# بررسی اثر افزودن اتیلن–وینیل استات (EVA) بر پارامترهای مقاومت خاک دانه‌ای

مهسا میری، مسعود عامل سخی*، مرتضی جیریایی شراهی

دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران

تاریخ دریافت: ١٤٠٠/٠٤/٠٦ تاریخ پذیرش: ١٤٠٠/٠٩/٢٩

## چکیده

تثبیت و تسلیح خاک‌ها از دیرباز نقش مهمی در علوم عمرانی به خصوص در علم ژئوتکنیک ایفا کرده است و با گذشت زمان و نیاز به زمینی مقاوم‌تر و با ثبات‌تر برای تحمل بارهای ثقلی و نیروهای برشی بیشتر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. هم‌چنین در سال‌های اخیر با ورود محیط زیست به صنعت ساخت و ساز، با هدف کاهش اثرات نامطلوب زایدات صنعتی و نخاله‌های ساختمانی بر محیط زندگی افراد و حفظ محیط زیست برای آیندگان، در موارد بسیاری باعث کاهش هزینه‌های اقتصادی پروژه‌ها نیز می‌شود. در این پژوهش، به تسلیح خاک دانه‌ای در دو حالت سست و نیمه‌متراکم با استفاده از مادهٔ ضایعاتی با نام کامل اتیلن–وینیل استات(EVA) پرداخته شده است. آزمایش‌ها بدون افزودن رطوبت، به شیوهٔ درصد وزنی و با استفاده از دستگاه CBR صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مقاومت خاک با استفاده از این مواد افزودنی به طور قابل توجهی افزایش پیدا کرده و تأثیر آن با کاهش وزن مخصوص خاک، بر روی خاک بیشتر می‌شود. هم‌چنین مقدار بهینه مواد افزودنی در حالت سست و نیمه‌متراکم به ترتیب ٢٪ افزودنی و ١٪ افزودنی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهسازی خاک، خاک دانه‌ای، EVA، تسلیح خاک، مادهٔ ضایعاتی، اختلاط مواد، محیط زیست

## مقدمه

با وجود پیشرفت جوامع و گسترش راه‌ها و ساختمان‌های بلند و دیگر سازه‌ها، نیاز به زمینی مقاوم‌تر و مستحکم‌تر برای احداث پی سازه‌ها، بستر جاده‌ها، سدها و ... با مقاومت کافی بیش از پیش اهمیت پیدا کرده است، بنابراین تثبیت و تسلیح خاک‌های سست اعم از رسی و یا ماسه‌ای مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌است. همچنین بازیافت و دفع زایدات و نخاله‌های صنعتی از مشکلات اصلی محیط زیست به شمار می‌رودکه باقی ماندن آنها در محیط زندگی انسان‌ها و موجودات کرهٔ زمین باعث آسیب رساندن به زیستگاه طبیعی آنها می‌شود. امروزه سعی می‌شود با هدف افزایش مقاومت و ظرفیت باربری خاک، از مواد ضایعاتی در تثبیت و تسلیح خاک استفاده شود تا با این روش به حفظ محیط زیست نیز کمک شود. پژوهشگران حوزهٔ ژئوتکنیک بر روی راهکارهای گوناگونی از روش‌های سنتی تا مدرن برای بهسازی،

* نویسندهٔ مسئول: amelsakhi@qut.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

تسلیح و تثبیت انواع خاک‌ها مطالعه وتحقیق کرده‌اند. از جمله این روش‌ها شامل: روش تزریق شیمیایی، تراکم دینامیک، استفاده ازتسمه‌ها و ژئوتکستایل‌ها، نیلینگ، اختلاط خاک با مواد مختلف هم‌چون پلاستیک، الیاف و ... می‌توان اشاره کرد. استفاده از هر کدام از این روش‌ها در پروژه‌ها وابسته به شرایط آن از قبیل نوع خاک، قرارگیری زمین موردنظر، دسترسی آسان به مصالح تسلیح و ... می‌باشد. از این رو لانگ و همکاران (۲۰۱۹) برای بهسازی و تثبیت خاک‌های نرم بستر راه آهن پرسرعت (HSR) که از نظر سلامت ساختاری و دوام بسیار مهم است، به بررسی اثر افزودن ضایعات محلی ذغال سنگ به خاک ضعیف پرداختند که سبب افزایش فشاری نمونه‌ها شد[۱]. لیکن یکی از موارد مهم و اثرگذار، هزینه‌های اقتصادی پروژه‌ها است که در سال‌های اخیر سعی شده است با استفاده از مواد ضایعاتی هم‌چون پلاستیک‌ها، لاستیک، پودر آهن و .... علاوه بر تقویت خصوصیات خاک، باعث کاهش هزینه‌ها نیز بشود. افزودن پودر آهن بر حدود اتربرگ خاک‌های رس با کاهش شاخص خمیری و حد روانی همراه بوده است [۳،۲]. هم‌چنین اختلاط پودر آهن با خاک‌های رمبنده باعث بهبود خصوصیات این خاک و کاهش نشست فروریزشی هنگام مرطوب شدن، می‌شود و نسبت بهینه پودر آهن در این نوع خاک‌ها، ۵٪ تا ٦٪ وزنی خاک می‌باشد[٤]. استفاده از مواد زاید پلاستیکی در زمینهٔ مهندسی عمران، یکی از راه‌حل‌های مناسب برای کمک به دفع زباله‌ها به خصوص پلاستیک‌ها می‌باشد. طبق آزمایش‌های تجربی، قطعات زباله‌های پلاستیکی به دلیل افزایش اصطکاک داخلی باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت خاک‌های ماسه‌ای و رسی می‌شود اما درصد افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک ماسه‌ای کمی بیشتر از خاک رس است [۵]. هم‌چنین بخیتی و همکاران (۲۰۱۹) با افزودن الیاف تایر لاستیک به خاک رس بنتونیت نشان دادند که مقدار شکل‌پذیری با افزایش مقدارالیاف لاستیک افزایش می‌یابد [٦]. علاوه بر تأثیر نوع مواد بر خصوصیات خاک، شکل ظاهری و ابعاد نیز می‌تواند بر بهسازی مؤثر باشد. از این‌رو مهدی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعهٔ رفتار ماسهٔ مسلح شده توسط تراشه‌های کف‌پوش‌های لاستیکی ضایعاتی با نسبت طول به عرض مختلف و سه درصد حجمی مختلف و در تراکم‌های متفاوت پرداختند. نتایج آزمایش CBR نشان می‌دهد که با افزایش درصد حجمی مواد افزودنی عدد CBR افزایش یافته و هم‌چنین نسبت طول به عرض نقش مؤثری در تغییرات پارامتر CBR دارد [۷]. هوشیار و رستمی (۲۰۱۸) به بررسی اثر استفاده از ضایعات پلاستیکی یکبار مصرف در بهبود ظرفیت باربری خاک ماسه‌ای در درصدهای وزنی متفاوت با استفاده از دستگاه CBR پرداختند و نتایج نشان داد که با قراردادن قطعات پلاستیکی در خاک، ظرفیت باربری افزایش قابل توجهی پیدا می‌کند و مقادیر بهینه بین ۲ تا ۲/۵ درصد می‌باشد [۸]. اثر بهسازی خاک با استفاده از الیاف پلی‌استر بر پارامترهای مقاومت برشی خاک، باعث بهبود قابل‌توجه خاک SC و هم‌چنین مقدار بهینه این الیاف ۱٪ گزارش شده‌است [۹]. علاوه بر اختلاط مواد با خاک برای بهسازی خاک‌های سست، افزودن مواد شیمیایی و پلیمری یکی دیگر از روش‌های تثبیت خاک‌های مسئله‌دار می‌باشد. میرزابابایی و همکاران (۲۰۱۷) به مطالعه تأثیر دو ماده افزودنی شیمیایی پلی (وینیل الکل) (PVA) و اسید کربوکسیلیک ترا ۱،۲،۳،٤بوتان (BTC) بر روی مقاومت فشاری محدود نشده یک نمونه خاک رس منبسط شونده در دو حالت وزن مخصوص پرداختند و نتایج نشان داد مقاومت فشاری هر دو خاک رس متراکم و نرم به طور قابل توجهی بهبود یافت [۱۰]. رضایی ملک و همکاران (۲۰۱۷) یک پلیمر مایع فعال شده

