

تأثیر ژئوتکستایل ها بر پایداری سدهای خاکی مسلح شده با توجه به پارامترهای مختلف به کمک روش اجزاء محدود

علی یوسفی سمنگانی¹، جعفر بلوری بزاز²، محمد حسین طالب پور³، حسن جامی⁴

¹ کارشناس ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تربت جام

² دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

³ دانشجوی دکترا سازه، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه صنعتی شاهرود

⁴ استاد، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تربت جام

bolouri@um.ac.ir

Aliyosefi90@yahoo.com

چکیده

سدها به سبب کاربردشان در صنعت، یکی از پر اهمیت ترین سازه ها برای ذخیره سازی آب در جوامع امروزی است. شکست سازه ای سد حاوی آب علاوه بر زیان اقتصادی نیز باعث خسارات جبران ناپذیری می شود. این مسئله سبب افزایش اهمیت طراحی و مقاوم سازی سدها شد. پایداری سدهای خاکی عمدتاً به مقاومت برشی خاک بستگی دارد و این مقاومت برشی در سدهای خاکی توسط عمل اصطکاک بین دانه ها تامین می گردد هر چه قدر زاویه اصطکاک داخلی بین دانه های خاک بیشتر شود تنش برشی بیشتری توسط خاک تحمل می شود و پایداری سد افزایش می یابد. مواد مصنوعی به نام ژئوتکستایل که خصوصیات نظیر مصالح دانه ای (خاک) از نظر مقاومت مکانیکی و شیمیایی در حد بالایی قرار دارند. بهره گیری از عناصر پلیمری در سدها عمدتاً سبب پایداری و تثبیت بیشتر خاکریزها می شود. در این تحقیق تاثیر قرار دادن ژئوتکستایل در سد خاکی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور با مدلسازی سد خاکی به کمک نرم افزار *Plaxis* تاثیر نوع مشخصات مصالح ژئوتکستایل و ارتفاع سد و موقعیت قرار گیری و فاصله بین یکدیگر مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است در این فرایند آب پشت سد به عنوان یک محیط پیوسته تراکم ناپذیر و غیر چرخشی فرض شده است. در نهایت با رسم نمودارها بررسی تاثیر قرار دادن ژئوتکستایل و بدون ژئوتکستایل در سد خاکی بر روی مقادیر ضریب اطمینان ارائه شده است.

کلمات کلیدی: سد خاکی، ژئوتکستایل، عناصر پلیمری، زاویه اصطکاک.



امروزه تسلیح خاک به عنوان فنی موثر و قابل اعتماد برای افزایش مقاومت و پایداری توده های خاکی بکار گرفته می شود. این روش در کارهای مختلفی از تثبیت لایه های موجود در داخل سدهای خاکی و زیر پی های سطحی و روسازی راه مورد استفاده قرار می گیرد. مفهوم نوین خاک مسلح به وسیله مهندس فرانسوی هنری ویدل در سال ۱۹۶۶ معرفی شد. وی از نوارهای پهن فلزی در بین لایه های خاک متراکم استفاده نمود. روش تسلیح خاک در پایداری شیب ها عمدتاً بر مبنای تاثیر متقابل اصطکاکی بین خاک و عناصر تسلیح است [۱]. گسترش استفاده از محصولات پلیمری در خاکریزها منجر به ایجاد نسل جدید ژئوتکستایل ها به نام ژئوگریدها (زمین شبکه) شده است که امروزه در تسلیح خاکریزها به علت مزایای فراوان کاربرد زیادی یافته اند. در یک سازه خاک مسلح، غالباً تنش کششی کمتری در خاک به وجود می آید، لذا پایداری بیشتری در خاکریز فراهم می آید و از آنجا که مسلح کننده های پلیمری، در محدوده غیر خطی نمودار تنش - کرنش هم کارایی دارد، به علت تحمل کرنش زیاد در یک نقطه به طور ناگهانی نمی شکنند و می توانند تغییر شکل جانبی زیادی از خود نشان دهند [۲]. به طور کلی ژئوگریدها به دلیل مساحت اصطکاکی زیادی که تولید می کنند و نیز به دلیل دارا بودن خاصیت زهکشی مناسب، می تواند استفاده از انواع مصالح درشت دانه را در خاکریزها ممکن سازند [۳]. امروزه تسلیح به روش های گوناگون هم از نظر شکل یعنی به صورت نوار، صفحه، شبکه، میله یا رشته، هم از نظر زبری یعنی به صورت زبری یا صاف و هم از نظر سختی نسبی یعنی به صورت سختی بالا مانند فولاد یا با سختی پایین مانند پارچه های پلیمری استفاده می شود. از دهه ۸۰ میلادی به بعد استفاده از پارچه بافته شده یا بافته نشده به نام ژئوتکستایل و نیز استفاده از شبکه های پلاستیکی به نام ژئوگرید به عنوان مصالح تسلیح کننده یا عناصر تقویت کننده به طور گسترده ای متداول شد. دلیل این مسئله می تواند ناشی از عملکرد بهتر پارچه ها با سختی پایین که هماهنگی بهتری با خاک دارند نسبت به مصالح تسلیح کننده فلزی با سختی نسبی بالا است. این پارچه های پلیمری یا مصنوعی به دلیل سختی پایین، از نظر تغییر شکل پذیری با خاک های سازگارتر هستند. علاوه بر این پارچه ها تراواتر و مقاوم در برابر خوردگی هستند و بعضی از انواع آنها در برابر پوسیدگی، حملات باکتری ها و اسیدها پایداری دارند و غیر سمی نیز هستند [۴].

استفاده از عناصر تسلیح در خاک ها به سبب افزایش تاثیر متقابل اصطکاکی بین خاک و عناصر تسلیح، تاثیر چشمگیری در افزایش مقاومت برشی خاک دارد و می تواند مقاومت برشی خاک را افزایش دهد. هدف از این تحقیق بررسی تاثیرات اثر نوع ژئوتکستایل ها، ارتفاع سد و فاصله بین ژئوتکستایل ها با تغییرات ضریب اطمینان در سدهای خاکی به کمک نرم افزار Plaxis است.

