تحقیقات آب و خاک ایران، دورهٔ ۴۶، شمارهٔ ۲، تابستان ۱۳۹۴ (ص ۲۵۳-۲۴۵)

تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر ویژگی‌های مکانیکی خاک‌های گچی

جهانگیر عابدی کوپایی[1]*، سمانه سلطانیان[2]، مهدی قیصری[3]

۱. استاد گروه مهندسی آب دانشکدهٔ مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی دانشکدهٔ مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. استادیار گروه مهندسی آب دانشکدهٔ مهندسی کشاورزی دانشگاه صنعتی اصفهان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۲/۱۱ـ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۲۱)

چکیده

خاک‌های گچی، که در طبقهٔ خاک‌های مشکل‌آفرین قرار می‌گیرند، در بستر سازه‌های آبی ممکن است به صورت موضعی یا کلی سبب تخریب سازه شوند. یکی از روش‌های مقابله با این نوع خاک‌ها تثبیت و اصلاح خاک است. روش‌های مسلح‌کردن خاک شامل استفاده از تسمه‌های فولادی و روش‌های ژئوتکستایل و ژئوسنتتیک الیاف است. در این مطالعه به تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن در دو طول ۶ و ۱۲ میلی‌متر با درصدهای متفاوت (۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۱۵، و ۰/۲۵) بر پارامترهای برشی، مشخصات تراکمی، حدود اتربرگ، و نسبت باربری خاک پرداخته شد. نتایج استخراج‌شده در قالب طرح کاملاً تصادفی به صورت آماری تجزیه‌وتحلیل و میانگین‌ها در سطح آماری ۱ درصد (P< ۰/۰۱) مقایسه شد. نتایج نشان داد هیچ‌یک از طول‌های الیاف پلی‌پروپیلن تغییر معناداری بر رطوبت بهینه و بیشترین وزن واحد حجم و چسبندگی خاک ایجاد نکرد. در حالی که هر دو طول الیاف نام‌برده سبب افزایش معنادار زاویهٔ اصطکاک داخلی، ظرفیت باربری، و حد روانی و خمیرایی خاک شدند.

کلیدواژگان: الیاف پلی‌پروپیلن، برش مستقیم، تراکم استاندارد، حدود اتربرگ، نسبت باربری.

مقدمه

در اصطلاح ژئوتکنیک واژهٔ خاک مشکل‌آفرین یا نامتعارف به خاکی اطلاق می‌شود که در صورت استفاده از آن در سازه‌های خاکی یا به مثابهٔ تکیه‌گاه سایر سازه‌ها در طول دوران ساخت یا بهره‌برداری مسائل و مشکلاتی ایجاد کنند. خاک‌های گچی نیز، که جزء خاک‌های انحلال‌پذیرند[1]، از خاک‌های مشکل‌آفرین به‌شمار می‌روند. خاک‌های گچی در بیشتر کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با بارندگی سالیانهٔ کمتر از ۴۰۰ میلی‌متر گسترش یافته‌اند. این در حالی است که حدود ۳۶ درصد از خشکی‌های سطح زمین را مناطق با آب‌وهوای خشک تشکیل می‌دهد (Rahimi, 2000). خاک‌های گچی در مناطق وسیعی از قارهٔ آسیا، از جمله ایران، که ۱۷/۵ درصد مساحت کل کشور را به خود اختصاص داده، گسترش دارند (Mahmoudi, 1995). وجود گچ در بستر سازه‌های آبی ممکن است به صورت موضعی یا کلی سبب تخریب سازه شود؛ از جمله تخریب کانال‌های تازه‌تأسیس بر زمین‌های گچی در اسپانیا، شکست سد سنت فرانسیس، تلفات شدید آب از مخازن سدهای اوکلاهما و نیومکزیکو، ایجاد تونل‌های ناشی از آب‌شُستگی در پی سدهای هوندو و مکسی میلیان و ردراک، و تخریب کانال سلهابیه در حوضهٔ فرات سبب شد بعد از سال ۱۹۲۷، در طول قریب به چهل سال، پروژه‌های واقع در مناطق گچی یا اجرا نشود یا محل آن تعویض شود (Sergeev and Maksimovich, 1983; Al-Refaie, 1976).

Al- Refaie (1976) با بررسی‌هایی که انجام داد مشکل اراضی رودخانهٔ فرات در سوریه و کانال‌های زیردست سد زاینده‌رود در اصفهان و کانال اصلی سد انحرافی مارون بهبهان را وجود گچ در بستر سازه‌ها اعلام کرد (Rahimi 2000). یکی از روش‌های مقابله با خاک‌های مشکل‌آفرین، از جمله خاک‌های گچی، که موضوع این تحقیق است، تثبیت و اصلاح خاک است. روش‌های مسلح‌کردن خاک شامل استفاده از الیاف یا تسمه‌های فولادی و روش‌های ژئوتکستایل و ژئوسنتتیک است. استفاده از الیاف جهت ارتقای خصوصیات رفتاری مواد گوناگون ایده‌ای قدیمی است. چهارهزار سال قبل بشر از الیاف برای تقویت خاک استفاده می‌کرد. کاربرد الیاف در دیوار چین مؤید این مطلب است (Hongu and Philips, 1990).

Sheng (2010) به اهمیت نقش الیاف در مسلح‌کردن خاک پی برد و توانست به کمک الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت