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

مرطوب از خانواده عمومی متیلن دیفنیل دییزوسیانات (MDI) را به عنوان تثبیت کننده خاک برای ماسهٔ بد دانه‌بندی شده (SP) مورد مطالعه قرار دادند. مطالعات حاکی از آن است که با افزایش نسبت پلیمر به آب، مقاومت ماسهٔ تثبیت شده با افزایش مقدار پلیمر اضافه شده، تقریباً به صورت خطی افزایش یافته و نسبت بهینه پلیمر به آب ۱:۲ است [۱۱]. بررسی نتایج خصوصیات مکانیکی خاک CL با تثبیت نانوکربنات‌کلسیم و تسلیح با ضایعات الیاف فرش(CWF) نشان داد که افزودن نانوذرات به خاک رس باعث بهبود خصویات خاک رس می‌شود و علاوه بر این، ضایعات الیاف فرش(CWF) سختی خاک را افزایش می‌دهد [۱۲]. هم‌چنین افزودن براده آلومینیم به خاک CL تأثیر فراوانی بر روی وزن مخصوص خشک بیشینه مخلوط رس و ذرات آلومینیم ندارد ولی باعث کاهش چشم‌گیر وزن مخصوص بیشینه در مخلوط رس و ذرات پلی‌اتیلن بازیافتی می‌شود [۱۳]. سعیدی‌کیا و مدنی (۱۳۹۷) به بررسی تأثیر جایگزینی ۱۵/۵ و ۲۵ درصد اتیلن وینیل استات و وینیل استات بر خواص مخلوط های پایه سیمان آلومینات کلسیم پرداختند. خواص مکانیکی مورد بررسی شامل مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بوده است. نتایج نشان می‌دهد اتیلن وینیل استات با نسبت پلیمر به سیمان ۵ و ۲۵ درصد، عملکرد مطلوبی نسبت به وینیل استات داشته و در ۱۵٪ جایگزینی، این دو پلیمر عملکرد یکسانی از خود نشان داده‌اند [١٤].

با توجه به اهمیت و گستردگی استفاده از افزودنی‌های مختلف به منظور بهسازی خاک، هدف از این پژوهش بررسی اثر تسلیح به روش اختلاط بر مقاومت خاک ماسه‌ای با استفاده از مواد افزودنی اتیلن-وینیل استات (EVA) در درصدهای وزنی مختلف و در دو نوع تراکم مختلف خاک می‌باشد. EVA از جمله زایدات صنعتی بوده که با توجه به قابل بازیافت نبودن آن و جمع شدن انبوهی از این زباله در محیط، می‌تواند در بهبود شرایط زیست محیطی کمک نموده، هم چنین استفاده از آن باعث کاهش هزینه‌های هنگفت پروژه‌ها شود.

## مواد و روش‌ها

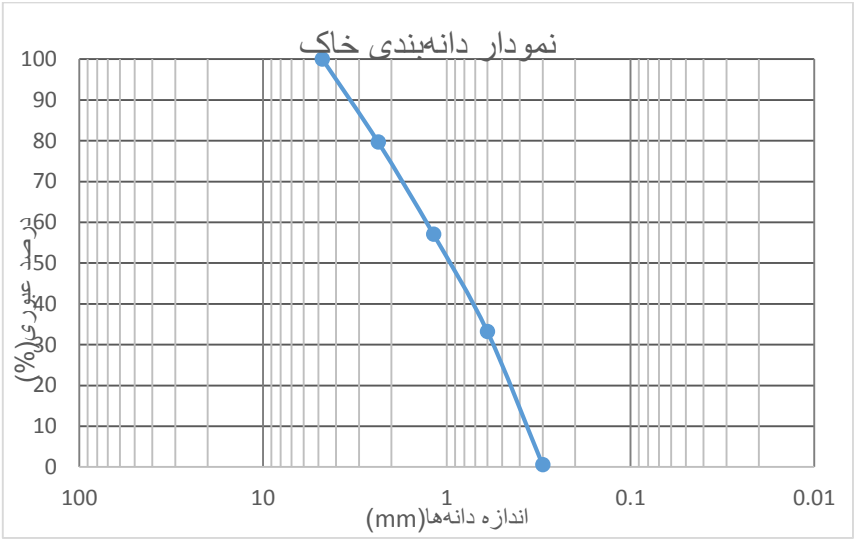
### خاک

در این پژوهش از یک نوع خاک دانه‌ای با دانه بندی مشخص(رد شده از الک ٤# تا مانده روی الک ۵۰#) به عنوان خاک پایه استفاده شده‌است. بر اساس سیستم طبقه بندی متحد خاک‌ها، این خاک ماسهٔ بد دانه‌بندی شده است. شکل ماسه، منحنی دانه‌بندی و ویژگی‌های آن به ترتیب درشکل ۱، شکل ۲ وجدول ۱ ارائه شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]



**شکل ١- شکل دانه‌های خاک ماسه‌ای**




**شکل ٢- منحنی دانه بندی خاک**

**جدول ١- مشخصات خاک**

| نوع خاک | حداقل وزن مخصوص خشک ($kN/m^3$) | نام خاک (Unified) | میانگین $G_S$ | $D_{10}$ | $D_{30}$ | $D_{60}$ | Cc | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ماسه | ١٦/١ | SP | ٢/٦٥ | ٠/٣٧ | ٠/٥٧ | ١/٤ | ٠/٦٣ | ٣/٧٨ |

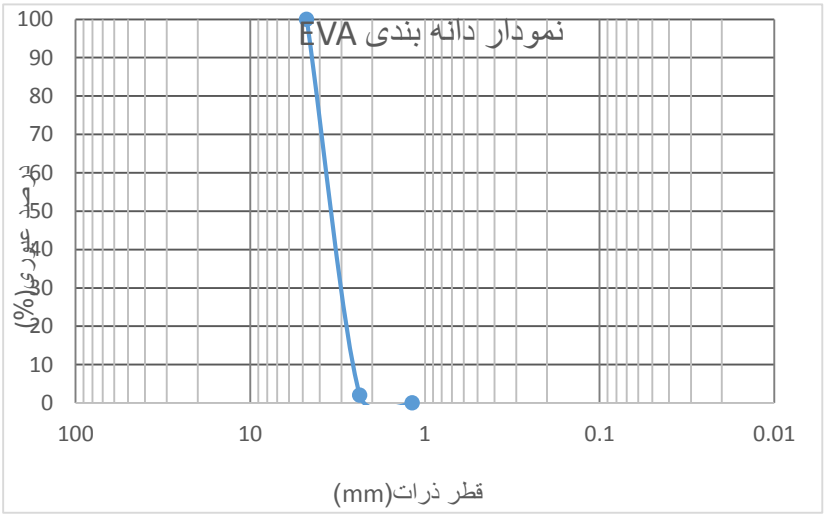
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

