

## بهبود مشخصات مقاومتی ماسه با استفاده از الیاف پلیمری

حسین غیائیان\* و غلامرضا پورابراهیم\*\*

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت مقاله: ۸۱/۸/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۱۱/۱۸)

چکیده - رفتار تنش-کرنش، مقاومت نهایی و شکل پذیری ماسه ریزدانه مسلح شده با الیاف پلیمری (تراشه‌های نازک موکت) برحسب درصد وزنی  $W_f$  (نسبت وزن خشک الیاف به وزن خشک خاک  $W_f$ ) و نسبت ابعاد  $A_R$  (نسبت طول الیاف به ضخامت الیاف  $A_R$ ) مورد مطالعه قرار گرفته است. تعدادی آزمایش سه‌محوری تحکیم یافته زهکشی شده (CD)، تک‌محوری، و CBR انجام شده‌اند. این نتایج نشان می‌دهند که افزودن تراشه‌ها، شکل‌پذیری و مقاومت نهایی نمونه‌ها را افزایش ولی ضریب کشسانی حداکثر را کاهش می‌دهد. منحنی تغییرات مقاومت و کرنش حجمی نهایی برحسب درصد وزنی الیاف دارای روند صعودی (افزایشی) بوده، ولی نرخ تغییرات، روند کاهشی دارد. تاثیر افزایش پارامتر  $A_R$  بر مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌ها نیز مشابه با تاثیر  $W_f$  است.

واژگان کلیدی: خاک مسلح، تراشه، سه‌محوری، تک‌محوری، CBR، مقاومت، شکل‌پذیری

## Improvement of Strength Parameters of Sand Reinforced with Polymeric Fibers

H. Ghiassian and G.R. Poorebrahim

Department of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

**Abstract:** *Triaxial consolidated drained, unconfined compression, and CBR tests have been conducted in order to study the stress-strain, strength, and volume change characteristics of fine sand specimens reinforced by polymeric fibers made from carpet wastes. The variables are aspect ratio (length/width) and weight percentage of the fibers. The results indicate that the peak strength and total volume change of reinforced specimens increase whereas the maximum elastic modulus decreases as the fiber content increases. The rate of increase in the peak strength and total volume change, however, diminishes with increasing the fiber content. The effect of increase in the aspect ratio on results is similar to that of the fiber content.*

**Keywords:** *Reinforced sand, carpet waste, Triaxial, Manaxial, CBR, Strength*

\*\* - دانشجوی دکترا

\* - استادیار

تسلیح خاک یکی از شاخه‌های ژئوتکنیک است که با اصول علمی و استفاده از تکنولوژیهای جدید، مواد و مصالح مناسب را در تقویت خاک به کار گرفته و مشخصات مهندسی و خواص مکانیکی از جمله مقاومت، سختی یا ضریب کشسانی، شکل پذیری و ظرفیت باربری آن را بهبود می بخشد. عناصری که در تسلیح به کار می روند از جنس فلزات، مواد پلیمری، و حتی گیاهان هستند. مکانیزم عمل و رفتار خاک مسلح مبتنی بر اثرات متقابل<sup>۱</sup> بین خاک و عنصر مسلح کننده بوده و در این رابطه پدیده اصطکاک بین خاک و عنصر تسلیح نقش اساسی را دارد.

ایده تسلیح خاک به نوعی از گذشته‌های دور مورد توجه بشر بوده است. منشاء این اندیشه را می توان در نمونه‌ها و الگوهای طبیعی جستجو کرد. بسیاری از حیوانات خصوصاً پرندگان، در ساخت لانه‌های خود شاخه‌های ریز گیاهان را با گل ادغام می کنند، و یا دامنه‌های با شیب تند با رویش گیاهانی که ریشه در زمین می دوانند در مقابل لغزش و ناپایداری تثبیت می شوند. به کارگیری پوشال و کاه در تسلیح گل (ملات کاهگل) از قدیم الایام رایج بوده و هنوز نیز استفاده می شود.

یکی از روشهای مسلح نمودن خاک، اختلاط آن با الیاف، رشته‌ها و تراشه‌های مواد است. اختلاط این عناصر با خاک، محیطی مرکب<sup>۲</sup> ایجاد می کند که در آن درگیری اجزای کشش پذیر (عناصر تسلیح) با دانه‌های خاک، مقاومت و شکل پذیری خاک را در جهات مختلف بهبود می بخشد. لی و همکاران [۱] در سال ۱۹۷۳ در رابطه با کاربرد الیاف در تسلیح خاک مطالعاتی انجام داده و افزایش مقاومت برشی ماسه مخلوط شده با الیاف گیاهی را در آزمایش سه محوری تحت بارگذاری استاتیکی گزارش کرده است. هور [۲] با انجام آزمایشهای تراکم و سی بی آر روی مخلوط ماسه شکسته و مسلح شده با الیاف پلی پروپیلن نشان داد که کاربرد الیاف، در حالی که انرژی مورد نیاز برای رسیدن به یک تراکم مشخص را افزایش می دهد، موجب افزایش سی بی آر<sup>۳</sup> می شود. آزمایشهای

سه محوری انجام شده توسط اندرز لند و ختک بر روی کائولینیت مسلح شده با الیاف گیاهی نشان داد که استفاده از الیاف باعث افزایش مقاومت زهکشی نشده خاک می شود [۳]. گری و اوهاشی [۴] با انجام آزمایشهای برش مستقیم، مدلی را برای رفتار خاک و الیاف در ناحیه برشی<sup>۴</sup> ارائه کردند. دین و فریتگ [۵] با انجام آزمایشهای تک محوری، تاثیر مثبت الیاف پلی پروپیلن بر رفتار ماسه رس دار را بررسی و گزارش کرده اند. آرنزیک و چادهاری [۶] طی مطالعات آزمایشگاهی با دستگاه برش مستقیم و ساخت مدل فیزیکی از یک دیوار حائل خاک مسلح که خاکریز پشت آن را ماسه ساحلی مسلح شده با پولکهای آلومینیمی تشکیل می داد، نتیجه گرفتند که به کارگیری این عناصر باعث افزایش مقاومت برشی ماسه شده و میزان این افزایش، به مشخصات و درصد عناصر تسلیح بستگی دارد. بنسون و کایر [۷] اثرات استفاده از نوارهای پلی اتیلن را در تغییرات مقاومت برشی و سختی ماسه مورد بررسی و آزمایش قرار داده و نتیجه گرفتند که افزودن تراشه‌های پلی اتیلن به خاک موجب افزایش سی بی آر، مقاومت برشی، و ضریب واکنش<sup>۵</sup> بستر ماسه می شود. رنجان و همکاران [۸] با انجام آزمایشهای سه محوری روی نمونه‌های ماسه مسلح شده با الیاف، تاثیر مثبت الیاف را بر مقاومت برشی نمونه‌ها اعلام کرده اند. بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی و بررسی های تئوریک، میکالوسکی و زبا [۹] معیاری برای گسیختگی ماسه مسلح شده با الیاف فولادی و پلی آمید ارائه کردند. ونگ و همکاران در سال ۲۰۰۰ [۱۰] با انجام آزمایشهای تک محوری و سه محوری، تاثیر افزودن بعضی از تراشه‌های پلیمری را به خاک در بهبود رفتار مکانیکی خاکهای ماسه رس دار مطالعه کرده و نتیجه گرفته اند که اضافه کردن این الیاف به خاک، ضمن افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها، شکل پذیری آنها را نیز بهبود می بخشد.

در راستای این تحقیقات، رفتار ماسه لای دار مسلح شده با الیاف پلیمری مطالعه و نتایج آن در این مقاله ارائه شده است. این الیاف از خرد کردن ضایعات کارخانه کرمان موکت به دست

آمده و استفاده از آنها باعث صرفه جویی مالی و همچنین کمک به حفظ محیط زیست خواهد شد. استفاده از این خاک مسلح در مواردی همچون شیروانیها، سیستمهای حائل، خاک زیر پیها و کلا کاربریهایی که در آنها پارامترهای مقاومتی خاک یعنی زاویه اصطکاک و چسبندگی نقش مهمی را در طراحی ایفا می نمایند توجیه اقتصادی و فنی مناسبی را خواهد داشت.

## ۲- مصالح مصرفی

### ۲-۱- خاک

خاک مورد استفاده در این تحقیق ماسه ریزدانه لای دار<sup>۱</sup> با چگالی ۲/۶۶ و قطر متوسط دانه‌های (D<sub>۵۰</sub>) برابر با ۱۸ mm بوده است. این خاک از ۸۵/۵٪ ماسه، ۱۲٪ لای، و ۲/۵٪ رس تشکیل گردیده و دارای ارزش ماسه ای ۶۶٪، ضریب یکنواختی حدود ۳/۳، ضریب خمیدگی یا انحناء حدود ۰/۷، حد روانی ۲۱٪، و فاقد خصوصیات پلاستیسیته است. بر اساس طبقه بندی متحد<sup>۲</sup> این خاک در گروه خاکهای SM قرار می گیرد. شکل (۱) منحنی دانه بندی خاک را نشان می دهد. رطوبت بهینه خاک برابر با ۹/۲٪ و وزن مخصوص بهینه آن  $\gamma_{d(op)} = 16/7 \text{ kN/m}^3$  هستند. این خاک از محل اجرای پروژه بزرگ هفت باغ کرمان تهیه شده تا بتوان از نتایج این تحقیق در اصلاح خاک این محل استفاده کرد.

### ۲-۲- عناصر تسلیح

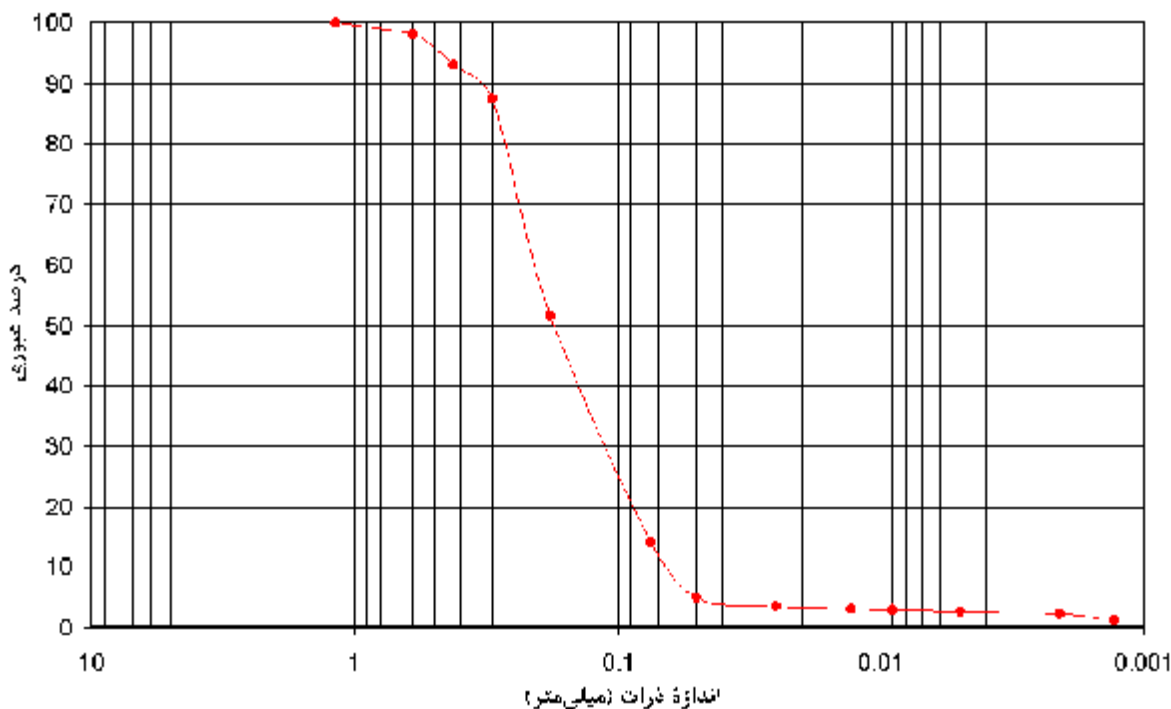
عناصر یا الیاف مورد استفاده برای تسلیح، از جنس پلی اتیلن و پلی پروپیلن بوده که از برش دادن و فیچی کردن نوارهای زائد کارخانه کرمان موکت به صورت تراشه‌های نازک تهیه شده است. این تراشه‌ها دارای چگالی ۱، ضریب کشسانی حداکثر ۷۳۰ کیلو پاسکال، مقاومت کششی ۸۰۰ کیلو پاسکال، و کرنش گسیختگی ۱۰/۵٪ هستند. مقطع تراشه‌ها مربعی به ضلع ۵ میلیمتر (ضخامت موکت)، طول آنها ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵، و ۴۵ میلیمتر که مربوط به نسبتهای اضلاع (نسبت طول به ضخامت) ۱-۳، ۳-۵، ۵-۷، ۷-۹ A<sub>R</sub> هستند. درصدهای وزنی عناصر (W<sub>f</sub>)، یعنی

نسبت وزن خشک الیاف به وزن خشک خاک به صورت ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، و ۱ تغییر کرده‌اند. در آزمایشهای تک محوری، نسبتهای اضلاع ۱ و ۳، و درصدهای وزنی ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، آزمایشهای سی بی آر نسبت اضلاع ۵ و درصدهای وزنی ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، و در آزمایشهای سه محوری نسبتهای اضلاع ۱، ۳، ۵، ۷، ۹ و درصدهای وزنی ۰، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ بررسی شده‌اند.