* نویسندهٔ مسئول: Koupai@cc.iut.ac.ir

1. Soluble Soils

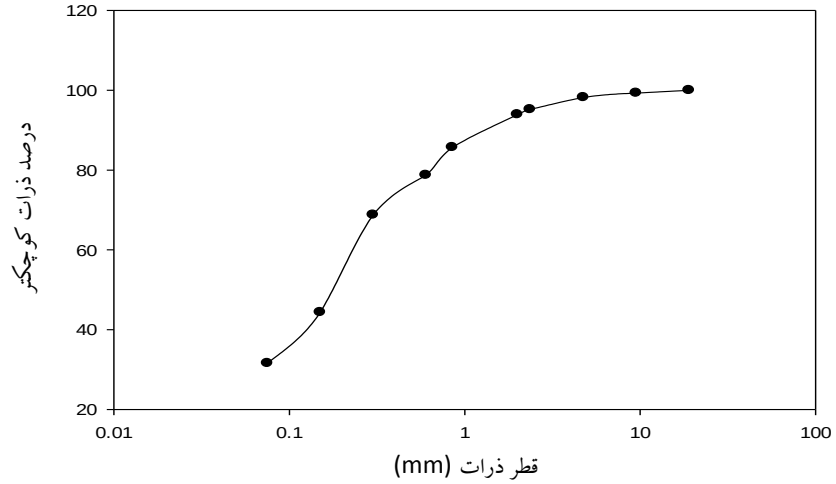
فشاری و رفتار خاک را تغییر دهد. Nataraj and Mcmanis (1997) با تحقیق روی رس و ماسهٔ مسلح‌شده با الیاف مصنوعی با آزمایش‌های تراکم برش مستقیم، تک‌محوری، نسبت باربری، به ترتیب افزایش مقاومت برشی، مقاومت فشاری تک‌محوری، به‌ویژه افزایش ظرفیت باربری، را گزارش کردند. Ohashi and Gray (1983) نحوهٔ عملکرد الیاف جهت تسلیح خاک‌های دانه‌ای را مطالعه کردند و نشان دادند استفاده از الیاف به طور قابل ملاحظه سبب افزایش حداکثر مقاومت برشی می‌شود. ایشان عوامل مؤثر بر افزایش مقاومت را مقدار و امتداد الیاف اعلام کردند. Benson and Khire (1994) آثار استفاده از نوارهای پلی‌اتیلن را در تغییرات مقاومت برشی و سختی ماسه بررسی کردند و نتیجه گرفتند افزودن تراشه‌های پلی‌اتیلن به خاک موجب افزایش ظرفیت باربری، مقاومت برشی، و ضریب واکنش بستر ماسه می‌شود. Ranjan *et al.* (1996) با آزمایش‌های سه‌محوری روی نمونه‌های ماسهٔ مسلح‌شده با الیاف تأثیر مثبت الیاف را بر مقاومت برشی نمونه‌ها اعلام کردند. Wang *et al.* (2000)، با آزمایش‌های تک‌محوری و سه‌محوری، تأثیر افزودن برخی تراشه‌های پلیمری را به خاک در بهبود رفتار مکانیکی خاک‌های ماسه‌ای رس‌دار مطالعه کردند و نتیجه گرفتند اضافه‌کردن این الیاف به خاک، ضمن افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها، شکل‌پذیری آن‌ها را نیز بهبود می‌بخشد. Dean and Freitag (1986) با آزمایش‌های تک‌محوری تأثیر مثبت الیاف پلی‌پروپیلن را بر رفتار ماسهٔ رس‌دار بررسی و گزارش کردند.

در این تحقیق تلاش شد با اختلاط الیاف پلی‌پروپیلن با خاک گچی خواص مکانیکی خاک- از جمله مقاومت برشی، نسبت باربری، مشخصات تراکمی، چسبندگی- بهبود یابد تا بتوان در صورت ناگزیربودن اجرای طرح‌های عمرانی، به‌خصوص پروژه‌های آبیاری و زهکشی در اراضی گچی، با تثبیت و تسلیح کردن آن با مواد پیشنهادی طرح، خسارت وارد به سازه‌ها به دلیل وجود گچ را حذف کرد یا کاهش داد.

مواد و روش‌ها

تهیهٔ نمونه‌ها

در این پژوهش از خاک گچی منطقهٔ اطراف سگزی، در شمال شرقی اصفهان، استفاده شد. منحنی دانه‌بندی طبق استاندارد (ASTM D422-87) در شکل ۱ و مشخصات خاک در جدول ۱ می‌آید.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی خاک گچی استفاده‌شده

جدول ۱. مشخصات خاک مورد تحقیق

مشخصات	مقدار	استاندارد
نوع خاک	A-2-4	AASHTO
طبقه‌بندی	SM	ASTM-D2487
جنس ذرات	ماسه لای دار	
حد روانی	٪۲۵٫۶۷	ASTM D423-66
حد خمیری	٪۲۲٫۸۱	ASTM D424-59

برای تعیین میزان گچ خاک از روش کاهش آب تبلور استفاده شد (Nelson *et al*., 1978). میزان گچ مورد تحقیق برابر ۲۳ درصد محاسبه شد. خاک با مشخصات یادشده با الیاف پلی‌پروپیلن با دو طول متفاوت ۶ و ۱۲ میلی‌متری با درصدهای ۰٫۰۵، ۰٫۱، ۰٫۱۵، ۰٫۲۵ مخلوط و آزمایش‌های حدود اتربرگ، تراکم استاندارد، باربری کالیفرنیا (CBR)، و برش مستقیم روی آن‌ها انجام شد. سپس تأثیر افزودنی‌های یادشده بررسی شد. در جدول ۲ مشخصات تیمارهای به‌کاررفته در آزمایش‌ها می‌آید.

جدول ۲. مشخصات تیمارها و نام‌گذاری آن‌ها

انواع تیمارها	نام‌گذاری تیمارها	درصد وزنی مواد افزودنی	تعداد تکرار
خاک گچی	G	-	۳
خاک گچی + الیاف پلی‌پروپیلن ۶ میلی‌متر	$GP_{۶-۱}$	۰٫۰۵	۳
	$GP_{۶-۲}$	۰٫۱	۳
	$GP_{۶-۳}$	۰٫۱۵	۳
	$GP_{۶-۴}$	۰٫۲۵	۳
خاک گچی + الیاف پلی‌پروپیلن ۱۲ میلی‌متر	$GP_{۱۲-۱}$	۰٫۰۵	۳
	$GP_{۱۲-۲}$	۰٫۱	۳
	$GP_{۱۲-۳}$	۰٫۱۵	۳
	$GP_{۱۲-۴}$	۰٫۲۵	۳

Gypsiferous (G) (P_{12}Polypropylene fibers 12(mm) (P_6Polypropylene fibers 6(mm)

الیاف پلی‌پروپیلن

الیاف پلی‌پروپیلن از طریق پلیمریزاسیون پروپیلن به صورت یک پلیمر خطی تهیه و به اختصار پ ـ پ نامیده می‌شوند. در جدول ۳ مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن می‌آید.

