



## مطالعه عددی سه‌بعدی پایداری شیب ماسه‌ای مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید

محمد حاجی عزیزی\*، مسعود نصیری

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۴-۱۱  
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۶-۲۳  
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۷-۱۱  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۰۷-۲۱

### کلمات کلیدی:

شیب ماسه‌ای  
ستون سنگی  
ژئوگرید  
مسلح سازی  
مطالعه عددی

**خلاصه:** یکی از روش‌های مناسب و مؤثر برای مسلح کردن شیب‌های خاکی استفاده از ستون‌های سنگی با پوشش ژئوگرید می‌باشد، که این غلاف ژئوگرید به خوبی قادر است ظرفیت باربری شیب را افزایش و میزان نشست را در آن کاهش دهد. هدف از انجام این پژوهش، مطالعه عددی رفتار ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید در پایداری شیب خاکی ماسه‌ای به صورت سه بعدی در حالات مختلف است. نتایج حاصل از تحلیل به کمک نرم افزار تفاضل محدود  $FLAC^{3D}$  نشان داده است که ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید در شیب ماسه‌ای اشباع، پایداری آن را تا حد رضایت بخشی نسبت به حالت شیب مسلح با ستون سنگی معمولی بهبود می‌بخشد. در این پژوهش پارامترهای مختلفی از جمله قطر ستون سنگی، سختی، چسبندگی و اصطکاک فنر کوپل ژئوگرید، فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی (نسبت  $S/D$ )، و نحوه آرایش مسلح کننده‌ها بررسی شده‌اند. نتایج حاکی از آن است که پارامتر تأثیر گذار در ژئوگرید به منظور مسلح کردن ستون سنگی، چسبندگی فنر کوپل است، که با افزایش این پارامتر ظرفیت باربری شیب مسلح به صورت خطی افزایش می‌یابد (این بدان معنی است که استفاده از ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید، می‌تواند ظرفیت باربری شیب را بسته به نوع مشخصات ژئوگرید، تا  $1/8$  برابر شیب مسلح با ستون سنگی معمولی بهبود بخشد). در حالت شیب مسلح با ردیف ستون سنگی بیشترین افزایش ظرفیت باربری در حالت  $S/D=2$  به وجود می‌آید، اما کاهش نسبت  $S/D$  الزاماً به معنای افزایش چشمگیر ظرفیت باربری شیب نخواهد بود.

### ۱- مقدمه

توانایی پایدار سازی و افزایش ضریب اطمینان شیروانی‌های خاکی را دارد و همچنین علاوه بر سادگی و راحتی اجرا، از نظر اقتصادی نیز نسبت به سایر روش‌های متداول در این زمینه، مقرون به صرفه می‌باشد [۲]. دلایل مناسب بودن استفاده از ستون سنگی عبارتند از افزایش ظرفیت باربری، کاهش میزان نشست، افزایش مقاومت برشی، کاهش پتانسیل روانگرایی و بهبود زهکشی. ستون‌های سنگی به عنوان عناصر مقاوم باربر عمل می‌کنند و عموماً در معرض نیروهای جانبی قرار دارند. انعطاف پذیری این المان‌ها یکی از مواردی است که سبب تمایزشان نسبت به سایر روش‌های متداول پایدار سازی می‌شود؛ همین ویژگی ذکر شده سبب می‌شود که بتوان با استفاده از شیوه‌های مختلف عملکرد این اعضای باربر را بهبود بخشید و علاوه بر افزایش مقاومت در برابر جابجایی افقی، فشار همه جانبه آن‌ها را

تثبیت شیب‌های خاکی یکی از مسائل اساسی در توسعه زندگی امروز بشر است. به طور کلی، روش‌های پایدار سازی در سه زیرشاخه تجربی، عددی و یا تحلیلی قابل مطالعه و بررسی هستند. روش‌های پایدار سازی شامل تکنیک‌های ویژه‌ای است که علاوه بر اینکه باید به خوبی شناخته شوند، باید به صورت عملی و کاربردی نیز قابلیت مدل‌سازی را داشته باشند [۱]. ایجاد شرایط پایدار برای شیب‌ها می‌تواند به کمک روش‌های متعددی انجام گیرد که از جمله آن‌ها می‌توان به مواردی همچون؛ تغییر هندسه شیب، استفاده از المان‌های مسلح کننده یا نصب سازه‌های مقاوم مانند ستون سنگی اشاره کرد. ستون‌های سنگی به عنوان یکی از راهکارهایی شناخته شده است که

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mhazizi@razi.ac.ir



نیز افزایش داد. یکی از این راهکارها، استفاده از ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید می‌باشد.

ستون‌های سنگی تحت بارهای فشاری به سه صورت عمده که عبارتند از شکم دادگی ستون [۴ و ۳]، گسیختگی برشی کلی [۵] و لغزش [۶] دچار گسیختگی خواهند شد. ستون‌های سنگی در گستره متنوعی از خاک‌های چسبنده‌ی نرم تا سخت و در خاک‌های ماسه سیلتی قابلیت کاربرد را دارند [۷]. به کمک ستون‌های سنگی می‌توان به اهداف زیر نائل آمد: افزایش ظرفیت باربری [۸ و ۹]، کاهش میزان نرخ نشست کلی و نسبی [۱۰]، کاهش پتانسیل روانگرایی [۱۱ و ۱۲]، بهبود پایداری شیب‌های خاکی [۱۳-۱۵]، و تحمل بیشتر تنش‌های برشی [۱۶].

بررسی رفتار شیب‌های خاکی همواره مورد توجه محققین بوده است [۱۷-۱۹]. به منظور حل مشکلات مربوط به پایداری شیب‌های عمیق از ستون‌های سنگی، ستون‌های اختلاط در عمق و شمع‌های ماسه‌ای به صورت گسترده‌ای استفاده شده است [۲۰-۲۴]. برگادو و همکاران [۲۵] دریافتند که ستون‌های سنگی ضریب اطمینان شیروانی‌ها را تا حدود ۲۵٪ افزایش می‌دهند و علاوه بر زهکشی، خاکریز مورد نظر را نیز مسلح می‌کنند. وکلی و همکاران [۲۶] تأثیر ستون سنگی روی پایداری شیب را بررسی کرده و نشان دادند که ستون‌های سنگی ظرفیت باربری شیب را بین ۱/۲۵ تا ۱/۷۱ برابر نسبت به شیروانی غیر مسلح افزایش خواهند داد.

ظرفیت باربری ستون‌های سنگی به تنش‌های جانبی وابسته است، به همین دلیل لازم است که در برخی خاک‌ها محصور کنندگی اضافی برای آن فراهم شود که برای این منظور تکنیک‌های متفاوتی پیشنهاد و ارائه شده است. ابوشی و همکاران [۶] قسمت بالایی ستون سنگی را با پوشش فلزی مسلح کرده‌اند. ژانگ و همکاران [۲۷]؛ لای و همکاران [۲۸] شارما و همکاران [۲۹]؛ گنیل و بوازا [۳۰]؛ فتاح و مجید [۳۱] استفاده از لایه‌های ژئوگرید را برای بهبود عملکرد ستون‌های سنگی پیشنهاد دادند. نتایج تحقیقات ژانگ و همکاران [۲۷] ولای و همکاران [۲۸] که بر روی اثرات قوس زدگی متمرکز بود، نشان داد که این پدیده در ستون‌های مسلح کمک شایانی به عملکرد آن‌ها خواهد کرد. پژوهش‌های شارما و همکاران [۲۹] نشان داد که ظرفیت باربری ستون مسلح با ژئوگرید افزایش می‌یابد و با افزایش تعداد ژئوگریدها و کاهش فاصله بین آن‌ها،

این عملکرد بیشتر بهبود خواهد یافت. آنان همچنین نشان دادند که قطر و طول ناحیه خمره‌ای شدن ستون سنگی مسلح نسبت به ستون سنگی معمولی کاهش پیدا می‌کند. بر اساس تحقیقات گنیل و بوازا [۳۰] می‌توان گفت که سختی ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید به شدت افزایش می‌یابد و کاهش کرنش‌های ایجاد شده در آن به حدود ۸۰ درصد نیز خواهد رسید. فتاح و مجید [۳۱] به این نتیجه رسیدند که غلاف ژئوگرید، تغییر شکل‌های جانبی ستون سنگی را در مقایسه با ستون‌های سنگی معمولی شدیداً کاهش می‌دهد.

علی‌رغم تحقیقات متعدد صورت گرفته، استفاده از این راهکار به عنوان روشی نوین در این پژوهش معرفی شده است. هدف از این پژوهش مقایسه مکانیسم عملکرد ستون‌های سنگی معمولی و مسلح با پوشش ژئوگرید در بهبود پایداری شیب‌های ماسه‌های است. همانطور که در ابتدای بحث اشاره شد، این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود سه بعدی (FLAC<sup>3D</sup>) انجام شده است. در این پژوهش پارامترهای متعددی از جمله قطر ستون سنگی، سختی فنر کوپل، چسبندگی فنر کوپل، اصطکاک فنر کوپل، فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی (در حالت شیب مسلح با ردیف ستون سنگی) و مسلح سازی تمامی ردیف، ستون‌های کناری و ستون میانی (در حالت ردیف ستون سنگی) مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مدل سازی‌های سه بعدی

ملاک انتخاب ابعاد در نظر گرفتن شرایط طبیعی حاکم بر شیب‌های خاکی بوده است. در انتخاب عرض شیب به این نکته توجه شده است که حداقل فاصله‌ی ستون‌های سنگی از مرزهای کناری برقرار باشد. به‌طور کلی فاصله مرکز ستون سنگی از جداره‌های کناری مدل‌ها حداقل ۵ برابر شعاع ستون می‌باشد.