ژئوسنتتیک

در تعریف کلی، ژئوسنتتیک ها منسوجات و یا پوشش های ژئوسنتتیک ها است. ساخته شده از یاف نفتی هستند که خاصیت اصلی آنها فساد ناپذیری در مقابل عوامل مخرب درون خاک است لذا از این نظر کاربردهای فراوانی در مهندسی خاک و بهبود کیفیت خواص گوناگون خاک دارند. ژئوسنتتیک که هریک بر حسب خاصیت ها انواع گوناگونی نظیر ژئوتکستایل، ژئوممبران، ژئوگرید، ژئومت و کاربردهای مختلفی دارند. از این میان ژئوتکستایل بر مبنای خصوصیات که در مهندسی ژئوتکنیک دارد، از دامنه کاربرد وسیعی برخوردار است. ژئوتکستایل ها پوشش های عموماً نفوذ پذیری



هستند که از الیاف مصنوعی پلی پروپیلین و یا پلی استر و به دو صورت کلی بافته شده (تک رشته ای و چند رشته ای) و بافته نشده ساخته می شوند. در ژئوتکستایل های بافته شده رشته های الیاف با تکنولوژی بافت منسوجات به شکل های مختلف بافته می شوند در حالی که در نوع بافته نشده توده ای از الیاف با استفاده از حرارات، چسب های شیمیایی یا فشار مکانیکی به هم اتصال بافته و بدین ترتیب عنوان مختلف ژئوتکستایل ها تولید می شوند. این مواد به علت نفوذ ناپذیری مناسب و بافت قابل کنترل، عموماً "به عنوان فیلتر" مورد استفاده قرار می گیرد [5,6].

	
شکل (۲): نمونه ای از ژئوتکستایل های بافته نشده	شکل (۱): نمونه ای از ژئوتکستایل های بافته شده
	
شکل (۳): نمونه ای از ژئوتکستایل های بافته نشده سوزنی	



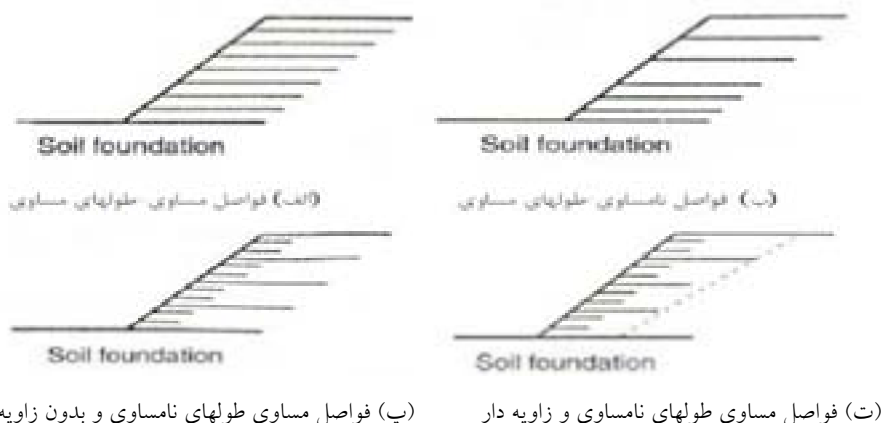


شکل (۴): تسطیح بستر پوشش محافظ و طریقه نصب لایه ژئوتکستایل بر روی بستر آماده شده در محل

نحوه قرارگیری و امتداد مسلح کننده

حالت های مختلف قرار گرفتن ژئوتکستایل ها در شکل (۵) ملاحظه می شود. شکل (الف) حالت کلی قرار گرفتن ژئوتکستایل در شیب را نشان می دهد. الگوی نشان داده شده در شکل (ب) که در آن فاصله ژئوتکستایل ها غیر یکنواخت است، نشان دهنده حالتی است که مقدار تنش ها در قسمت های پایینی شیب بیشتر از مقدار آن در قسمت های بالایی شیب است. همچنین نوارهای کوتاهی که مطابق شکل های (پ) و (ت) در لبه شیب قرار گرفته اند و گاهی مسلح کننده های ثانویه نامیده می شوند، به منظور تراکم بهتر در نظر گرفته می شوند زیرا دستیابی به تراکم بالا در لبه های شیب مشکل می باشد. این لایه های کوتاه ژئوتکستایل همچنین وقوع گسیختگی های کم عمق را در فواصل نسبتاً زیاد بین لایه های مسلح کننده، محدود می کند. قابل توجه است که در تمام حالت های فوق لازم است، قرار گرفتن ژئوتکستایل ها همزمان با ساخت خاکریز انجام گیرد. به این معنی که این روش ها برای پایدارسازی در جای خاک قابل استفاده نیست [۴].

شکل (۵): نمونه های مختلف بکارگیری ژئوتکستایل ها برای پایداری شیب خاک مسلح بر روی فنداسیون





عملکرد مسلح کننده بر مقاومت برشی خاک

مقاومت برشی خاک از اصطکاک بین دانه های خاک که در معرض تنش های فشاری موثر هستند ناشی می شود. هنگام تغییر شکل برشی خاک در امتداد یک سطح گسیختگی، هم کرنش های کششی و هم کرنش های فشاری در خاک توسعه می یابند شکل (۶- الف).