جدول ۳. مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن مصرفی

مشخصات	مقادیر
رنگ ظاهری	سفید
وزن مخصوص (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	۱
قطر (میکرون)	۲۳
مقاومت کششی (MPa)	۴۰۰
محدودهٔ ذوب (سانتی‌گراد)	۱۶۰-۶۵
مقاومت در برابر اسیدها و قلیاها و نمک‌ها	بالا

آزمایش‌های انجام‌شده

حدود اتربرگ

در این پژوهش آزمایش حد روانی طبق استاندارد ASTM D423-66 و آزمایش حد خمیری طبق استاندارد ASTM D424-59 بر تیمارها صورت گرفت؛ با این تفاوت که به جای دمای ۱۰۵ در دمای ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک شدند و با توجه به رابطهٔ ۱ به رطوبت در دمای ۱۰۵ درجهٔ سانتی‌گراد تبدیل شدند (Arkelyan, 1986).

$$W_{۱۰۵} = ۱/۰۰۳ \times W_{۶۰} + ۰/۰۰۳ \quad \text{(رابطهٔ ۱)}$$

W_{105} و W_{60} رطوبت خاک است که به ترتیب در دمای ۱۰۵ و ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک شد.

تراکم استاندارد

آزمایش تراکم روی تیمارها طبق استاندارد ASTM D698-70 (Soil Mechanics, 1986) صورت گرفت تا بتوان تأثیر مواد افزودنی را روی رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک معین کرد. به علاوه، از آنجا که سایر آزمایش‌های ظرفیت باربری (CBR) و برش مستقیم نیازمند آماده‌سازی نمونهٔ خاک با مقدار رطوبت بهینه و حداکثر وزن واحد حجم خاک است، آزمایش تراکم ضروری است. گفتنی است در همهٔ آزمایش‌ها تیمارها طبق آنچه بیان شد در دمای ۶۰ درجهٔ سانتی‌گراد خشک و با توجه به رابطهٔ ۱ به رطوبت دمای ۱۰۵ درجه تبدیل شد.

نسبت باربری کالیفرنیا (CBR)

آزمایش CBR طبق استاندارد ASTM D1883-73 (Soil Mechanics, 1986) صورت گرفت و همهٔ تیمارها در رطوبت بهینه آماده شدند. اما تیمارهای G و GP_{12-4}، علاوه بر حالت رطوبت بهینه، به مدت ۹۶ ساعت در آب قرار داده شدند تا اشباع شوند و سپس آزمایش روی آن‌ها انجام گرفت. این آزمایش در دو حالت رطوبت بهینه و حالت اشباع صورت

پذیرفت تا تأثیر افزودن الیاف به خاک‌های گچی در دو حالت خشک و اشباع بررسی شود.

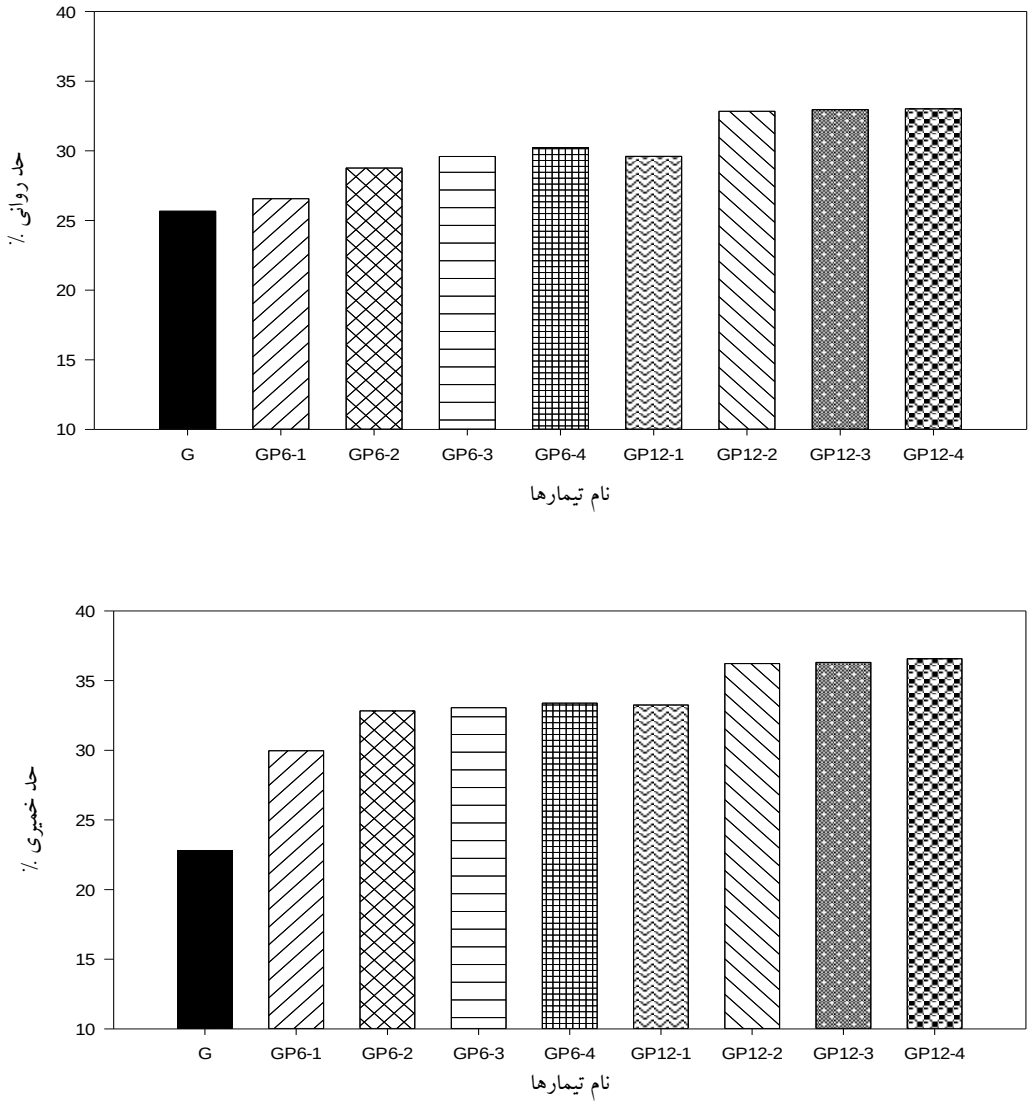
برش مستقیم

آزمایش برش مستقیم نیز طبق استاندارد ASTM D2080-72 (Soil Mechanics, 1986) انجام شد. سربارهای انتخاب‌شده برابر ۰٫۵ و ۱ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بودند. همهٔ تیمارها در رطوبت بهینه آماده شدند و آزمایش روی آن‌ها انجام گرفت. ولی تیمارهای G **و** GP_{12-4} به صورت اشباع هم آماده شدند و آزمایش به صورت تحکیم‌نیافته و زهکشی‌نشده روی آن‌ها صورت گرفت.