### ۲-۱- مشخصات مصالح

در این پژوهش، خاک شیب از نوع ماسه سیلتی [۳۲] و مشخصات ستون سنگی برگرفته از مرجع [۲۶] است که در جدول ۱ ارائه شده‌اند و مشخصات ژئوگرید [۳۳] در جدول ۲ ارائه شده است. در محاسبات ستون سنگی مسلح در شیب، از محدوده وسیع‌تر ژئوگرید با پارامترهای متفاوت استفاده شده است. در این پژوهش، چسبندگی

جدول ۱. مشخصات مصالح در مدل سازی عددی

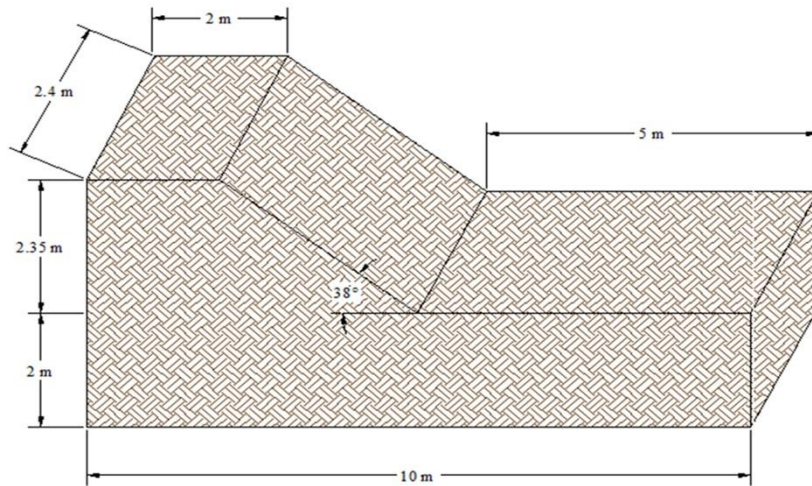
Table 1. Material characteristics in numerical modeling

مشخصات	مدل رفتاری	$E(MPa)$	$\gamma(\frac{kN}{m^3})$	$\phi(^{\circ})$	$c(kPa)$	$\nu(-)$
ماسه [۳۲]	موهر-کولمب	۱۰/۵	۱۶	۳۹	۰	۰/۳
ستون سنگی [۲۶]	الاستیک	۷۵	۲۰	—	—	۰/۳

جدول ۲. مشخصات مصالح در نرم افزار  $FLAC^{3D}$

Table 2. Material characteristics in  $FLAC^{3D}$

ویژگی مصالح	$E(GPa)$	$\nu(-)$	ضخامت (mm)
ژئوگرید [۳۳]	۲۰	۰/۲	۱



شکل ۱. هندسه شیب مدل سازی شده

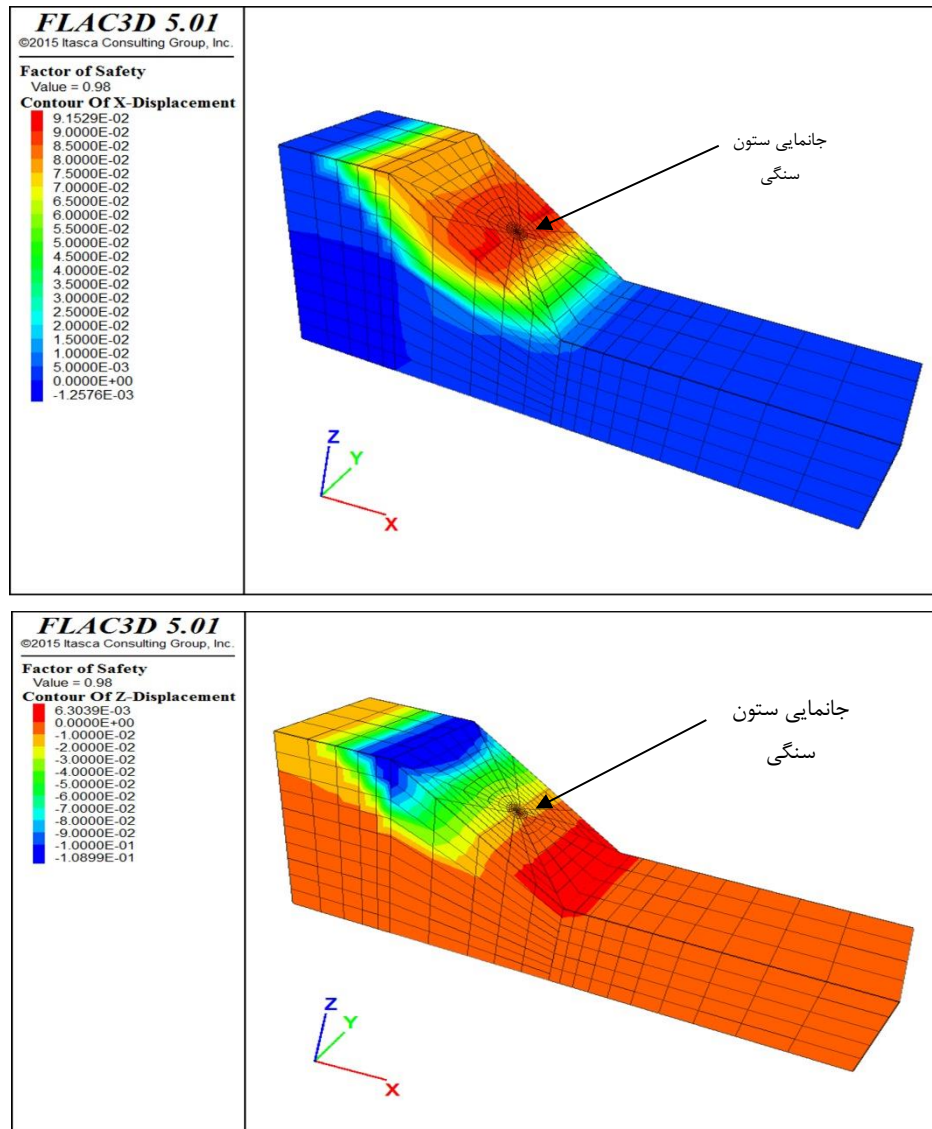
Fig. 1. The geometry of the modeled slope

ارتفاع شیب، ۲/۳۵ متر و زاویه شیب ۳۸ درجه می باشد؛ عرض شیب هم با توجه به نوع تحلیل (ستون سنگی تک یا ردیف ستون سنگی) ۲/۴ و ۴/۸ متر انتخاب شده است (شکل ۱). برای تمامی تحلیل ها، مدل سازی در شرایط استاتیکی انجام شده است و مرزهای کناره ها و کف بسته شده اند و مدل ها تنها در راستای قائم توانایی جابه جایی و نشست را دارند و همچنین فاصله ستون های سنگی از مرزها به اندازه ی حداقل ۵ برابر شعاع ستون سنگی می باشد. در تمامی حالات در شیب مسلح، ملاک گسیختگی شیب رسیدن به مقادیر جابه جایی در راستای  $Z$  به میزان ۱۰ سانتی متر و در راستای  $X$  به میزان ۹

فتر کوپل، اصطکاک فتر کوپل و سختی فتر کوپل به عنوان متغیر انتخاب شده اند.

## ۲-۲- شرح مدل و شرایط مرزی

برای بررسی رفتار شیب ماسه ای مسلح با ستون سنگی تسلیح شده توسط ژئوگرید به کمک نرم افزار تفاضل محدود سه بعدی، مدل سازی ها برای دو حالت ستون سنگی تک و ردیف ستون سنگی انجام شده است. مشخصات کلی مدل بدین شرح است: طول مدل، ۱۰ متر؛ طول تاج، ۲ متر؛ عمق مدل، ۲ متر؛ طول شیب، ۳ متر؛



ب

شکل ۲. گسیختگی شیب (F.S.<1) برای ستون تک؛ (بیشینه جابه‌جایی در راستای  $X$  (الف) و  $Z$  (ب) به ترتیب برابر با ۹ و ۱۰ سانتی‌متر).  
**Fig. 2. Slope failure (F.S.<1) for singular column, maximum displacement in (a) X direction, (b) Z direction are 9 and 10 cm, respectively**

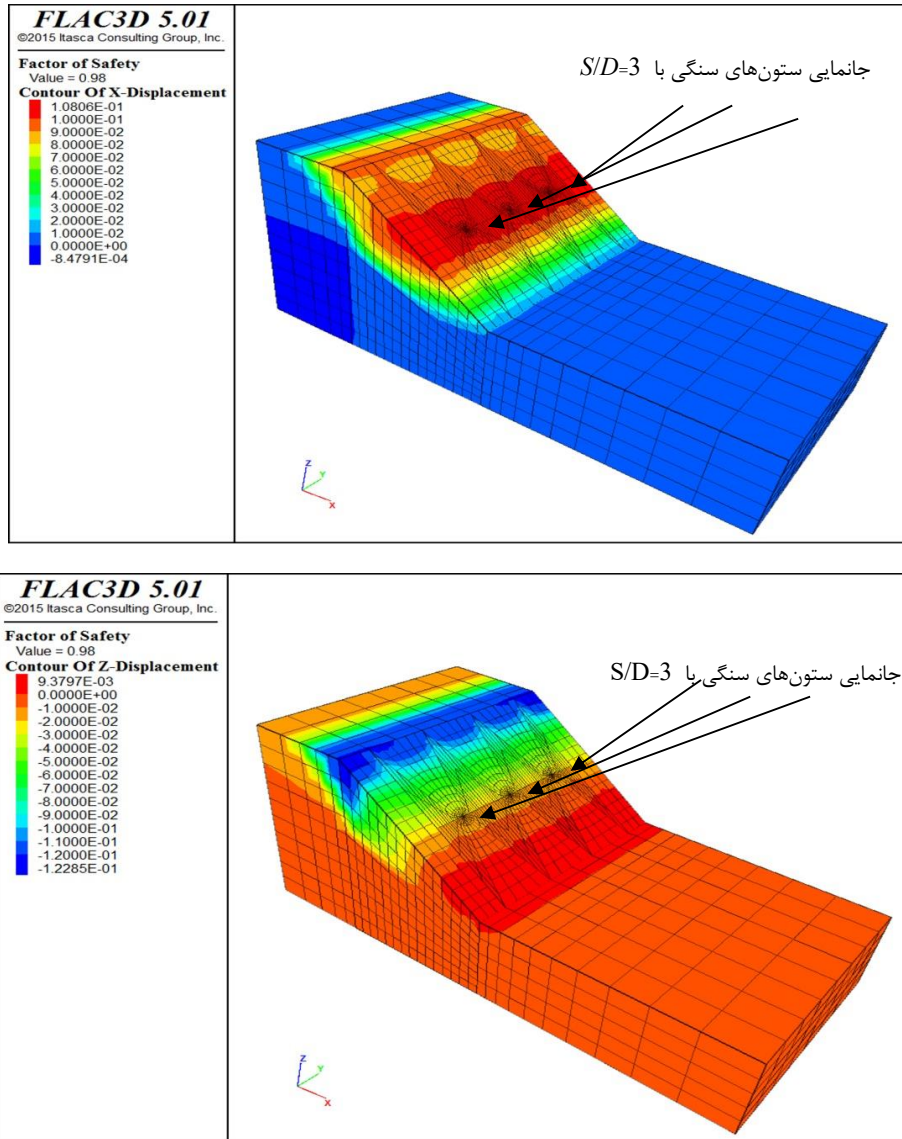
ستون سنگی و خاک [۸] و چه بین ژئوسنتتیک و خاک [۳۴].