### مواد مسلح‌کننده

مواد تسلیح‌کننده مورد استفاده در این تحقیق با نام کامل اتیلن-وینیل استات(Ethylene-Vinyl Acetate) به عنوان مادهٔ ضایعاتی صنعتی پلیمری می‌باشد. به منظور اختلاط مواد EVA با خاک، در قطعات تقریبا مساوی و هم‌اندازه خرد شده‌اند که تصویر و منحنی دانه بندی آن به ترتیب در شکل‌های ٣ و ٤ آمده است. هم‌چنین آزمون کشش برای



**شکل ٣- مواد خرد شده EVA**



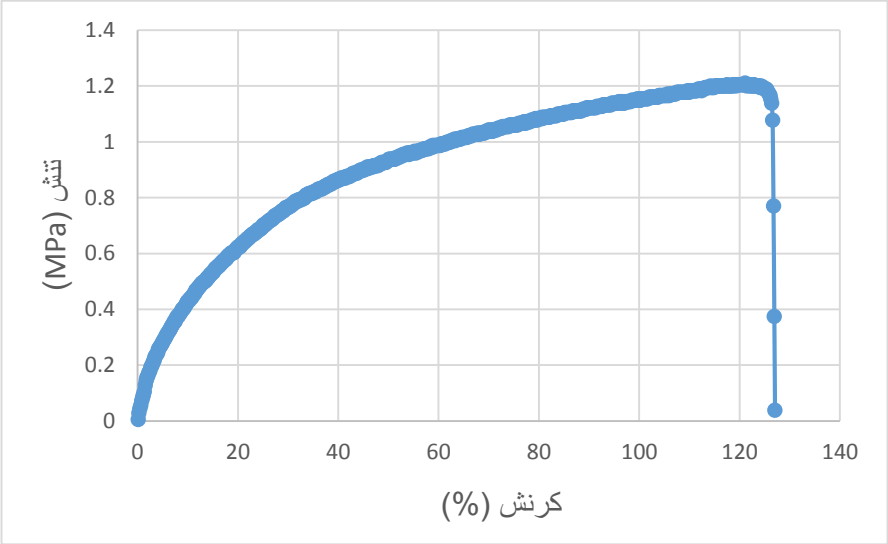

**شکل ٤- منحنی دانه بندی EVA**

تنش-کرنش مهندسی بر اساس مقادیر نیرو اعمالی-ازدیاد طول رسم می‌شود که نشان دهنده رفتار ماده تحت کشش است، شکل ٥ یک نمونه از رفتار ماده را بر اساس تنش- کرنش نشان می‌دهد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

**جدول ۲- نتایج میانگین آزمایش کشش EVA در لحظه شکست**

| نوع ماده | مدول الاستیک (MPa) | استحکام کششی (MPa) | کرنش(٪) |
|---|---|---|---|
| اتیلن-وینیل استات(EVA) | ۲/۹ | ۱/۱٤ | ۱۲۹/٤۸ |




**شکل ۵- نمودار رفتار ماده EVA**

**نحوه آماده سازی و شیوه انجام آزمایش‌ها**

خاک‌ها بدون افزودن رطوبت و با دو تراکم متفاوت، سست و نیمه‌متراکم، در حالات بدون استفاده از مسلح کننده و با استفاده از مسلح کننده در درصدهای مختلف EVA، مورد آزمایش قرار گرفته است. تراکم‌های سست ($\gamma = 16/1\ \mathrm{KN}/m^3$) و نیمه متراکم ($\gamma = 17\ \mathrm{KN}/m^3$) با توجه به آزمایش‌های تراکم و تعیین حداقل وزن مخصوص، تعیین شدند.

نمونه‌ها به شیوه درصد وزنی انجام گرفته و با توجه به محاسبه مقدار وزن مواد افزودنی و خاک ماسه‌ای مورد نظر در درصدهای مختلف، با یکدیگر مخلوط شدند (شکل ٦). آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه CBR صورت گرفته‌است(شکل ۷) و نمونه در قالب مورد نظر با روش تراکم ریزشی از سطح آن، تا ارتفاع مشخص ریخته می‌شود و قرارگیری ماده افزودنی در بین ذرات خاک به صورت تصادفی می‌باشد. با توجه به وزن و ارتفاع نمونه تا نقطه مورد نظر در قالب، سعی شده است نمونه های یکسانی تهیه شود و اختلاط مواد، همگن و به درستی انجام گیرد. سپس هنگام قراردادن نمونه در دستگاه جهت آزمایش، طوری قرار گرفته است که سنبه بارگذاری تقریباً هم مرکز با نمونه و مماس

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

با سطح بالایی آن باشد. هم چنین از سرباری یکسان برای کلیه نمونه‌ها استفاده شده و سرعت بارگذاری ۱/۲۷ میلی‌متر بر دقیقه است.



**شکل٦ : مخلوط خاک و مواد EVA**



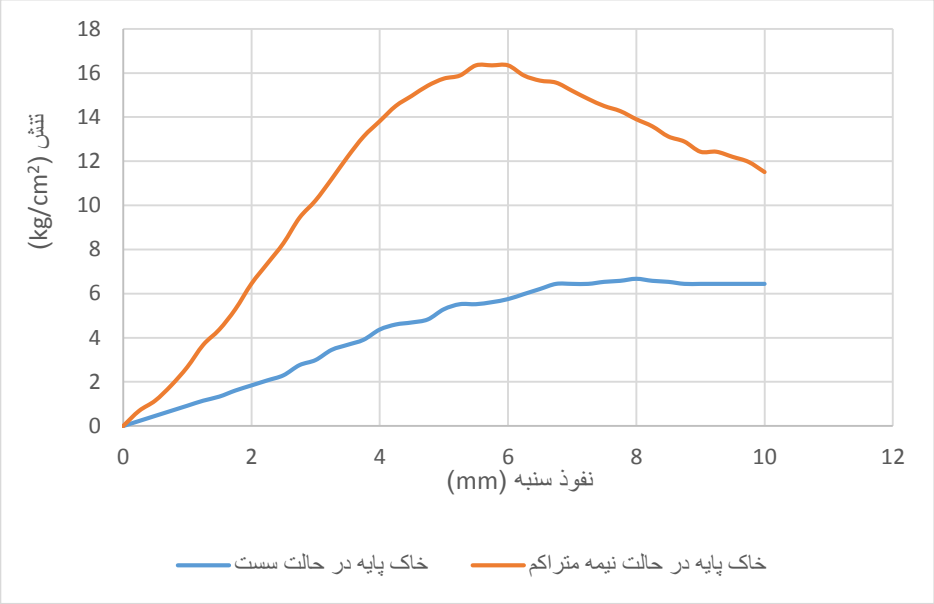
**شکل۷ : نمونه آزمایش در حین بارگذاری**

## بحث و تحلیل نتایج

### بررسی ظرفیت باربری در حالت خاک پایه در دو نوع تراکم

به جهت تعیین مقاومت نسبی خاک‌ها با افزودن درصدهای وزنی مختلف EVA و سپس مقایسه آن‌ها با خاک‌های پایه (بدون افزودنی) مربوط به تراکم‌های مشخص، سست و نیمه‌متراکم، در ابتدا به بررسی ظرفیت باربری خاک‌های بدون افزودنی در دو تراکم متفاوت پرداخته می‌شود. در شکل ۸ نمودارهای تنش–نفوذ سنبه برای دو نمونه خاک پایه در تراکم‌های سست و نیمه‌متراکم ارائه شده است.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]