## ۳- نمونه سازی

برای تهیه و ساختن هر نمونه، مقدار خاک، آب، و تراشه لازم را بر اساس مشخصات هندسی، تراکم نمونه و درصد وزنی تراشه‌ها محاسبه و وزن کرده و به منظور اختلاط بهتر ابتدا خاک را کمی مرطوب کرده و سپس تراشه‌ها را به آن افزوده و به تدریج با اضافه کردن آب، رطوبت را تا حد رطوبت بهینه برای مخلوط الیاف و خاک (۹/۲٪) افزایش داده تا مخلوطی همگن و یکنواخت حاصل شود. آن گاه این مخلوط داخل قالبهای مربوط به هر آزمایش تا حد بهینه ( $\gamma_{d(op)} = 16/7 \text{ kN/m}^3$ ) متراکم شده است. قالب تک محوری، استوانه‌ای به قطر ۵۰ mm و ارتفاع ۱۰۰ mm بوده و نمونه‌ها در ۵ لایه طبق استاندارد ASTM D-۲۱۶۶ کوبیده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. قالب سی بی آر، استوانه‌ای به قطر ۱۵۲/۴ mm (۶ اینچ) و ارتفاع ۱۷۷/۸ mm (۷ اینچ) ارتفاع قالب اصلی + کلاهک) بوده و نمونه‌ها در ۵ لایه طبق استاندارد ASTM D-۱۵۵۷ متراکم و تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند. نمونه‌های سی بی آر در دو حالت نیمه اشباع و اشباع مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اشباع نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت غرقاب حاصل و پس از آن بارگذاری انجام شده است.

آزمایشهای سه محوری تحت شرایط CD و نمونه‌ها در قالب استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ mm و ارتفاع ۲۰۰ mm با رطوبت بهینه و حداکثر وزن مخصوص خشک در ۸ لایه متراکم شده‌اند. به منظور ایجاد تراکم یکنواخت روش تراکم کاهش یافته [۱۱] استفاده شده است. لذا علی‌رغم اینکه بخشی از رطوبت خاک توسط الیافها جذب می‌شوند با افزایش انرژی تراکم تمام نمونه‌ها



شکل ۱- منحنی دانه بندی خاک استفاده شده در تحقیق

این واقعیت‌اند که رفتار خاک به میزان زیادی تحت تاثیر حضور الیاف در خاک قرار گرفته‌اند.

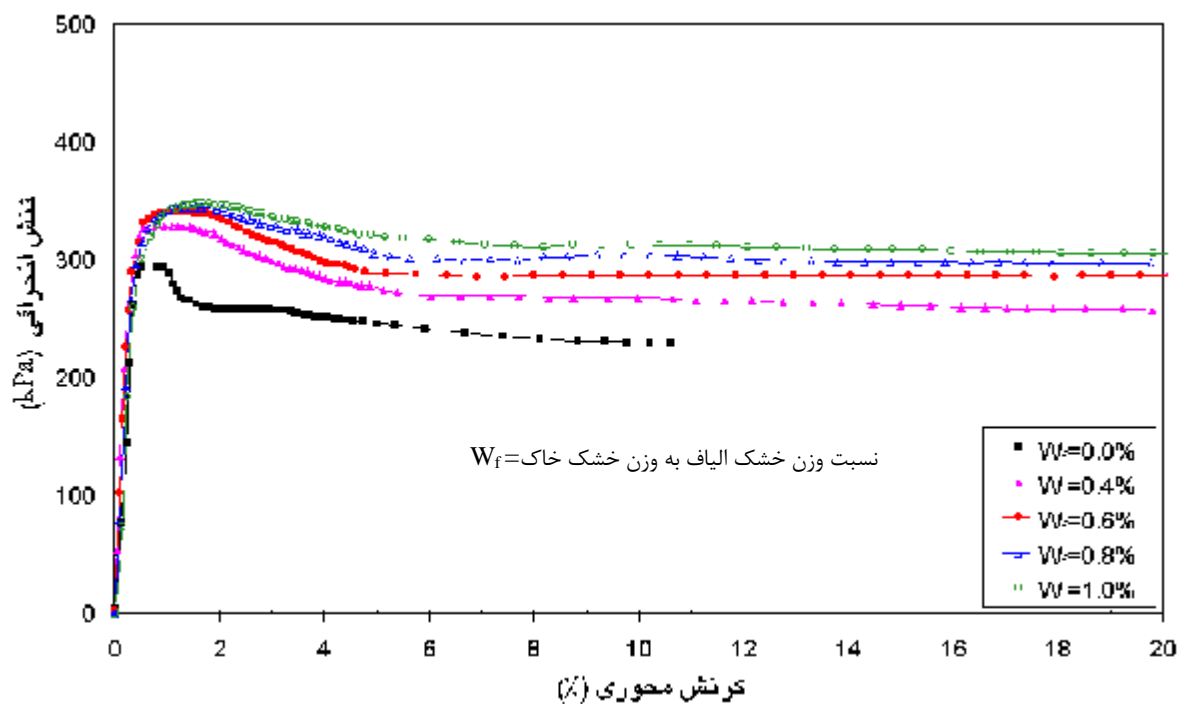
با توجه با نتایج ارائه شده، ملاحظه می‌شود که با افزودن عناصر تسلیح به خاک مقاومت حداکثر و مقاومت باقی مانده افزایش، ضریب کشسانی حداکثر کاهش، و رفتار خاک به تدریج از حالت شکنندگی به حالت نرمی<sup>۸</sup> تغییر می‌یابد که به صورت کاهش ضریب کشسانی حداکثر و کاهش در شیب منحنی بعد از مقاومت نهایی ظاهر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در یک نسبت اضلاع ثابت (یا درصد عناصر تسلیح ثابت)، با افزایش درصد عناصر تسلیح (یا نسبت اضلاع)، مقاومت نهایی افزایش یافته و این افزایش رابطه مستقیم با میزان عناصر تسلیح یا نسبت اضلاع دارد، ولی نرخ تغییرات مقاومت برحسب میزان عناصر تسلیح یا نسبت اضلاع کاهش می‌یابد که در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه و مشابه با نتایج ارائه شده توسط دیگر محققان است [۴، ۸ و ۱۲]. این امر مبین این واقعیت است که مقادیر بهینه‌ای برای میزان عناصر تسلیح و نسبت اضلاع با توجه به در نظر گرفتن هزینه‌ها، مسائل اجرایی، و امکان اختلاط همگن

در وزن مخصوص بهینه متراکم و آماده شده‌اند. در این روش، با کاهش تدریجی ضخامت لایه‌های متراکم شده در هر مرحله سعی می‌شود که تراکم یکنواخت در نمونه در تمام ارتفاع حاصل شود. نمونه‌ها در شرایط صد در صد اشباع با حداقل ضریب فشار آب منفذی  $B=0/98$  آماده شده‌اند. برای ایجاد این شرایط، از گاز  $CO_2$  قبل از ورود آب به نمونه، آب بدون هوا، و میزان پس فشار  $400 \text{ kPa}$  استفاده شده است. نقش گاز کربنیک در خروج بهتر هوا از نمونه و فراهم شدن شرایط بهتر اشباع به علت قابلیت بالای حل شدن آن در آب است. میزان فشار موثر همه جانبه در تمام آزمایشها برابر  $100 \text{ kPa}$  بوده است.

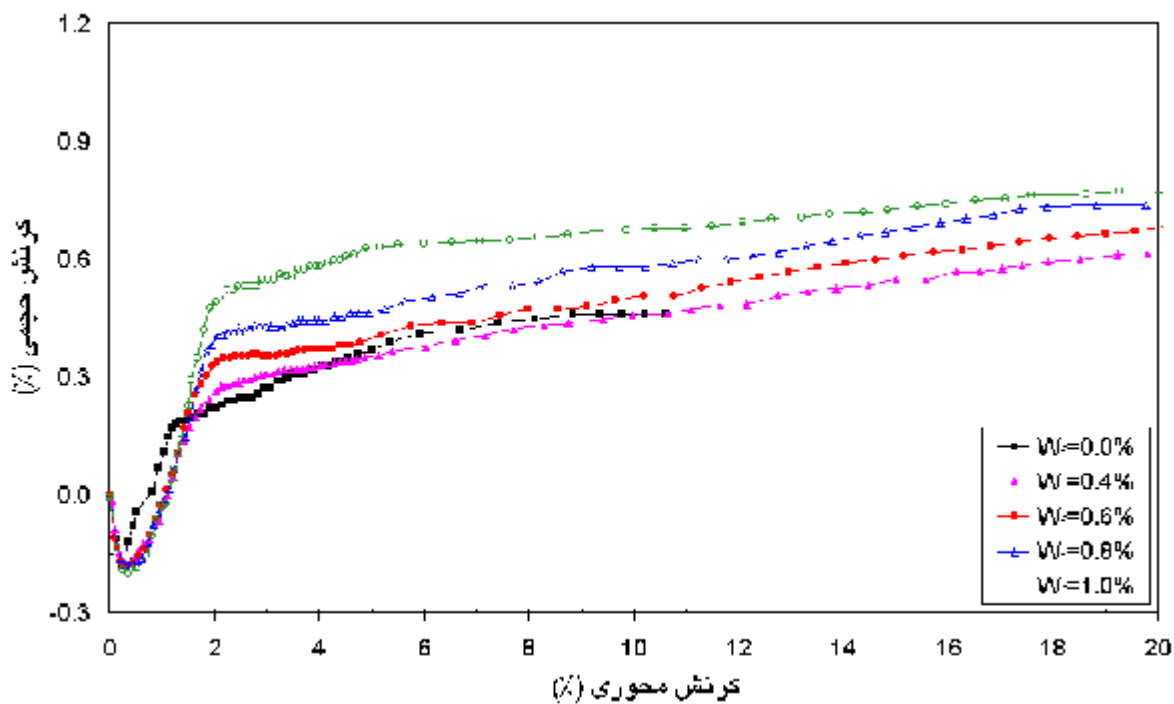
#### ۴- تجزیه و تحلیل

##### ۴-۱- آزمایشهای سه محوری CD

شکل‌های (۲) تا (۶) تغییرات تنش انحرافی و کرنش حجمی را برحسب کرنش محوری برای نمونه‌های با نسبت اضلاع و درصدهای وزنی مختلف نشان می‌دهند. تمام شکل‌های نمایانگر