۳-۲- شیب خاکی مسلح با یک ستون سنگی

۳-۱-۲- مدل‌سازی شیب خاکی غیر مسلح در حالت خشک

به منظور یافتن تعداد المان‌های بهینه در مدل، برای شیب‌های مورد نظر تحلیل حساسیت انجام شد. در شروع کار، تعداد ۲۷۸۴۰ المان برای مدل در نظر گرفته شد و تحلیل پایداری برای آن انجام گردید، در چنین شرایطی محاسبه در حدود ۸ ساعت زمان نیاز داشت و مقدار ضریب اطمینان نیز ۱/۰۶ به دست آمد. پس از این مرحله،

سانتی‌متر برای ستون سنگی مسلح تکی (شکل ۲) و مقادیر جابه-جایی در راستای  $Z$  به میزان ۱۲ سانتی‌متر و در راستای  $X$  به میزان ۱۰ سانتی‌متر برای ردیف ستون سنگی مسلح بوده است (شکل ۳). این مقادیر از نتایج تحلیل ضریب اطمینان شیب‌ها به دست آمده که با رسیدن مقادیر تغییر مکان‌ها به اعداد ذکر شده، ضریب اطمینان به کمتر از یک کاهش یافته و شیب دچار گسیختگی شده است. در حالت استفاده از ردیف ستون سنگی نسبت‌های مختلف  $S/D$  از ۲ تا ۳/۵ مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. در حالات شیب مسلح، برای ستون سنگی از هیچ سطح مشترکی استفاده نشده است؛ چه بین



ب

شکل ۳. گسیختگی شیب (F.S.<1) برای ردیف ستون؛ (بیشینه جابه‌جایی در راستای الف)  $X$  (ب)  $Z$  به ترتیب برابر با ۱۰ و ۱۲ سانتی‌متر،  $(S/D=3)$ .  
**Fig. 3. Slope failure (F.S.<1) for group column ( $S/D=3$ ), maximum displacement in (a) X direction, (b) Z direction are 10 and 12 cm, respectively**

شیب مورد نظر در شرایط خشک پایدار است.

### ۲-۳-۲- شیب غیر مسلح در حالت اشباع

پس از تحلیل مدل در حالت اشباع، مقدار ضریب اطمینان ۰/۹۸ گردید، که این موضوع نشان می‌دهد شیب در حالت ناپایدار قرار گرفته و دچار گسیختگی گردیده است. همچنین بیشینه تغییر مکان در راستای  $x$  در حالت اشباع به مقدار ۹ سانتی‌متر در وسط شیب رخ داده است (شکل ۲) و همین موضوع نشان می‌دهد که ستون سنگی باید در وسط شیب قرار بگیرد تا از تغییر مکان‌های به وجود

کم از تعداد المان‌ها کاسته شد تا در نهایت با تعداد المان ۳۰۰۰، تحلیل در کمتر از ۳۰ دقیقه به اتمام رسید و مقدار ضریب اطمینان ۱/۰۷ به دست آمد. با توجه به اعداد به دست آمده و نیز نزدیکی و تطابق خوب مقادیر ضرایب اطمینان، از تعداد المان ۳۰۰۰ برای این مدل استفاده شده است (جدول ۳). شایان ذکر است که با توجه به حساسیت وسط شیب، مقادیر المان‌ها در آن ناحیه ریزتر در نظر گرفته شده‌اند و با فاصله گرفتن از وسط شیب ابعاد مش‌ها درشت‌تر می‌شوند. در ابتدا شیب غیر مسلح در حالت خشک تحلیل شد و مقدار ضریب اطمینان ۱/۰۷ به دست آمد. این موضوع نشان می‌دهد که



جدول ۳. نتایج تحلیل حساسیت

Table 3. The results of sensitivity analysis

تعداد المان	مقدار ضریب اطمینان	مدت زمان تحلیل
شیب مسلح با یک ستون سنگی		
۲۷۸۴۰	۱/۰۶	۸ ساعت
۳۰۰۰	۱/۰۷	۳۰ دقیقه
شیب مسلح با ردیف ستون سنگی		
۱۱۸۰۰	۰/۹۷	۴ ساعت
۹۵۰۰	۰/۹۸	۳۵ دقیقه

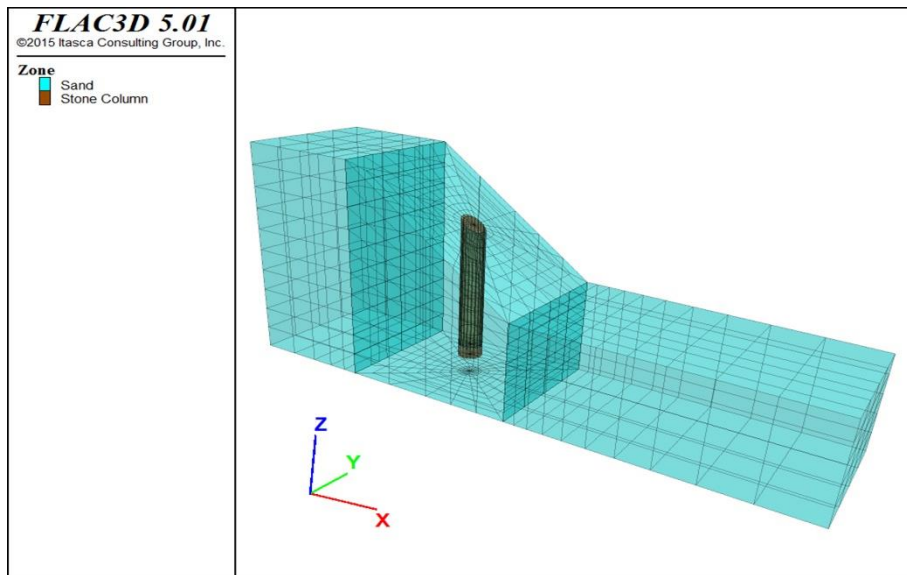
آمده در این ناحیه جلوگیری به عمل آورد. مقدار بیشینه جابهجایی در راستای قائم در این حالت نیز ۱۰ سانتی متر بوده است (شکل ۲).

### ۳-۳-۲- مدل سازی شیب خاکی مسلح با ستون سنگی معمولی در حالت اشباع

ستون سنگی به صورت یک المان استوانه‌ای با قطرهای مشخص در نرمافزار مدل سازی شده است. در هر یک از مدل ها، به منظور عدم گیرداری انتهای ستون در کف و ایجاد ستون سنگی متکی به بستر صلب (ستون اتکایی)، انتهای هر یک از ستون ها به اندازه قطر ستون سنگی از کف مدل ها فاصله داشته است. نحوه مدل سازی این المان ها به شرح زیر بوده است: ابتدا محل مورد نظر برای احداث ستون سنگی حفاری می شود (با توجه به مختصات ناحیه مورد نظر)، سپس المان استوانه‌ای شکل ستون در این محل قرار داده شده و مشخصات و پارامترهای ستون سنگی به آن ناحیه تخصیص داده می شود. از آنجایی که مشبندی المان ستون سنگی و شیب مدل شده با هم متفاوت هستند، در محل اتصال آن ها به هم از دستور *Attach* استفاده شده است تا از نظر هندسی برای مدل ها خطایی ایجاد نگردد. به دلیل اینکه مشخصات و پارامترهای مقاومتی ستون سنگی و بستر ماسه‌ای اختلاف چشمگیری ندارند و با دلایلی که قبلاً (در قسمت مدلسازی و شرایط مرزی) ذکر گردید، نیازی به در نظر گرفتن سطح مشترک بین این دو المان نبوده است. با توجه به اینکه المان ستون سنگی اهمیت بیشتری در تحلیل ها دارد و از حساسیت بیشتری نسبت به سایر قسمت های مدل برخوردار است، مشبندی این المان ریزتر انتخاب شده است تا از نظر هندسی و تحلیلی برای مدل سازی ها مشکلی پیش نیاید. در تحلیل حالات مختلف شیب

مسلح با قطرهای ستون متفاوت، روند کار مشابه است و تنها قطر ناحیه حفاری و قطر المان ستون سنگی متغیر می باشد که در کدهای دستوری اعداد مربوط به آن ها تغییر می کنند. نکته مهم دیگر در رابطه با این مسأله آن است که در تمامی تحلیل های انجام شده برای شیب های خاکی مسلح با ستون سنگی (چه ستون سنگی معمولی و چه ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید)، مرکز ستون سنگی حداقل به اندازه پنج برابر شعاع ستون از جداره های کناری فاصله داشته است تا اثر مرزها در مدل سازی رعایت گردد و تغییر شکل های به وجود آمده به مرزهای کناری برخورد نکنند.

ستون سنگی در وسط شیب، به عنوان موقعیت بهینه [۳۵-۳۷]، قرار داده شد و تحلیل ها انجام گردید. در تمامی حالات تعداد المان ها تغییر نکرد و تنها در وسط شیب از المان استوانه‌ای به قطر ۴۰ سانتی متر برای مدل سازی ستون سنگی استفاده شد. در حالت شیب مسلح، برای جلوگیری از گیرداری انتهای ستون سنگی در کف، المان ستون سنگی به اندازه قطر ستون از انتهای مدل فاصله داشته است (شکل ۴). پس از تحلیل، بیشینه مقدار جابهجایی در راستای  $x$ ، ۲ سانتی متر بوده است که نسبت به حالت غیر مسلح ۴/۵ برابر کمتر شده است. همچنین بیشینه مقدار جابهجایی در راستای  $z$ ، ۲/۷ سانتی متر بوده است که نسبت به حالت غیر مسلح ۳/۷ برابر کمتر گردیده است. در گام بعد، تاج شیب بارگذاری شد تا ظرفیت باربری شیب مسلح با ستون سنگی معمولی به دست بیاید (ذکر این نکته ضروری است که در تمامی حالات بارگذاری، ناحیه اعمال تنش روی تاج ثابت بوده است). در حالت شیب مسلح با ستون سنگی معمولی در شرایط اشباع، مقدار تنشی که عامل گسیختگی شیب می شود (یعنی مقادیر جابهجایی در راستای  $z$  به ۱۰ سانتی متر و در راستای  $x$  به ۹



شکل ۴. موقعیت ستون سنگی در شیب مسلح.

Fig. 4. The location of a stone column in reinforced slope

سنگی با قطر ۴۰ سانتی متر استفاده شده است.

سانتی متر برسد) ۱۰ کیلوپاسکال بوده است.