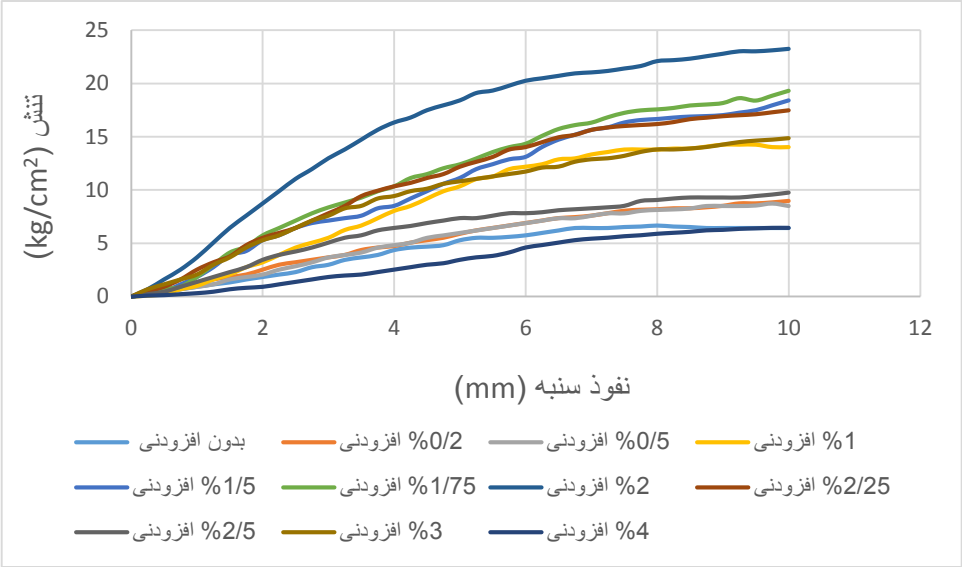

**شکل ۸- نمودار تنش- نفوذ سنبه برای خاک پایه در دو حالت سست و نیمه متراکم**

نتایج حاصل نشان می‌دهد ظرفیت باربری نمونه خاک نیمه‌متراکم بیشتر از نمونه خاک سست است. در خاک سست با افزایش فشار نفوذ سنبه، ظرفیت باربری تا میزان نفوذ ۸ میلی‌متر افزایش پیدا کرده است اما بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند و هم چنین در خاک نیمه متراکم تا میزان نفوذ ٦ میلی‌متر به حداکثر مقدار خود رسیده و سپس ظرفیت باربری آن کاهش می‌یابد.

### اثر افزودنی برای نمونه مسلح شده در حالت نمونه سست

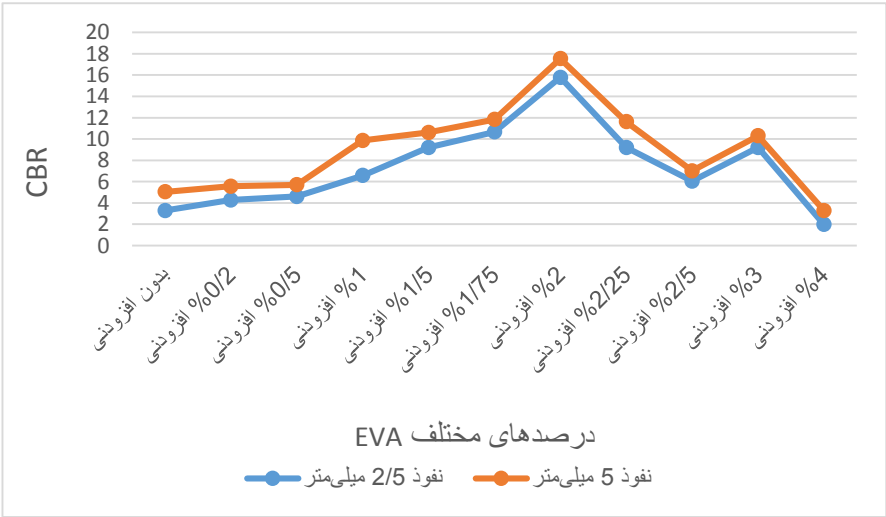
در شکل ۹ نمودار تنش- نفوذ سنبه نمونه‌های مسلح شده با EVA در درصدهای وزنی ۰ ، ۰/۲، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۱/۷۵، ۲، ۲/۲۵، ۲/۵، ۳ و ٤ برای نمونه‌های سست نمایش داده شده است. طبق شکل مشاهده می‌شود که در ۲٪ افزودنی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و هم‌چنین تا ۸ میلی‌متر نفوذ همانند خاک پایه تنش افزایش پیدا کرده اما بعد از این مقدار بر خلاف خاک غیر مسلح، تنش با شیب صعودی افزایش می‌یابد.هم چنین در درصد های ۳ و٤ به جهت آن که رسیدن به تراکم مناسب مقدور نبوده و وزن مخصوص آن تغییر پیدا می‌کند (کم می‌شود)، در ادامه مطالعات حذف می‌شود و برای حالت سست، نتایج فقط تا ۲/۵ ٪ افزودنی تحلیل می‌شود.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]




**شکل ۹- نمودار تنش- نفوذ سنبه برای درصد افزودنی های مختلف حالت نمونه سست**

در این پژوهش با به دست آوردن عدد CBR و تعیین مقاومت نسبی خاک‌ها، به مقایسه نمونه‌ها در درصد افزودنی های مختلف نسبت به خاک پایه(بدون افزودنی) پرداخته می‌شود. عدد CBR از یکی از دو نسبت



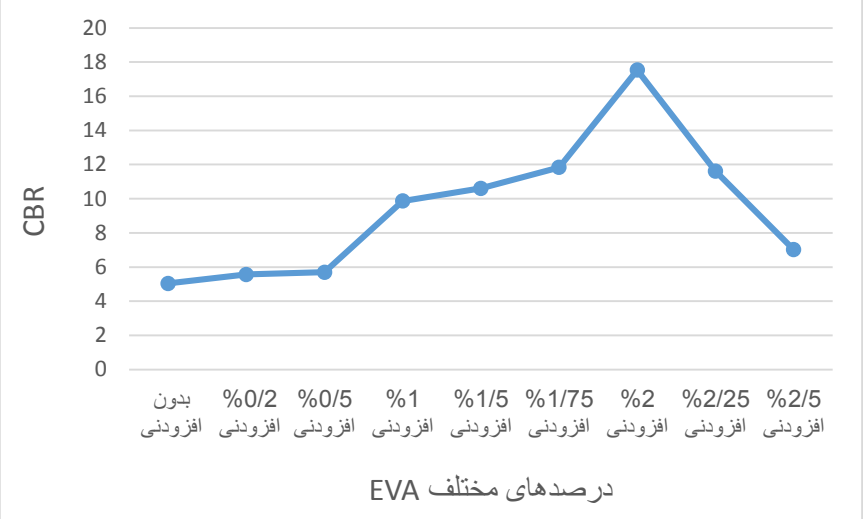

**شکل ۱۰- نمودار مقدار CBR بر حسب درصدهای مختلف EVA در دو نفوذ ۲/۵ و ۵ میلی‌متر برای حالت نمونه سست**

$CBR = \frac{P_{2.5}}{70}$ و $CBR = \frac{P_5}{105}$ حاصل می‌شود که در آن P2.5 و P5 عبارت اند از فشارهای لازم برای فرو بردن ۲/۵ میلی‌متر یا ۵ میلی‌متر از پیستون در خاک و ۷۰ و ۱۰۵ کیلوگرم بر سانتی مترمربع، فشارهای لازم برای فرو بردن پیستون به همان اندازه در مصالح استاندارد است. معمولاً عدد CBR برای مقدار نفوذ ۲/۵ میلی‌متر بیشتر از ۵ میلی‌متر است اما اگر در آزمایشی CBR5 بیشتر از CBR2.5 شود، آزمایش مجدد انجام می‌شود و در صورت حصول نتایج

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

مشابه، CBR5 گزارش می‌شود [١٦،١٥]. با توجه به شکل ١٠ واضح است که عدد CBR در نفوذ ٥ میلی‌متر مقدار بیشتری را نشان می‌دهد، در نتیجه برای حالت سست از خاک ماسه‌ای CBR5 مدنظر قرار می‌گیرد.