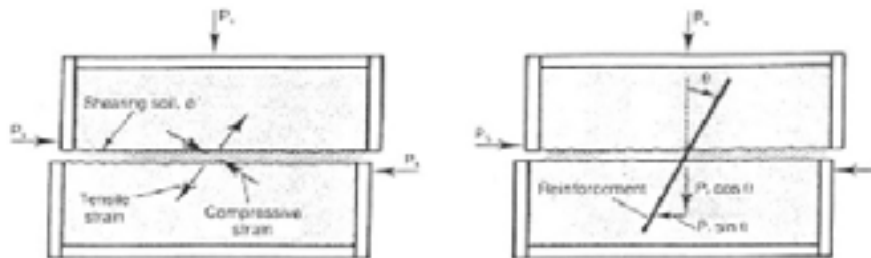
اگر عناصر مسلح کننده در جهت کرنش های کششی قرار گیرند، تغییر شکل برشی خاک باعث نیروی کششی در آنها شده و این نیروی کششی به دو صورت باعث بهبود ویژگی های مکانیکی خاک می شود.

الف- مقداری از نیروی برشی اعمال شده را مستقیماً نگهداری می کند.

ب- تنش نرمال در خاک، روی سطح گسیختگی را افزایش می دهد و در نتیجه باعث بسیج شدن مقاومت اصطکاکی بزرگتری می شود شکل (۶- ب).

در شکل (۶) عملکرد مسلح کننده در یک المان خاک در آزمایش برش مستقیم نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، مولفه مماسی $P_r \sin \theta$ مستقیماً در برابر نیروی برشی وارد بر خاک مقاومت می کند و مولفه نرمال $P_r \cos \theta$ نیروی نرمال در سطح برش را افزایش می دهد و باعث افزایش مقاومت برشی خاک می شود. بنابراین مقاومت برشی خاک از مقدار $P_s = P_v \tan \phi$ در خاک غیر مسلح به مقدار $P_s = P_v \tan \phi + P_r (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi)$ در خاک مسلح افزایش یافته است [۴].

شکل (۶): نمایش عملکرد مسلح کننده در برش مستقیم، الف: مولفه های نیروی مسلح کننده، ب: کرنش های کششی و فشاری در خاک



(الف)

$$P_s = P_v \tan \phi$$

(ب)

$$P_s = P_v \tan \phi + P_r (\sin \theta + \cos \theta \tan \phi)$$

ضریب اطمینان در برابر لغزش

مهم ترین قسمت محاسبه پایداری شیروانی ها، کنترل ضریب اطمینان لغزش است که در کل می تواند به صورت زیر

تعریف شو د:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

که در این رابطه τ_f عبارت از مقاومت متوسط خاک بوده، τ_d نیز تنش برشی متوسط بسیج شده در سطح لغزش بحرانی است. با توجه به دو فاکتور ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می توان مقاومت برشی خاک را از رابطه زیر به دست آورد.



$$\tau_f = C_f + \delta \cdot \tan \varphi_f \quad (2)$$

که در این رابطه نیز C_f چسبندگی خاک مورد نظر و φ_f زاویه اصطکاک داخلی و δ تنش قائم و متوسط بسیج شده جهت لغزش نیز می تواند به صورت مشابهی معادل سازی شود که عبارت خواهد بود با:

$$\tau_d = C_d + \delta \cdot \tan \varphi_d \quad (3)$$

که C_d چسبندگی و φ_d زاویه اصطکاک داخلی بسیج شده در سطح لغزش است و با توجه به رابطه اول خواهیم داشت:

$$F_s = \frac{C_f + \delta \cdot \tan \varphi_f}{C_d + \delta \cdot \tan \varphi_d} \quad (4)$$

$$F_c = \frac{C}{C_d} \quad F_\varphi = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_d} \quad (5)$$

$$F_c = F_\varphi \Rightarrow F = F_\varphi = F_s \quad (6)$$

با توضیحات ذکر شده، هنگامی که F_s برابر یک گردد، سطح مورد نظر در آستانه لغزش است. پس با توجه به لزوم کسب اطمینان، مقدار می بایست F_s بزرگ تر از یک است و معمولاً F_s را بزرگ تر از ۱,۵ در نظر می گیرند. ولی در سدهای مختلف، با توجه به شرایط و مصالح مصرفی توسط آیین نامه های مربوط از جمله ICOLD مقادیر مختلفی پیشنهاد شده است.

روش محاسباتی پایداری شیروانی ها

همانطور که گفته شد، با توجه به مقادیر تنش برشی متوسط بسیج شده در سطح لغزش و مقاومت برشی متوسط خاک، می توان ضریب اطمینان را محاسبه نمود. در ادامه سعی خواهد شد روش هایی از نحوه محاسبه چند نمونه از لغزش های احتمالی را بیان کنیم.

$$W \cdot \sin \alpha = \gamma \cdot L \cdot H \sin \alpha$$

$$\tau = \frac{\gamma \cdot L \cdot H \sin \alpha}{L / \cos \alpha} = \gamma \cdot H \sin \alpha \cdot \cos \alpha \quad (7)$$

$$W = \gamma \cdot L \cdot H$$

$$W \cdot \cos \alpha = \gamma \cdot L \cdot H \cos \alpha \quad (8)$$

$$\delta = \frac{\gamma \cdot L \cdot H \cos \alpha}{L / \cos \alpha} = \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \quad (9)$$

$$\tau_d = C_d + \delta \cdot \tan \varphi_d \Rightarrow \tau_d = C_d + \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi_d \quad (10)$$

$$\Rightarrow \tau = \gamma \cdot H \sin \alpha \cdot \cos \alpha$$

$$\Rightarrow \gamma \cdot H \sin \alpha \cdot \cos \alpha = C_d + \gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi_d$$

$$\frac{C_d}{\gamma \cdot H} = \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi_d = \cos^2 \alpha (\tan \varphi - \tan \varphi_d) \quad (11)$$

$$\tan \varphi_d = \frac{\tan \varphi_d}{F_s}, C_d = \frac{C}{F_s} \Rightarrow F_s = \frac{C}{\gamma \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \varphi_d} + \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} \quad (12)$$



$$F_s = 1 \Rightarrow H = H_{cr} \Rightarrow H_{cr} = \frac{C}{\gamma} \cdot \frac{1}{\gamma \cdot \cos^2 \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi)} \quad (13)$$

