

تحلیل قابلیت اطمینان پایداری استاتیکی دیوارهای خاک مسلح

ناصر شابختی^۱، سعید غفارپور جهرمی^{۲*} و ربیبین احمدی^۳

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۳ دانش آموخته کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸-۰۲-۲۷

بازنگری: ۱۳۹۸-۰۳-۲۵

پذیرش: ۱۳۹۸-۰۴-۰۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۴-۱۹

کلمات کلیدی:

خاک مسلح

پایداری

عدم قطعیت

قابلیت اطمینان

آنالیز حساسیت

خلاصه: در این پژوهش تحلیل قابلیت اطمینان پایداری داخلی و خارجی دیوارهای حائل خاک مسلح تحت شرایط بارگذاری استاتیکی مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثر متغیرهای مختلف نظیر زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص خاک، مقاومت مسلح کننده‌ها، زاویه اصطکاک کف دیوار و سربار وارده با فرض عدم قطعیت و همچنین بررسی همبستگی بین آنها بر پایداری داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. پایداری خارجی مورد بررسی در این پژوهش شامل لغزش، واژگونی و فشار پنجه و پایداری داخلی شامل گسیختگی و بیرون کشیدگی مسلح کننده می‌باشند. همچنین آنالیز حساسیت روی متغیرهای تصادفی مؤثر نیز انجام شده است. بدین منظور از تحلیل مرتبه اول قابلیت اطمینان (FORM) استفاده شده و اعتبارسنجی آن نیز با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) انجام شده است. بررسی شاخص قابلیت اطمینان در موده‌های خرابی مختلف بیانگر تاثیر مهم و شاخص زاویه اصطکاک داخلی بر پایداری دیوار در مقایسه با دیگر متغیرها است. همچنین مود خرابی لغزش بعنوان بحرانی‌ترین خرابی محتمل در این بررسی معرفی شده است.

۱- مقدمه

استفاده از خاک به عنوان یکی از پرکاربردترین و درعین حال پیچیده‌ترین مصالح مورد استفاده بشر از دیرباز مورد توجه قرار داشته و همواره محققان در تلاش برای بهبود مشخصات مکانیکی آن با استفاده از مسلح کننده‌های مختلف می‌باشند که مهم‌ترین آنها استفاده از انواع ژئوسنتتیک‌ها می‌باشد. مسلح کننده‌ها معمولاً به شکل نوار، شبکه، میله، لیاف و یا ورقه‌هایی می‌باشند که نقش اصلی آن‌ها تأمین مقاومت در برابر تنش‌های کششی در خاک است. خاک مسلح نخستین بار توسط هانری ویدال فرانسوی در سال ۱۹۶۳ معرفی شد [۱]. در شروع دهه ۱۹۷۰ اشتیاق برای یافتن روش‌های جدید مسلح نمودن خاک توسعه یافت بطوریکه در سال ۱۹۷۵

شرکت خاک مسلح (REC) امتیاز ابداع نوارهای تسلیح دنداندار را به ثبت رساند [۱]. استفاده از ژئوسنتتیک بعنوان مصالحی که دارای دوام و پایایی زیاد هستند اولین بار توسط فرانک در سال ۱۹۷۷ معرفی شد [۱]. با برگزاری اولین کنفرانس مسلح سازی خاک با مصالح پلیمری در سال ۱۹۸۴، دستورالعمل طراحی دیوار خاک مسلح توسط اداره فدرال آمریکا ارائه گردید [۲]. در کشور ما اولین سازه‌های خاک مسلح در سال ۱۳۵۵ اجرا شدند که با استقبال و توسعه زیادی تا کنون روبرو شده است.

در سال‌های اخیر با توجه به برتری قابل توجه تحلیل احتمالاتی در پوشش دادن عدم قطعیت‌ها نسبت به تحلیل قطعی، تحقیقات زیادی در مورد به‌کارگیری این روش‌ها جهت تحلیل سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر سد، شیروانی خاکی، پی، دیوار حائل، خاک مسلح و تونل‌ها صورت گرفته است. تیوبات (۱۹۸۲) از اولین پژوهشگرانی بود که

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: saeed_ghf@sru.ac.ir



مکانیزم‌های خرابی احتمالی این تحلیل، لغزش، واژگونی و فشار پنجه (ظرفیت باربری) در نظر گرفته شدند که برای حفظ پایداری در سه حالت احتمال خرابی، رسیدن به شاخص قابلیت اطمینان معادل ۳ برای مقادیر مختلف ضریب تغییرات (COV)، زاویه اصطکاک خاکریز، خاک زیر پی، سربار، چسبندگی و شتاب افقی لرزه‌ای نیاز می‌باشند [۸]. آنها در ادامه مطالعات خود به این نتایج دست یافتند که مقادیر ضرایب مقاومت در خرابی لغزش، واژگونی و ظرفیت باربری متفاوت است. می‌توان گفت که میانگین مقدار زاویه اصطکاک تأثیر ناچیزی بر ضرایب مقاومت دارد اما تأثیر ضریب تغییرات زاویه اصطکاک برای تمامی حالات پایداری دیوار قابل توجه است [۹].