یافته‌ها و بحث

آزمایش حدود اتربرگ

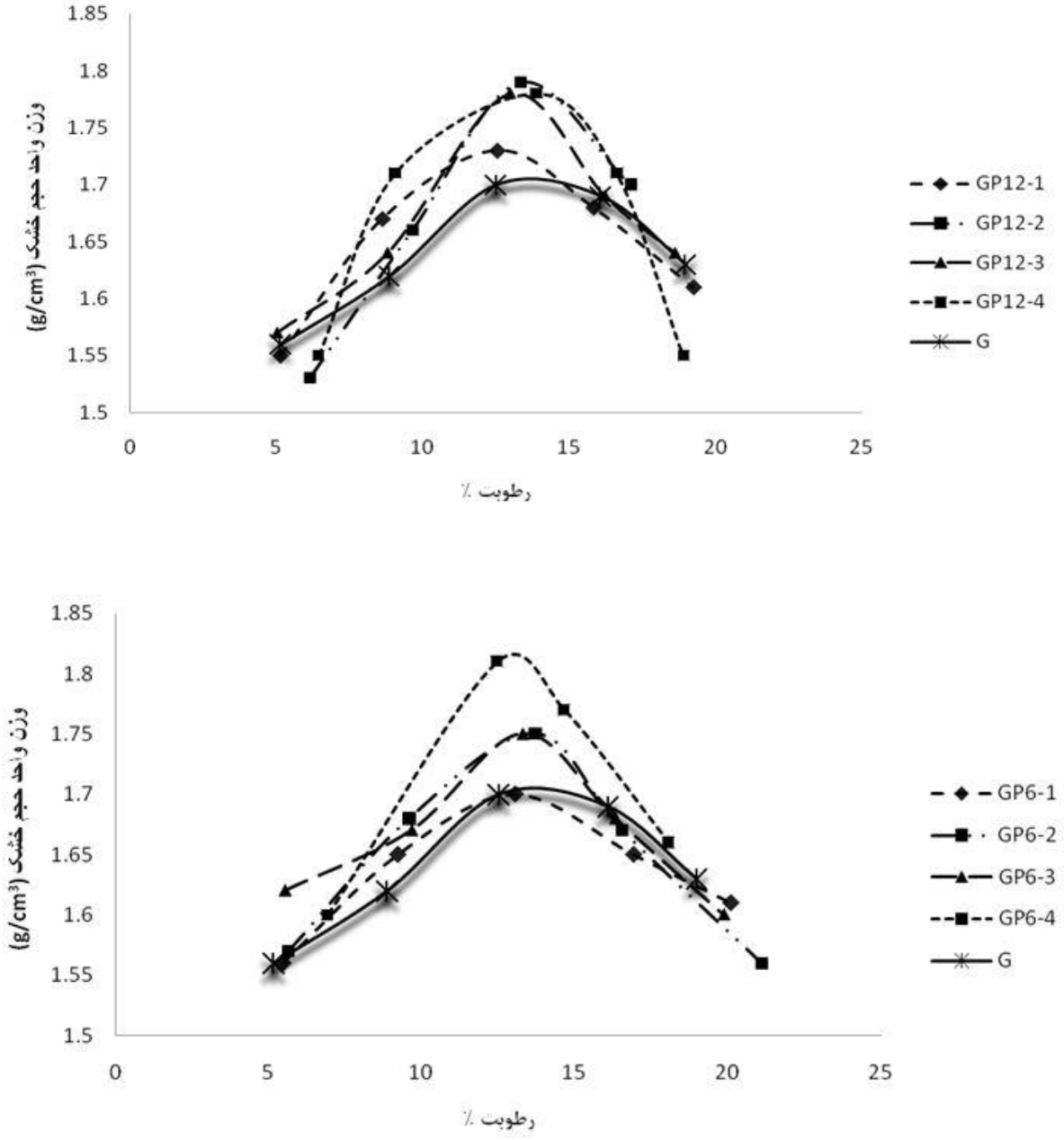
بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌ها حد روانی خاک گچی مورد تحقیق ۲۵٫۶۷ درصد و حد خمیری آن ۲۲٫۸۱ درصد در نتیجه شاخص خمیرایی (PI) آن حدود ۲٫۸۶ به دست آمد. همان‌گونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، الیاف پلی‌پروپیلن حدود خمیرایی و روانی را افزایش می‌دهد. این افزایش بر حد روانی بیش از حد خمیری بود. در نتیجه، خاک حاوی الیاف فاقد شاخص خمیرایی (PI) شد.



شکل ۲. نمودارهای حد روانی و خمیری نمونه‌های مختلف

آزمایش تراکم استاندارد

با آزمایش تراکم پراکتور استاندارد بر تیمارهای مختلف منحنی تراکم به ازای هر یک از تیمارها ترسیم شد و با استفاده از این منحنی‌ها حداکثر وزن واحد حجم خشک و رطوبت بهینه به دست آمد. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود الیاف پلی‌پروپیلن بر رطوبت بهینهٔ خاک گچی تأثیر چندانی نمی‌گذارد؛ اما سبب افزایش حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک گچی از ۱٫۷ به ۱٫۸۱ می‌شود.