در صورتی که شیروانی شامل مصالح همراه با تراوش آب است، در این صورت روابط ذکر شده باید با توجه به مقادیر زیر محاسبه شود:

$$\begin{aligned} \tau_d &= C_d + (\delta - u) \cdot \tan \varphi_d \\ u &= \gamma_w \cdot H \cdot \cos^2 \alpha \\ F_s &= \frac{C}{\gamma \cdot H_{sat} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \tan \alpha} + \frac{\gamma' \cdot \tan \varphi}{\gamma_{sat} \cdot \tan \alpha} \\ \gamma' &= \gamma_{sat} - \gamma_w \end{aligned} \quad (14)$$

الگوسازی سد خاکی و آنالیز مدل

با توسعه روش اجزاء محدود و پیشرفت علوم نرم افزاری امکان تعیین جابه جایی ها، تنش ها و فشارهای حفره ای در محیط های پیوسته مقدور شده است. برای تحلیل تنش و کرنش سد خاکی از روش اجزاء محدود به صورت دو بعدی در شرایط کرنش صفحه ای که منجر به ساده شدن محاسبات می شود استفاده می شود. زیرا اگر نسبت طول به ارتفاع سدهای خاکی بیشتر از ۵ باشد می توان با تقریب خوبی سد را به صورت دو بعدی مدل کرد [۸].

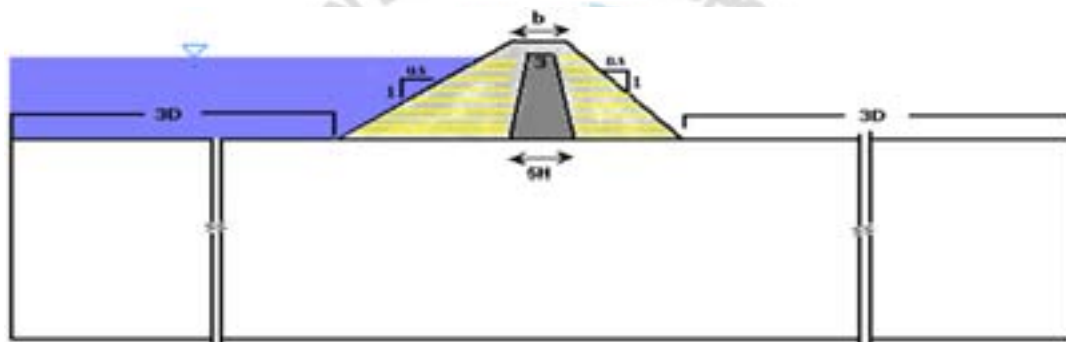
تحلیل و طراحی سد فوق بوسیله نرم افزار Plaxis انجام گرفته است. این نرم افزار یک کد اجزاء محدود توان مند به صورت دو بعدی برای مدل سازی برای محیط پیوسته و تحلیل تغییر شکل ها و پایداری پروژه های ژئوتکنیکی است، همچنین در این نرم افزار روش های مختلف رفتاری خاک نظیر روش موهر کولمب، روش نرم شونده، روش نرم شونده خزشی و روش سخت شونده قابل بررسی هستند. در تحقیق حاضر به منظور مدلسازی رفتار خاک از مدل موهر کولمب استفاده شده است. روش موهر کولمب به دلیل عدم نیاز به پارامترهای متعدد و وجود پارامترهای اساسی خاک در تمامی حالات رفتاری، اعم از خمیری و کشسان، برای مدلسازی سد خاکی توصیه شده است [۹]. پارامترهای به کار برده شده برای تحقیق حاضر در جداول (۲، ۳) مشخص شده است. در تحقیق حاضر به منظور بررسی اثر ژئوتکستایل بر پایداری سد خاکی، تحلیل پارامتری با در نظر گرفتن پارامترهای خاک، ژئوتکستایل و هندسه ترکیب آنها انجام شد. با ثابت نگه داشتن پارامترها، یک پارامتر تغییر داده شد تا تاثیر آن پارامتر بر پایداری سد بررسی شود.

شیب بالا دست و پایین دست سدهای خاکی یکی از عوامل عمده و موثر در پایداری سدهای خاکی است. این شیب ها به طور کلی تابع نوع مصالح خاکی مورد استفاده، وضعیت پی سد و ارتفاع آن است. این شیب به نوع سد نیز بستگی دارد. شیب بالا دست سدهای خاکی عمدتا در حدود ۲:۱ تا ۵:۱ است (۲ و ۵ در جهت افقی و ۱ در جهت قائم) و همانطور که اشاره شد، انتخاب این شیب بستگی به نوع مصالح خاکی مورد مصرف دارد. هر چه مصالح خاکی درشت دانه تر هستند می توان شیب بیشتری را انتخاب کرد و بالعکس هر چه مصالح ریز دانه تر هستند، شیب ملایم تری نیاز است. محدوده شیب های فوق در صورتی مناسب است که خطر افت ناگهانی سطح آب، فشار آب منفذی داخل بدنه سد نمی تواند به سرعت پخش شود، از این رو فشار زیادی به سطح شیبدار بالادست وارد خواهد کرد که ممکن است موجب ریزش یا لغزش آن شد.



در این تحقیق برای تحلیل پایداری سد خاکی، پارامتر ارتفاع سد، بررسی اثر نوع ژئوتکتستایل و فاصله قائم ژئوتکتستایل ارزیابی شد. علاوه بر تحلیل سد خاکی مسلح، تحلیل سد خاکی غیر مسلح با همان پارامترها نیز انجام شد تا بتوان تغییرات حاصل از تسلیح سد خاکی را مشاهده نمود. برای این منظور از نرم افزار *Plaxis* استفاده شد. سه ارتفاع سد ۲۵، ۴۰ و ۱۵ متر بررسی گردید که عرض تاج در آنها به ترتیب ۹، ۷ و ۶ متر در نظر گرفته شد. از آنجا که در بیشتر موارد با افزایش ارتفاع سد، به طور طبیعی وسعت دریاچه سد نیز افزایش می یابد، ارتفاع موج و متاثر از آن ارتفاع آزاد معادل افزایش می یابد.