با توجه به شکل ١١ مشاهده می‌شود که در محور افقی اولین نقطه مربوط به خاک بدون افزودنی(خاک پایه) و سپس مقادیر خاک همراه با درصد افزودنی های متفاوت به ترتیب درصد افزودنی هایشان، نشان داده شده است. ابتدا منحنی از خاک پایه(٠٪ افزدونی) تا ٢٪ به صورت افزایشی عمل کرده و در ٢٪ به مقدار حداکثر خود رسیده و سپس بعد از این مقدار در ٢/٢٥و ٢/٥ درصد افزودنی، نمودار در قسمت نزولی قرار گرفته و کاهش می‌یابد.



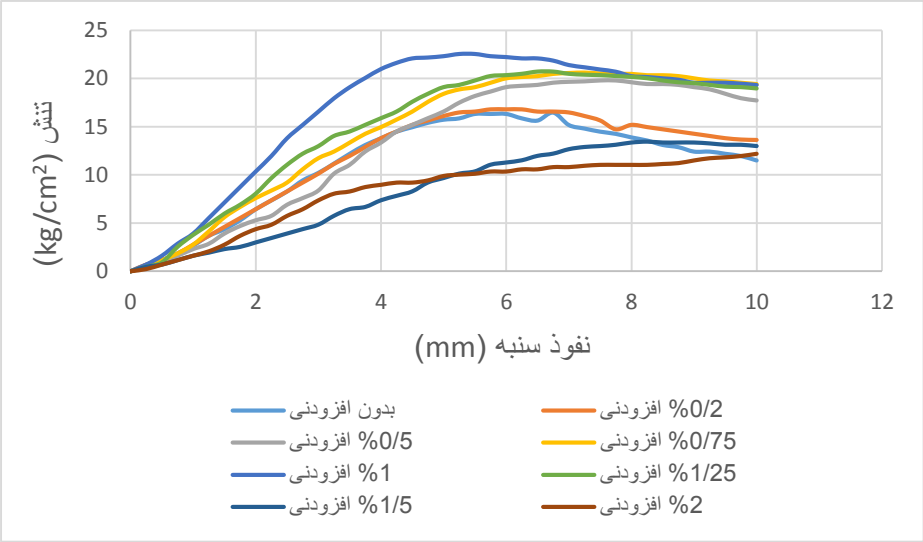

**شکل ١١- نمودار مقدار CBR بر حسب درصد افزودنی‌های مختلف در نفوذ ٥ میلی‌متر برای حالت نمونه سست**

### اثر افزودنی برای نمونه مسلح شده در حالت نمونه نیمه متراکم

در شکل ١٢ نمودار تنش- نفوذ سنبه نمونه‌های مسلح شده با مواد افزودنی در درصدهای وزنی ٠ ، ٠/٢، ٠/٥، ٠/٧٥، ١، ١/٢٥، ١/٥ و ٢ برای تمونه‌های نیمه متراکم ارائه شده‌است. در

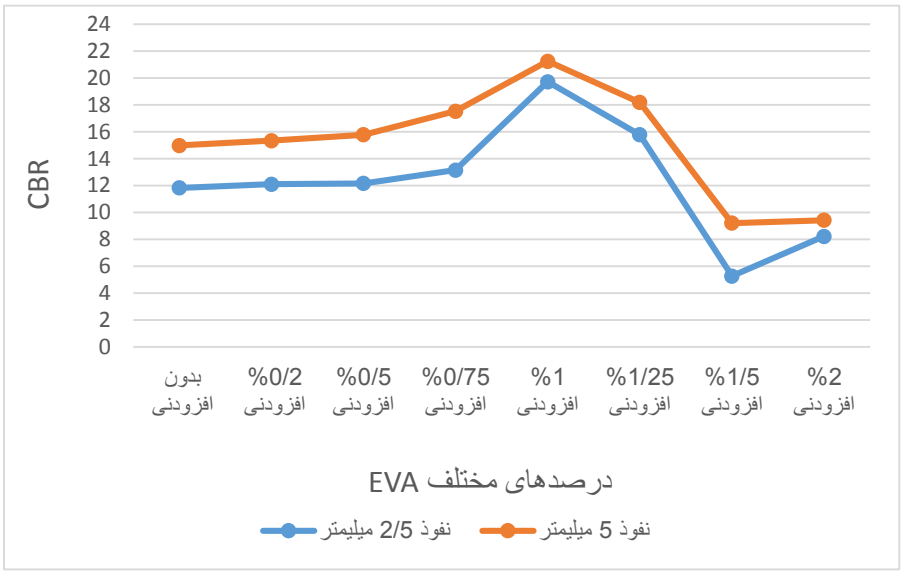
درصد وزنی ٢٪ به دلیل عدم تراکم تا نقطه مورد نظر و تغییر وزن مخصوص آن، در ادامه مطالعات حذف گردید. هم چنین با توجه به شکل، بیشترین ظرفیت باربری در حالت نیمه متراکم در ١٪ افزودنی رخ می‌دهد و تقریبا در میزان نفوذ ٥/٥ میلی‌متر به حداکثر ظرفیت باربری خود می‌رسد و بعد از این مقدار با کاهش تنش همراه است اما قسمت نزولی آن نسبت به خاک پایه با شیب ملایم‌تری همراه است. هم چنین طبق شکل مشهود است که با افزایش درصدهای مختلف افزودنی شیب قسمت نزولی نمودار نیز کاهش می‌یابد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]




