این، نرخ افزایش چسبندگی و یا کاهش زاویهٔ اصطکاک داخلی در درصدهای بنتونیت زیادتر، کاهش می‌یابد.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]



شکل ۷. رابطهٔ درصد بنتونیت و چسبندگی نمونه‌ها در شرایط اشباع



شکل ۸. رابطهٔ درصد بنتونیت و زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونه‌ها

آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا

آزمون ظرفیت باربری کالیفرنیا، به‌عنوان مکملی برای ارزیابی مقاومت برشی نمونه‌ها انجام شد. نمونهٔ با دانسیته خشک و رطوبت بهینه حاصل از آزمون تراکم استاندارد، متراکم شده و پس از قرائت میزان نفوذ سنبه در فشارهای مختلف، عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR)، محاسبه شد (جدول ٤).

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

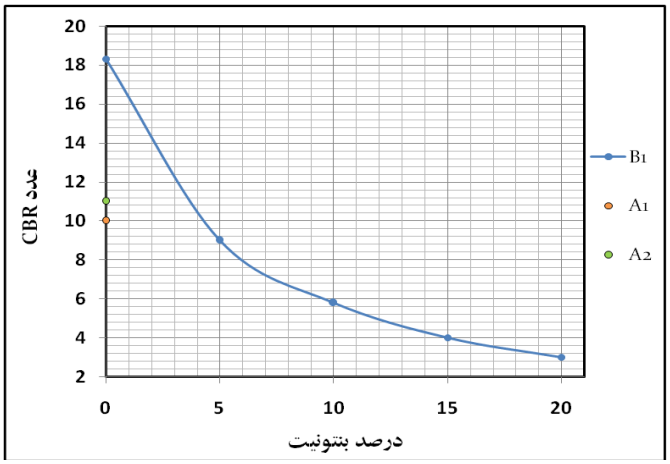
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

جدول ٤. عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا نمونه‌های بررسی شده

نمونه	A_1	A_2	B_1	B_1+۵%	B_1+۱۰%	B_1+۱۵%	B_1+۲۰%
عدد CBR	۱۰	۱۱	۱۸/۳	۹	٦	٤	۳
رده‌بندی	**نسبتاً خوب**				ضعیف تا نسبتاً خوب		

بر اساس رده‌بندی رایج برای نتایج این آزمون، نمونه‌های A_1، A_2، B_1 و مخلوط آن با ۵ درصد بنتونیت، در ردهٔ نسبتاً خوب و نمونه‌های B_1 حاوی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی بنتونیت، در ردهٔ ضعیف تا نسبتاً خوب قرار می‌گیرند. از بین تمامی نمونه‌ها، خاک منبع قرضه (B_1) وضعیت بهتری دارد. دو نمونه رس تماسی در مقایسه با این خاک، ظرفیت باربری کم‌تری دارند که علت اساسی آن، شاخص خمیری زیاد این دو نمونه در مقایسه با نمونه B_1 است.

شکل ۹، رابطهٔ عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) و درصد بنتونیت موجود در مخلوط را نشان می‌دهد. چنان‌که مشاهده می‌شود ، بین عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا و درصد بنتونیت موجود در مخلوط، رابطه‌ای غیرخطی معکوس دیده می‌شود به‌طوری‌که با افزایش درصد بنتونیت و به‌دنبال آن افزایش شاخص خمیری، مقاومت خاک در برابر نفوذ سنبه کم‌تر و نفوذ آن به درون خاک راحت‌تر می‌شود. بدین‌ترتیب، عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا (CBR) به‌دست آمده کوچک‌تر می‌شود.