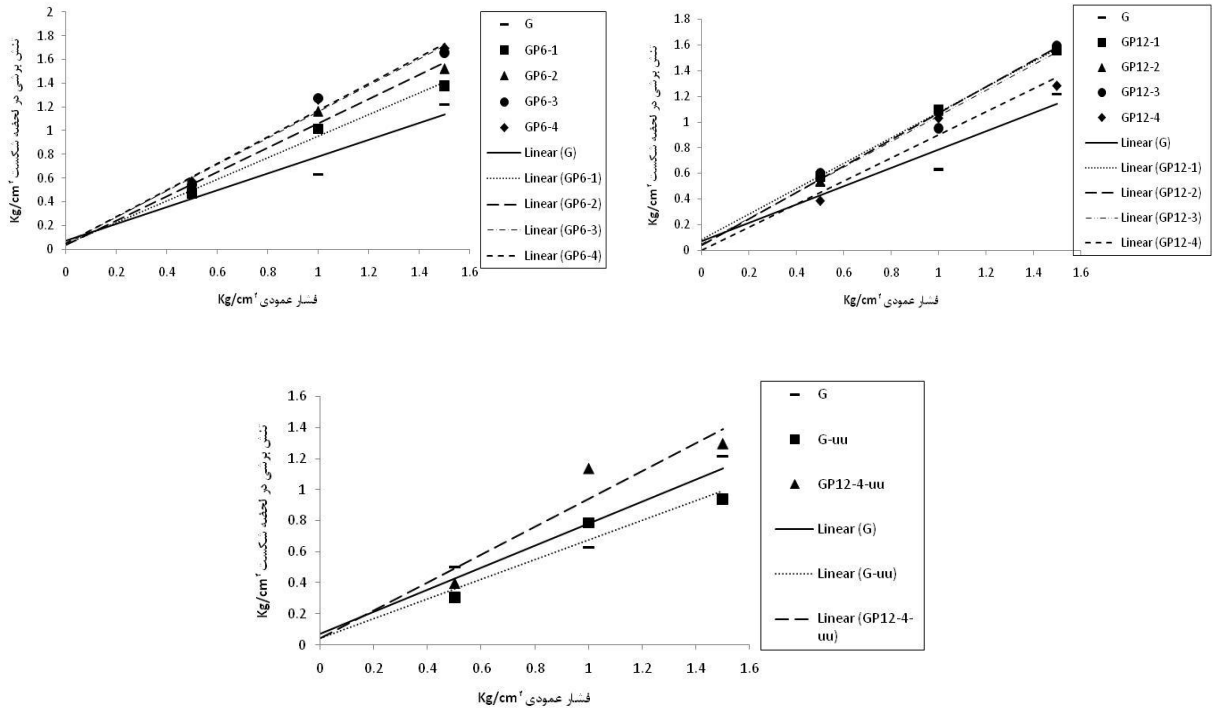
شکل۳. تغییرات وزن واحد حجم خشک خاک تحت تأثیر درصد رطوبت

آزمایش برش مستقیم

با آزمایش برش مستقیم تحت سه سربار یادشده برای همهٔ تیمارها می‌توان نمودار تنش برشی در برابر تنش عمودی (رابطهٔ موهر- کولمب) تهیه کرد تا به پارامترهای مقاومت برشی دست یافت؛ شامل زاویهٔ اصطکاک داخلی، که از زاویهٔ بین بهترین خط ترسیم‌شده از سه نقطهٔ حاصل از سربارهای وارده و امتداد افق به دست می‌آید، و چسبندگی، که از مقدار تنش برشی در محل تلاقی خط مذکور با محور عرض‌ها حاصل می‌شود. در شکل ۴ نمودارهای روند تغییرات تنش برشی تحت تأثیر فشار عمودی می‌آید. همان‌طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، افزودن الیاف به خاک گچی تأثیری بر میزان چسبندگی خاک ندارد؛ اما زاویهٔ اصطکاک داخلی آن را افزایش می‌دهد.

جدول ۴. زاویهٔ اصطکاک داخلی (ø) و چسبندگی (C) تیمارهای مختلف

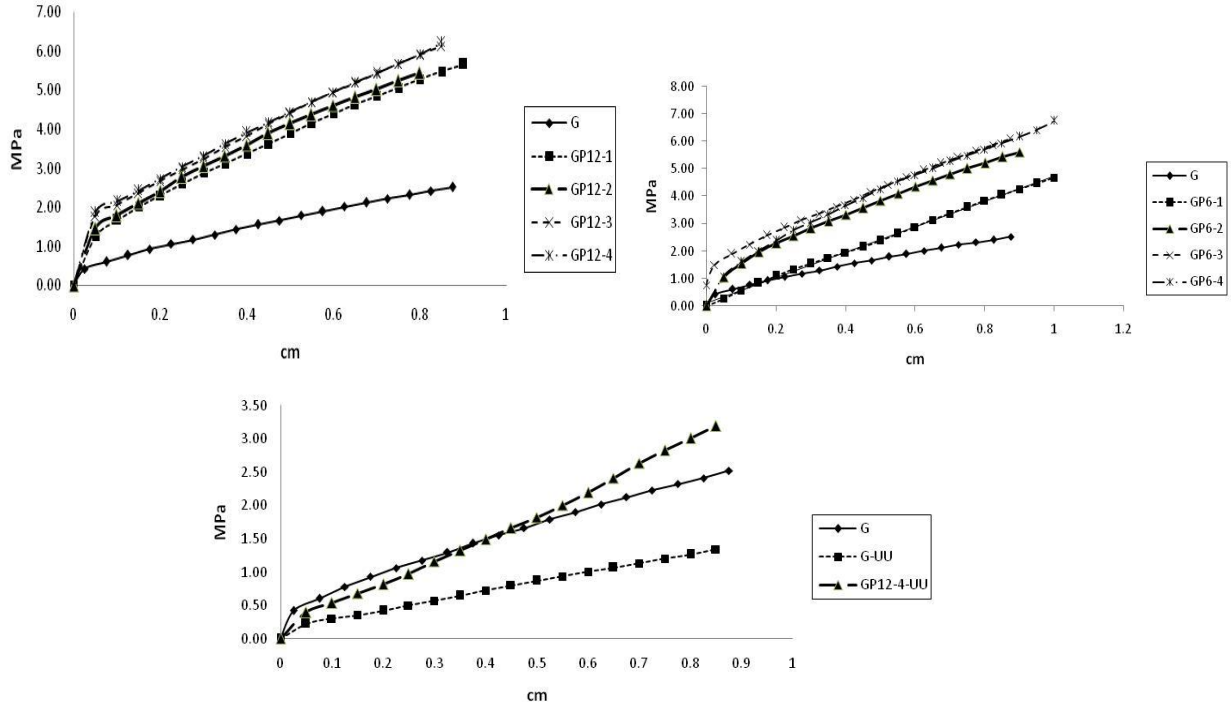
اسم تیمار	ø	C
G	۳۶٫۳۸	۰٫۰۵
GP6-1	۴۲٫۲۸	۰٫۰۴۶
GP6-2	۴۵٫۶۲	۰٫۰۳۷
GP6-3	۴۸٫۱۱	۰٫۰۴
GP6-4	۴۸/۲۸	۰٫۰۵۳
GP12-1	۴۴٫۶۸	۰٫۰۸۶
GP12-2	۴۵٫۶۲	۰٫۰۴۴
GP12-3	۴۴٫۸۷	۰٫۰۵
GP12-4	۴۵٫۰۶	۰٫۰۷
G-UU	۳۲	۰٫۰۴
GP12-4-UU	۴۱٫۸۶	۰٫۰۴۶