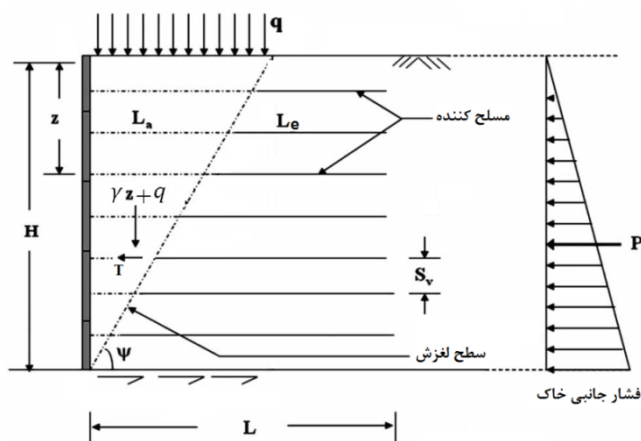
جینگیو و همکارش در سال ۲۰۱۶ با انجام تحقیقی پایداری داخلی و خارجی دیوارهای خاک مسلح را بر اساس روش قابلیت اطمینان مورد ارزیابی قرار دادند. آنها از روش تخمین نقطه (PEM) و مونت کارلو (MC) جهت محاسبه شاخص قابلیت اطمینان استفاده کردند که نشان داد پایداری داخلی مؤثرترین توابع حدی هستند. متغیرهای تصادفی در این تحقیق زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک، اصطکاک کف و مقاومت کششی مسلح کننده لحاظ شدند [۱۰]. پایداری داخلی و خارجی دیوارهای خاک مسلح صرفاً در حالت بارگذاری استاتیکی توسط میشل در سال ۲۰۱۷ مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج بررسی وی نشان داد زاویه اصطکاک داخلی مؤثرترین پارامتر و دیگر متغیرهای تصادفی وزن مخصوص خاک، سربار وارده، مقاومت کششی مسلح کننده و اصطکاک کف دیوار تأثیر کمتری بر پایداری دارند [۱۱].

با بررسی تحقیقات گذشته مشخص است که ارزیابی تأثیر متغیرهای مختلف بر شاخص قابلیت اطمینان دیوارهای خاک مسلح همچنان مورد علاقه محققان مختلف قرار دارد. لذا در این تحقیق نیز با بررسی متغیرهای مختلف نظیر زاویه اصطکاک داخلی خاک، وزن مخصوص خاک، مقاومت مسلح کننده، سربار و اصطکاک کف دیوار بعنوان متغیرهای مسئله به تحلیل قابلیت اطمینان دیوار خاک مسلح پرداخته می‌شود. بعلاوه در تحقیقات گذشته عمدتاً برای ارزیابی قابلیت اطمینان از روش مونت کارلو استفاده شده است که نتایج آن نیز بسیار زمان‌بر است. در سال‌های اخیر روش‌های قابلیت اطمینان مرتبه اول (FORM) و مرتبه دوم (SORM^۶) برای انواع توابع