شکل ۹. رابطهٔ درصد بنتونیت و عدد CBR برای نمونهٔ خاک B_1

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

بر اساس شکل فوق، نرخ کاهش عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا در ابتدا (از ۰ تا ۵٪ بنتونیت) بسیار سریع است. به‌طوری که با افزایش ۵ درصد بنتونیت به خاک عدد CBR با کاهش ۵۰ درصدی، از حدود ۱۸ به حدود ۹ می‌رسد. در ادامه، با افزایش هر چه بیش‌تر محتوای بنتونیت مخلوط، نرخ کاهش این عدد کم‌تر می‌شود و تقریباً از ۲۰ ٪ بنتونیت به بعد مقدار آن به‌طور تقریبی، ثابت گشته و یا به مقدار جزیی کاهش می‌یابد.

به‌طورکلی، با بررسی ویژگی‌های مقاومتی مخلوط‌های خاک- بنتونیت، به‌نظر می‌رسد که با افزایش محتوای این رس، به‌دلیل افزایش شاخص خمیری، زاویهٔ اصطکاک داخلی و عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا کاهش و میزان چسبندگی خاک افزایش می‌یابد. این موضوع با نتایج حاصل از تحقیقات گودودا و همکاران [۷] هم‌خوانی دارد.

تأثیر بنتونیت بر نفوذپذیری مخلوط‌های خاک-بنتونیت

قبل از انجام آزمون نفوذپذیری، نمونه‌ها با دانسیته و درصد رطوبت بهینه به‌دست آمده از آزمون تراکم استاندارد، در قالب دستگاه نفوذپذیری متراکم شده و تحت شرایط اشباع قرار گرفت. بسته به شاخص خمیری و میزان بنتونیت استفاده شده در نمونه‌ها، مدت زمان اشباع هر نمونه از یک تا سه هفته متغیر بود، به‌طوری‌که در مخلوط‌های حاوی مقادیر بیش‌تر از رس بنتونیت، زمان اشباع طولانی‌تر شد.

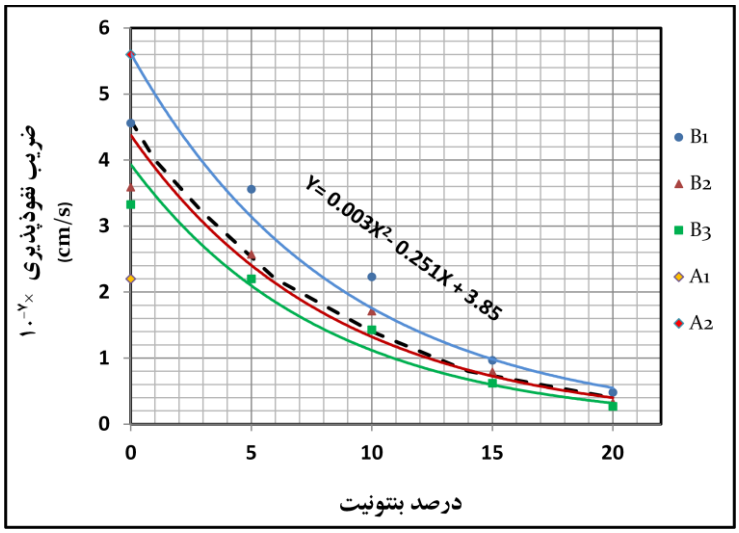
نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش درصد بنتونیت، ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نمودار شکل ۱۰، رابطهٔ ضریب نفوذپذیری و درصد بنتونیت استفاده شده در مخلوط را برای نمونه‌هایB، نشان می‌دهد. این نمودار، بیان‌گر رابطه‌ای معکوس بین ضریب هدایت هیدرولیکی و درصد بنتونیت موجود در مخلوط است، به‌طوری‌که با افزایش محتوای بنتونیت، ضریب نفوذپذیری کاهش می‌یابد.