#### ۲-۴- شیب خاکی مسلح در حالت ردیف ستون سنگی

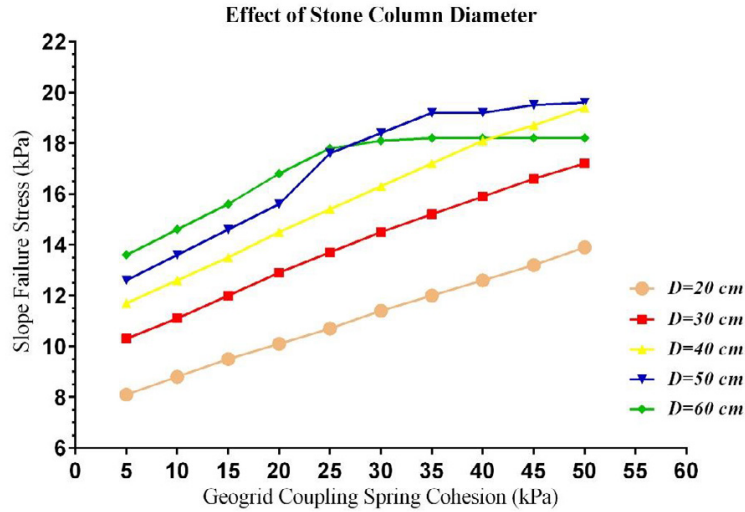
##### ۲-۴-۱- مدل سازی شیب خاکی غیر مسلح در حالت اشباع

در این مرحله از ردیف ستون سنگی به منظور مسلح کردن شیب استفاده شده است. همانند قبل برای این مدل هم تحلیل حساسیت انجام شد؛ در ابتدا از تعداد ۱۱۸۰۰ المان برای مدل استفاده شد که پس از گذشت حدود ۴ ساعت تحلیل به اتمام رسید و مقدار ضریب اطمینان ۰/۹۷ به دست آمد. در گام بعدی از تعداد المانها کاسته شد تا به تعداد مش بهینه به دست بیاید؛ در نهایت تعداد المان بهینه برای این مدل ۹۵۰۰ تعیین شد که در آن، زمان تحلیل به کمتر از ۳۵ دقیقه تقلیل پیدا کرد و مقدار ضریب اطمینان به دست آمده هم ۰/۹۸ گردید. پس با توجه به این موضوع، تعداد ۹۵۰۰ المان به عنوان المان بهینه تلقی گردید و محاسبات بر اساس آن انجام شد. همانند قبل نواحی وسط شیب دارای ریز ترین مشها هستند (به دلیل حساسیت این ناحیه) و با فاصله از وسط شیب کم کم به ابعاد مشها اضافه می شود. مقادیر جابهجایی بیشینه که سبب گسیختگی شیب می گردد (با توجه به نتایج ضرایب اطمینان)، در جهت  $x$ ، ۱۰ سانتی متر بود است (شکل ۳) و مقدار جابهجایی بیشینه در جهت  $z$  هم ۱۲ سانتی متر می باشد (شکل ۳).

#### ۲-۳-۴- مدل سازی شیب خاکی مسلح با ستون سنگی مسلح با

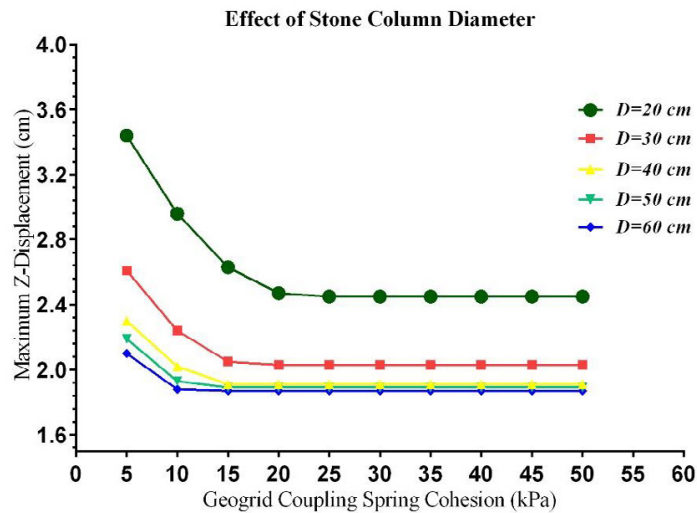
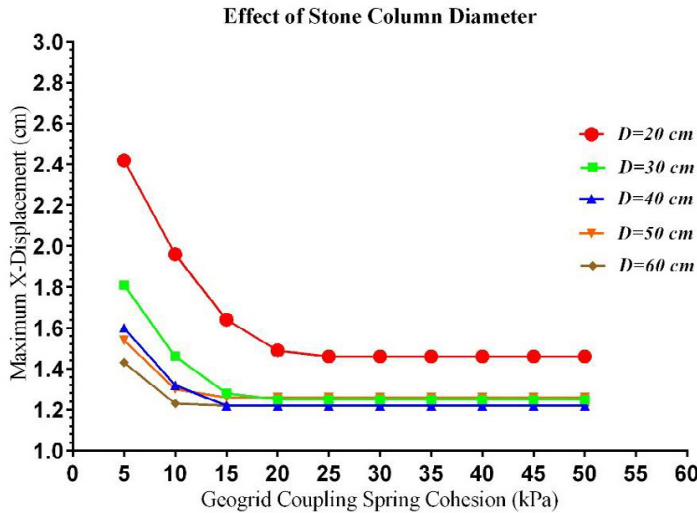
##### ژئوگرید در حالت اشباع

در این مرحله، به دور ستون سنگی غلاف ژئوگرید کشیده شده است. این کار بدین شکل انجام شد که لایه ژئوگرید به صورت دورپیچ به دور المان ستون سنگی پیچیده شد تا ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید ساخته و مدل سازی شود. همانند مدل پیشین، ستون سنگی مسلح با همان مشخصات در وسط شیب ماسه ای و با فاصله ای برابر قطر ستون از کف قرار داده شد. در این مرحله از ستون هایی به قطر ۲۰ تا ۶۰ سانتی متر و ژئوگرید با پارامترهای مقاومتی متفاوت استفاده شده است. برای مثال نتایج تحلیل ژئوگرید با چسبندگی فنر کوپل ۳۵ کیلوپاسکال و اصطکاک فنر کوپل صفر نشان داد که جابهجایی بیشینه در راستای  $x$ ، ۱/۲ سانتی متر است و جابهجایی بیشینه در راستای  $z$ ، ۱/۹ سانتی متر می باشد. مقدار تنش اعمالی جهت ایجاد گسیختگی در این شیب مسلح نیز ۱۷/۲ کیلوپاسکال به دست آمد (۱/۷۲ برابر شیب مسلح با ستون سنگی معمولی). شکل های ۵ تا ۹ هم نتایج تحلیل حالات مختلف شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید را نشان می دهد. لازم به ذکر است با توجه به نتایج به دست آمده از شکل های ۵ و ۶ برای انجام سایر محاسبات، از ستون



شکل ۵. تنش گسیختگی برای قطرهای مختلف ستون سنگی در شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید.

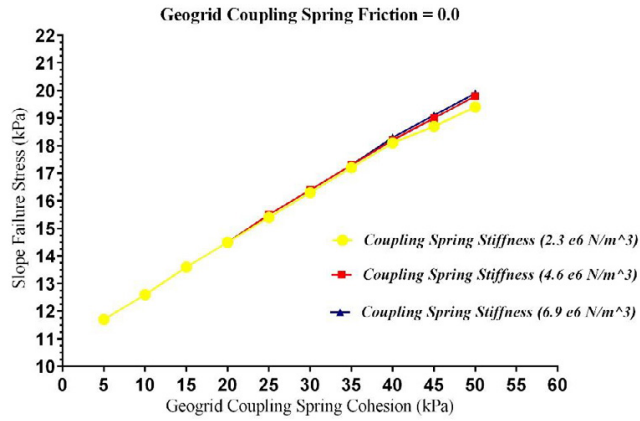
Fig. 5. Failure stress for different stone column diameter in a reinforced slope using geogrid encases stone column



شکل ۶. بیشینه جابهجایی در راستای X و Z برای قطرهای مختلف ستون سنگی در شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید.

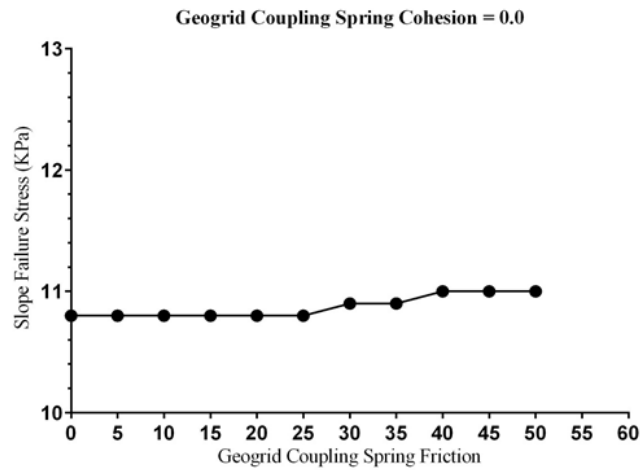
Fig. 6. Maximum displacement in X and Z direction for different stone column diameter in a reinforced slope using geogrid encased stone column



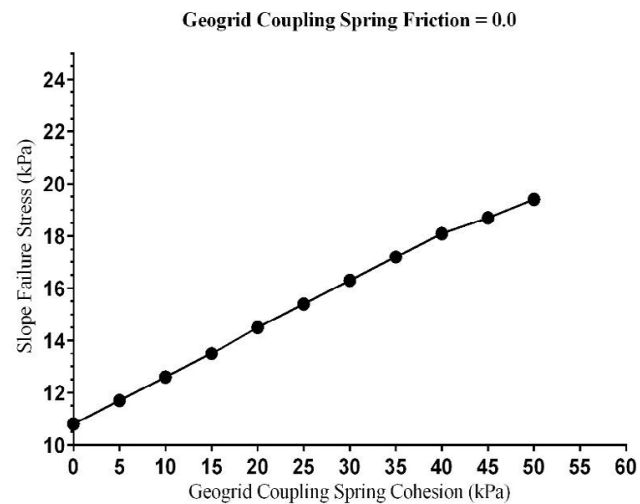


شکل ۷. اثر سختی فنر کوپل در تنش گسیختگی شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید (با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر).

Fig. 7. The effect of coupling spring stiffness on failure stress of reinforced slope using geogrid encases stone column (stone diameter = 40 cm)



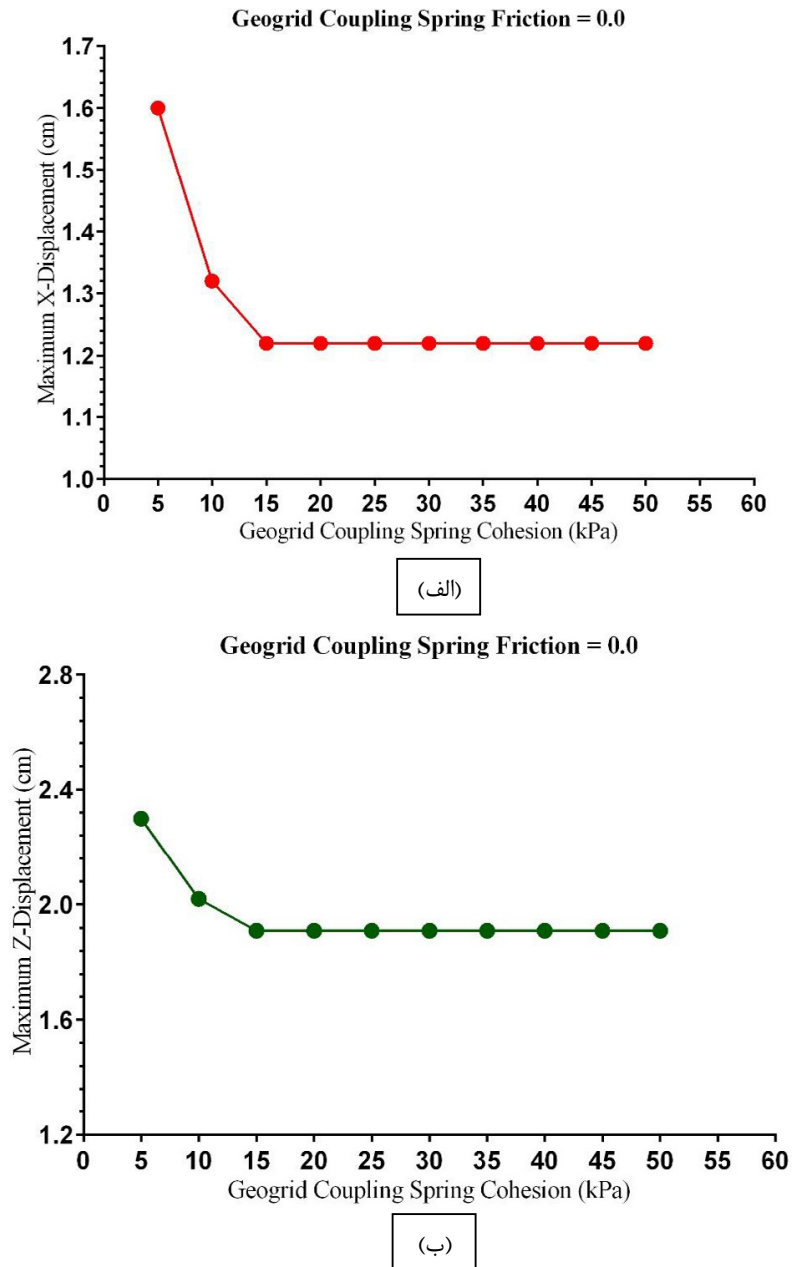
(الف)