از روش مونت کارلو (MC^۱) جهت پایداری شیروانی خاکی استفاده نمود. وی از روش بیشاب برای تحلیل شیروانی خاک مسلح استفاده و متغیرهای ورودی را با تابع توزیع نرمال و لوگ نرمال تعریف کرد. وی نشان داد چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک پارامترهای مؤثر در این ارزیابی هستند [۳]. گنسک و همکارش (۱۹۹۱) با استفاده از روش هاسوفر و لیند قابلیت اطمینان پایداری داخلی دیوارهای مسلح شده با ژئوتکستایل را مورد بررسی قراردادند [۴]. بیونگ و همکارش (۱۹۹۸) با استفاده از روش قابلیت اطمینان گشتاور دوم مرتبه اول (FOSM^۲) پایداری داخلی دیوارهای خاک مسلح را مورد ارزیابی قرار دادند که در این تحقیق از بین متغیرهای مختلف زاویه اصطکاک داخلی را به عنوان مؤثرترین پارامتر معرفی شد. روش مرتبه اول قابلیت اطمینان (FORM^۲) توسط محققان به روش گشتاور دوم مرتبه اول (FOSM) اصلاح شده نیز موسوم می‌باشد که می‌توان از این روش نتایج بهتری با تعریف تابع توزیع احتمال متغیرهای تصادفی به صورت غیرنرمال نیز در حل مسائل بهره جست [۵]. چلمیرانونت و همکارش (۲۰۰۴) پایداری داخلی را با استفاده از روش ساده بیشاب و شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS^۴) تحلیل کردند. با این حال، تلاش آن‌ها بر اساس این فرض بنا نهاده شده است که حالت‌های مختلف خرابی به‌طور مستقل هستند [۶]. سید و همکارش (۲۰۰۸) تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی دیوارهای خاک مسلح را با استفاده از سه روش مرتبه اول قابلیت اطمینان (FORM)، گشتاور دوم مرتبه اول (FOSM) و روش تخمین نقطه (PEM^۵) انجام دادند که نتایج آنها نشان داد که زاویه اصطکاک داخلی خاک مهم‌ترین متغیر تصادفی است که بر پایداری داخلی و خارجی دیوار خاک مسلح اثر می‌گذارد. در این تحقیق زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص خاک، اصطکاک کف دیوار و مقاومت مسلح کننده به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته و همبستگی بین پارامترها را نیز تأثیر داده‌اند [۷].

باشا و همکارانش تحقیقات زیادی روی تحلیل قابلیت اطمینان دیوارهای خاک مسلح انجام دادند [۸]. آنها در یکی از مقالات خود در سال ۲۰۱۳ از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان استفاده تا محدوده‌های مناسب برای مقادیر ضرایب بار و مقاومت تعیین کنند.

- 1 Monte Carlo
- 2 First Order Second Moment
- 3 First Order Reliability Method
- 4 Monte Carlo Simulation
- 5 Point Estimation Method



شکل ۱. کنترل پایداری دیوار خاک مسلح

Fig. 1. Controlling the stability of the reinforced soil wall

۱/۵ استفاده شود. در این پژوهش ظرفیت باربری خاک به روش وسیک، مسلح کننده از نوع ژئوتکستایل و خاکریز نیز دانه‌ای در نظر گرفته شده است. در روابط جدول ۱ فاکتور ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، γ وزن مخصوص، δ ضریب اصطکاک کف دیوار، H ارتفاع، L طول مسلح کننده، k_a ضریب فشار محرک رانکین، T نیروی کششی قابل تحمل ژئوتکستایل، N_γ فاکتور ظرفیت باربری پی، S_v سطح موثر ژئوتکستایل در عرض واحد، q سربار، σ_v تنش قائم و L_e طول موثر ژئوتکستایل می‌باشد.

۳- قابلیت اطمینان در طراحی سازه‌ها

روش‌های آنالیز قابلیت اطمینان به‌طور کلی به سه دسته روش‌های تحلیلی، روش‌های اولین و دومین مرتبه قابلیت اطمینان و همچنین روش‌های شبیه‌سازی تقسیم می‌شوند. در طراحی‌ها باید تعادل بین ایمنی و هزینه ساخت مدنظر گرفته شود. فقط در صورتی می‌توان طراحی دقیق داشت که پیش‌بینی دقیقی از عملکرد آنها داشته باشیم اما از آنجا که در واقعیت چنین دقت پیش‌بینی قابل دسترسی نیست، باید حاشیه امنیت در نظر گرفته شود. این حاشیه اطمینان اغلب در قالب افزایش ضریب اطمینان لحاظ می‌گردد. افزایش ضریب اطمینان به معنای طراحی محافظه‌کارانه‌تر و هزینه‌های بیشتر است. لذا ضریب اطمینان نمی‌تواند معیار ایده آلی برای پروژه‌هایی با درجه اهمیت بالا تلقی گردد. چون ضریب اطمینان به صورت یک عدد ثابت بیان می‌شود و هیچ‌گونه رواداری موجود در مسائل اجرائی و همچنین عدم قطعیت‌های ذاتی موجود در خاک را لحاظ نمی‌نماید.