در درصدهای کم‌تر بنتونیت، میزان این کاهش سریع‌تر است اما در درصدهای بیش‌تر، نرخ کاهش ضریب نفوذپذیری، کم‌تر می‌شود. براساس نمودار، در صفر درصد بنتونیت، دامنهٔ تغییرات ضریب نفوذپذیری سه نمونه خاک نسبتاً زیاد است، اما با افزایش درصد بنتونیت، میزان این تغییرات کم

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

می‌شود و در ۲۰ درصد، نمودارها به یک‌دیگر نزدیک می‌شوند. به‌عبارت دیگر در درصدهای بیش‌تر، خاک‌ها از نظر وضعیت نفوذپذیری به‌هم نزدیک می‌شوند.



شکل ۱۰. رابطهٔ درصد بنتونیت و ضریب نفوذپذیری نمونه‌ها

با توجه به نزدیکی خصوصیات این سه نمونه، برای محاسبه تغییرات ضریب نفوذپذیری برای درصدهایی از بنتونیت که بررسی نشده‌اند، منحنی متوسط ضریب نفوذپذیری به‌صورت نقطه‌چین در شکل مشخص شده است.

دو دلیل اصلی برای کاهش ضریب نفوذپذیری به نظر می‌رسد:

- وجود بنتونیت، سبب افزایش بخش ریزدانه[1] خاک می‌گردد. بدین‌ترتیب ذرات ریز بنتونیت در لابلای ذرات درشت‌تر خاک قرار می‌گیرد. بدین‌ترتیب، با کاهش تخلخل مفید خاک، مدت زمان اشباع اولیه نمونه بیش‌تر و ضریب نفوذپذیری که معرف سرعت حرکت آب از بین ذرات خاک است، کاهش می‌یابد.
- بنتونیت موجود در مخلوط، در حضور آب هیدراته گشته و با توجه به ظرفیت انبساط زیادی که دارد، با پرکردن حفرات خاک سبب کاهش سهولت حرکت آب از بین ذرات و کاهش ضریب نفوذپذیری خاک می‌شود.

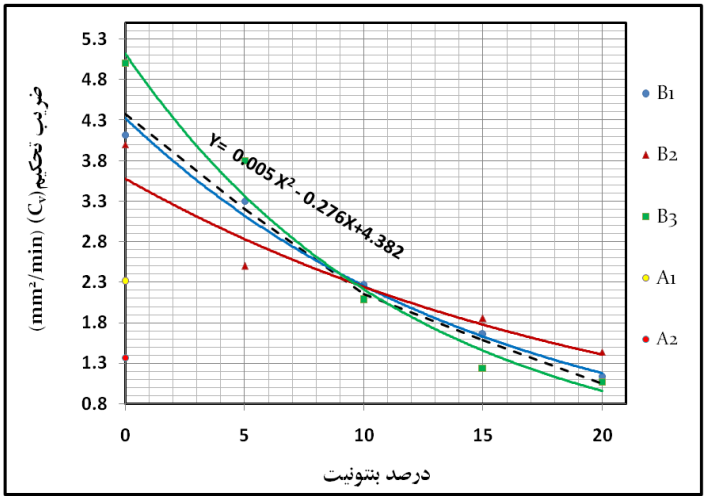
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

با افزایش ۵ تا ۲۰ درصدی بنتونیت به نمونه‌ها، ضریب نفوذپذیری نسبت به‌حالت پایه (صفر درصد بنتونیت) حدود ۹۰ درصد کاهش می‌یابد. دو نمونه رس تماسی، به‌ترتیب ضریب نفوذپذیری $۲/۲\times۱۰^{-۷}$ و $۵/٦\times۱۰^{-۸}$ سانتی‌متر بر ثانیه دارند که معادل ضریب نفوذپذیری مخلوط خاک‌های B با ۱۰ و ۱۵ درصد بنتونیت است. نتایج حاضر مشابه نتایج تحقیقات باغبانیان (۱۳۸۲)، سیما و همکاران (۱۹۷۹) و آمتا و همکاران (۲۰۰۸) بیان‌گر کاهش ضریب نفوذپذیری با افزایش محتوای بنتونیت است.