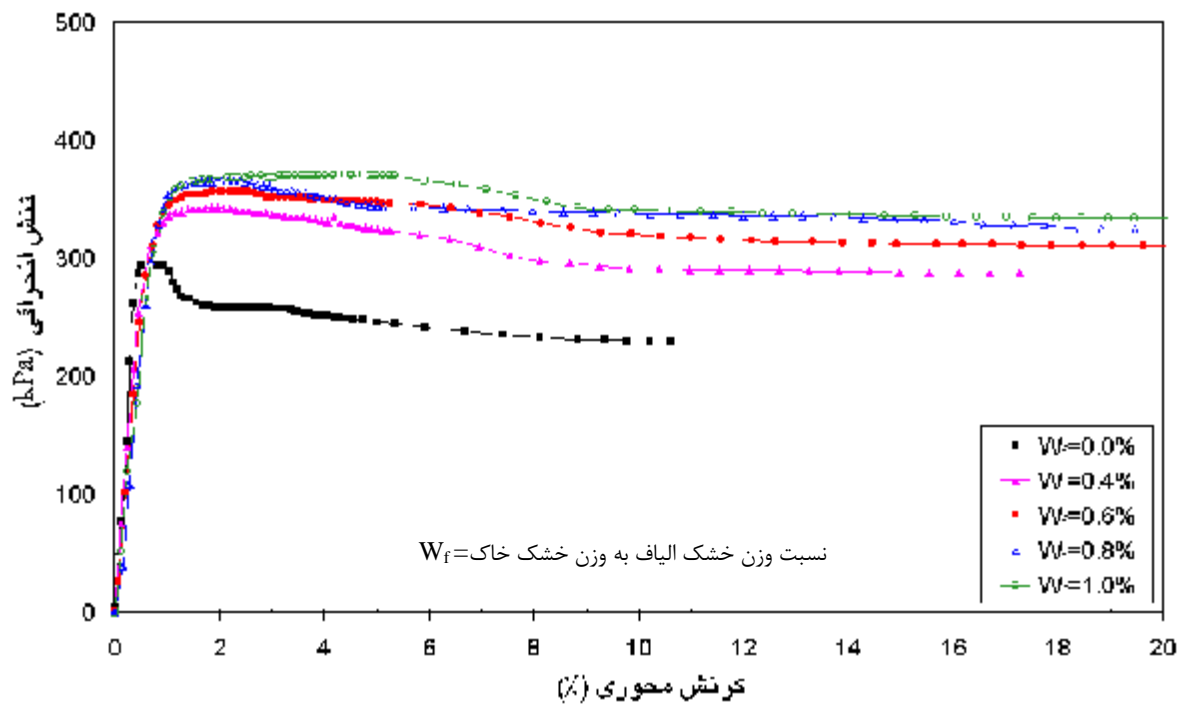


(الف)

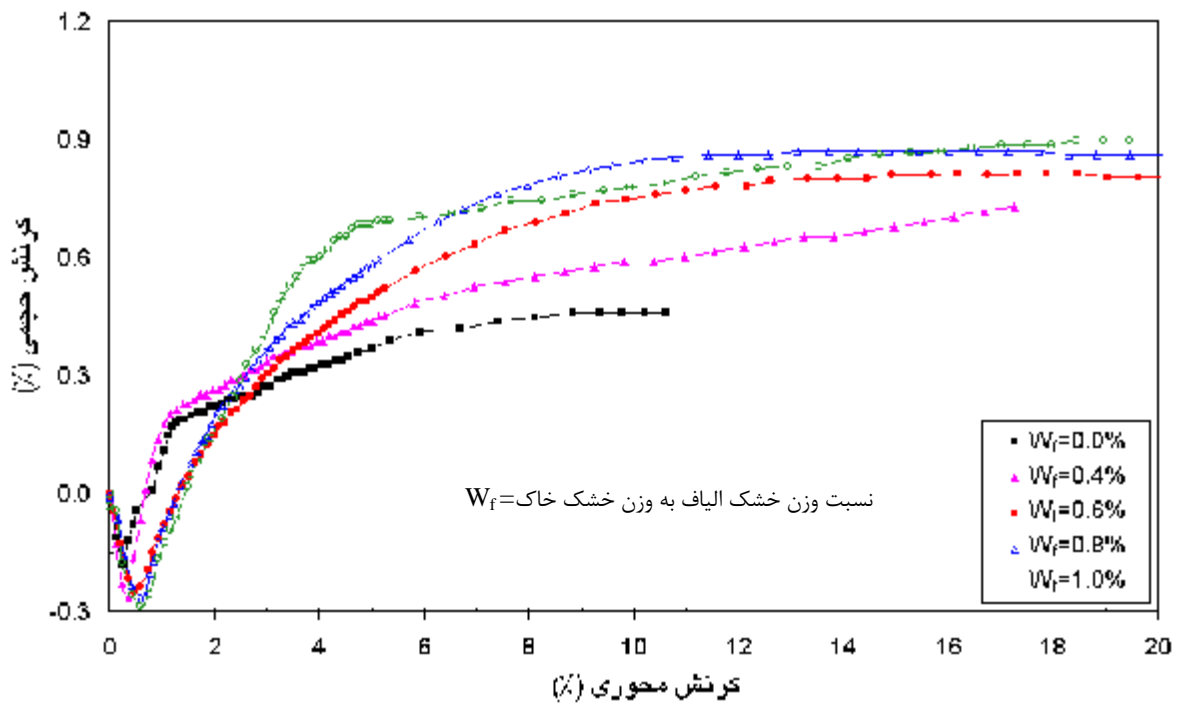


(ب)

شکل ۲- تغییرات تنش انحرافی (شکل الف) و کرنش حجمی (شکل ب) در آزمایش سه محوری CD (s'c= ۱۰۰ kPa) برای درصدهای وزنی مختلف عناصر تسلیح (Wf) و نسبت اضلاع عناصر ۱ AR=



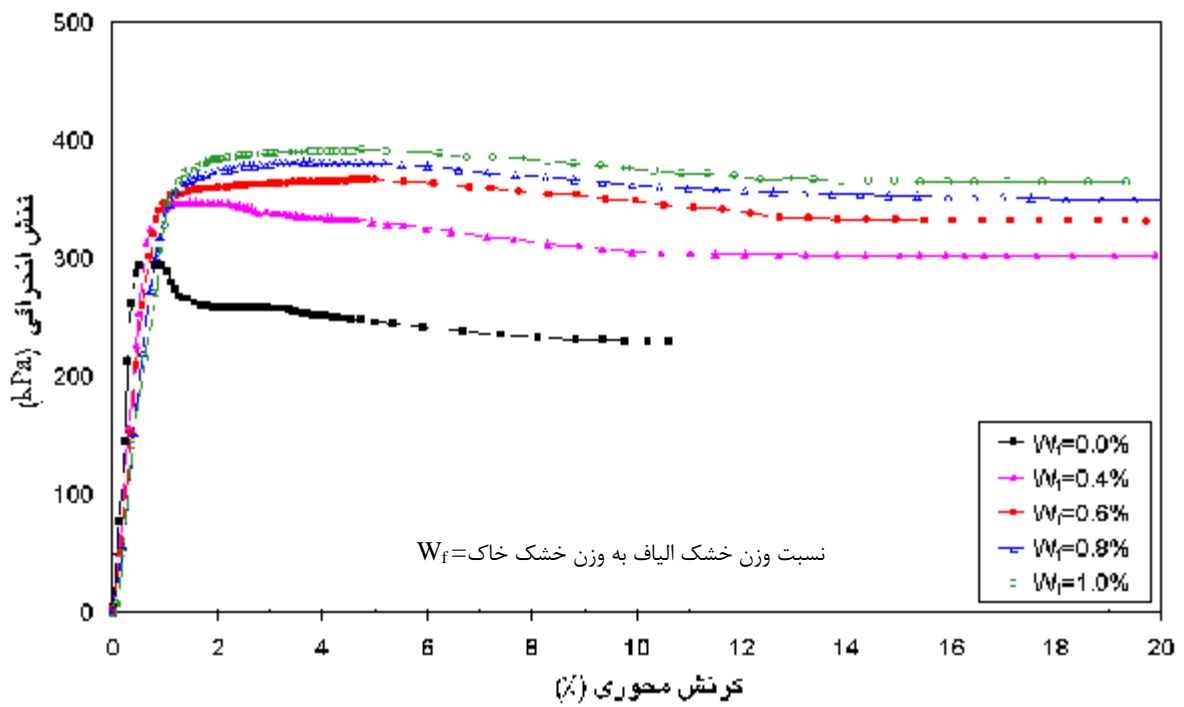
(الف)



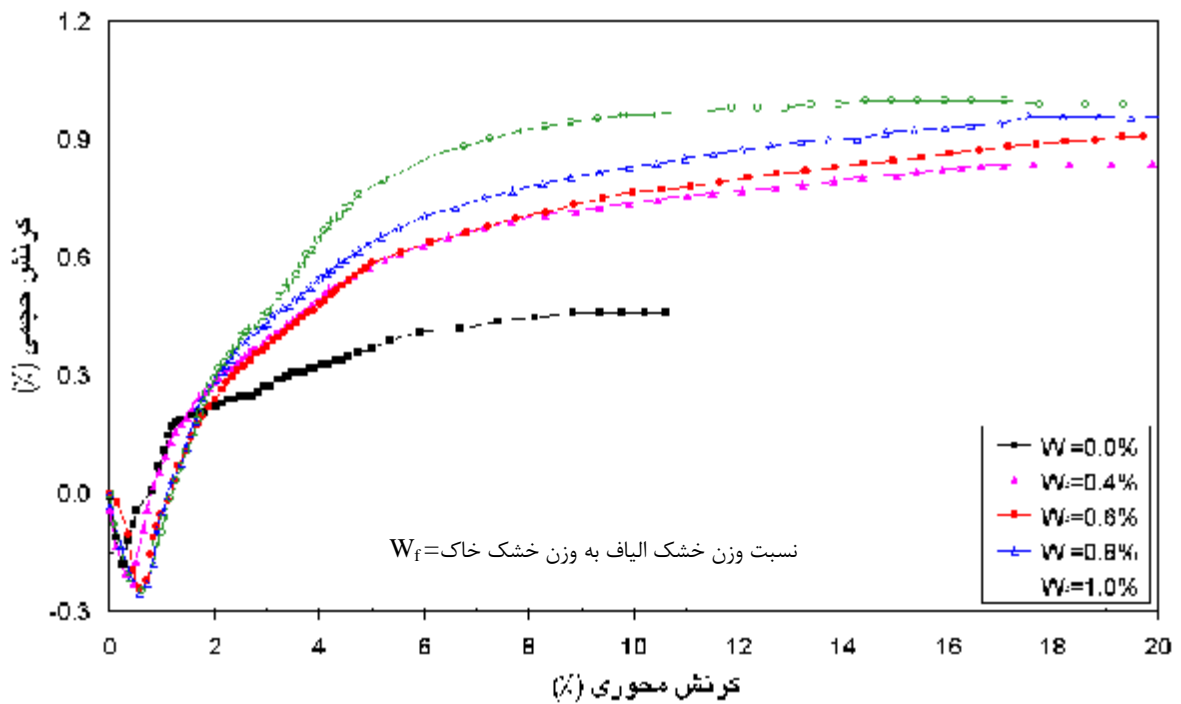
(ب)

شکل ۳- تغییرات تنش انحرافی (شکل الف) و کرنش حجمی (شکل ب) آزمایش سه محوری CD ( $S'_c = 100 \text{ kPa}$ ) برای درصدهای وزنی