بنابراین برای سه ارتفاع مورد بررسی، به ترتیب ارتفاع های آزاد ۵، ۴ و ۳ متر در نظر گرفته شد. همچنین در مورد الگوهای سد مسلح به منظور آب بندی، محدوده میانی سد بصورت غیر مسلح باقی ماند و تنها پوسته بالادست و پایین دست بصورت خاک مسلح با ژئوتکتستایل طراحی گردید. برای تعیین شیب بالادست و پایین دست سد خاکی، برای هر یک از الگوها تحلیل های آزمایشی با شیب های مختلف انجام گردید تا شیب پایدار برای بارگذاریهای پایان ساخت، تراوش دائمی از مخزن پر و نیمه پر و افت سریع حاصل شود. نمونه ای از مقطع خاکریز مسلح که به منظور مطالعه پارامتری مورد استفاده قرار گرفت، در شکل (۸) نشان داده شد.



شکل (۷): هندسه الگوی سد خاکی مسلح شده جدول (۱): پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح سد خاکی

$K (m / day)$	$c (KN / m^2)$	ϕ	$\gamma_{sat} (KN / m^3)$	$\gamma (KN / m^3)$	نوع مصالح	اجزای سد	
0.864	۵	۳۸	۲۱،۲	۲۰	GW-GM	پوسته	(۱)
0.005184	۱۳	17	18.4	16	CL	هسته	
0.864	۷	33	۲۱،۲	۲۰	GW-GM	پوسته	(۲)
0.005184	۲۰	17	18.4	16	CL	هسته	

مشخصات مکانیکی مصالح به کار رفته در بدنه سد در جدول (۱) نشان شده است.



در این تحقیق از سه نوع ژئوتکتستایل A, B, C استفاده شده و مطابق جدول (۲) است. بالادست و پایین دست سد خاکی توسط ژئوتکتستایل مسلح شد. سه فاصله قائم ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر برای چینش ژئوتکتستایل در نظر گرفته شد. همچنین سه مقاومت کشش ۷/۵، ۱۵ و ۴۰ کیلونیوتن بر متر مربع بررسی شد. حد فاصل بین خاک و ژئوتکتستایل با دو پارامتر ضریب اصطکاک و همچسبی به ترتیب برابر ۰/۵ و ۰/۶ تعیین شد. همچنین مشخصات مکانیکی پی زیر سد خاکی در جدول (۳) مشخص شده است.

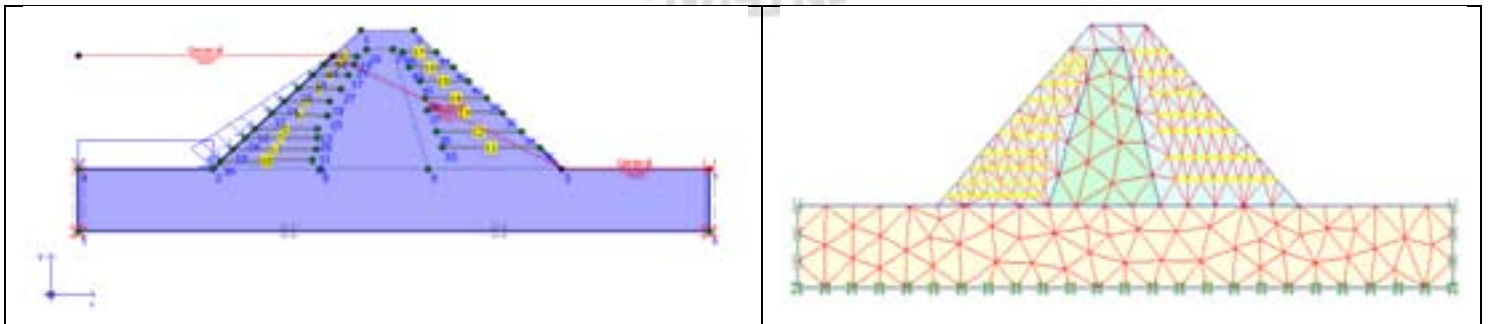
جدول (۲): مشخصات مقاومت کششی ژئوتکتستایل ها

نوع	مدل	مقاومت کششی نهایی KN / m^2
A	Elastic	۷,۵
B	Elastic	۱۵
C	Elastic	۴۰

جدول (۳): مشخصات مصالح پی

$K (m / s)$	ϕ	$c (Kpa)$	$\gamma (KN / m^3)$	$\gamma_{sat} (KN / m^3)$	نوع مصالح بدنه سد
8.64E-6	۱۸	۲۰۰	۱۹	۲۰	خاک رس نوع (۱)
8.64E-5	مقاومت نامحدود		۱۹	۲۰	پی سنگی نوع (۲)

پس از تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مصالح پی، بدنه سد و ژئوتکتستایل، الگوهای مورد نظر به کمک نرم افزار *Plaxis* تشکیل گردید و تحلیل پایداری بر روی الگوها صورت گرفت. در ادامه نتایج حاصل از این تحلیل ها بحث و بررسی می شود.