ارزیابی تأثیر بنتونیت بر پارامترهای تحکیمی نمونه‌ها

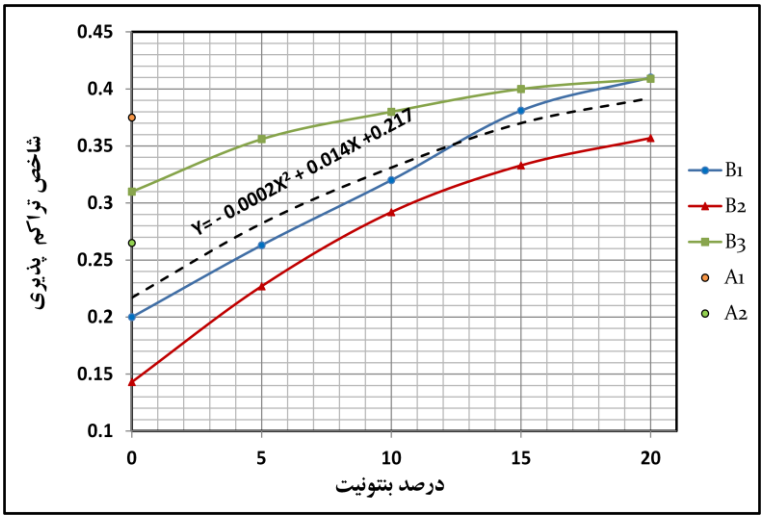
در این آزمون، هر نمونه با دانسیته خشک و رطوبت بهینه تراکمی متراکم و سپس اشباع شد و درطی ٤ مرحله بارگذاری مختلف (۰/۵، ۱، ۲ و ۲/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)، قرائت نشست- زمان نمونه‌ها انجام شد. پارامترهای ضریب تحکیم (C_v) و زمان ۵۰ درصد تحکیم (t_{50}) نمونه‌ها، از نمودار تخلخل- لگاریتم زمان (e-log t) یا روش کاساگراند و شاخص تراکم (C_C) و شاخص تورم (C_S)از نمودار تخلخل- لگاریتم فشار (e-log p)، محاسبه شده‌اند. نمودار شکل‌های ۱۱ تا ١٤ رابطهٔ درصد بنتونیت و پارامترهای تحکیمی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



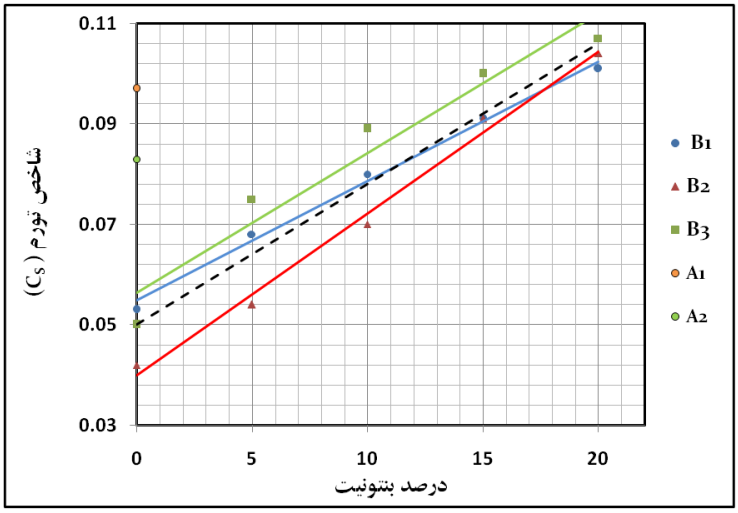
شکل ۱۱. رابطهٔ درصد بنتونیت و ضریب تحکیم (C_v) نمونه‌ها