مختلف عناصر تسلیح ( $W_f$ ) و نسبت اضلاع عناصر  $A_R = 3$

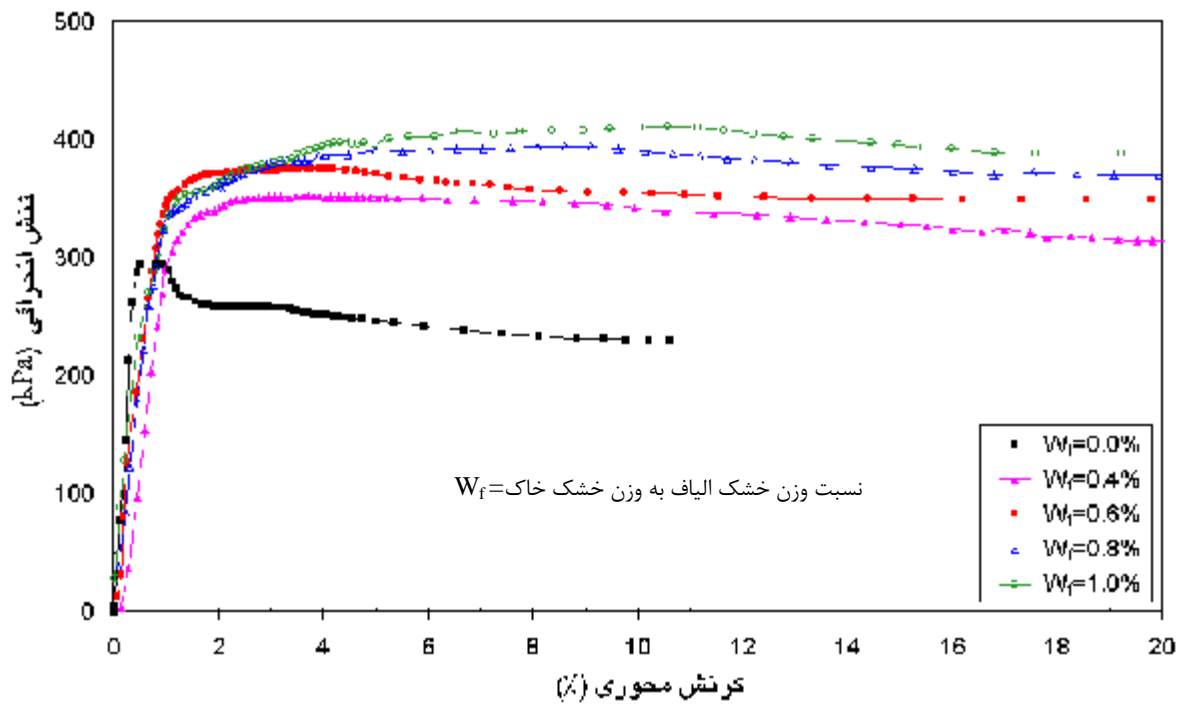


(الف)

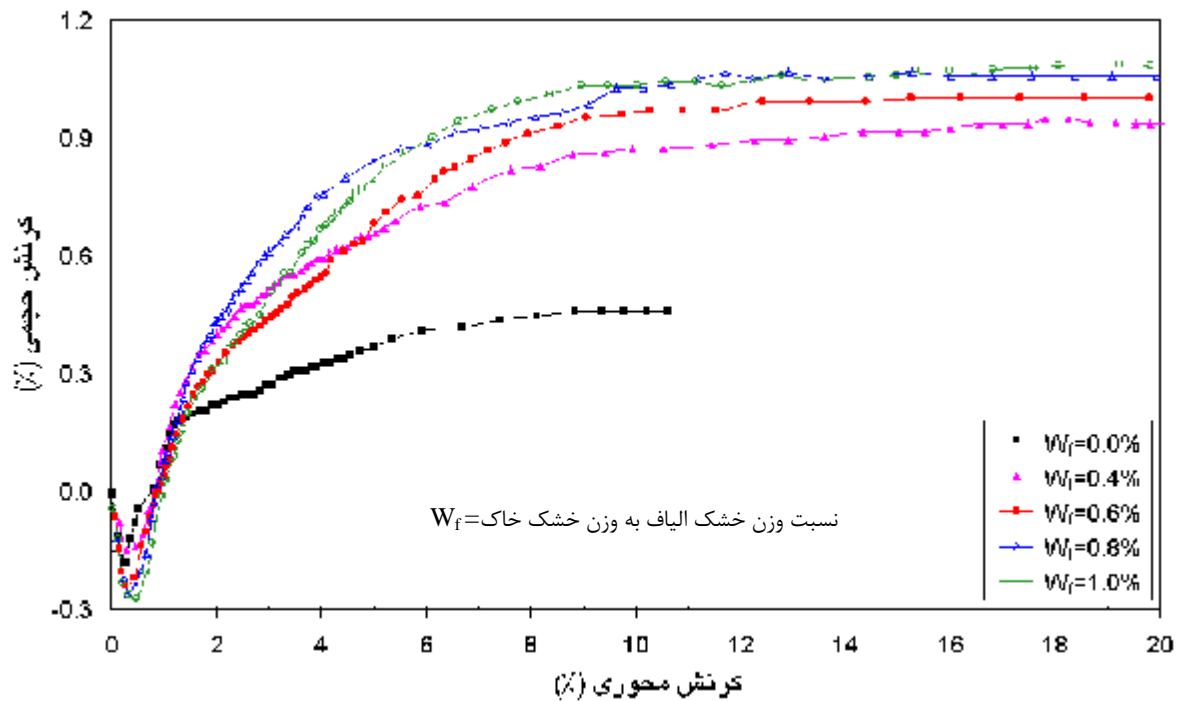


(ب)

شکل ۴- تغییرات تنش انحرافی (شکل الف) و کرنش حجمی (شکل ب) در آزمایش سه محوری CD ( $s'_c = 100 \text{ kPa}$ ) برای درصدهای وزنی مختلف عناصر تسلیح ( $W_f$ ) و نسبت اضلاع عناصر  $A_R = 5$



(الف)

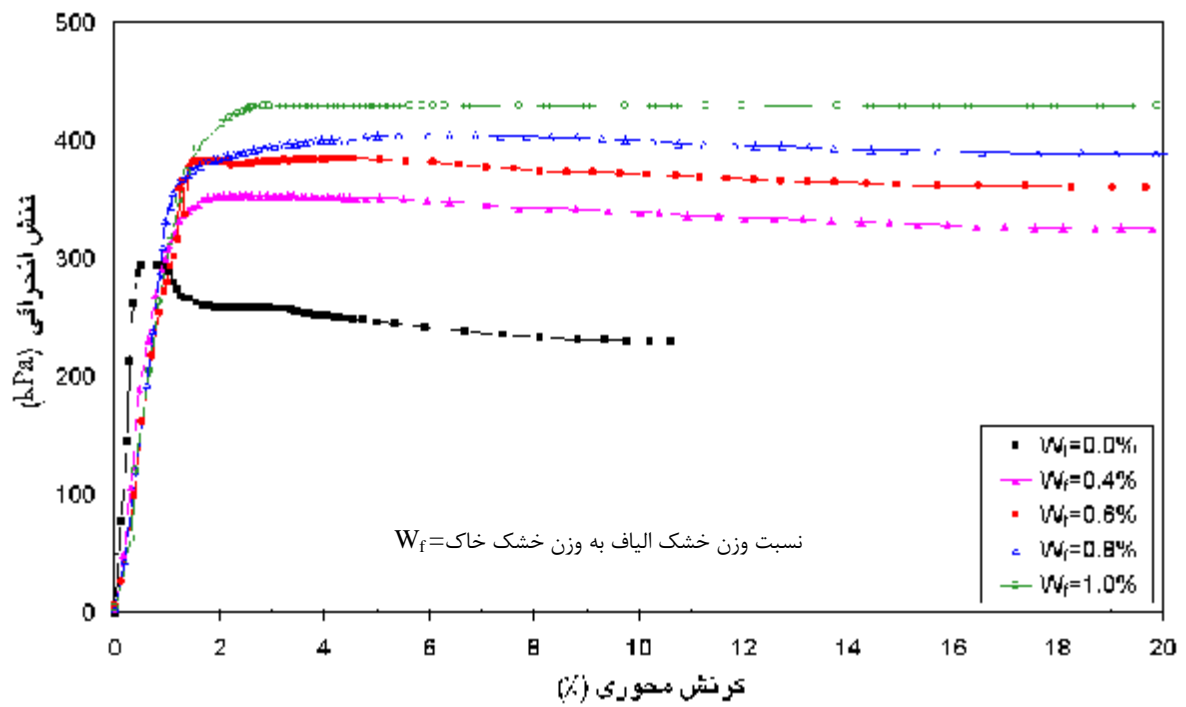


(ب)

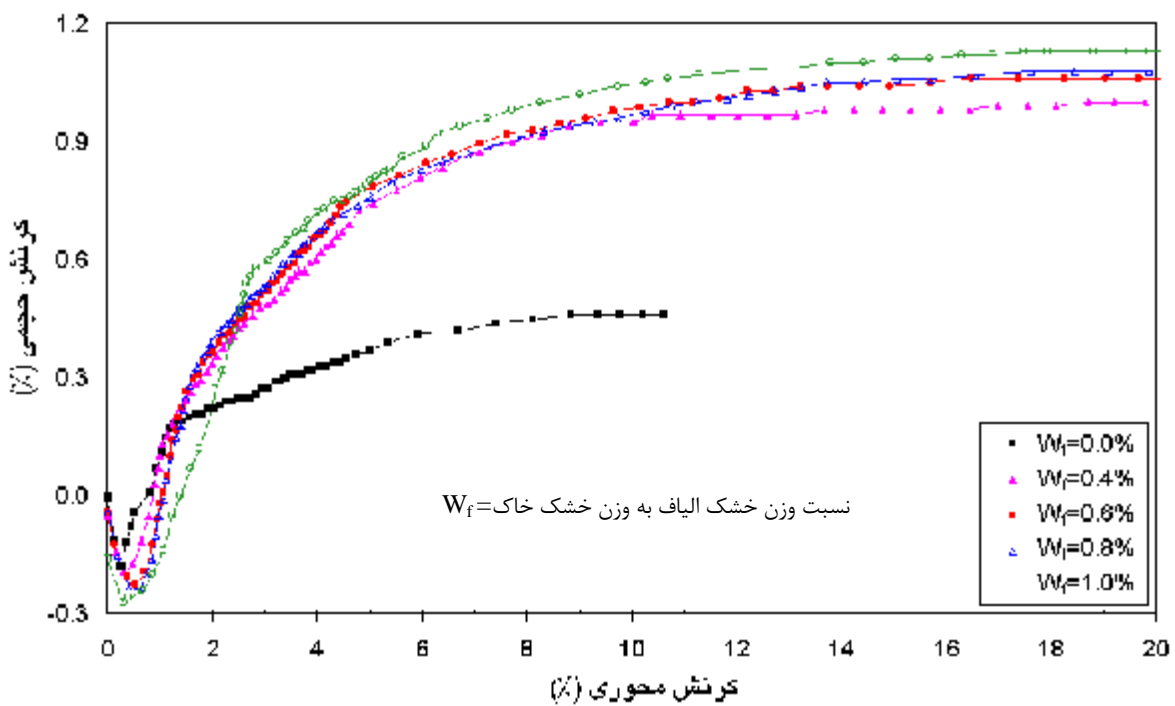
شکل ۵- تغییرات تنش انحرافی (شکل الف) و کرنش حجمی (شکل ب) در آزمایش سه محوری CD ( $s'_c = 100$  kPa) برای درصدهای