شکل (۸): نحوه مدلسازی سد خاکی در نرم افزار



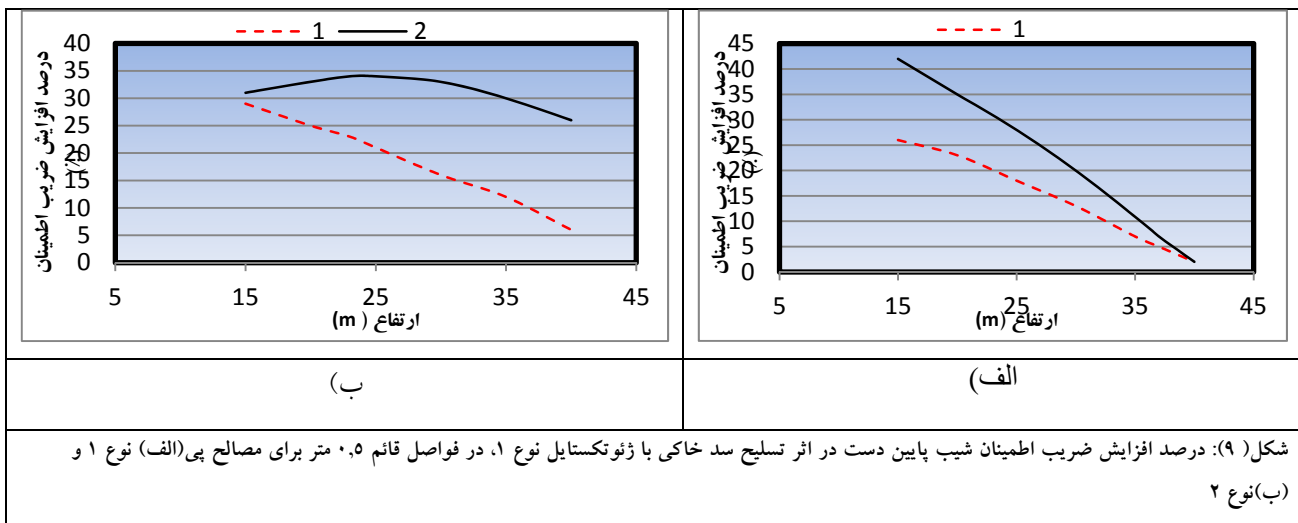
نتایج تحلیل ها

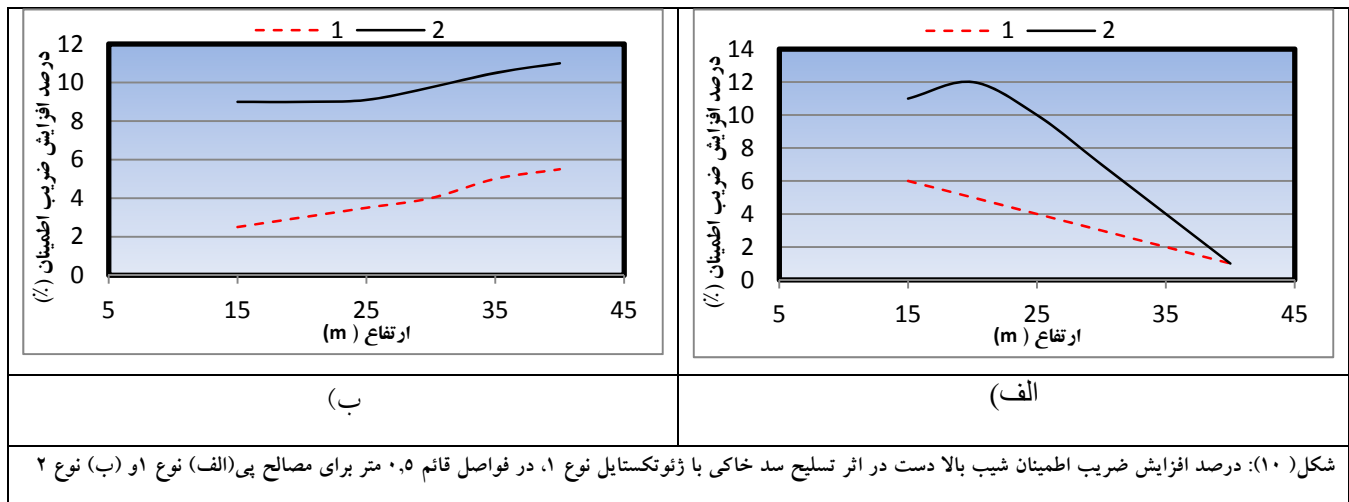
تحلیل پارامتری به منظور بررسی اثر پارامترهایی نظیر ارتفاع سد، فاصله قائم ژئوتکستایل و اثر نوع ژئوتکستایل، پایداری سد مسلح صورت گرفت. در این بخش اثر هر یک از پارامترهای مذکور بررسی می شود.

بررسی اثر ارتفاع سد و مقاومت برشی مصالح

روند تاثیر مسلح کننده بر درصد افزایش ضریب اطمینان پایین دست و بالادست، برای مصالح مختلف بدنه و پی، در سه ارتفاع مورد بررسی، در اشکال (9) و (10) نشان داده شده است. بررسی این اشکال نشان می دهد که با افزایش ارتفاع، تاثیر تسلیح بر افزایش ضریب اطمینان چه برای شیب بالادست و چه برای شیب پایین دست در مقایسه با خاکریز غیر مسلح کاهش می یابد. به عبارت دیگر، اثر تسلیح در ارتفاع های پایین (در حدود ۱۵ متر) برای هر دو شیب بالادست و پایین دست به مراتب قابل ملاحظه تر است. البته به طوری که در اشکال ۹-ب و ۱۰-ب مشاهده می شود، در حالت مصالح بدنه نوع ۱ بر روی پی سنگی، میزان افزایش ضریب اطمینان به طور تقریبی مستقل از ارتفاع سد است و در ارتفاع های مختلف سد، کم و بیش یکسان است. علت این موضوع، تاثیر ویژگی های مقاومتی مصالح پی بر روی پایداری شیب است. چنانچه بدنه سد بر روی مصالح پی ضعیفتر قرار گیرد، با افزایش ارتفاع، نقش ویژگی های مقاومتی مصالح پی بر روی پایداری شیب افزایش می یابد و در نتیجه تاثیر تسلیح بر افزایش ضریب اطمینان کم رنگ تر می شود. در حالیکه اگر همین بدنه بر روی مصالح پی خیلی قوی (پی سنگی) قرار گیرد، چون مقاومت مصالح پی نقشی بر روی پایداری شیب ندارد، تاثیر تسلیح بر افزایش ضریب اطمینان کم و بیش یکسان است. در ضمن به طوری که در اشکال (9) و (10) نیز مشاهده می شود، نتایج تحلیل ها نشان می دهد که بهبود مقاومت مصالح پی موجب افزایش چشمگیر پایداری سد با ارتفاع بالاتر (حدود 40 متر) می شود. این امر منجر به تندتر شدن شیب های بالادست و پایین دست و کاهش حجم عملیات خاکی می شود.