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

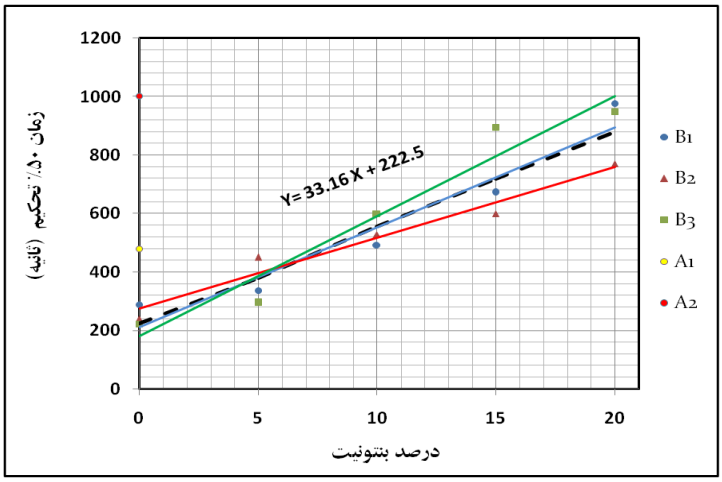


شکل ۱۲. رابطهٔ درصد بنتونیت و شاخص تراکم (C_C) نمونه‌ها



شکل ۱۳. رابطهٔ درصد بنتونیت و شاخص تورم (C_S) نمونه‌ها

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]



شکل ١٤. رابطهٔ درصد بنتونیت و زمان ۵۰٪ تحکیم (t_{50})نمونه‌ها

براساس شکل ۱۱، ضریب تحکیم با افزایش درصد بنتونیت، به‌صورت غیرخطی کاهش می‌یابد. نرخ این کاهش در درصدهای کم‌تر بنتونیت، زیاد است و با افزایش آن، آهنگ کاهش این ضریب، کاهش می‌یابد.

ضریب تحکیم نمونه‌های B_1، B_2 و B_3 حاوی ۵ الی ۲۰ درصد بنتونیت، به‌ترتیب ۷٤، ٦۹ و ۷۷ درصد کاهش داشته است. از طرفی افزایش بخش ریزدانه خاک با قرار گیری ذرات ریز بنتونیت در فضاهای خالی و از طرف دیگر انبساط آن در تماس با آب، سبب کاهش خروج آب از نمونه تحت بار تحکیمی قائم و در نتیجه کاهش ضریب نفوذپذیری می‌شود.

شکل ۱۲ نشان می‌دهد که ضریب تراکم‌پذیری مخلوط‌های خاک- بنتونیت، با افزایش درصد بنتونیت به‌صورت غیرخطی افزایش می‌یابد. در این نمودار نیز در درصدهای زیاد بنتونیت، آهنگ افزایش ضریب تراکم‌پذیری کاهش می‌یابد. به‌نظر می‌رسد که می‌توان علت این افزایش در شاخص تراکم را بدین‌صورت توجیه کرد:

بنتونیت موجود در مخلوط، به‌دلیل خاصیت انبساطی، در تماس با آب متورم گشته و تدریجاً شروع به پر کردن فضاهای خالی خاک می‌کند. با پرشدن فضاهای خالی، انبساط هرچه بیش‌تر بنتونیت، سبب فشرده شدن ذرات خاک به یک‌دیگر می‌شود. وقتی فشار تحکیمی قائم به مخلوط اعمال می‌گردد، مخلوط به‌دلیل تراکم بنتونیت متورم شده و هم‌چنین خمیدن،

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

لغزیدن، غلتیدن و شکستن ذرات خاک، به‌میزان بیش‌تری متراکم گشته و بدین‌ترتیب ضریب تراکم‌پذیری مخلوط افزایش می‌یابد. هر چه درصد بنتونیت بیش‌تر باشد، میزان فشار وارده از طرف بنتونیت متورم به ذرات خاک بیش‌تر و این ذرات تحت بار تحکیمی قائم، سریع‌تر و بیش‌تر دچار خمش، لغزش و شکست می‌شوند و در نتیجه، میزان تراکم‌پذیری نمونه افزایش می‌یابد.