وزنی مختلف عناصر تسلیح ( $W_f$ ) و نسبت اضلاع عناصر  $A_R = 7$



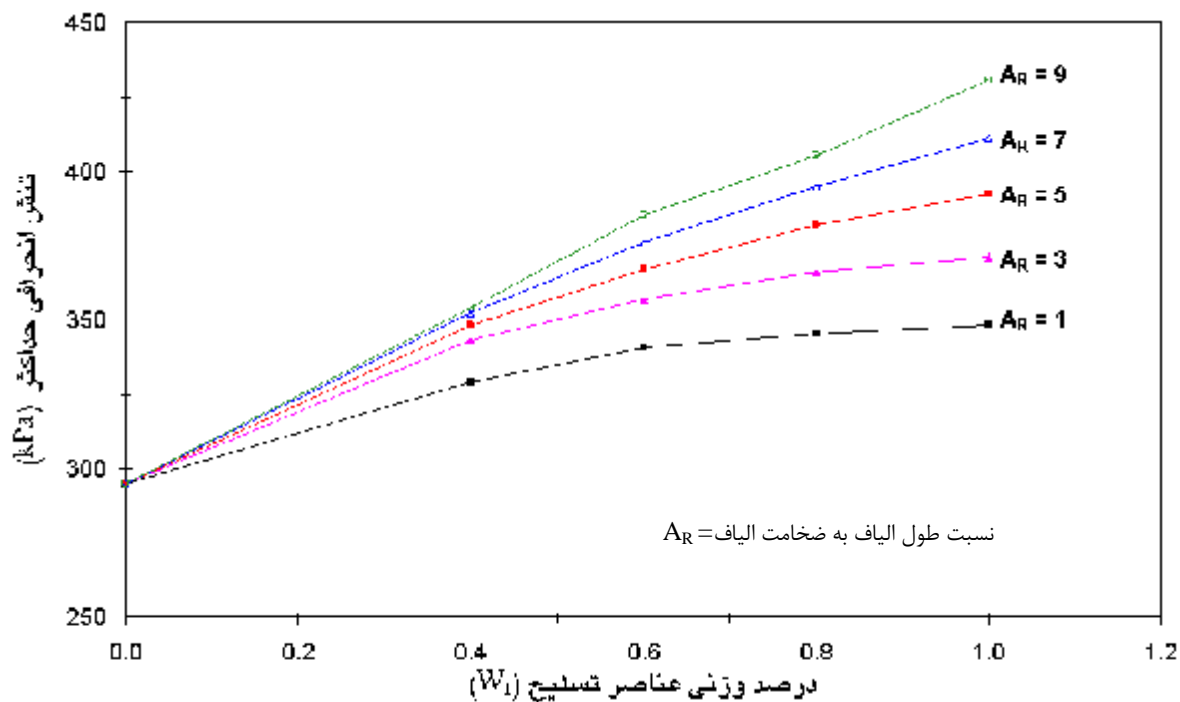


(الف)

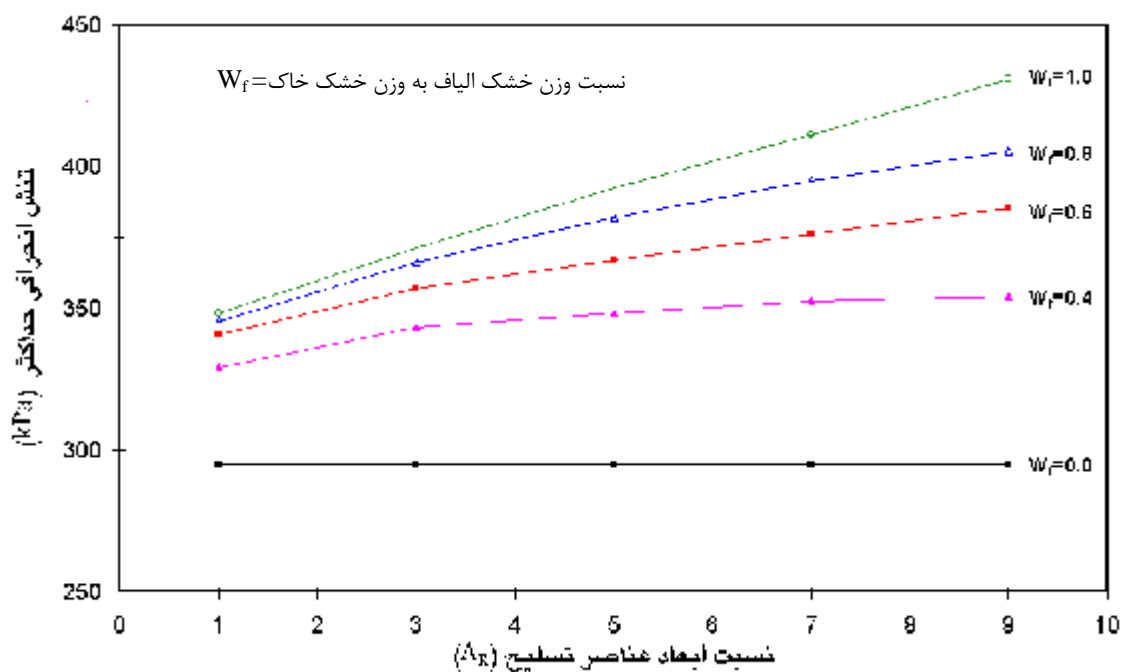


(ب)

شکل ۶- تغییرات تنش انحرافی (شکل الف) و کرنش حجمی (شکل ب) در آزمایش سه محوری CD ( $s'_c = 100 \text{ kPa}$ ) برای درصدهای وزنی مختلف عناصر تسلیح ( $W_f$ ) و نسبت اضلاع عناصر  $A_R = 9$



شکل ۷- تغییرات تنش انحرافی حداکثر بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح  $W_f$  و نسبت اضلاع عناصر  $A_R$  در آزمایش سه‌محوری CD ( $s'_c = 100$  kPa)



شکل ۸- تغییرات تنش انحرافی حداکثر بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح  $W_f$  و نسبت اضلاع عناصر  $A_R$  در آزمایش سه‌محوری CD ( $s'_c = 100$  kPa)

عناصر با خاک می‌توان مشخص کرد.

شکل (۸) نشان می‌دهد که در میزان ثابت  $W_f$ ، مقاومت نمونه‌ها با افزایش  $A_R$  افزایش می‌یابد. از طرفی می‌دانیم تعداد عناصر در این شرایط با افزایش  $A_R$  کاهش می‌یابد. لذا می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که نقش پارامتر  $A_R$  در افزایش مقاومت موثرتر از نقش تعداد عناصر تسلیح است. به عبارتی مقاومت بیرون کشیدگی<sup>۹</sup> (لغزشی) عناصر، در مقایسه با مقاومت گسیختگی<sup>۱۰</sup> آنها، مهمترین عامل کنترل‌کننده مقاومت و باربری نمونه‌هاست. مشاهده نمونه‌ها بعد از آزمایشها مویید این مطلب بود که رفتار عناصر در صفحه گسیختگی عمدتاً به صورت لغزشی بوده و پارگی در آنها مشاهده نشده است. طبیعی است با افزایش فشارهای همه جانبه، این روند تغییر خواهد کرد و انتظار می‌رود که منحنیهای شکل (۸) با افزایش  $A_R$  به طرف حالت افقی و احتمالاً حالت کاهشی میل کنند [۸].

نتایج مربوط به تغییرات حجمی نمونه‌های غیر مسلح در شکل‌های (۲) تا (۶) مطابق با رفتار خاکهای متراکم است که پس از مقداری فشردگی حجمی<sup>۱۱</sup> نمونه شروع به افزایش حجم یا اتساع<sup>۱۲</sup> می‌کند. همچنین در زمان گسیختگی، میزان تغییرات کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری (شیب منحنی) به حداکثر می‌رسد. در نمونه‌های مسلح نیز این رفتار مشاهده می‌شود ولی حداکثر تغییرات کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری قبل از رسیدن مقاومت نهایی نمونه حاصل می‌شود. دلیل این رفتار می‌تواند در ارتباط با نقش عناصر در مقاومت نهایی نمونه تفسیر شود. با این توضیح که به نظر می‌آید مقاومت برشی خاک ابتدا و قبل از گسیختگی کششی (یا لغزشی) عناصر بسیج شده و این مقارن با لحظه وقوع حداکثر نرخ تغییرات کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری نمونه است. در ادامه بارگذاری و ایجاد کرنشهای بیشتر، حداکثر مقاومت نمونه به علت تاثیر عناصر تسلیح و بسیج نیروی کششی بیشتر در آنها حاصل می‌شود و این زمانی است که تغییرات کرنش حجمی بر حسب کرنش محوری از مقدار

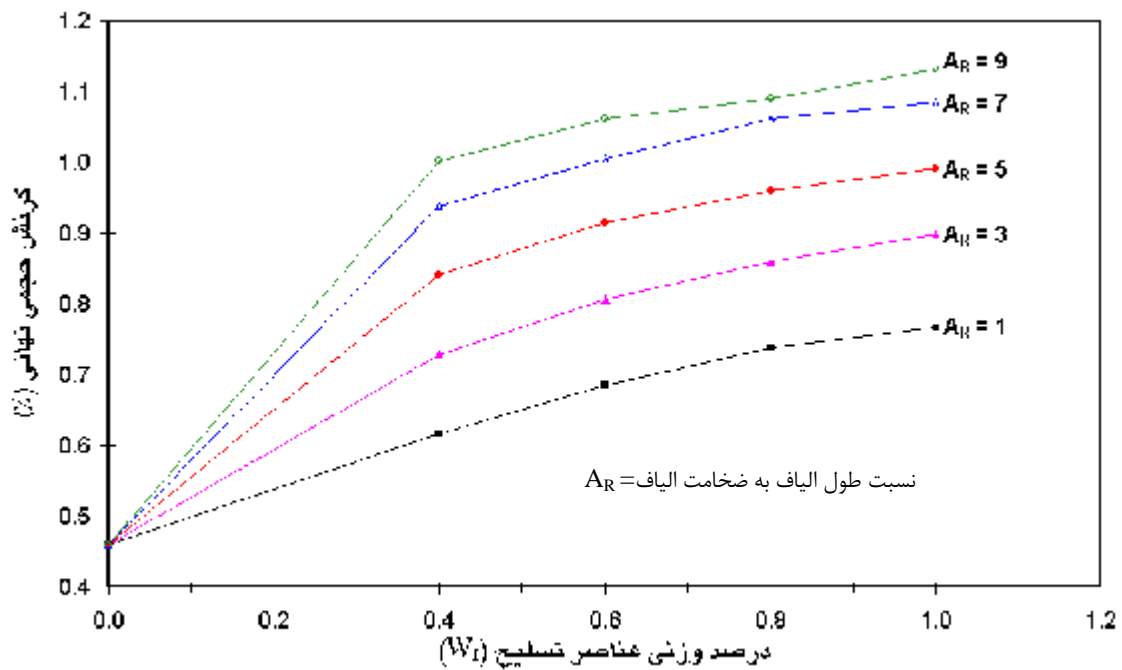
حداکثر کمتر شده است. همچنین ملاحظه می‌شود که مقدار فشردگی حجمی اولیه در نمونه‌ها با بالا رفتن درصد عناصر افزایش می‌یابد، ولی تاثیر میزان نسبت اضلاع در این ارتباط محسوس نیست.

شکل‌های (۹) و (۱۰) نتایج تغییرات کرنش حجمی نهایی نمونه‌ها بر حسب پارامترهای  $W_f$  و  $A_R$  را ارائه می‌کند. روند تغییرات در این شکلها مشابه نتایج ارائه شده در شکل‌های (۷) و (۸) است. کرنش حجمی نهایی نمونه‌ها با افزایش  $W_f$  بیشتر و نرخ افزایش با زیاد شدن  $A_R$  افزایش می‌یابد لیکن این نرخ با افزایش  $W_f$  کاهش می‌یابد. مشاهدات عینی از نمونه‌ها در هنگام آزمایش نشان داد که حضور عناصر در خاک باعث تشکیل نواحی برشی متعددی در نمونه می‌شود به نحوی که چندین نوار یا ناحیه برشی شکل می‌گیرند. این رفتار می‌تواند نقش مستقیمی در افزایش بیشتر کرنش حجمی نمونه به علت پدیده اتساع در تمامی نواحی برشی داشته باشد. همچنین محققان گزارش کرده‌اند که ضخامت ناحیه برشی با افزایش درصد عناصر افزایش می‌یابد و این پدیده خود می‌تواند در افزایش کرنش حجمی نمونه‌ها موثر باشد [۱۲].