(ب)

شکل ۸. اثرات چسبندگی و اصطکاک فنر کوپل در تنش گسیختگی شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر: (الف) اثر اصطکاک فنر کوپل و (ب) اثر چسبندگی فنر کوپل.

Fig. 8. The effects of geogrid coupling spring cohesion and friction on failure stress of reinforced slope using geogrid encases stone column with a diameter of 40 cm: a) coupling spring friction b) coupling spring cohesion



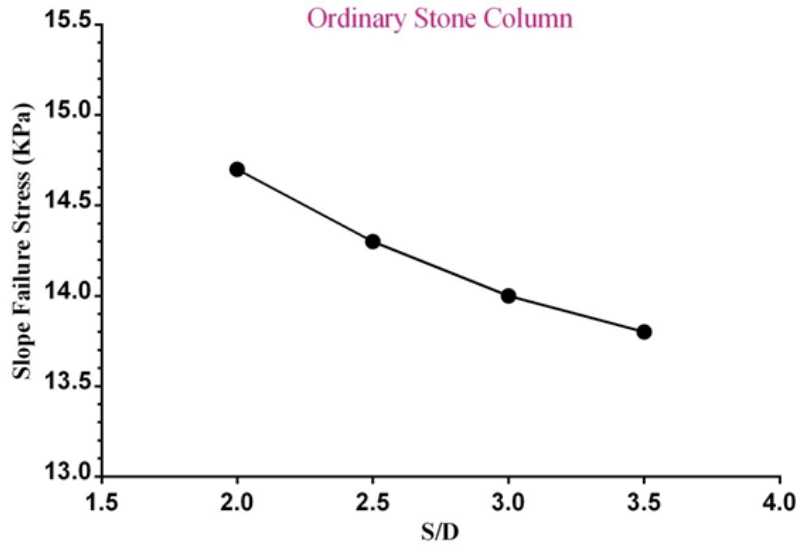
شکل ۹. اثرات چسبندگی فنر کوپل در جابه‌جایی‌های به وجود آمده در شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر؛ (الف) بیشینه جابه‌جایی‌ها در راستای  $x$  و (ب) بیشینه جابه‌جایی‌ها در راستای  $z$ .

Fig. 9. The effect of coupling spring cohesion on displacements of the reinforced slope using geogrid encases stone column with a diameter of 40 cm: a) maximum displacements in X direction b) maximum displacements in the Z direction

است. همچنین به منظور بررسی اثر قوس زدگی، نسبت‌های  $S/D$  مختلف (۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵) بررسی شد؛ در این رابطه  $S$  فاصله مرکز به مرکز ستون‌های سنگی و  $D$  قطر ستون سنگی است. برای مثال، نتایج تحلیل برای حالت  $S/D=3$  نشان داد که مقادیر جابه‌جایی بیشینه در جهت  $x$  برای این شیب ۱/۸ سانتی‌متر بود است و مقدار جابه‌جایی

۲-۴-۲- مدل‌سازی شیب خاکی مسلح با ردیف ستون سنگی معمولی در حالت اشباع

در این حالت از تعداد ۳ ستون سنگی به صورت ردیفی در وسط شیب به منظور مسلح کردن خاکریز استفاده شده است. در این حالت، از ستون‌های سنگی با قطر ۴۰ سانتی‌متری استفاده شده



شکل ۱۰. تنش گسیختگی در شیب مسلح با ستون سنگی معمولی برای نسبت‌های مختلف  $S/D$   
**Fig. 10. Failure stress in a reinforced slope using an ordinary stone column for different  $S/D$  ratios**

۲-۴-۴- مدلسازی شیب خاکی مسلح با ستون میانی مسلح شده در حالت اشباع  
 در این حالت، ستون سنگی میانی با پوشش ژئوگرید مسلح شد و ستون‌های سنگی کناری در شیب، غیر مسلح باقی ماندند، نتایج تحلیل در این شرایط در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

۲-۴-۵- مدلسازی شیب خاکی مسلح با ستون‌های کناری مسلح شده در حالت اشباع

در این حالت، ستون‌های سنگی کناری با پوشش ژئوگرید مسلح شدند و ستون سنگی میانی در شیب، غیر مسلح باقی ماند، نتایج تحلیل در این شرایط در شکل ۱۴ نشان داده شده است. شکل ۱۵ تنش گسیختگی شیب را در حالات مختلف مسلح کردن با ژئوگرید (تسلیح ستون وسط، تسلیح ستون‌های کناری و تسلیح ردیف ستون سنگی) با نسبت  $S/D=3$  نشان می‌دهد.

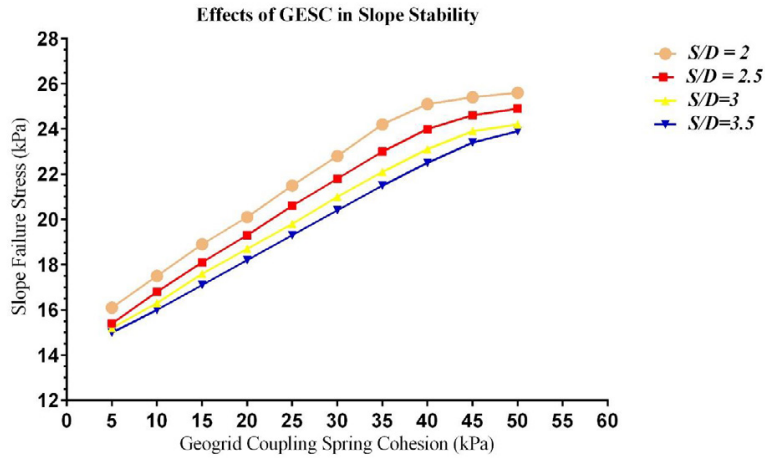
### ۳- اعتبار سنجی

در این پژوهش به منظور اعتبار سنجی نتایج، مدلسازی فیزیکی انجام شده است. برای انجام این آزمایش، ستون سنگی مسلح با ژئوگرید در وسط یک شیب ماسه‌ای قرار داده شد. پیش از انجام کار، ژئوگرید به قطر  $3/6$  سانتی‌متر و به صورت یک استوانه ساخته شده و لبه‌های آن

بیشینه در جهت  $Z$  هم  $2/5$  سانتی‌متر می‌باشد. برای یافتن تنش گسیختگی شیب، همانند قبل تاج شیب تحت بارگذاری قرار گرفت و میزان تنش گسیختگی برای این حالت (میزان تنشی که سبب ایجاد تغییر مکان در راستای  $X$  به اندازه  $10$  سانتی‌متر و در راستای  $Z$  به اندازه  $12$  سانتی‌متر می‌شود) مقدار  $14$  کیلوپاسکال به دست آمد. نتایج  $S/D$  مختلف برای ردیف ستون سنگی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

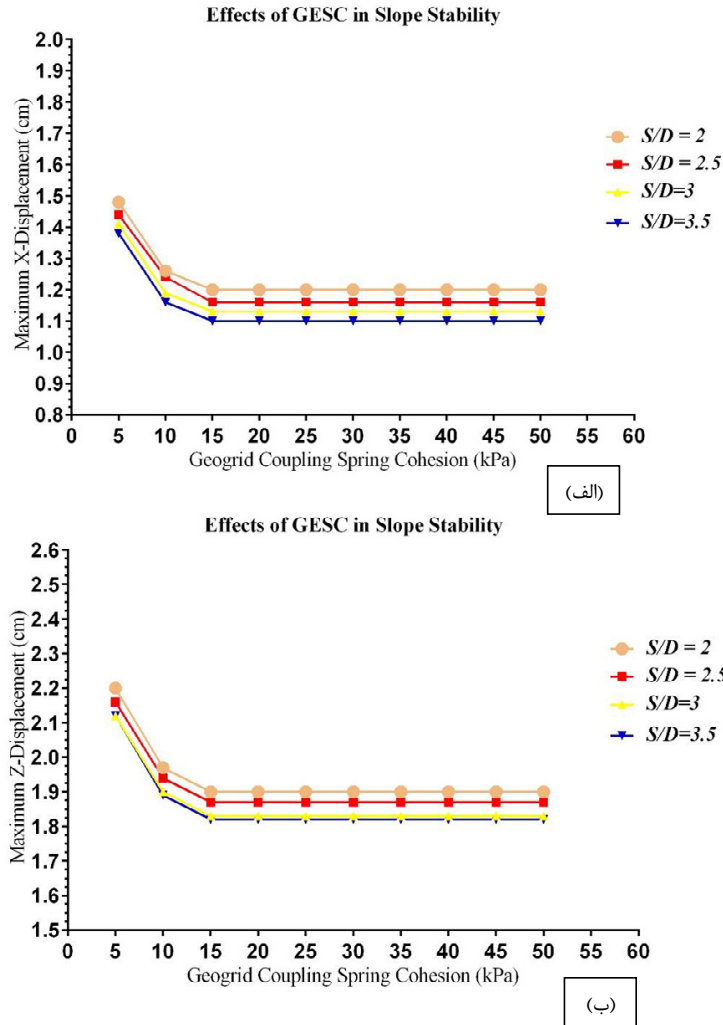
۲-۴-۳- مدلسازی شیب خاکی مسلح با ردیف ستون سنگی مسلح با ژئوگرید در حالت اشباع

در این بخش نیز انواع ژئوگرید با مشخصات متغیر با ضخامت‌های متفاوت و نسبت‌های  $S/D$  مختلف به کار گرفته شدند. برای نمونه، نتایج تحلیل برای ژئوگرید با چسبندگی فنر کوپل  $20$  کیلوپاسکال و اصطکاک فنر کوپل صفر و  $S/D=3$  نشان داد که مقادیر جابه‌جایی بیشینه در جهت  $Z$  برای این شیب  $1/1$  سانتی‌متر بود است و مقدار جابه‌جایی بیشینه در جهت  $X$  هم  $1/8$  سانتی‌متر می‌باشد. در این شرایط، مقدار تنش عامل گسیختگی در شیب  $18/7$  کیلوپاسکال به دست آمد. مقادیر تنش گسیختگی برای ژئوگرید در حالات مختلف  $S/D$  در شکل ۱۱ آورده شده است. شکل ۱۲ هم بیشینه جابه‌جایی در جهت  $X$  و  $Z$  را برای حالات مختلف  $S/D$  نشان می‌دهد.