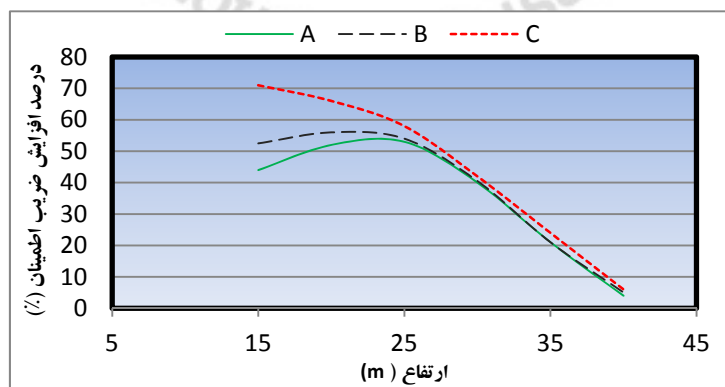
بررسی محققان پیشین نشان داد که تسلیح رس باعث افزایش میزان چسبندگی آن می شود. به طوری که در اشکال (9) و (10) مشاهده می شود، در این پژوهش نیز در کلیه موارد به خوبی دیده شد که تاثیر مسلح کننده بر پایداری سد خاکی مسلح با بدنه نوع ۱ که چسبنده تر از مصالح نوع ۲ است، به مراتب بیشتر است.





بررسی اثر نوع ژئوتکتایل

اشکال (11) و (12) نشان دهنده تاثیر نوع ژئوتکتایل بر میزان افزایش ضریب اطمینان سد خاکی مسلح در مقایسه با غیر مسلح است. به طوری که در این اشکال دیده می شود، بیشترین افزایش ضریب اطمینان مربوط به ژئوتکتایل نوع C است که دارای مقاومت کششی بالاتری است. برای پی نوع A این تاثیر در ارتفاع های پایین قابل ملاحظه است و در ارتفاع های بالاتر که ویژگیهای مقاومتی مصالح پی تاثیرگذارتر است، چندان دیده نمی شود. در ضمن به طوری که در شکل (12) دیده می شود با بهبود مقاومت برشی مصالح پی، افزایش مقاومت کششی ژئوتکتایلها در پایداری سد خاکی مسلح تاثیرگذارتر است. دلیل این امر را می توان عدم عبور سطح لغزش از پی سنگی دانست. در ضمن با ملاحظه اشکال (13) و (14) دیده می شود با افزایش فاصله ژئوتکتایل ها از هم، میزان افزایش ضریب اطمینان ناشی از وجود ژئوتکتایل در سد خاکی مسلح در مقایسه با سد خاکی غیر مسلح کاهش می یابد.

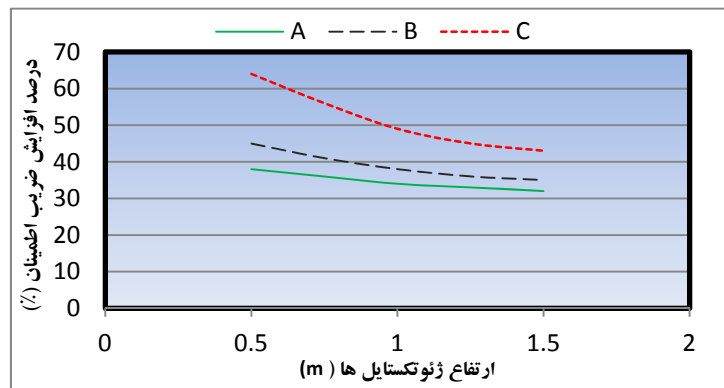


شکل (۱۱): درصد افزایش ضریب اطمینان شیب پایین دست در اثر تسلیح سد خاکی با مصالح نوع ۱ انواع گوناگون ژئوتکتایل در فواصل قائم ۰/۵ متر، برای مصالح پی نوع ۲