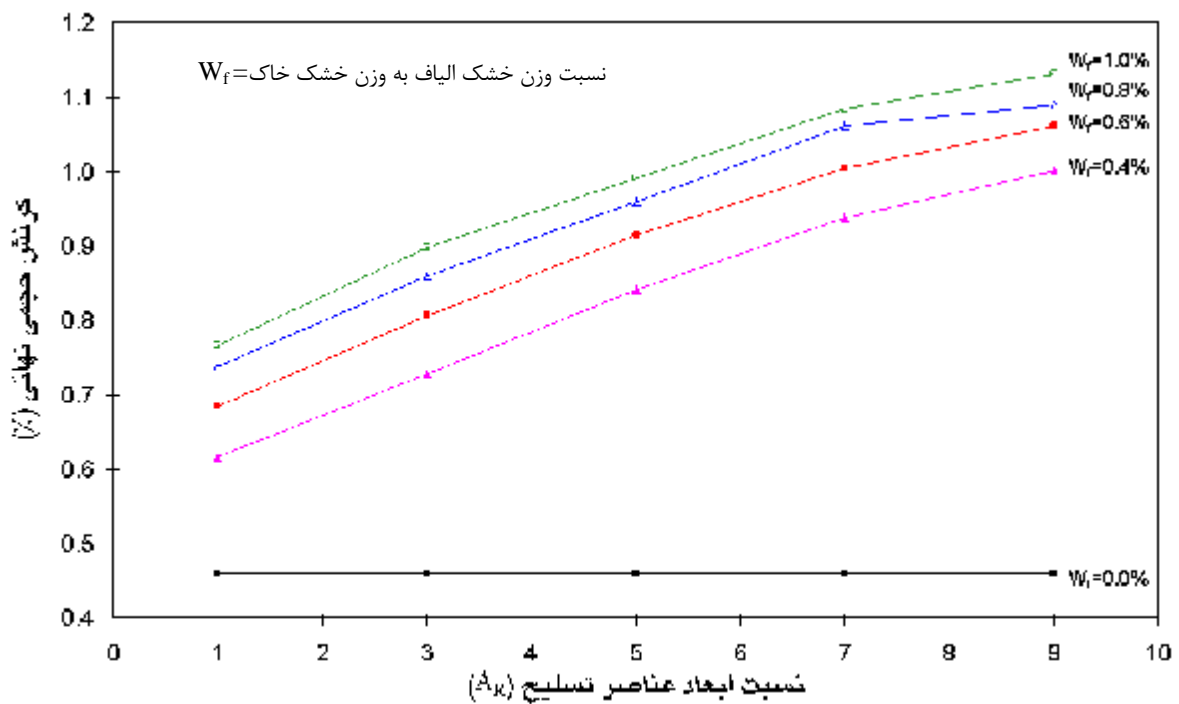
با توجه به اینکه نتایج ارائه شده فقط برای یک فشار همه جانبه موثرند (  $10 \cdot kPa$  ) و آزمایشها برای دیگر فشارها در حال انجام است، نمودارهای موهركولمب و مقادیر  $\phi$  و  $c$  ارزیابی و ارائه نشده‌اند. معهداً از همین نتایج مشخص است که این مقادیر برای نمونه‌های مسلح شده نسبت به مقادیر نمونه‌های ماسه معمولی بیشترند.

#### ۴-۲- آزمایشهای تک‌محوری

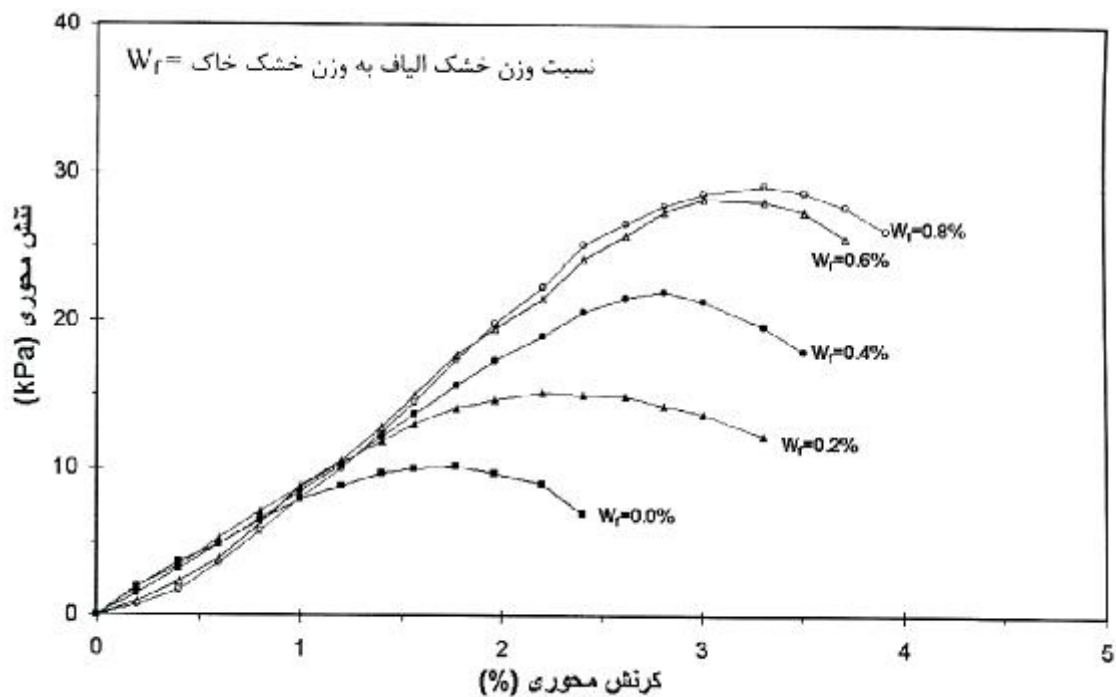
شکل‌های (۱۱) و (۱۲) تغییرات تنش محوری بر حسب کرنش محوری در آزمایشهای تک‌محوری برای نمونه‌های مسلح شده با درصدهای وزنی ۰ تا ۰/۸ با نسبت‌های اضلاع ۱ و ۳ را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در یک نسبت اضلاع ( $A_R$ ) ثابت، با افزایش درصد وزنی عناصر تسلیح ( $W_f$ ) مقاومت حداکثر نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همین روند برای تاثیر افزایش پارامتر



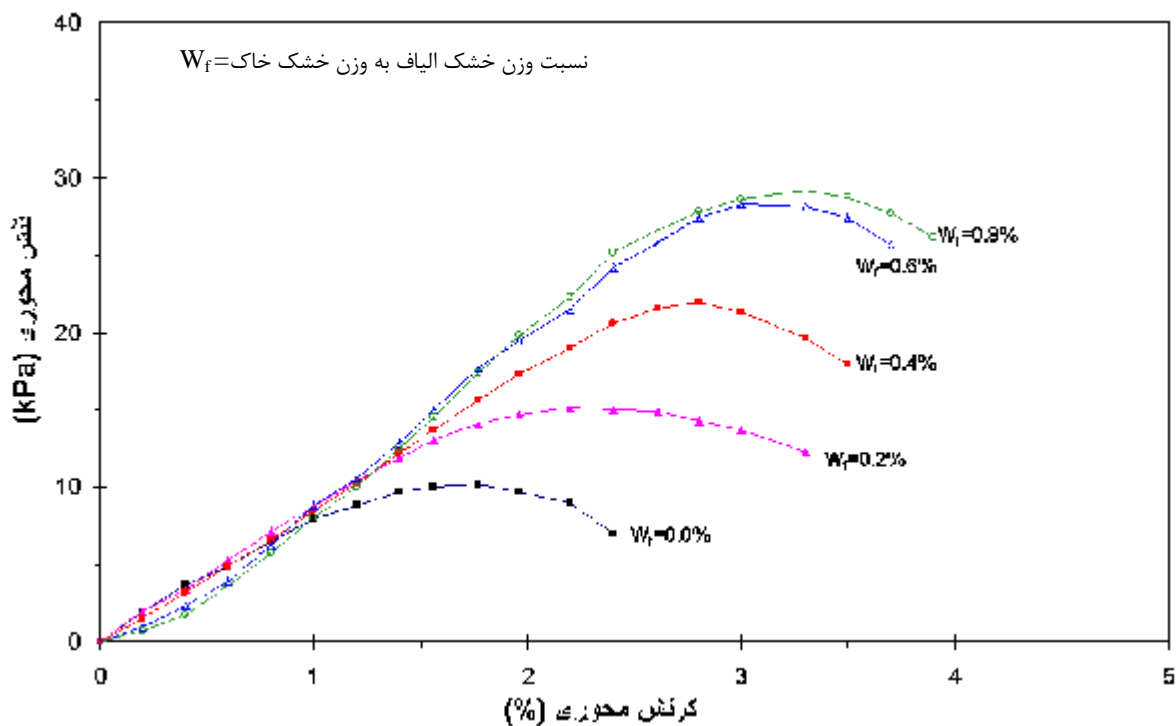
شکل ۹- تغییرات کرنش حجمی بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح  $W_f$  و نسبت اضلاع عناصر  $A_R$  در آزمایش سه محوری CD ( $s'_c = 100$  kPa)



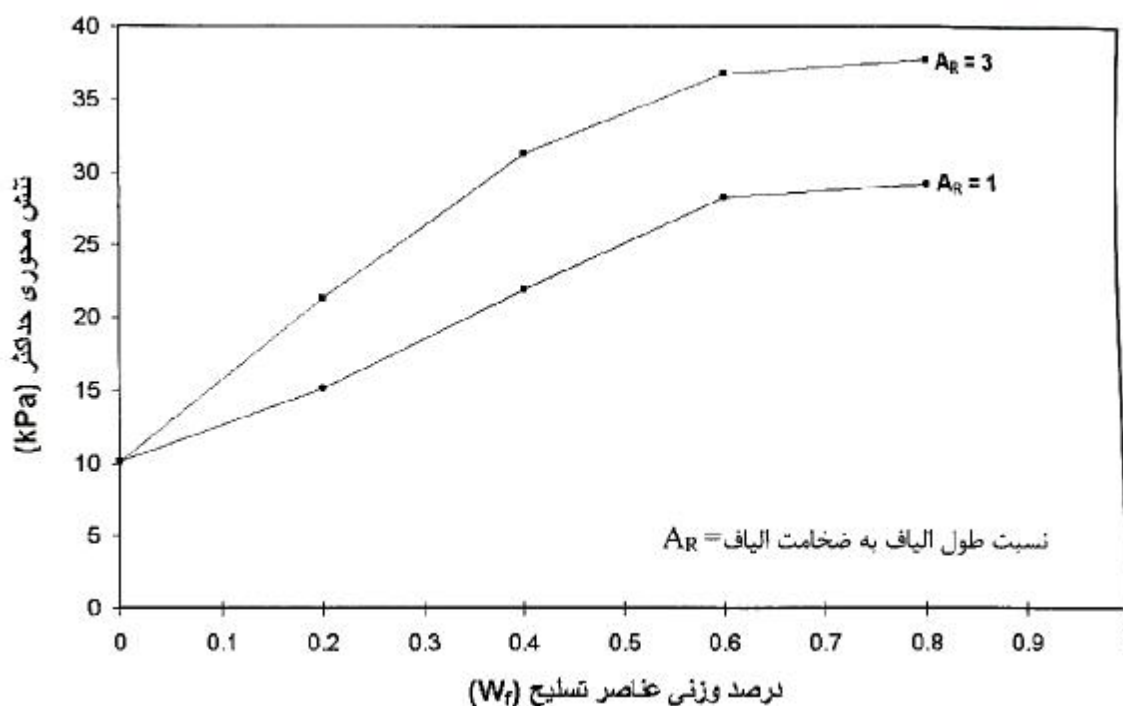
شکل ۱۰- تغییرات کرنش حجمی بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح  $W_f$  و نسبت اضلاع عناصر  $A_R$  در آزمایش سه محوری CD ( $s'_c = 100$  kPa)