**شکل ١٢- نمودار تنش- نفوذ سنبه برای درصد افزودنی‌های مختلف حالت نمونه نیمه متراکم**

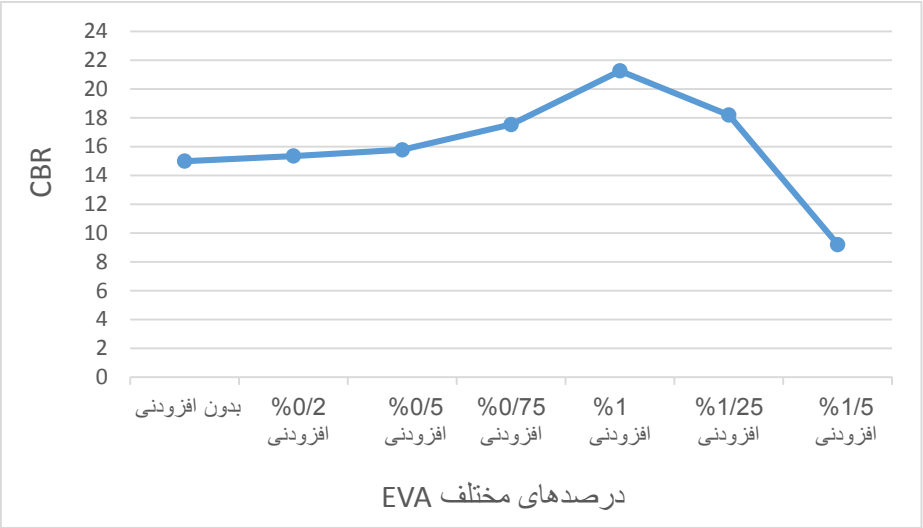
در شکل ١٣ نشان می‌دهد که در خاک نیمه متراکم ماسه‌ای نیز همانند خاک سست ماسه‌ای، عدد CBR در نفوذ ٥ میلی‌متر مقدار بیشتری را نسبت به نفوذ ٢/٥ میلی‌متر نشان می‌دهد؛ در نتیجه برای بررسی نتایج حالت نیمه متراکم، $CBR_5$ مدنظر قرار می‌گیرد.




**شکل ١٣- نمودار مقدار CBR بر حسب درصدهای مختلف EVA در دو نفوذ ٢/٥ و ٥ میلی‌متر برای حالت نمونه نیمه متراکم**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

با توجه به شکل ١٤ مقدار CBR برای خاک نیمه متراکم با وزن مخصوص ١/٧را نشان می‌دهدکه همانند خاک سست ابتدا مقاومت آن با افزودن مواد تسلیح‌کننده به آن، افزایش پیدا کرده و منحنی شکل صعودی به خود گرفته است؛ اما برخلاف خاک سست، در ١٪ وزنی به حداکثر مقدار خود رسیده و پس از آن در مقادیر ١/٢٥٪ و ١/٥٪ شکل نزولی به خود می‌گیرد.

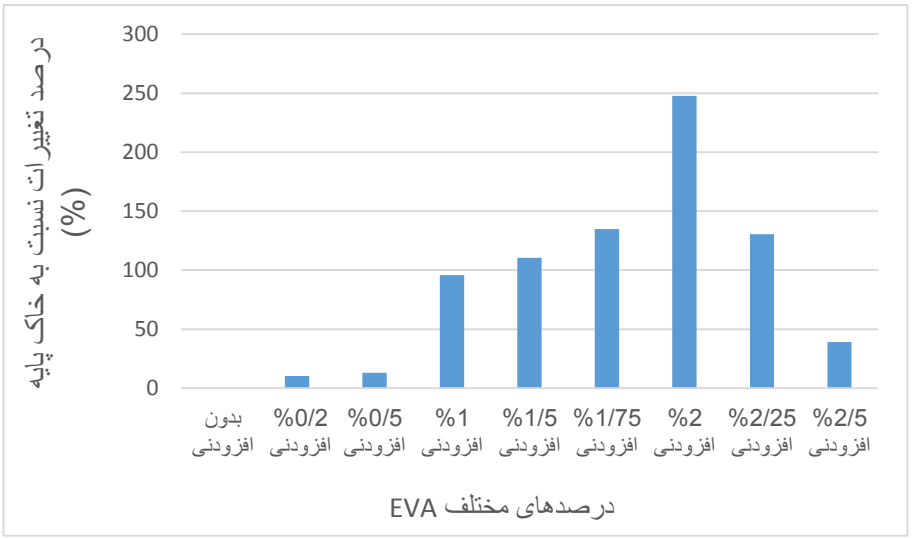



**شکل ١٤- نمودار مقدار CBR بر حسب درصد افزودنی‌های مختلف در نفوذ ٥ میلی‌متر برای حالت نمونه نیمه متراکم**

### درصد تغییرات مقدار CBR برای دو حالت نمونه سست و نیمه متراکم

در این قسمت، خاک‌هایی با درصدهای وزنی مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه براساس درصد تغییرات مقدار CBR در عمق نفوذ ٥ میلیمتر، در شکل ١٥ برای خاک سست($\gamma = 16/1\ \mathrm{KN}/m^3$) و شکل ١٦ برای خاک نیمه متراکم($\gamma = 17\ \mathrm{KN}/m^3$) نشان داده شده‌است.

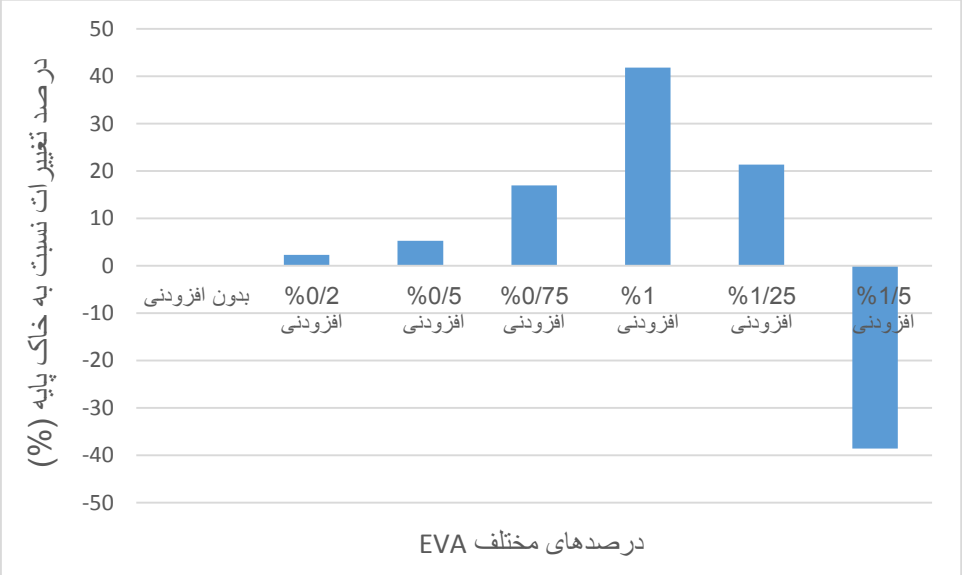
[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]




**شکل ۱۵- درصد تغییرات مقدار CBR برای درصدهای مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه برای حالت نمونه سست**

با توجه به شکل ۱۵ برای خاک سست، درصد تغییرات مقدار CBR برای مقدار بهینه آن (٪۲)، در ۵ میلی‌متر نفوذ ، ۲٤۷/۸۳ ٪ می‌باشد. طبق نتایج آزمایش‌ها مشاهده می‌شود در درصد افزودنی‌های کم مسلح‌کننده‌ها، تأثیر چندانی در تغییرات نتایج ندارد به طور مثال در وزن مخصوص ۱٦/۱ کیلونیوتن برمترمکعب ، درصد تغییرات آن‌ها در ۰/۲٪ افزودنی و ۰/۵٪ افزودنی به ترتیب ۱۰/٤۳٪ و ۱۳/۰٤ ٪ می‌باشد اما هرچه افزودن EVA به خاک بیشتر می‌شود، درصد تغییرات محسوس‌تر می‌گردد که برای نمونه، در ۱٪، ۱/۵ ٪ و ۲٪ افزودنی به ترتیب مقادیر ۹۵/٦۵٪، ۱۱۰/٤۳٪ و ۲٤۷/۸۳٪ تغییرات مثبت نسبت به خاک پایه را نشان می‌دهند و به صورت صعودی تا ۲٪ افزودنی در حال افزایش می‌باشند اما در مقدار ۲/۵٪، با توجه به این‌که ۳۹/۱۳ ٪ نسبت به خاک پایه افزایش یافت، پس از مقدار بهینه (٪۲) نسبت تغییرات در حال کاهش است هم‌چنین بعد از مشخص مقدار بیشینه ۲٪ برای خاک سست، آزمایشات ۱/۷۵٪ افزودنی و ۲/۲۵٪ افزودنی برای دقیق‌تر شدن نمودار و مقدار بیشینه آن صورت گرفت که درصد تغییرات این مقادیر به ترتیب ۱۳٤/۸۰٪ و ۱۳۰/٤٦٪ می‌باشد و هر دو مقدار کمتر از ۲٪ است. علاوه بر این، در هیچ یک از درصدهای افزودنی، درصد تغییرات آن‌ها نسبت به خاک پایه(در حالت بدون افزودنی)، با رشد منفی همراه نبوده است و همه مقادیر افزودنی‌ها تأثیر مثبت در مقاومت خاک سست داشته‌اند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]