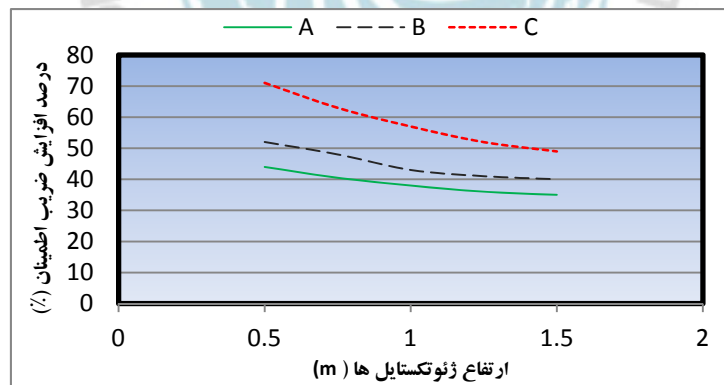


اثر فاصله بین ژئوتکستایل ها

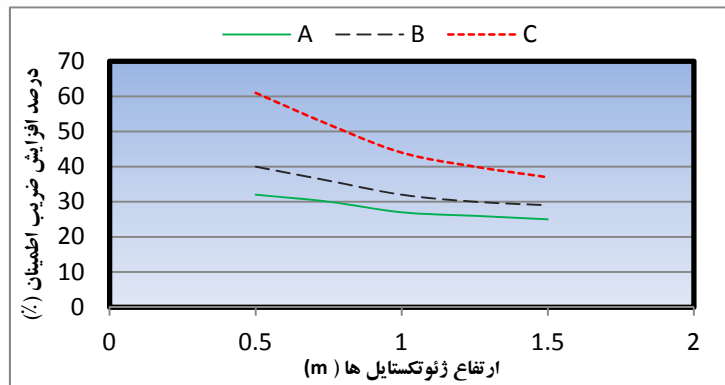
با کاهش فاصله بین ژئوتکستایل ها درصد کاهش تغییر مکان افقی خاکریز مسلح نسبت به خاکریز غیر مسلح افزایش می یابد. میزان کاهش تغییر مکان افقی خاکریز مسلح با فاصله ژئوتکستایل های نیم متری از یکدیگر در مقایسه با خاکریز غیر مسلح بسته به ارتفاع و نوع خاکریز، نوع پی و شرایط بارگذاری بین ۰/۱ تا ۲۷/۷۵ درصد است در حالی که این میزان کاهش برای خاکریز مسلح با فاصله ژئوتکستایل ها یک متر از یکدیگر در مقایسه با خاکریز غیر مسلح بین ۰/۰۵ تا ۲۴/۷۵ درصد است. این نتایج نشان می دهد با کاهش فاصله بین ژئوتکستایل ها باعث افزایش ضریب اطمینان و کاهش تغییر مکان افقی در سد می شود.



شکل (۱۲): درصد افزایش ضریب اطمینان شیب پایین دست در اثر تسلیح سد خاکی به ارتفاع ۲۵ متر بر روی پی نوع ۲ و مصالح بدنه نوع ۲



شکل (۱۳): درصد افزایش ضریب اطمینان شیب پایین دست در اثر تسلیح سد خاکی به ارتفاع ۱۵ متر بر روی پی نوع ۱، با مقاومت گوناگون ژئوتکستایل و مصالح بدنه نوع ۱



شکل (۱۴): درصد افزایش ضریب اطمینان شیب پایین دست در اثر تسلیح سد خاکی به ارتفاع ۱۵ متر بر روی پی نوع ۱، با مقاومت گوناگون ژئوتکتستایل و مصالح بدنه نوع ۲

نتیجه گیری

- بررسی نتایج تحلیل های پایداری انجام شده در تحقیق حاضر نشان داد که سد خاکی مسلح عملکرد خوبی از خود نشان می دهد. برخی از نتایج تحلیل ها را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:
- تاثیر مسلح کننده بر افزایش پایداری سد خاکی مسلح با مصالح بدنه با ویژگیهای مکانیکی پایین تر (چسبندگی بیشتر و زاویه اصطکاک داخلی کمتر) بیشتر است.
 - با افزایش ارتفاع، تاثیر تسلیح بر افزایش ضریب اطمینان چه برای شیب بالادست و چه برای شیب پایین دست در مقایسه با خاکریز غیر مسلح کاهش می یابد. بهبود در مقاومت برشی مصالح پی موجب افزایش چشمگیر پایداری سد با ارتفاع بالاتر می شود.
 - با کاهش فاصله بین ژئوتکتستایل ها باعث افزایش ضریب اطمینان و کاهش تغییر مکان افقی در سد می شود.
 - ژئوتکتستایل ها باعث افزایش مقاومت خاک و در نتیجه کاهش جابه جایی ها در سد خاکی است.
 - با افزایش مقاومت کششی ژئوتکتستایل ها و همچنین با کاهش فاصله بین آنها، میزان افزایش ضریب اطمینان سد خاکی مسلح در مقایسه با غیر مسلح، افزایش می یابد. با بهبود در مقاومت برشی مصالح پی، افزایش مقاومت کششی ژئوتکتستایل ها در پایداری سد خاکی مسلح تاثیرگذارتر است.



- [1]. Koerner, R.M. (1998) *Designing With Geosynthetics*. Prentice Hall, New York.
- [2]. Michalowski, R.L. (1998) *Limit Analysis in Stability Calculations of Reinforced Soil Structures*. Geotextiles and Geomembranes, Issue No.16, pp 311-331.
- [3]. San, K.C., Leshchinsky, D. and Matsui, T. (1994) *Geosynthetic Reinforced Slopes: Limit Equilibrium and Finite Element Analyses*. Journal of Soils and Foundations, Vol. 34, No. 2, pp. 79-85.
- [4]. Leshchinsky, D. (2002) *Stability of Geosynthetic Reinforced Structures*. ADAMA Engineering, Newark, D.E., USA, 20p.
- [5]. Elias, V., Christopher, B.R. and Berg, R.R. (2001) *Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines*. Repot No.FHWA-NHI-00-043, FHWA-US Dept. of Transportation, Washington, DC.
- [6]. Zorenberg, J.G., Sitar, N., Mitchell, J.K. (1998) *Limit Equilibrium as Basis for Design of Geosynthetic Reinforced Slopes*. J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., ASCE, Vol.124, No.8, pp 684-698.
- [7]. Zorenberg, J.G., Sitar, N., and Mitchell, J.K. (1998) *Performance of Geosynthetic Reinforced Slopes at Failure*. J. Geotechnical and Geoenvironmental Engrg., ASCE, Vol.124, No.8, pp 670-683.
- [8]. Hilf, j,w, (1948). "Estimating Construction Pore Pressure in in Rolled Earth Dams" Porc.II Int.on Soil Mech. And Found. Engg. Vol.III, p.p.234-240.
- [9]. Plaxis in corporation (2002), "Refrence and Scintific manual" (Plaxis Manual Vrsion 8.2).