شکل ۱۱- تغییرات تنش بر حسب کرنش محوری در آزمایش تک محوری برای درصدهای وزنی عناصر تسلیح  $W_f$  و نسبت اضلاع عناصر  $A_R=1$



شکل ۱۲- تغییرات تنش بر حسب کرنش محوری در آزمایش تک محوری برای درصدهای وزنی مختلف عناصر تسلیح ( $W_f$ ) و نسبت اضلاع عناصر  $A_R=3$



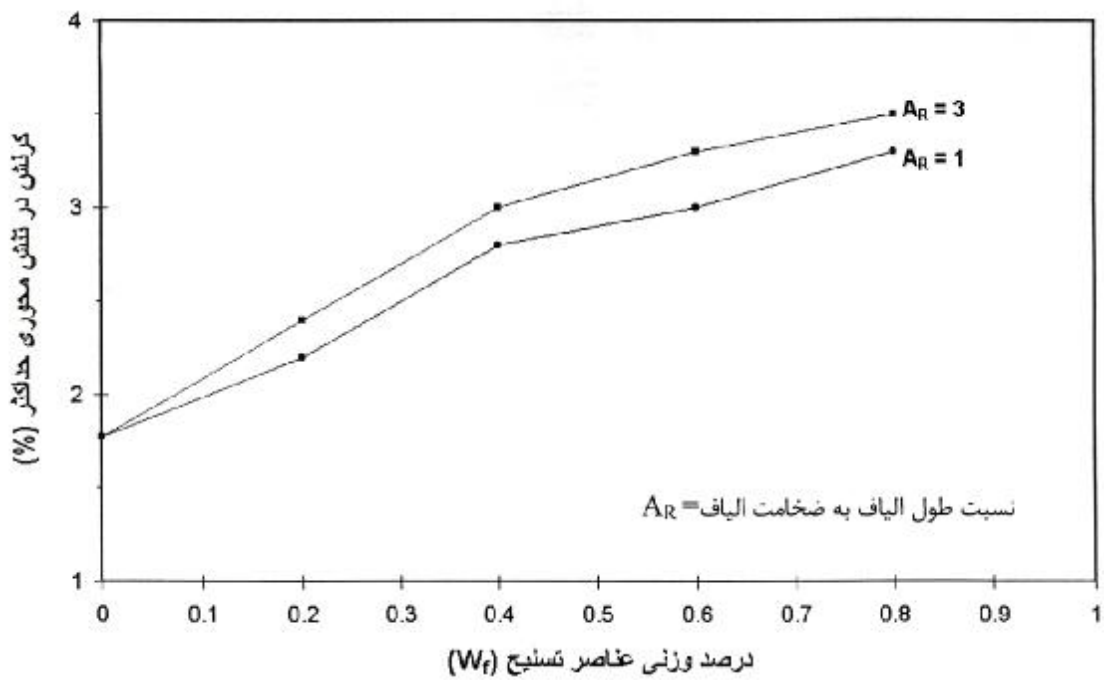
شکل ۱۳- تغییرات مقاومت حد اکثر بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح ( $W_f$ ) و نسبت اضلاع عناصر  $A_R = 3$  در آزمایش تک محوری

حداکثر (سختی) و افزایش کرنش گسیختگی متناسب با افزایش  $W_f$  دیده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود در یک درصد ثابت الیاف، با افزایش پارامتر  $A_R$  کرنش گسیختگی افزایش و سختی کاهش می‌یابد که این تغییرات کرنش گسیختگی در نمودار ۱۴ بهتر دیده می‌شوند. در مجموع می‌توان استنباط کرد که با افزایش پارامترهای  $W_f$  و  $A_R$  شکل پذیری نمونه‌ها افزایش و سختی آنها کاهش یافته است [۲].

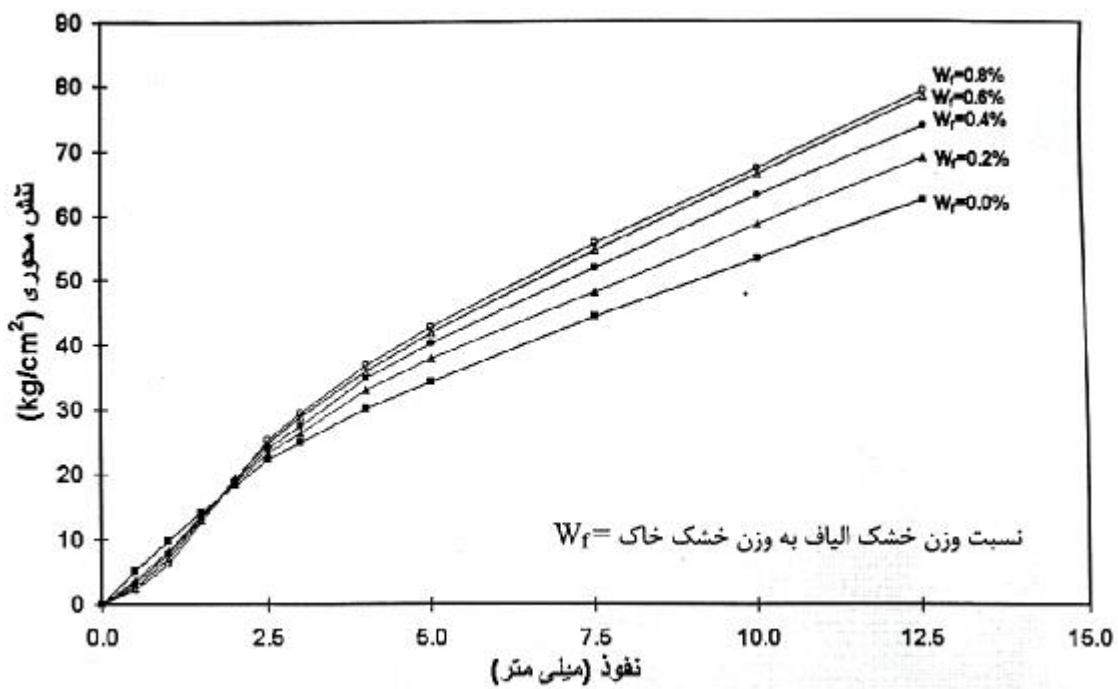
در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود که نرخ تغییرات مقاومت حداکثر بر حسب درصد وزنی الیاف با نسبت اضلاع ۱ و ۳ به صورت کاهشی بوده و تاثیر الیاف در افزایش مقاومت در درصدهای وزنی کمتر عمده‌تر است. به نظر می‌رسد که در درصدهای بالاتر الیاف، مقدار مقاومت تدریجاً به حداکثر ممکن رسیده و افزایش بیشتر الیاف تاثیر چندانی نخواهد داشت. این رفتار مشابه با روند تغییرات مقاومت سه‌محوری در شکل (۷) است. ونگ و همکاران [۱۰] در یک مطالعه مشابه بر روی

$A_R$  در یک درصد وزنی ثابت نیز دیده می‌شود. برای ارزیابی بهتر تغییرات مقاومت، شکل (۱۳) این تغییرات را بر حسب درصد وزنی الیاف برای نسبت اضلاع ۱ و ۳ نشان می‌دهد. افزایش مقاومت نمونه‌ها بر حسب میزان الیاف مشخصات در ارتباط با بسیج شدن بیشتر مقاومت کششی الیاف در ناحیه برشی قابل تفسیر است.

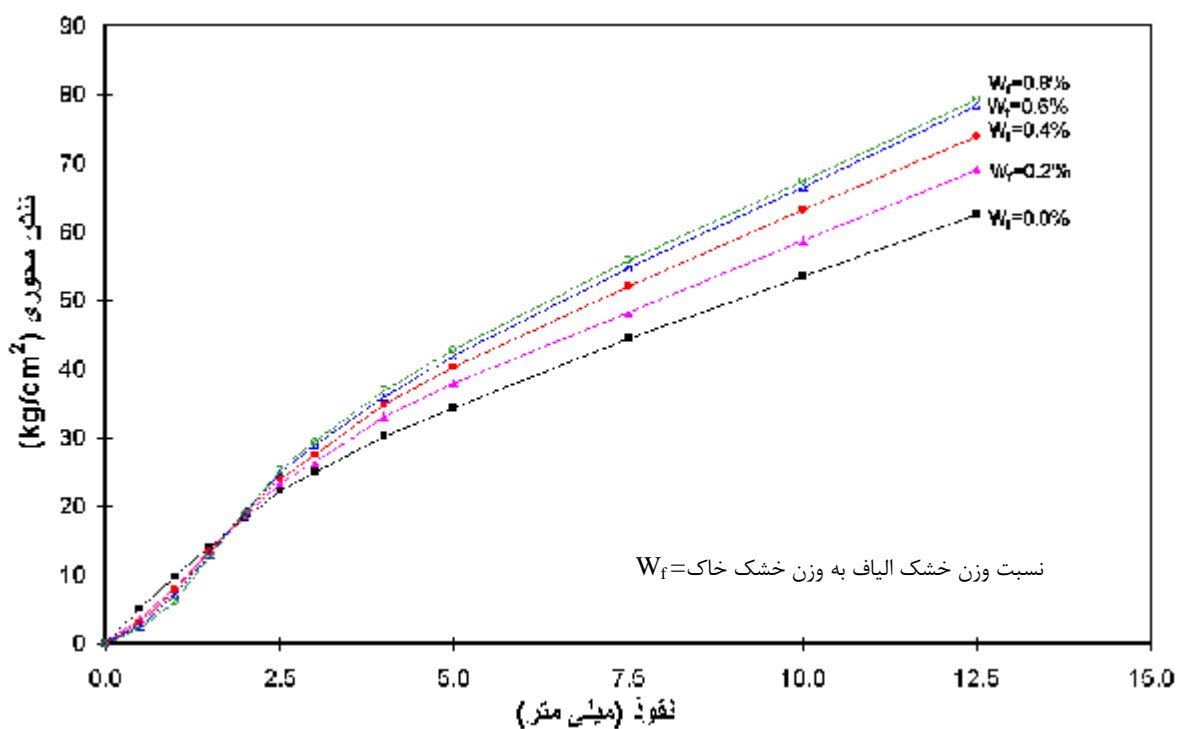
در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) مشاهده می‌شود منحنی تنش و کرنش نمونه غیر مسلح در مقایسه با نمونه‌های مسلح با شیب تندتر (یعنی سختی بیشتر) صعود کرده و در کرنش گسیختگی حدود ۱/۷۷ درصد که کمترین مقدار به دست آمده است به حداکثر می‌رسد. همان گونه که قبلاً اشاره شد، این رفتار مشابه رفتار مواد ترد و شکننده بوده که غالباً در خاک‌های دانه‌ای متراکم و ریزدانه سفت (پیش تحکیم یافته) مشاهده می‌شود. با افزودن الیاف به خاک این خاصیت کاهش یافته و خاک حالت نرمتری به خود می‌گیرد و این روند در کاهش تدریجی ضریب کشسانی