**شکل ١٦- درصد تغییرات مقدار CBR برای درصدهای مختلف افزودنی نسبت به خاک پایه برای حالت نمونه نیمه متراکم**

با توجه به شکل ١٣ برای خاک نیمه متراکم، برخلاف خاک سست، در ١٪ افزودنی به مقدار بیشینه خود می‌رسد و درصد تغییرات مقدار CBR در این مقدار افزودنی برای نفوذ ٥ میلی‌متر، ٤١/٨١٪ است؛ که این درصد نسبت به درصد تغییرات مقدار بیشینه(٢٪) خاک سست بسیار کمتر است. هم چنین همانند خاک سست، در این وزن مخصوص نیز در درصدهای کم مواد افزودنی برای مقادیر ٠/٢ و ٠/٥ درصد به ترتیب ٢/٣٤٪ و ٥/٢٦٪ تغییرات نسبت به خاک پایه را نشان می‌دهند که افزایش چندانی مشاهده نمی‌گردد. در مقادیر ٠/٧٥ و ١ درصد افزودنی اثرات تغییرات مثبت بر مقاومت خاک نسبت به خاک پایه مشهود است که به ترتیب درصد تغییرات این مقادیر ١٦/٩٦٪ و ٤١/٨١٪ (مقدار بیشینه) می‌باشد. پس از مقدار بیشینه، در مقادیر افزودنی ١/٢٥ و ١/٥ درصد، تغییرات نسبت به خاک پایه کاهش می‌یابد که در ١/٢٥٪ افزودنی، ٢١/٣٤٪ تأثیر مثبت نسبت به خاک پایه به همراه داشته اما در ١/٥٪ اثر منفی گذاشته و مقاومت خاک پایه را تا ٣٨/٦٠٪ کاهش می‌دهد.

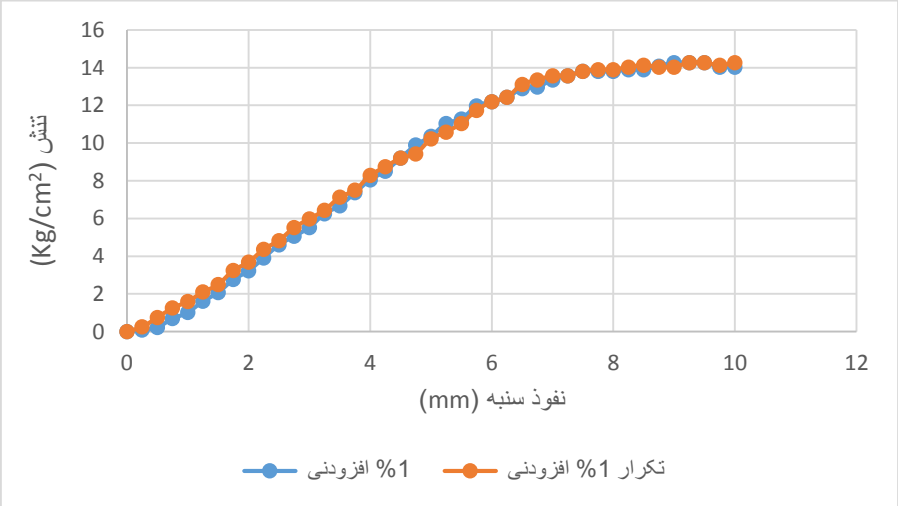
با مقایسهٔ بین نمونه‌های سست و نیمه متراکم از یک نوع خاک ماسه‌ای در نمودارهای ارائه شده، هر دو حالت‌های تراکم، دارای مقدار بهینه بوده با این تفاوت که مقدار بهینه برای نمونه مسلح شده در حالت سست ٢٪ و برای حالت نیمه متراکم ١٪ می‌باشد که علت این امر افزایش تخلخل حالت سست نسبت به حالت نیمه متراکم است و این افزودنی می‌تواند باعث کاهش تخلخل و ایجاد قفل و بست بیشتر بین ذرات خاک با یکدیگر و مواد افزودنی می‌شود. و بعد از این مقدار بهینه برای هر دو حالت با کاهش مقاومت همراه بوده که به علت برهم خوردن دانه‌بندی ذرات خاک و قرارگیری EVA در بین آن‌ها می‌باشد. هوشیار و رستمی(٢٠١٨) مقدار بهینه برای حالت‌های مخلوط منظم (به صورت لایه‌بندی شده) و نامنظم (پخش تصادفی) مسلح‌کننده در خاک ماسه‌ای را به ترتیب ٢/٥٪ و ٢٪ به دست آوردند که بعد از این مقادیرمقاومت کاهش خواهد یافت [٨]. ولی‌پور و همکاران(٢٠٢٠) به تسلیح خاک رس با استفاده از الیاف پلیمر

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

تایر بازیافت شده و الیاف شیشه پرداختند که بالاترین افزایش مقاومت برای الیاف تایر ۰,۵٪ و الیاف شیشه ۱٪ گزارش شده است و فراتر از آن مقاومت کاهش می‌یابد [۱۷]. هم چنین در تحقیقی دیگر برای تثبیت شن و ماسه با استفاده از الیاف پلی پروپیلن، در ۰/۸٪ افزودنی، مقاومت فشاری و کششی به ترتیب ۱۰۸/۰۷٪ و ۲۹۵/۴۲ ٪ افزایش یافت [۱۸] که پژوهش محققین(به دست آمدن مقدار بیشینه مقاومت و سپس کاهش آن) مطابق با نتیجه به دست آمده با در این تحقیق است، البته به دست آمدن مقدار بهینه متفاوت در پژوهش‌ها, به علت تأثیرگذاری نوع خاک و افزودنی‌های مختلف، شرایط متفاوت آزمایش می‌باشد.

## تکرارپذیری نتایج

به جهت صحت سنجی نتایج، آزمایش کشش برای تعیین خصوصیات ماده EVA و هم‌چنین آزمایش CBR برای خاک ماسه‌ای در دو حالت تراکم سست و نیمه‌متراکم درصدهای مختلف افزودنی تکرار شد که اختلاف نتایج به دست آمده در حد قابل قبولی قرار دارد. هم‌چنین نمونه‌های که اختلاف آن‌ها با نمونه اصلی بیشتر بود، آزمایش برای بار سوم و چهارم تکرار و میانگین نتایج مورد قبول آن‌ها ارائه گردید. در شکل ۱۷ نمونه‌ای از تکرارپذیری نتایج در ۱٪ افزودنی حالت سست ارائه شده‌است.