شرایط حدی غیرخطی و متغیرهای تصادفی غیرنرمال توسط محققان مختلف استفاده شده است و در این تحقیق نیز بعنوان نوآوری از یک روش توسعه یافته قابلیت اطمینان با شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) به ارزیابی قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. همچنین تغییرات مقادیر میانگین، همبستگی و ضریب تغییرات متغیرهای مختلف نیز مورد ارزیابی قرار گرفته تا مؤثرترین متغیر با توجه به آنالیز حساسیت محاسبه شود. در این پژوهش تحلیل و محاسبات با نوشتن یک برنامه محاسباتی در نرم‌افزارهای متلب (Matlab) و RT بر مبنای نظریه‌های قابلیت اطمینان اقدام شده است.

۲- پایداری خارجی و داخلی دیوار خاک مسلح در حالت استاتیکی

پایداری دیوارهای خاک مسلح شامل کنترل پایداری خارجی و پایداری داخلی است که در این تحقیق بررسی این موضوع به دستورالعمل FHWA و همچنین نشریه شماره ۳۰۸ سازمان برنامه و بودجه رجوع داده شده است [۱۲ و ۱۳]. روابط تحلیلی مورد استفاده در بررسی پایداری خارجی و پایداری داخلی در شکل ۱ نشان داده و در جدول ۱ آمده است. دستورالعمل FHWA و نشریه شماره ۳۰۸ توصیه کرده‌اند که ضریب اطمینان در حالت استاتیکی برای کنترل پایداری لغزش و واژگونی باید به ترتیب ۱/۵ و ۲ باشد و همچنین حداقل ضریب اطمینان برای کنترل ظرفیت باربری پنجه دیوار، بین ۲ و ۲/۵ توصیه شده است. برای کنترل گسیختگی و بیرون کشیدگی مسلح کننده نیز پیشنهاد شده از ضریب اطمینان

جدول ۱. روابط تحلیلی مورد استفاده در بررسی پایداری داخلی و خارجی دیوار خاک مسلح [۱۲]

Table 1. Analytical relationships used to study the internal and external stability of retained walls [12]

$f_s = \frac{\tan \delta (\gamma HL + qL)}{k_a \gamma \frac{H^2}{2} + k_a qH}$	(۱)	کنترل لغزش	پایداری خارجی
$f_s = \frac{\gamma \frac{HL^2}{2} + q \frac{L^2}{2}}{k_a \gamma \frac{H^3}{6} + k_a q \frac{H^2}{2}}$	(۲)	کنترل واژگونی	
$f_s = \frac{q_{ult}}{\sigma_v} = \frac{0.5\gamma LN_\gamma}{\gamma H + q}$	(۳)	کنترل فشار پنجه دیوار	
$f_s = \frac{T}{\sigma_v k_a S_v}$	(۴)	کنترل پارگی مسلح کننده	پایداری داخلی
$f_s = \frac{2 \tan \mu (\gamma z + q) L_e}{\sigma_v k_a S_v}$	(۵)	کنترل بیرون کشیدگی مسلح کننده	
$k_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$	(۶)	ضریب فشار محرک رانکین	

می‌باشد. ضرایب همبستگی را می‌توان به صورت تجربی از روابط آماری بصورت زیر محاسبه نمود [۱۴].

$$\rho_{XY} = \frac{CoV(X, Y)}{\sqrt{\sigma^2(X) \sigma^2(Y)}} \quad -1 \leq \rho_{xy} \leq +1 \quad (7)$$

در رابطه بالا $Cov(X, Y)$ کوواریانس بین دو متغیر تصادفی است که معیاری از وابستگی بین دو متغیر X و Y بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است [۱۴].

$$CoV(X, Y) = E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)] \quad (8)$$

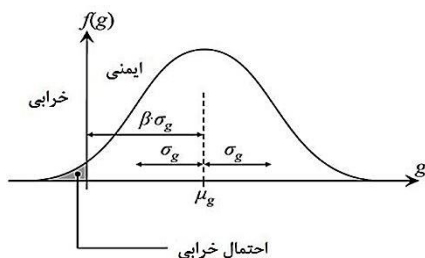
در مسائل قابلیت اطمینان کمی کردن مقدار اعتمادپذیری توسط "شاخص قابلیت اطمینان"^۳ یا شاخص اعتمادپذیری صورت می‌گیرد. شاخص اعتمادپذیری (β) در ساده‌ترین قالب به صورت نسبت میانگین (μ_g) و انحراف معیار (σ_g) برای تابع شرایط حدی (g) بیان می‌شود که به آن شاخص قابلیت اطمینان کورنل نیز می‌گویند (رابطه ۹) [۱۴].