شکل ۴. روند تغییرات تنش برشی تحت تأثیر فشار عمودی در لحظهٔ شکست در تیمارهای مختلف

آزمایش نسبت باربری (CBR)

نتایج آزمایش نسبت باربری به صورت منحنی ترسیم شد و مقدار نفوذ در محور افقی و تنش در محور عمودی قرار گرفت. نسبت باربری از مقدار تنش مورد نیاز برای نفوذ ۰/۱ اینچ نسبت به تنش لازم برای فروکردن پیستون به همان اندازه در خاک استاندارد به دست می‌آید. در شکل ۵ روند تغییرات تنش به ازای افزایش نفوذ در تیمارهای مختلف ترسیم شد. همان‌طور که در نمودارها دیده می‌شود نفوذ یکسان افزودن الیاف به خاک گچی سبب افزایش تنش در نمونهٔ حاوی خاک و الیاف می‌شود.



شکل ۵. روند تغییرات تنش به ازای افزایش نفوذ در تیمارهای مختلف

نتایج آزمایش‌ها و اطلاعات استخراج‌شده از نمودارها در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار به کمک نرم‌افزار SAS تجزیه‌وتحلیل آماری شد و میانگین‌های آن‌ها در سطح آماری ۱ درصد با آزمون دانکن مقایسه شد. نتایج این مقایسه درجدول‌های ۵ و ۶ و ۷ می‌آید.

جدول ۵. تجزیهٔ واریانس پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (C, CBR, ø)

منابع تغییر	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات صفات اندازه‌گیری‌شده		
		CBR	C	Ø
تیمار	۱۰	۰٫۰۵۴***	۰٫۰۰۰^{ns}	۷۷٫۷۳۳***
خطا	۲۲	۰٫۰۰۱	۰٫۰۰۰	۰٫۵۱۷
CV		۱۰٫۱۲	۴۹٫۰۲	۱٫۶۷

ns، *، **، و * به ترتیب عدم معنادارشدن و معنادارشدن در سطح ۵ و ۱ و ۰٫۱ درصد است.**

C: چسبندگی، CBR: ظرفیت باربری، ø: زاویهٔ اصطکاک داخلی

جدول ۶. تجزیهٔ واریانس پارامترهای اندازه‌گیری‌شده (LL, ωopt, PL, γ_d)

منابع تغییر	درجهٔ آزادی	میانگین مربعات صفات اندازه‌گیری‌شده			
		PL	LL	γ_d	ω_{opt}
تیمار	۸	۵۴٫۹۵۵***	۲۱٫۸۵۷***	۰٫۰۰۴^{ns}	۰٫۸۱۵*
خطا	۱۸	۰٫۵۷۹	۰٫۷۵۳	۰٫۰۰۱	۰٫۳۰۵
CV		۲٫۳۲	۲٫۹۰	۲٫۵۱	۴٫۲۲

ns، *، **، و *** به ترتیب عدم معنادارشدن، معنادارشدن در سطح ۵ و ۱ و ۰٫۱ درصد است.

PL: حد خمیری، W: رطوبت بهینه، LL: حد روانی، γ_d: حداکثر وزن واحد حجم خشک

همان‌طور که در جدول‌های ۵ و ۶ دیده می‌شود، تغییرات پارامترهای چسبندگی و حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک در تیمارهای مختلف معنادار نیست. به همین دلیل این دو پارامتر در جدول مقایسهٔ میانگین‌ها نیامد.