نمودار شکل‌های ۱۳ و ١٤ گویای رابطه‌ای تقریباً خطی و مستقیم، بین افزایش محتوای بنتونیت با شاخص تورم و زمان ۵۰ درصد تحکیم (بر حسب ثانیه) مخلوط‌ها هستند. بر اساس دلایلی که برای کاهش ضریب تحکیم ذکر شد، زمان ۵۰ درصد تحکیم اولیه یا مدت زمانی که طول می‌کشد تا در اثر خروج آب نمونه به ۵۰ درصد تحکیم اولیه خود برسد نیز، افزایش خواهد یافت.

افزایش میزان ضریب تورم مخلوط، به خاصیت انبساطی بنتونیت در تماس با آب مربوط می‌شود. هر چه درصد بنتونیت استفاده شده در مخلوط بیش‌تر باشد، میزان انبساط و در نتیجه تورم نمونه‌ها بیش‌تر می‌شود.

نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که دو نمونه رس تماسی به‌دلیل شاخص خمیری بیش‌تر در مقایسه با سه نمونهٔ $B_۱$، $B_۲$ و $B_۳$، ضریب تحکیم کوچک‌تر و شاخص تورم، شاخص تراکم‌پذیری و زمان ۵۰٪ تحکیم بیش‌تری دارند و از نظر این ویژگی‌ها، به‌طور تقریبی معادل مخلوط این سه نمونه خاک با ۱۰ الی ۱۵ درصد بنتونیت هستند.

نتایج این پژوهش، با نتایج برخی محققان دیگر از جمله آمتا و همکاران (۲۰۰۸) و میشار و همکاران (1020) که پارامترهای تحکیمی مخلوط‌های خاک- بنتونیت را بررسی کرده‌اند، مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر، به‌منظور بررسی تأثیر اختلاط بنتونیت بر خواص مهندسی خاک‌های ریزدانه رسی، انجام شده است. سه نمونهٔ خاک ریزدانه منبع قرضه سد چشمه زنه، با افزودن درصدهای مختلف بنتونیت و دو نمونه رس تماسی بدون افزایش بنتونیت بررسی شده‌اند.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

نتایج نشان می‌دهد افزایش بنتونیت، سبب افزایش شاخص خمیری، رطوبت بهینه تراکمی، چسبندگی (C)، زمان ۵۰ درصد تحکیم، شاخص تورم و تراکم‌پذیری خاک و کاهش دانسیته خشک حداکثر، زاویهٔ اصطکاک داخلی، عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا، ضریب تحکیم و ضریب هدایت هیدرولیکی مخلوط‌های خاک- بنتونیت می‌شود.

علی‌رغم نقش مهم بنتونیت در کاهش ضریب نفوذپذیری و ضریب تحکیم و افزایش انعطاف‌پذیری و چسبندگی که از ویژگی مهم رس تماسی هستند، استفاده بیش از ۱۰ ٪ وزنی پودر بنتونیت، سبب کاهش دانسیته خشک حداکثر به کم‌تر از ۱/٦ گرم بر سانتی‌متر مکعب، کاهش چشم‌گیر زاویهٔ اصطکاک داخلی و عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا، افزایش قابلیت تراکم‌پذیری و (در نتیجه افزایش استعداد ترک‌خوردگی مصالح) و ایجاد پدیدهٔ واگرایی (به‌دلیل تماس دائمی این لایه با آب) در آن‌ها می‌شود. بدین‌ترتیب با تجزیه و تحلیل نتایج مذکور و در نظر گرفتن تغییرات تمامی پارامترها، می‌توان گفت درصد بهینه بنتونیت مصرفی که به‌منظور بهبود خواص مهندسی این نمونه‌ها برای تهیهٔ رس تماسی پیشنهاد می‌شود، ۱۰ ٪ است.