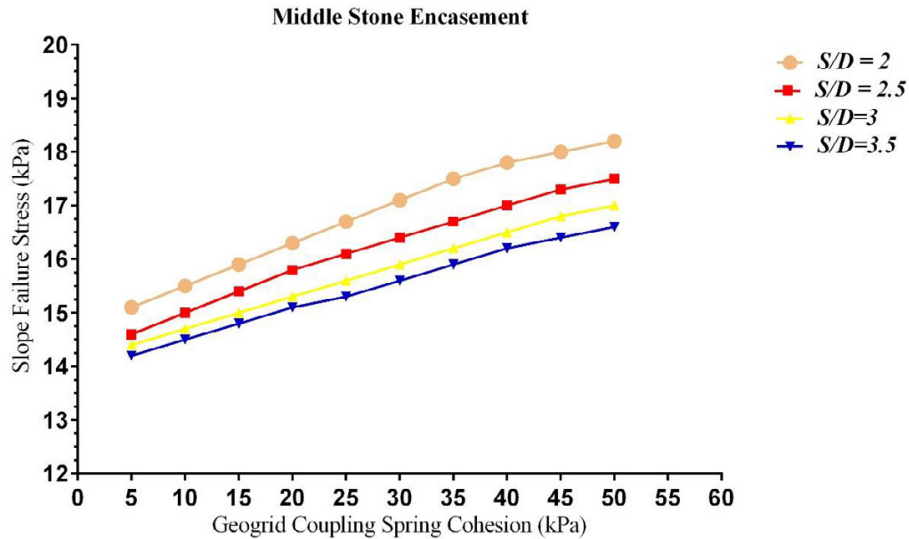
شکل ۱۱. تنش گسیختگی شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید برای نسبت‌های مختلف S/D (با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر).

Fig. 11. Failure stress in a reinforced slope using a geogrid encased stone column for different S/D ratios (stone diameter = 40 cm)



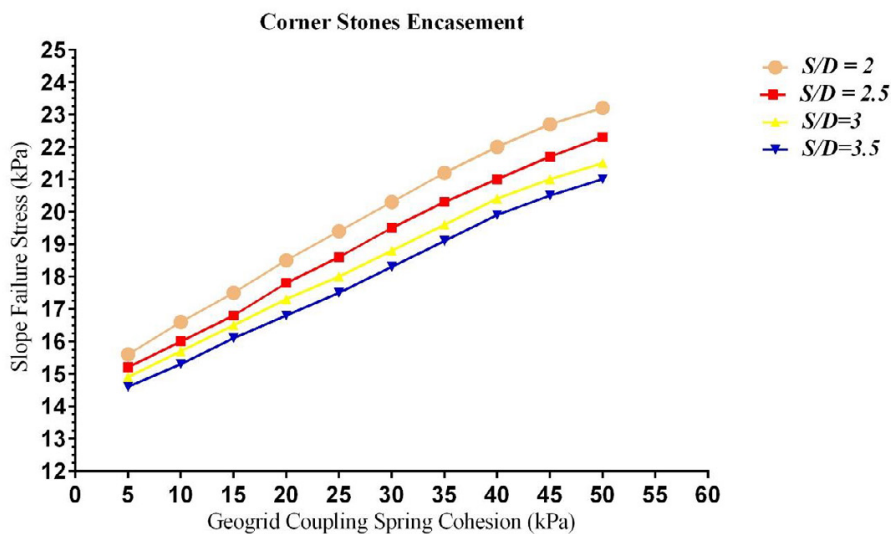
شکل ۱۲. بیشینه جابه‌جایی رخ داده در شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید و نسبت‌های مختلف S/D (با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر): (الف) بیشینه جابه‌جایی در راستای X و (ب) بیشینه جابه‌جایی در راستای Z.

Fig. 12. Maximum displacement in a reinforced slope using a geogrid encased stone column for different S/D ratios, stone diameter = 40 cm: a) maximum displacements in X direction b) maximum displacements in the Z direction



شکل ۱۳. تنش گسیختگی شیب مسلح برای نسبت‌های مختلف  $S/D$  (با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر)، در حالتی که تنها ستون سنگی میانی با ژئوگرید مسلح شده است.

Fig. 13. Failure stress in a reinforced slope using a geogrid encased stone column for different  $S/D$  ratios, stone diameter = 40 cm, only middle column reinforced with geogrid



شکل ۱۴. تنش گسیختگی شیب مسلح برای نسبت‌های مختلف  $S/D$  (با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر)، در حالتی که ستون‌های سنگی کناری با ژئوگرید مسلح شده‌اند.

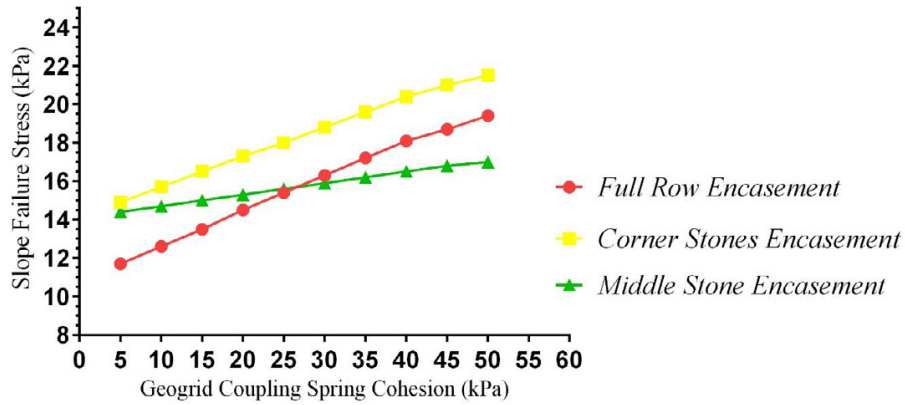
Fig. 14. Failure stress in a reinforced slope using a geogrid encased stone column for different  $S/D$  ratios, stone diameter = 40 cm, only side columns reinforced with geogrid

شیروانی، قسمت تاج آن تحت بارگذاری تدریجی قرار داده شد تا در نهایت در تنش ۱۳/۵۹ کیلوپاسکال دچار گسیختگی گردید. نکته قابل توجه آن است که سطح لغزش در ستون سنگی مسلح با ژئوگرید، در بالادست ستون متوقف شده است (شکل ۱۷).

به هم متصل شدند تا از جداسدگی جلوگیری شود. سپس ستون مسلح به ژئوگرید در وسط شیب قرار گرفت و به صورت لایه‌لایه خاکریزی شیب انجام شد (شکل ۱۶). پس از تکمیل ساخت مدل، شیروانی تحت بارش مصنوعی قرار داده شد و اشباع گردید. برای ایجاد گسیختگی در



**Effects of Geogrid Encasement ( $S/D = 3$ )**

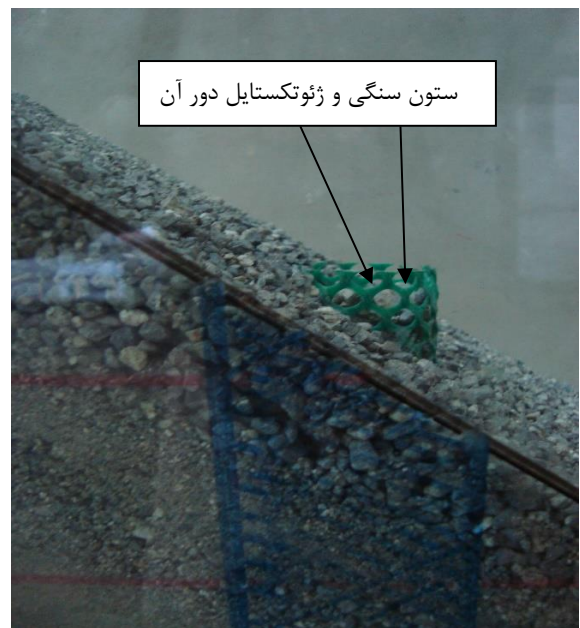


شکل ۱۵. تنش گسیختگی شیب مسلح برای حالت‌های مختلف ستون سنگی مسلح با ژئوگرید در حالت  $S/D=3$  (با قطر ستون ۴۰ سانتی‌متر).

**Fig. 15. Failure stress in a reinforced slope using different geogrid encased stone column for  $S/D=3$ , (stone diameter = 40 cm)**



الف



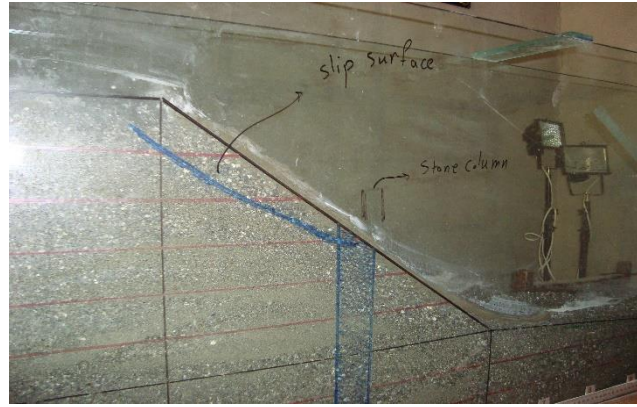
ب

شکل ۱۶. ساخت شیب ماسه‌ای مسلح با پوشش ژئوگرید در آزمایشگاه (الف) قبل از ساخت شیب، (ب) داخل شیب.

**Fig. 16. Construction of reinforced sand slope using geogrid encased stone column: a) before slope construction. b) in the slope**

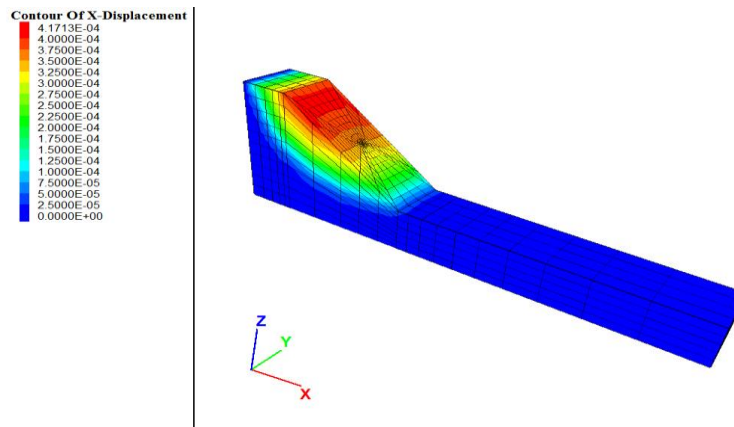
کیلوپاسکال گسیخته شد (شکل ۱۸). همان‌گونه که در شکل ۱۸ دیده می‌شود، سطح لغزش بحرانی مشابه شرایط آزمایشگاهی بوده و گوه گسیختگی در بالادست شیب به وجود آمده است که شرایط در هر دو حالت یکسان می‌باشد.