جدول ۷. مقایسهٔ میانگین پارامترهای CBR، ø، ω_{opt}، LL، PL در تیمارهای مختلف

تیمار		CBR	ø	ω_{opt}	LL	PL
G		۰٫۱۷۰^{d}	۳۵٫۳۸۰^{d}	۱۲٫۵۰۰^{b}	۲۵٫۶۷۰^{c}	۲۲٫۸۱۰^{d}
	$GP_{۶-۱}$	۰٫۲۰۰^{d}	۴۲٫۲۸۰^{c}	۱۳٫۰۵۰^{ab}	۲۶٫۵۷۰^{c}	۲۹٫۹۶۰^{c}
	$GP_{۶-۲}$	۰٫۳۷۰^{c}	۴۵٫۶۲۰^{b}	۱۳٫۷۱۰^{a}	۲۸٫۷۷۰^{b}	۳۲٫۸۲۰^{b}
	$GP_{۶-۳}$	۰٫۴۲۰^{abc}	۴۸٫۱۱۰^{a}	۱۳٫۳۰۰^{ab}	۲۹٫۶۰۰^{b}	۳۳٫۰۵۰^{b}
	$GP_{۶-۴}$	۰٫۴۴۰^{a}	۴۸٫۲۸۰^{a}	۱۲٫۴۶۰^{b}	۳۰٫۲۴۰^{b}	۳۳٫۳۸۰^{b}
	$GP_{۱۲-۱}$	۰٫۳۸۰^{bc}	۴۴٫۶۸۰^{b}	۱۲٫۵۴۰^{b}	۲۹٫۶۱۰^{b}	۳۳٫۲۵۰^{b}
	$GP_{۱۲-۲}$	۰٫۴۰۰^{abc}	۴۵٫۶۲۰^{b}	۱۳٫۳۴۰^{ab}	۳۲٫۸۴۰^{a}	۳۶٫۲۲۰^{a}
	$GP_{۱۲-۳}$	۰٫۴۳۰^{ab}	۴۴٫۸۷۰^{b}	۱۲٫۹۹۰^{ab}	۳۲٫۹۶۰^{a}	۳۶٫۳۰۰^{a}
	$GP_{۱۲-۴}$	۰٫۴۴۰^{a}	۴۵٫۰۶۰^{b}	۱۳٫۸۸۰^{a}	۳۳٫۰۲۰^{a}	۳۶٫۵۷۰^{a}
G-UU		۰٫۰۸۰^{e}	۳۲٫۰۰۰^{e}	–	–	–
	$GP_{۱۲-۴}$-UU	۰٫۱۷۰^{d}	۴۱٫۸۶۰^{c}	–	–	–
LSD		۰٫۰۵۴	۱٫۲۱۸	۰٫۹۴۸	۱٫۴۸۸	۱٫۳۰۲

چسبندگی خاک (C)

همان‌طور که در جدول ۵ دیده می‌شود، چسبندگی تیمارهای مختلف تفاوت معناداری ($P<0.01$) با هم ندارند. یعنی اضافه‌کردن الیاف پلی‌پروپیلن به نمونهٔ خالص خاک بر چسبندگی آن تأثیری نمی‌گذارد؛ طوری که چسبندگی نمونهٔ خالص از ۰٫۰۷ با افزودن الیاف در بیشترین مقدار به ۰٫۰۸ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رسد که بسیار ناچیز است. Nataraj and Mcmanis (1997) نیز در نتایج تحقیقات خود این مطلب را بیان کردند.

زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک (ø)

همان‌طور که در جدول ۷ و نمودارهای شکل ۴ دیده می‌شود، زاویهٔ اصطکاک داخلی با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن ۶ میلی‌متر افزایش معنادار ($P<0.01$) پیدا می‌کند که بیشترین مقدار آن ۴۸٫۲۸ درجه است. این مقدار نسبت به نمونهٔ خالص ۳۶ درصد افزایش نشان می‌دهد. ولی الیاف پلی‌پروپیلن ۱۲ میلی‌متر نسبت به نمونهٔ خالص فقط ۲۹ درصد افزایش نشان داد. با اشباع‌کردن خاک و آزمایش تحت شرایط تحکیم‌نیافتهٔ زهکشی‌نشده (UU) زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک به طور

معنادار (P<0.01) کاهش پیدا می‌کند و مقدار آن برابر ۳۲ درجه می‌شود که نسبت به نمونهٔ در حالت رطوبت بهینه، خاک ۱۰ درصد کاهش نشان می‌دهد؛ ولی افزودن الیاف ۱۲ میلی‌متری پلی‌پروپیلن به نمونهٔ اشباع خاک سبب افزایش معنادار ۳۰ درصد زاویهٔ اصطکاک داخلی نمونهٔ مشابه اشباع خاک شد. این نتایج با نتایجی که قبلاً محققان مختلف ارائه کرده‌اند تطابق دارد. ایشان افزایش زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک را با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن اعلام کردند (Maher and Gray, 1990 ; Benson and Khire, 1994 ; Yetimoglu et al, 2005).

ظرفیت باربری خاک (CBR)

بر اساس نسبت باربری استخراج‌شده از نمودارهای شکل ۵، الیاف پلی‌پروپیلن افزایش معناداری (P<0.01) در ظرفیت باربری نمونهٔ خالص خاک ایجاد کردند که بالاترین مقدار آن ۰/۴۴ بود. این مقدار نسبت به نمونهٔ خالص خاک افزایش ۲/۵ برابری را نشان می‌دهد. تفاوت معناداری (P<0.01) بین ظرفیت باربری نمونه‌های حاوی الیاف ۱۲ و ۶ میلی‌متری وجود نداشت. با اشباع‌کردن نمونهٔ خالص خاک، ظرفیت باربری آن به‌شدت کاهش یافت. این کاهش نسبت به نمونه‌ای که در حالت رطوبت بهینه آماده شده بود ۵۲ درصد بود. ولی افزودن ۰/۲۵ درصد الیاف ۱۲ میلی‌متری به نمونهٔ اشباع سبب افزایش معنادار (P<0.01) ۲/۱۳ برابری ظرفیت باربری نمونهٔ خالص خاک در حالت اشباع شد. این نتایج با یافته‌های Abtahi (2009) و Hoare (1982) تطابق دارد.

رطوبت بهینهٔ خاک (ω_{op}) و بیشترین وزن واحد حجم خشک (γ_d)

رطوبت بهینهٔ نمونهٔ خالص ۱۲/۵ درصد است. با افزودن الیاف بیشترین رطوبت بهینه در تیمار GP_{12-4} برابر ۱۳/۸ شد که حدود ۱/۳ درصد افزایش داشت. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن تفاوت معناداری (P<0.01) در رطوبت بهینه و بیشترین وزن واحد حجم خشک خاک ایجاد نمی‌کند؛ اما از نظر اصول مهندسی ژئوتکنیک خاک افزایش ۶/۵ درصدی حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک از ۱/۷ (نمونهٔ خالص خاک G) به ۱/۸۱ (نمونهٔ حاوی ۰/۲۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن ۱۲ میلی‌متر GP_{12-4}) مهم و چشمگیر است.

حد روانی به درصد (LL)

الیاف پلی‌پروپیلن ۶ میلی‌متر سبب افزایش معنادار حد روانی خاک می‌شود. بیشترین مقدار آن ۳۰/۲۴ بود مربوط به ۰/۲۵ درصد افزودن الیاف ۶ میلی‌متری؛ که نسبت به خاک ۱۷ درصد افزایش نشان داد. ولی بین درصدهای متفاوت الیاف ۶ میلی‌متری در حد روانی تفاوت معنادار مشاهده نشد. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر نیز سبب افزایش معنادار ۲۸ درصدی حد روانی خاک شد؛ ولی بین درصدهای متفاوت الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر هم تفاوت معنادار در حد روانی آن‌ها مشاهده نشد.