با افزودن این مقدار از بنتونیت به خاک‌های منبع قرضه، علاوه بر این که شاخص خمیری نمونه‌ها تا حد قابل قبول برای مصالح رس تماسی افزایش می‌یابد، دانسیته تراکمی و پارامترهای مقاومت برشی لازم برای خاک از حد مشخصی کم‌تر نمی‌گردد. هم‌چنین، شرایط قابل قبول خاک از نظر واگرایی نیز تأمین می‌شود و ضریب نفوذپذیری و ضریب تحکیم، تا حد ممکن کاهش می‌یابند.

دو نمونه رس تماسی بررسی شده، از نظر شاخص خمیری؛ به‌طور تقریبی معادل مخلوط نمونه‌های B با ۱۵ درصد وزنی و از نظر پارامترهای تحکیمی معادل مخلوط آن‌ها با ۱۰ الی ۱۵ درصد وزنی بنتونیت هستند. این نمونه‌ها به‌دلیل شاخص خمیری بیش‌تر نسبت به نمونه‌های B، دارای چسبندگی و رطوبت بهینه بیش‌تر و زاویهٔ اصطکاک داخلی، دانسیتهٔ خشک و عدد ظرفیت باربری کالیفرنیا کم‌تر هستند. در مجموع با توجه به شرایطی که برای لایهٔ رس تماسی ذکر شد، دو نمونه رس تماسی بررسی شده، شرایط مذکور را دارد و نسبت

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

به نمونه‌های منبع قرضه از نظر شاخص خمیری، ضریب نفوذپذیری، ضریب تحکیم در وضعیت بهتری قرار دارند.

منابع

1. Foster M. A., Fell R., Spannagle M., "The statistics of embankment dam failures andaccidents", Can. Geotech. J., 37-51 (2000a) 1000-1024.

۲. سروش ع.، پیلتن طباطبایی ش.، میری دیسفانی م.، *شناسایی پدیدهٔ ریزشویی و خاک‌های ناپایدار داخلی*، انتشارات وزارت نیرو-کمیته ملی سدهای بزرگ ایران (۱۳۸۹).

3. Daniel D. E., "Earthen liner for disposal facilities. In: Woods RD (ed) Geotechnical practice for waste disposal", Geotechnical Special Publication, Vol. 13. ASCE, New York (1987) 21-39.

4. Sima N., Harsulescu A., "The use of bentonite for sealing earth dams", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, N° 20 (1979) 222-226.

5. Mishar A. K., Ohtsubo M., Y.Li L., Higashi T., "Influence of the bentonite on the consolidation behavior of soil-bentonite mixture", Carbonate Evaporites, 25 (2010) 43-49.

6. Ameta N. K., Wayal A. S., "Effect of bentonite on permeability of dune sand", EJGE, Vol. 13 (2008) 1-7.

7. Gueddouda M. K., Goual I., Lamara M., Aboubaker N., "Hydraulic conductivity and shear strength of compacted dune sand-bentonite mixtures", International Conference on Construction and Building Technology, 12 (2008) 139-150.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]

۸. باغبانیان ع.، تاجیک ح..، نیکودل م. ر، *کاربرد کائولن و بنتویت در به‌سازی خاک‌های مورد استفاده در هسته سدهای خاکی*، مجموعه مقالات سومین کنفرانس زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران. دانشگاه بوعلی سینا همدان (۱۳۸۲) ۹۳- ۱۰٤.

۹. خوشخو م.، زمردیان م. ع.، مخبری م، *تأثیر کانی بنتونیت (مونت موریونیت سدیمی) بر فرسایش داخلی در سدهای خاکی*، چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران. تهران (۱۳۸۹).

10. ASTM, "Annual Book of Standards. American Society of Testing and aterials", West Conshohocken, PA (2008).

11. Sherard J. L., Dunnigan L. P., Decker R. S., "Identification & nature of dispersive soils", Journal of the Geotechnical Engineering Division (ASCE), 102(GT 4) (1976) 298-312.

12. Decker R. S., Dunnigan L. P., "Development & use of the soil conservation service dispersion test", ASTM STP 623 (1977) 94-100.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1393.8.3.6.6]