در گام بعدی شیروانی مسلح به ستون سنگی تسلیح شده با ژئوگرید در نرمافزار FLAC3D مدل‌سازی گردید تا از صحت نتایج این پژوهش اطمینان حاصل شود. پس از اعمال بار روی تاج شیب، در نهایت شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید در تنش ۱۳/۱۷



شکل ۱۷. گسیختگی شیب مسلح با ستون سنگی مسلح با ژئوگرید در تنش ۱۳/۵۹ کیلوپاسکال.

Fig. 17. Failure of the reinforced slope using geogrid encased stone column under 13.59 kPa stress



شکل ۱۸. تحلیل عددی سه بعدی شیب مدل سازی شده در آزمایشگاه، تنش گسیختگی ۱۳/۱۷ کیلوپاسکال.

Fig. 18. 3D numerical analysis of modeled experimental slope, failure stress is 13.17 kPa

وجود آمده می‌گردد. استفاده از ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید سبب تغییر مکانیسم گسیختگی ستون سنگی از گسیختگی برشی به گسیختگی لغزشی می‌شود؛ چرا که غلاف پیچیده شده به دور ستون سبب ایجاد ساختار یکپارچه‌تری نسبت به ستون سنگی معمولی (که دارای ساختار گسسته و در نتیجه گسیختگی برشی است) می‌شود. همین مساله سبب می‌گردد که مکانیسم گسیختگی ستون سنگی معمولی و ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید با هم متفاوت باشند. در این پژوهش پارامترهای مختلفی از جمله قطر ستون سنگی، چسبندگی فتر کوپل ژئوگرید، اصطکاک فتر کوپل ژئوگرید، سختی فتر کوپل ژئوگرید، نسبت‌های مختلف  $S/D$  و نحوه آرایش مسلح کننده‌ها بررسی و مورد مطالعه قرار گرفت که در ادامه به بررسی هر

با توجه به نتایج به دست آمده از این تحلیل‌ها و نزدیکی و تطابق مناسب اعداد به دست آمده از هر دو مدل‌سازی فیزیکی و عددی، می‌توان نتیجه گرفت که نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D به خوبی قادر به مدل‌سازی شرایط اشاره شده می‌باشد.

#### ۴- بحث و بررسی

در این پژوهش تحلیل‌های عددی متعددی به کمک روش تفاضل محدود سه بعدی به منظور بررسی اثر ستون‌های سنگی مسلح با غلاف ژئوگرید در بهبود پایداری و افزایش ظرفیت باربری شیب ماسه‌ای انجام شد. نتایج نشان داد وجود ستون سنگی مسلح در شیب ماسه‌ای اشباع سبب بهبود ظرفیت باربری و کاهش جابه‌جایی‌های به

یک از موارد ذکر شده پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- قطر ستون سنگی

در این پژوهش از پنج قطر ۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متر استفاده شد و رفتار ستون سنگی مسلح با ژئوگرید در حالات قطرهای مختلف بررسی گردید. بر اساس شکل ۵ می‌توان فهمید که ستون با قطر ۲۰ سانتی‌متر کمترین تحمل باربری را دارد و با افزایش چسبندگی فنر کوپل ژئوگرید، نرخ افزایش ظرفیت باربری به صورت خطی خواهد بود. همین موضوع برای ستون‌های با قطرهای ۳۰ و ۴۰ سانتی‌متری نیز صادق است، با این تفاوت که در این قطرها میزان بهبود ظرفیت باربری بیشتر است. در این بین اما رفتار ستون سنگی با ضخامت ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متر متفاوت است، ستون با قطر ۵۰ سانتی‌متر تا میزان چسبندگی فنر کوپل ۳۵ سانتی‌متر دارای رفتار تقریباً خطی است و پس از آن افزایش ظرفیت باربری در آن مشهود نخواهد بود. ستون سنگی با قطر ۶۰ سانتی‌متر تا چسبندگی فنر کوپل ۲۵ کیلوپاسکال داری رفتار خطی افزایشی است و مقدار ظرفیت باربری آن کمی بیش‌تر از ستون با قطر ۵۰ سانتی‌متر است و بعد از چسبندگی فنر کوپل ۲۵ کیلوپاسکال، نه تنها شاهد افزایش ظرفیت باربری نمی‌باشیم، بلکه مقادیر متناظر ظرفیت باربری نیز کمتر از ستون با قطر ۵۰ سانتی‌متر هستند. نکته جالب توجه در مورد این قطر آن است که در چسبندگی فنر کوپل ۲۵ کیلوپاسکال، ظرفیت باربری هر دو ستون سنگی با قطرهای ۵۰ و ۶۰ سانتی‌متری یکسان می‌باشد و از این مقدار به بعد است که سیر افزایشی ظرفیت باربری ستون سنگی با قطر ۵۰ سانتی‌متری قابل مشاهده خواهد بود؛ همچنین در چسبندگی فنر کوپل ۴۰ کیلوپاسکال برای ستون سنگی با قطر ۶۰ سانتی‌متر، مقدار ظرفیت باربری برای هر دو قطر ۴۰ و ۶۰ یکسان خواهد بود و پس از این مقدار نیز مشاهده می‌شود که عملکرد ستون سنگی با قطر ۴۰ سانتی‌متر، در حالت مسلح با ژئوگرید، بهتر از ستون با قطر ۶۰ سانتی‌متر است. این موضوع نشان می‌دهد که افزایش قطر ستون سنگی از یک مقدار مشخص، نه تنها در افزایش ظرفیت باربری نقشی ندارد، بلکه برعکس می‌تواند سبب کاهش آن در مقایسه با ستون‌های با قطر کمتر شود، و همانطور که اشاره شد رفتار ستون‌های بیشتر از یک قطر مشخص، نسبت به قطرهای کوچکتر کاملاً متفاوت خواهند شد و ظرفیت باربری عملاً برای آن‌ها ثابت می‌شود. این

موضوع نشان می‌دهد که با افزایش قطر ستون سنگی کارایی پوشش ژئوگرید رفته‌رفته کم می‌شود و ستون سنگی مسلح در قطرهای کمتر مؤثرتر واقع خواهد شد. به همین منظور برای سایر بررسی‌های انجام شده از ستون سنگی با قطر ۴۰ سانتی‌متر استفاده شده است.

نکته قابل توجه دیگر در این زمینه آن است که در مقادیر بیشینه جابه‌جایی در راستای  $x$  و  $z$  (شکل ۶) در میزان مشخصی از چسبندگی فنر کوپل ثابت می‌شود. در تمامی قطرهای مختلف، پس از رسیدن به مقدار مشخصی از چسبندگی فنر کوپل، نرخ کاهش جابه‌جایی‌ها ثابت می‌شود. در ستون با قطر ۲۰ سانتی‌متر این نرخ ثابت شدگی در چسبندگی فنر کوپل ۲۵ کیلوپاسکال رخ می‌دهد، در حالی که برای ستون با قطر ۳۰ سانتی‌متر این نرخ ثابت شدگی در چسبندگی فنر کوپل ۲۰ کیلوپاسکال رخ می‌دهد و برای ستون‌های با قطر ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر این نرخ ثابت شدگی در چسبندگی فنر کوپل ۱۵ کیلوپاسکال رخ می‌دهد و برای ستون با قطر ۶۰ سانتی‌متر این نرخ ثابت شدگی در چسبندگی فنر کوپل ۱۰ کیلوپاسکال اتفاق می‌افتد. نکته حائز اهمیت در این مسأله آن است که ژئوگرید در این حالات بدون بارگذاری را ندارد، بلکه کارایی مناسب خود را در افزایش ظرفیت باربری نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- سختی فنر کوپل

در این پژوهش از ژئوگرید با سه سختی فنر کوپل  $10^6 \times 2/3$ ،  $10^6 \times 4/6$  و  $10^6 \times 6/9$  نیوتن بر متر مکعب استفاده گردید (شکل ۷). همانطور که مشاهده می‌شود، تا چسبندگی فنر کوپل ۲۰ کیلوپاسکال، نتایج ظرفیت باربری دقیقاً بر هم منطبق هستند و پس از آن، اختلافات بسیار جزئی است و فقط در چسبندگی فنر کوپل ۴۵ و ۵۰ کیلوپاسکال است که نمودار دارای کمی اختلاف است. این موضوع نشان می‌دهد که این پارامتر تأثیری در افزایش بهبود ظرفیت باربری شیب مسلح با ژئوگرید ندارد.

#### ۴-۳- چسبندگی و اصطکاک فنر کوپل

پارامتر تأثیرگذار در افزایش ظرفیت پایداری شیب‌های مسلح با ژئوگرید چسبندگی فنر کوپل می‌باشد و اصطکاک فنر کوپل تأثیر مشخصی ندارد (شکل ۸). همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود،

حالت تغییر بازه چسبندگی فنر کوپل سبب افزایش ظرفیت باربری تا حد بسیار مطلوبی می‌شود. در هر دوی این حالات نیز همچنان نتایج  $S/D=3$  و  $S/D=3.5$  تقریباً به هم نزدیک است. شکل ۱۵ به خوبی نمایانگر این موضوع است که مسلح کردن ستون سنگی میانی به تنهایی کافی و مؤثر نمی‌باشد، اما می‌توان با مسلحسازی ستون‌های گوشه به نتایج مطلوبی رسید و در شرایطی که امکان مسلح کردن تمامی ردیف ستون سنگی فراهم نیست، می‌توان با مسلح کردن ستون‌های کناری به نتایج بسیار بهتری دست پیدا کرد.