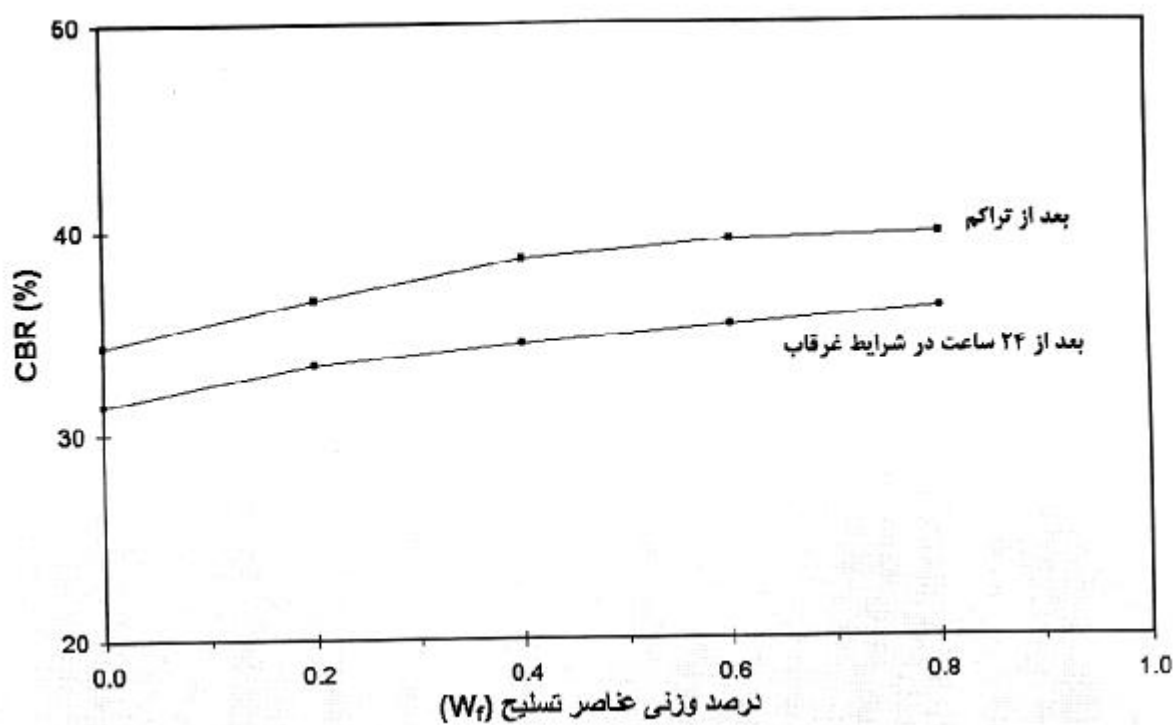
شکل ۱۴- تغییرات کرنش در مقاومت حداکثر بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح  $W_f$  و نسبت اضلاع عناصر  $A_R$  در آزمایش تک محوری



شکل ۱۵- تغییرات تنش محوری بر حسب نفوذ سنبه برای نمونه‌های با نسبت اضلاع عناصر  $A_R = 5$  و غرقاب شده به مدت ۲۴ ساعت در آزمایش CBR



شکل ۱۶- تغییرات تنش محوری بر حسب نفوذ سنجه برای نمونه‌های با نسبت اضلاع عناصر  $A_R=5$  در آزمایش CBR



شکل ۱۷- تغییرات CBR بر حسب درصد وزنی عناصر تسلیح برای نمونه غرقاب شده  $W_f$  و مرطوب



مقاومت تک‌محوری نمونه‌های خاک ماسه رسی مسلح شده با الیاف موکت گزارش نموده‌اند که در مقادیر بالاتر از ۲ درصد وزنی الیاف، مقاومت شروع به کاهش کرده است. به عبارتی برای هر نوع خاک و الیاف مشخص، مقدار بهینه‌ای از درصد الیاف وجود خواهد داشت که حداکثر مقاومت را به دست می‌دهد. این رفتار از این نظر منطقی و قابل تفسیر است که در درصدهای بالای الیاف به تدریج با جایگزینی عناصر تسلیح به جای ذرات خاک، مقاومت نمونه مرکب بیشتر تحت تاثیر عناصر تسلیح قرار گرفته و به عبارتی میزان الیاف کنترل کننده رفتار نمونه می‌شود.

#### ۴-۳- آزمایش‌های سی بی آر

شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نتایج آزمایش‌های سی بی آر انجام شده روی نمونه‌های مسلح شده تحت شرایط رطوبت بهینه و اشباع (۲۴ ساعت غرقاب) را نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود افزودن الیاف به خاک باعث می‌شود که شیب منحنی تغییرات فشار بر حسب میزان نفوذ ابتدا افزایش یافته و به تدریج حالت کاهشی می‌یابد. به عبارتی یک نقطه عطف در هر نمودار وجود دارد یعنی نقطه‌ای که تقعر منحنی در آن عوض می‌شود. این روند با کاهش الیاف تخفیف می‌یابد تا به حالت نمونه بدون الیاف که منحنی تغییرات فشار آن نقطه عطفی ندارد می‌رسد. این نتیجه برای هر دو حالت نمونه‌های مرطوب و غرقاب معتبر است. البته لازم به تذکر است که منحنی‌های سی بی آر برای خاک‌های مختلف معمولاً دارای یک نقطه عطف‌اند که ناشی از عدم یکنواختی و تراز بودن سطح نمونه و تماس کامل آن با پیستون بارگذاری در اوایل آزمایش است (که در این ارتباط این منحنیها باید طبق روش استاندارد اصلاح شوند). ولی با توجه به منحنی مربوط به خاک غیرمسلح ( $W_f=0$ ) که در آن نقطه عطف دیده نمی‌شود منحنی‌های حالت تسلیح اصلاح نشده‌اند. به عبارتی تشکیل نقاط عطف را می‌توان عمدتاً ناشی از وجود الیاف تا اثرات بارگذاری دانست. ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد الیاف میزان تنش لازم برای ایجاد نفوذ مشخص افزایش

می‌یابد. یعنی مقدار سی بی آر با افزایش درصد الیاف افزایش می‌یابد که منطقی است. نمونه‌های غرقاب شده مقاومت سی بی آر کمتری نسبت به نمونه‌های مشابه مرطوب دارند که می‌تواند ناشی از اثرات موئینگی و ایجاد فشار منفذی منفی در نمونه‌های مرطوب و همچنین تاثیر شرایط اشباع بر مواد ریزدانه (۱۴ درصد) موجود در ماسه و احتمالاً بر الیافها باشد.

روند تغییرات سی بی آر برحسب درصد وزنی الیاف برای نمونه‌های مرطوب و غرقاب شده در شکل (۱۷) بهتر دیده می‌شود. ملاحظه می‌شود با افزودن الیاف به خاک میزان سی بی آر برای هر دو حالت افزایش یافته ولی نرخ تغییرات کاهشی بوده که مشابه با نتایج آزمایش‌های تک‌محوری و یا سه‌محوری است. این نحوه تاثیر عناصر تسلیح بر مقاومت سی بی آر را محققان دیگر نیز گزارش کرده‌اند [۷]. البته تاثیر تسلیح در افزایش سی بی آر آنچنان عمده و قابل توجه نیست و این می‌تواند به این صورت تفسیر شود که چون نیروهای کششی قابل توجه در الیافها فقط در تغییر شکل‌های زیاد خاک بسیج می‌شوند (به علت سختی بسیار کمتر آنها نسبت به خاک) و میزان  $2/5$  میلی‌متر نفوذ پیستون سی بی آر در خاک با توجه به عدم امکان تغییر شکل جانبی خاک ناشی از قراردادن نمونه در داخل قالب آزمایش، کرنش کششی (و نتیجتاً نیروی کششی) کمی را در الیافها بسیج می‌کند، لذا تاثیر آنها در افزایش باربری نمونه‌ها ناچیز است.

#### ۵- نتیجه گیری

نتایج ارائه شده در این مقاله بخشی از تحقیق در حال انجام در مورد تاثیر الیاف پلیمری بر مقاومت و شکل‌پذیری نمونه‌های ماسه لای‌دار است که می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- افزودن الیاف به خاک، حالت شکنندگی خاک را کاهش داده و رفتار آن را از حالت شکنندگی به نرمی تغییر می‌دهد که به صورت کاهش ضریب کشسانی حداکثر خاک، افزایش کرنش گسیختگی، و کاهش در شیب منحنی بعد از مقاومت نهایی ظاهر می‌شود.

- در هر مقدار ثابت الیاف، تاثیر تسلیح در افزایش مقاومت و کرنش حجمی نهایی نمونه‌ها با افزایش AR بیشتر می‌شود.
- افزودن الیاف به خاک موجب افزایش سی بی آر خاک شده و روند تاثیر مشابه با نتایج آزمایشهای سه‌محوری یا تک‌محوری ولی با شدت تاثیر کمتر است. غرقاب کردن نمونه‌ها باعث افت مقاومت می‌شود.

### قدردانی

هزینه‌های اجرای این تحقیق از محل اعتبارات اختصاص یافته توسط "کمیته ملی کاهش اثرات بلاهای طبیعی، کمیته فرعی - تخصصی مقابله با خطرات ناشی از زلزله و لغزش لایه‌های زمین" و همچنین "کارخانه کرمان موکت" تامین شده که بدین وسیله قدردانی و سپاسگزاری می‌شود.

- در یک نسبت اضلاع ثابت، با افزایش میزان الیاف، مقاومت نهایی سه‌محوری یا تک‌محوری افزایش یافته که این افزایش رابطه مستقیم با میزان الیاف و عناصر تسلیح موجود در خاک دارد، ولیکن نرخ تغییرات مقاومت بر حسب درصد وزنی عناصر کاهش می‌یابد.
- در آزمایشهای سه‌محوری، نرخ تغییرات کرنش حجمی برحسب کرنش محوری در نمونه‌های مسلح شده برای مقادیر مختلف نسبت اضلاع الیافها به مقدار حداکثر می‌رسد قبل از اینکه حداکثر مقاومت نهایی نمونه حاصل شود.
- کرنش حجمی نهایی در نمونه‌های آزمایش شده تحت شرایط سه‌محوری با افزایش درصد عناصر تسلیح بیشتر می‌شود و نرخ افزایش با زیاد شدن نسبت اضلاع افزایش می‌یابد، ولی این نرخ با افزایش مقدار درصد عناصر تسلیح (برای مقدار ثابت AR) کاهش می‌یابد.

### واژه نامه

- |                                   |                                 |                                  |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1. interaction                    | 5. effective confining pressure | 9. Pullout Resistance            |
| 2. composite                      | 6. deviatoric stress            | 10. Breakage or Tensile Strength |
| 3. california bearing ratio (CBR) | 7. brittleness                  | 11. Compression                  |
| 4. shear zone                     | 8. Ductility                    | 12. Dilation                     |

### مراجع

- Lee, K. L., Adams, and Vagneron. "Reinforced Earth Retaining Walls," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 99, No. SM10, pp. 745-764, 1973.
- Hoare, D. "Synthetic Fabrics Soil Filter," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 108, No. 10, pp. 1230-1246, 1982.
- Andersland, O. B., and Khattak, A. S. "Shear Strength of Kaolinite/Fiber Soil Mixtures," *Proc. Int. Conf. on Soil Reinforcement*, Paris, France, 1997.
- Gray, D. H., and Ohashi, H., "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 335-353, 1983.
- Dean, R. and Freitag, F., "Soil Randomly Reinforced with Fibers," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 112, No. 4, pp. 823-827, 1986.
- Arenzic, R. M., and Chowdhury, R. N., "Laboratory Investigation of Earth Walls Simultaneously Reinforced by Strips and Random Reinforcement," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 11, No. 4, pp. 241-247, 1988.
- Benson, C. H., and Khire, M. V., "Reinforcing Sand with Strips of Reclaimed High-Density Polyethylene," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 5, pp. 828-855, 1994.
- Ranjan, G., Vasan, R. M., and Charan, H.D., "Probabilistic Analysis of Randomly Distributed Fiber Reinforced Soil," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 6, pp. 419 - 426, 1996.
- Michalowski, R. and Zoba, A., "Failure of Fiber Reinforced Granular Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 3, pp. 226-234, 1996.

10. Wang, Y., Frost, J. D., and Murray, J., "Utilization of Recycled Fiber for Soil Stabilization," *Proceedings of the Fiber Society Meeting*, May 17-19, Guimaraes, Portugal, pp. 59-62, 2000.
11. Ladd, R. S., "Preparing Test Specimens Using Undercompaction," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 1, No. 1, pp. 16-23, 1978.
12. Shewbridge, S. E. and Sitar, N., "Deformation Characteristics of Reinforced Sand in Direct Shear," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (ASCE), Vol. 115, No. 8, pp. 1134-1147, 1989.