حد خمیرایی به درصد (PL)

الیاف پلی‌پروپیلن ۶ میلی‌متری سبب افزایش معنادار حد خمیرایی خاک می‌شود که بیشترین مقدار آن ۳۳/۳۸ بود. این مقدار مربوط به ۰/۲۵ درصد افزودن الیاف ۶ میلی‌متری بود که نسبت به نمونهٔ خالص ۴۶ درصد افزایش نشان می‌دهد. ولی بین درصدهای متفاوت الیاف ۶ میلی‌متری در حد روانی تفاوت معنادار مشاهده شد. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ میلی‌متر نیز سبب افزایش معنادار ۶۰ درصدی حد روانی خاک شد. ولی بین درصدهای متفاوت الیاف به طول ۱۲ میلی‌متر هم تفاوت معنادار در حد روانی آن‌ها مشاهده نشد. در نتیجه، بین حد روانی نمونه‌های حاوی الیاف ۶ و ۱۲ میلی‌متری تفاوت معنادار وجود دارد. حد روانی نمونه‌های حاوی الیاف ۱۲ میلی‌متری نسبت به الیاف ۶ میلی‌متر ۹ درصد افزایش نشان داد.

نتیجه‌گیری

بر اساس مجموعهٔ آزمایش‌ها و نمودارها و جدول‌های ارائه‌شده در این پژوهش، نتایج زیر به دست آمد:

۱- الیاف پلی‌پروپیلن سبب افزایش معنادار در حد روانی و خمیرایی خاک شد که این افزایش در الیاف ۱۲ میلی‌متری بیشتر بود.

۲- الیاف پلی‌پروپیلن در رطوبت بهینه و بیشترین وزن مخصوص خشک خاک از نظر آماری تفاوت معنادار ایجاد نکرد؛ اما از نظر ژئوتکنیک مهندسی خاک افزودن الیاف به آن سبب افزایش حداکثر وزن واحد حجم خشک خاک شد.

۳- الیاف پلی‌پروپیلن در چسبندگی خاک تغییرات معنادار ایجاد نکرد؛ در صورتی که سبب افزایش معنادار زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک شد.

۴- الیاف پلی‌پروپیلن سبب افزایش معنادار ظرفیت باربری خاک شد؛ ولی بین طول‌های متفاوت آن در ظرفیت باربری خاک تفاوت معنادار دیده نشد. با آزمایش نسبت باربری در حالت اشباع نسبت به نمونهٔ رطوبت بهینه ظرفیت باربری به‌شدت کاهش یافت؛ اما افزودن الیاف پلی‌پروپیلن ظرفیت باربری آن را در همان حالت اشباع افزایش داد. به طور کلی می‌توان گفت الیاف پلی‌پروپیلن سبب بهبود پارامترهای مقاومت برشی و باربری خاک گچی می‌شود.

REFERENCES

Abtahi, S. M. (2009). Use of new chemicals for soil stabilization. *Proceedings of the Eighth Congress of Civil Engineering,* Shiraz University, May. (In Persian)

Al-Refaie, N. (1976). Problems created by irrigation schemes and ground gypsum-bearing area of the Euphrates River in Syria. *National Committee on Irrigation and Drainage*., Publication NO 16.

Arkelyan, E. A. (1986). Characteristics of the determination of the physical properties of gypsum soils. *Soil Mech. & Found*, 23, 27-29.

Benson, C. H. and Khire, M. V. (1994). Reinforcing Sandwith Strips of Reclaimed High-Density Polyethylene. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 120, 828-855.

Dean, R. and Freitag, F. (1986). Soil Randomly Reinforced with Fibers. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 112, 823-827.

Gray, D. H. and Ohashi, H. (1983). Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 109, 335-353.

Hoare, D. (1982). Synthetic Fabrics Soil Filter. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 108, 1230-1246.

Hongu, T. and Philips, G. (1990) New Fibers ellis hor wood series in polymercience and technology. *Fibers and Polymers*, 3, 1-7.

Maher, M. H. and Gray, D. H. (1990). Static response of sands reinforced with randomly Distributed fiber. *Geotechnical Engineering*, 116, 1661-1677.

Mahmoudi, S. H. (1995). Properties and management of soils with gypsum. *Proceedings of the Fourth Congress of Soil Science*, Iran University of Technology. (In Persian)

Maksimovich, N. G. and Sergeev, V. L. (1983). Effect of chemical injection stabilization on gypsum stability in foundation of hydraulic structure. *Hydrotechnical Con*, 17, 380-384.

Nataraj, M. S. and McManis, K. L. (1997). Strength and deformation properties of soils reinforced with fibrillated fibers. *Geosynthetics*, 4, 65-79.

Nelson, R. E. Klameth, L. C. and Nettleton, W. D. (1987) Determination of soil gypsum content and expressing properties of gypsiferous soils. *Soil Sci, Soc*, 42, 147-168.

Rahimi, H. (2000) Constructing irrigation canals in unconventional soils. *Paper Technical Workshop - Training irrigation canals limitations of solution*, 128-163. (In Persian)

Ranjan, G. Vasan, R. M., and Charan, H. D. (1996). Probabilistic Analysis of Randomly Distributed Fiber Reinforced Soil. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 122, 419-426.

Sheng, T. C. (2010). Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 54-260.

Standards Soil Mechanics Testing. (1984) Soil Mechanics Note No.8.

Wang, Y., Frost, J. D., and Murray, J. (2000). Utilization of Recycled Fiber for Soil Stabilization. *Proceedings of the Fiber Society Meeting*, Guimaraes, Portugal, 17-19 May, 59-62.

Yetimoglu, T., Inanir, M., and Inanir, O. E. (2005). study on bearing capacity of randomly Distributed fiber-reinforced sand fills overlying soft clay. *Geotextiles and Geomembranes,* 23, 174-183.