#### ۵- نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که ستون سنگی مسلح به خوبی توانایی این را دارد که سبب بهبود ظرفیت باربری شیب ماسه‌ای در حالت اشباع شود. بیشینه تغییر مکان‌های به وجود آمده در شیب ماسه‌ای اشباع، وسط شیب بوده است که همین موضوع اثباتی بر این مدعا است که باید ستون سنگی را در وسط شیب قرار داد. در حالت شیب مسلح با ستون سنگی مسلح، با افزایش چسبندگی فنر کوپل غلاف پیچیده شده به دور ستون، ظرفیت باربری افزایش می‌یابد و این افزایش به صورت خطی می‌باشد (این بدان معنی است که استفاده از ستون سنگی مسلح با پوشش ژئوگرید، می‌تواند ظرفیت باربری شیب خاکی مسلح با ستون سنگی معمولی را بسته به نوع مشخصات ژئوگرید، تا  $1/8$  برابر افزایش دهد). پارامترهای دیگری که در این پژوهش به عنوان متغیر به کار رفتند، نشان دادند که تأثیری بر روی افزایش ظرفیت باربری نخواهند داشت (یعنی تغییرات اصطکاک فنر کوپل و سختی فنر کوپل عملاً بی تأثیر تلقی می‌شوند). نکته مهم دیگر در این پژوهش آن است که نتایج تحلیل‌ها برای  $S/D=3$  و  $S/D=3.5$  نسبتاً به هم نزدیک است، به همین علت در حالتی که خواهیم فاصله بین ستون‌ها را تعیین کنیم، از آنجایی که این دو مقدار به هم نزدیک هستند، می‌توان از منظر اقتصادی،  $S/D=3.5$  را انتخاب کرد. موضوع دیگر آنکه، مسلح کردن ستون سنگی میانی کارساز و مفید نخواهد بود و توصیه می‌شود در حالتی که نتوان کل ردیف ستون سنگی را مسلح کرد، ستون‌های کناری را تسلیح کرد تا به نتایج مطلوب‌تری دست یافت.

افزایش اصطکاک فنر کوپل، تأثیری روی افزایش پایداری به صورت چشمگیر نداشته ولی با افزایش چسبندگی فنر کوپل ظرفیت باربری به صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. همانطور که در شکل ۹ نیز دیده می‌شود، پس از رسیدن به چسبندگی فنر کوپل ۱۵ کیلوپاسکال، روند کاهش بیشینه جابه‌جایی‌های در راستای  $x$  و  $z$  در حالت اشباع (و بدون اعمال بار خارجی به تاج شیب) متوقف شده و پس از این مقدار، رفتار دارای تغییرات خطی بوده، درحالی‌که در حین بارگذاری، کارایی مقادیر بیشتر چسبندگی فنر کوپل کاملاً مشهود است.

#### ۴-۴ تغییرات نسبت $S/D$

در این پژوهش میزان  $S/D$  از ۲ تا  $3/5$  تغییر کرده است تا اثر این پارامتر بر رفتار شیب مسلح با ستون سنگی مسلح بررسی شود. همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، افزایش ظرفیت باربری برای ردیف ستون سنگی با  $S/D=2$  بیش از سه حالت دیگر است. همچنین در حالت  $S/D=3$  و  $S/D=3.5$  مقادیر به دست آمده نزدیکی بیشتری به هم دارند و این نشان می‌دهد که افزایش فاصله ستون‌ها از هم تا میزان مشخص، دارای اثرات تقریباً یکسان بر بهبود ظرفیت باربری شیب مسلح است. همین موضوع در مورد جابه‌جایی در راستای  $x$  و  $z$  نیز مشاهده می‌شود (شکل ۱۲). همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است، جابه‌جایی در راستای  $z$  برای هر دو حالت  $S/D=3$  و  $S/D=3.5$  تقریباً بر هم منطبق می‌باشد.

#### ۴-۵ اثر آرایش مسلح کننده

به منظور بررسی اثر مسلح کردن ستون‌ها، نحوه آرایش آن‌ها (یک بار مسلح کردن ستون وسط و بار دیگر مسلح کردن ستون‌های کناری) نیز بررسی شد و مطابق شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که مسلح کردن ستون میانی به تنهایی خیلی مؤثر و کارساز نمی‌باشد و تغییر بازه چسبندگی فنر کوپل نیز سبب افزایش چشمگیر ظرفیت باربری در این حالت نخواهد شد. اما در حالتی که ستون‌های کناری مسلح شوند، نتیجه متفاوت خواهد بود و اثرات غلاف به مانند حالت مسلح کردن ردیف ستون سنگی مؤثر و کارآمد است. شکل ۱۴ این موضوع را به خوبی نشان می‌دهد و همانطور که مشاهده می‌شود، در این

- effects." *International Journal of Geomechanics* **2**(2): 135–151
- [12] Adalier, K. E., A. Meneses, J. and Baez, J.I. (2003). "Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **23**: 571–584
- [13] Connor, S. S. G., A.G. (2000). A timely solution for the Nojoqi Grade landslide. Repair US 101 South of Buellton. 51st Annual highway geology symposium, Seattle.
- [14] Christoulas, S. G., C. and Tsiambaos, G. (1997). "Stabilization of embankment foundations by using stone columns." *Geotechnical and Geological Engineering* **15**(3): 247–258
- [15] Marandi, S. M. A., M. and Bahrami, M. (2016). "Uncertainty analysis of embankment built on stone column improved soft soil using fuzzy logic  $\alpha$ -cut technique." *Computers and Geotechnics* **75**: 135-144.
- [16] Madhav, M. R. a. M., N. (1994). Soil improvement panel report on stone columns. Proceedings of the 13th international conference on soil mechanics and foundation Engineering.
- [17] Sanaeirad, A., and Jalalvandi, M. (2015). "Application of genetic algorithm for length design of reinforcement in reinforced soil slopes." *AmirKabir Journal of Science & Research Civil and Environmental Engineering (ASJR-CEE)* **47**(3): 53-60.
- [18] Jafarian, Y., and Lashgari, A. (2017). "Effect of slip width on the permanent displacement of earth slopes." *AmirKabir Journal of Science & Research Civil and Environmental Engineering (ASJR-CEE)* **49**(1): 81-87.
- [19] Salmasi, F. H. D., A. and Nourozi Sarkarabad, R. (2018). "Investigation of performance of horizontal drains in increasing slope stability in intense rain conditions by numerical simulation." *AmirKabir Journal of Science & Research Civil and Environmental Engineering (ASJR-CEE)*.
- [20] McKenna, J. M. E., W.A. and Wolstenholme, D.R. (1975). "Performance of an embankment supported
- [1] Abramson, L. W., Lee, T. , Sharma, S. , Boyce, G. (2002). *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons, John Wiley & Sons.
- [2] Almeida, S. S. a. M., M (2013). *Design and Performance of Embankments on Very Soft Soils*, Taylor and Francis.
- [3] Hughes, J. M. O. a. W., N.J. (1974). "Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns." *Ground Engineering* **7**(3): 42-49.
- [4] Hughes, J. M. O. W., N.J. and Greenwood, D.A. (1975). "A field trial of the reinforcing effect of a stone column in soil." *Geotechnique* **25**(1): 31–44
- [5] Madhav, M. R. a. V., P.P. (1978). "Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile." *Canadian Geotechnical Journal* **15**(4): 605–609
- [6] Aboshi, H. I., E. Harada, K. and Emoki, M. (1979). The composer—A method to improve the characteristics of soft clays by inclusion of large diameter sand columns. *International Conference on Soil Reinforcement*.
- [7] Barksdale, R. D. a. B., R.C. (1983). "Design and construction of stone columns." *Federal Highway Administration*.
- [8] Ambily, A. P. G., S.R. (2007). "Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **133**(4): 405–415.
- [9] Gueguin, M. H., G. and Buhan, P. (2015). "Stability analysis of homogenized stone column reinforced foundations using a numerical yeild desing approach." *Computers and Geotechnics* **64**: 10-19
- [10] Castro, J. C., A. Costa, A. Ganizal, J. and Sagasetta, C. (2013). "Consolidation and deformation around stone columns: Comparison of theoretical and laboratory results." *Computers and Geotechnics* **49**: 326-337
- [11] Han, J. a. Y., S.L. (2002). "A theoretical solution for consolidation rates of stone column-reinforced foundation accounting for smear and well resistance



- embankments.” *Computers and Geotechnics* **61**: 13-23
- [29] Sharma, R. S. K., B.R.P. and Nagendra, G. (2004). “Compressive load response of granular piles reinforced with geogrids.” *Canadian Geotechnical Journal* **41**(1): 187–192
- [30] Gniel, J. a. B., A. (2009). “Improvement of soft soils using geogrid encased stone columns.” *Geotextiles and Geomembranes* **27**: 167–175
- [31] Fattah, M. Y. a. M. Q. G. (2012). “Finite Element Analysis of Geogrid Encased Stone Columns.” *Geotechnical and Geological Engineering* **30**: 713–726
- [32] Das, B. M. *Advanced Soil Mechanics*, Taylor and Francis.
- [33] FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimension) user’s guide. Itasca Co.
- [34] Khabbazian, M. M., C.L. and Kaliakin, V. (2014). “Column supported embankments with geosynthetic encased columns: Parametric study.” *Transportation Infrastructure Geotechnology* **1**: 301-325
- [35] Hajiazizi, M. Nasiri, M. and Mazaheri, A.R. (2018). “The Effect of Fixed Piles Tip on Stabilization of Earth Slopes.” *Scientia Iranica* **25**(5): 2550-2560.
- [36] Hajiazizi, M. a. N., M. (2018). “Experimental and Numerical comparison between reinforced earth slope using ordinary stone column and rigid stone column.” *International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE)* **52**(1): 23-30.
- [37] Hajiazizi, M. a. N., M. (2016). “Experimental Studies of Cohesion Effect on Stability of Soil Slopes Reinforced with Stone Column.” *Modares Civil Engineering Journal (M.C.E.J.)* **16**(5): 65-78.
- by stone columns in soft ground.” *Geotechnique* **25**(1): 51–59
- [21] Rathgeb, E. a. K., C. (1975). “Some applications of the vibro-replacement process.” *Geotechnique* **25**(1): 45–50
- [22] Datye, K. R. a. N., S.S. (1981). Design approach and field control for stone columns. Proc. of 10th Int. Conf. on SMFE, Stockholm.
- [23] Bergado, D. T. P., B. Sampaco, C.L. and Miura, N. (1988). Reinforcement of soft Bangkok clay using granular piles. Int. Geotech. Symp. on Theory and Practice of Earth Reinforcement, Kyushu, Japan.
- [24] Cooper, M. R. a. R., A.N. (1999). Stone column support for an embankment on deep alluvial soils. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering.
- [25] Bergado, D. T. S., N. Sim, S.H. Panichayatum, B. Sampaco, C.L. Balasubramaniam, A.S. (1990). “Improvement of soft Bangkok clay using vertical geotextile band drains compared with granular piles.” *Geotextiles and Geomembranes* **9**(3): 203–231
- [26] Vekli, M. A., M. Ikszler, SB. and Calik, U. (2012). “Experimental and numerical investigation of slope stabilization by stone columns.” *Natural Hazards* **64**: 797-820
- [27] Zhang, C. J., G. Liu, X. and Buzzi, O. (2016). “Arching in geogrid-reinforced pile-supported embankments over silty clay of medium compressibility: Field data and analytical solution.” *Computers and Geotechnics* **77**(11-25).
- [28] Lai, H., J. Zheng, J.J. Zhang, J. Zhang, R.J. and Cui, L. (2014). “DEM analysis of “soil”-arching within geogrid-reinforced and unreinforced pile-supported

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Hajiazizi, M. Nasiri, 3D Numerical Stability Investigation of Sand Slope Reinforced Using Geogrid Encased Stone Column, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(3) (2020) 531-550.

DOI: [10.22060/ceej.2018.14678.5718](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.14678.5718)