**شکل ۱۷- تکرارپذیری نمونه مسلح شده در ۱٪ افزودنی برای حالت سست**

## نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به تسلیح خاک دانه‌ای با استفاده از مواد ضایعاتی اتیلن-وینیل استات(EVA) در دو حالت سست و نیمه متراکم پرداخته شد. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه CBR و به صورت درصد وزنی انجام گرفت. طبق نتایج به

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

دست آمده در این پژوهش عدد CBR برای تمامی آزمایش‌ها در نفوذ ۵ میلی‌متر بیشتر از نفوذ ۲/۵ میلی‌متر می‌باشد که در تحلیل نتایج $CBR_5$ مد نظر قرار گرفت.

خاک دانه‌ای با وزن مخصوص ١٦/١ کیلونیوتن برمتر مکعب(در حالت سست) مقدار بهینه افزودن ماده EVA به خاک که بیشترین مقاومت را از خود نشان می‌دهد، در ۲٪ افزودنی می‌باشد که درصد تغییرات نسبت به خاک پایه ٢٤٧/٨٣٪ است که برای همین نوع خاک در وزن مخصوص ۱۷ کیلونیوتن برمتر مکعب(در حالت نیمه متراکم) مقدار بهینه افزودنی که خاک بیشترین مقاومت را دارا می‌باشد، در ۱٪ افزودنی اتفاق می‌افتد و درصد تغییرات این مقدار افزودنی نسبت به خاک پایه ٤١/٨١٪ می‌باشد. طبق نمودارهای ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت با کاهش وزن مخصوص خاک، مقدار درصد بهینه مواد افزودنی افزایش می‌یابد و تأثیر افزایش مقاومت نسبی در آن‌ها بسیار بیشتر است.

در حالت سست و نیمه متراکم بعد از رسیدن به مقدار بیشینه خود، با افزودن مسلح کننده به خاک با کاهش مقاومت همراه است که می‌تواند به علت برهم خوردن چفت و بست دانه‌های خاک و دور شدن آنها از یکدیگر باشد. کاهش مقاومت در حالت سست بعد از مقدار بهینه آن(۲ ٪)، در ۲/۲۵٪ و ۲/۵٪ افزودنی اتفاق می‌افتد، اما درصد تغییرات مقاومت آن‌ها نسبت به خاک پایه با رشد مثبت همراه است؛ در حالی که در حالت نیمه متراکم، در مقدار ۱/۲۵٪ و ۱/۵٪ افزودنی که بعد از مقدار بهینه آن می‌باشد، درصد تغییرات مقاومت نسبت به خاک پایه برای مقدار ۱/۲۵٪ رشد مثبت داشته ولی در ۱/۵٪ افزودنی با رشد منفی همراه است و مقاومت خاک را کاهش می‌دهد.

هم چنین ضایعاتی بودن این مواد افزودنی و صرف انرژی کم برای اختلاط آن با خاک و رسیدن به مقاومت بیشتر حتی در سست‌ترین تراکم خاک از محاسن این روش به شمار می‌رود و باعث کاهش هزینه و زمان در پروژه ها می‌گردد و با توجه به عمر زیاد این مواد نوع مسلح کننده و ماندگاری آن در محیط زندگی، استفاده از چنین موادی در تسلیح و بهسازی خاک نه تنها باعث افزایش مقاومت خاک می‌شود بلکه باعث حفظ محیط زیست نیز می‌شود.

## منابع

1. Long G., Li L., Li W., Ma K., Dong W., Bai Ch. & Zhou J. L. (2019). "Enhanced mechanical properties and durability of coal gangue reinforced cement-soil mixture for foundation treatments", Journal of Cleaner Production, 231, 468-482.

2. Barazesh A., Saba H. R. & Gharib M. (2012). "The Effect Of Adding Iron Powder On Atterberg Limits Of Clay Soils", International Research Journal of Applied and Basic Sciences, Vol, 3, ISSN 2251-838X.

3. Rupas Kumar M., Manasa S. & Asiya SK. (2015). "Soil Stabilization using Iron Powder", International Journal of Engineering Research and General Science, Volume 3, Issue 4, ISSN 2091-2730.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

4. Alshaba A. A., Abdelaziz T. M. & Ragheb A. M. (2018). "Treatment of collapsible soils by mixing with iron powder", Alexandria Engineering Journal, 57, 3737–3745.

5. Nsaif H. M., (2013). "Behavior of Soils Strengthened By Plastic Waste Materials", Journal of Engineering and Development, Vol. 17, No.4, ISSN 1813- 7822.

6. Bekhiti M., Trouzine H. & Rabehi M. (2019). "Influence of waste tire rubber fibers on swelling behavior, unconfined compressive strength and ductility of cement stabilized bentonite clay Soil", Construction and Building Materials, 208, 304–313.

۷. مهدی پور. م.، عربانی. م. و قربانی. ع. (۱۳۸۹). " مطالعه آزمایشگاهی استفاده از کف پوش‌های لاستیکی ضایعاتی به منظور بهبود CBR ماسه‌ها"، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، ۰,۳۸ (MAAMEH).

8. Hooshyar A. & Rostami V. (2018). " Granular Soil Bearing Capacity Improvement Using Waste Plastic Materials ", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(4), 235-238.

9. Nguyena G., Hrubešová E. & Voltr A. (2015). "Soil improvement using polyester fibres", Procedia Engineering, 111 , 596 – 600.

10. Mirzababaei M., Arulrajah A. & Ouston M. (2017). "Polmers for stabilization of soft clay soils", Procedia Engineering, 189 , 25-32.

11. Rezaeimalek S., Huang J. & Bin-Shafique S. (2017). "Evaluation of curing method and mix design of a moisture activated polymer for sand stabilization", Construction and Building Materials, Volume 146, Pages 210-220.

12. Janalizadeh Choobbasti A., Samakoosh M. A. & Kutanaei S. S. (2019). "Mechanical properties soil stabilized with nano calcium carbonate and reinforced with carpet waste fibers", Construction and Building Materials, 211, 1094–1104.

۱۳. صفر رضوی زاده م. (۱۳۹۳). "بررسی مشخصات مکانیکی و مقاومتی خاک رس مسلح شده با براده آلومینیم"، پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی آب گرایش سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، دانشکده مهندسی زراعی.

١٤. سعیدی کیا. ع. و مدنی. ح. (١٣٩٧)." عملکرد اتیلن وینیل استات و وینیل استات بر مشخصات مکانیکی، جمع شدگی و دوام مخلوط های پایه سیمان آلومینات کلسیم"، مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره هجدهم، شماره ٤.

۱۵. اسکروچی، ع. و صدیقی منش، م. (۱۳۹۳). "آزمایشگاه مکانیک خاک"، چاپ پنجم، ویراست دوم، انتشارات کتاب دانشگاهی.

١٦. مرادی، د. (١٣٩٩). "آزمایشگاه مکانیک خاک،مهندسی خاک و ژئوتکنیک"، چاپ اول، انتشارات نوآور.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]

17. Valipour M., Tabatabaie Shourijeh P. & Mohammadinia A. (2020). "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement",Transportation Geotechnics, Volume 27,100474.

18. Liu J., Bai Y., Song Z., Kanungo D.P., Wang Y., Bu F., Chen Z & Shi X. (2017). "Stabilization of sand using different types of short fibers and organic polymer", Construction and Building Materials, Volume 253, 30 August 2020, 119164.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02 ]