$$\beta_c = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (9)$$

در مسائل ژئوتکنیک، نامعینی و تغییرپذیری ذاتی در پارامترهای مقاومتی خاک به شکل محسوسی دیده می‌شوند و استفاده از تحلیل قطعی با استفاده از پارامترهای قطعی چندان منطقی به نظر نمی‌رسد. لذا استفاده از متغیرهای تصادفی و روش‌های قابلیت اطمینان، بهترین شیوه برای بیان این پارامترها است. برای تحلیل‌های احتمالاتی باید عدم قطعیت موجود در پارامترهای موجود را نیز در نظر گرفت. این عدم قطعیت‌ها به وسیله متغیرهای تصادفی با توابع توزیع احتمالاتی خاص و همچنین پارامترهای آماری شامل مقادیر میانگین، انحراف معیار و چولگی بیان می‌گردند. خاک و سنگ از جمله محیط‌های غیرهمگن و ناهمسان هستند که عموماً دارای تعدادی متغیر هندسی، مکانیکی و مقاومتی می‌باشند. انتخاب پارامترهای مناسب در حوزه مهندسی ژئوتکنیک به دلیل عدم قطعیت‌های موجود، همواره یکی از چالش‌های مهندسان طراح بوده است. عدم قطعیت در این حوزه به دو دسته ذاتی^۱ و شناختی^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۶].

در مهندسی ژئوتکنیک همبستگی بین متغیرهای تصادفی امری انکارناپذیر است و صرف‌نظر کردن از همبستگی بین متغیرهای تصادفی در خاک می‌تواند بر جواب مسئله تاثیرگذار باشد. ضریب همبستگی از جمله پارامترهای مهم در محاسبات قابلیت اطمینان

1 Inherent Uncertainty
2 Epistemic Uncertainty



شکل ۲. چگالی احتمال برای حالت حدی [۱۴]
Fig. 2. Probability density for the limit state [14]

جدول ۲. توابع حدی مورد استفاده در بررسی پایداری داخلی و خارجی دیوار خاک مسلح [۱۲]
Table 2. Limit functions used to study the internal and external stability of retained wall [12]

$g_1 = R - Q = \tan \delta (\gamma HL + qL) - (k_a \gamma \frac{H^2}{2} + k_a qH)$	(۱۳)	تابع حدی لغزش دیوار	توابع حدی پایداری خارجی
$g_2 = R - Q = \left(\gamma \frac{HL^2}{2} + q \frac{L^2}{2} \right) - \left(k_a \gamma \frac{H^3}{6} + k_a q \frac{H^2}{2} \right)$	(۱۴)	تابع حدی واژگونی دیوار	
$g_3 = R - Q = 0.5 \gamma LN_\gamma - \gamma H + q$	(۱۵)	تابع حدی فشار پنجه دیوار	
$g_4 = R - Q = T - \sigma_v k_d V$	(۱۶)	تابع حدی گسیختگی مسلح کننده	توابع حدی پایداری داخلی
$g_5 = R - Q = 2 \tan \mu (\gamma z + q) L_e - \sigma_v k_d V$	(۱۷)	تابع حدی بیرون کشش مسلح کننده	

تابع به صورت زیر بیان می شود.

$$g(R, Q) = R - Q \quad (11)$$

در این رابطه R پارامتر مقاومت یا ظرفیت و Q نیز پارامتر بار می باشند. در حل مسائل ممکن است سه حالت زیر برای تابع حدی رخ بدهد که با حدود سلامتی، حدی و خرابی بیان می گردند.

$$\begin{cases} g(R, Q) = R - Q > 0 & \text{حالت سلامتی} \\ g(R, Q) = R - Q = 0 & \text{حالت حدی} \\ g(R, Q) = R - Q < 0 & \text{حالت خرابی} \end{cases}$$

بدین ترتیب با توجه به مفاهیم اشاره شده، در این پژوهش توابع حدی و نوع خرابی برای پایداری داخلی و خارجی دیوارهای خاک مسلح به تفکیک در جدول ۲ ارائه شده است. احتمال خرابی P_f نیز به صورت زیر قابل بیان است [۱۶].

از آنجایی که این شاخص به شکل تابع شرایط حدی وابسته است توسط هاسوفر و لیند اصلاح و به عنوان کوچک ترین فاصله از مبدأ مختصات تا تابع شرایط حدی در فضای استاندارد نرمال تعریف شد [۱۵]. شکل ۲ توضیح هندسی از شاخص قابلیت اطمینان در فضای یک بعدی را نشان می دهد. ایده اصلی محاسبه شاخص قابلیت اطمینان فاصله از محل اندازه گیری میانگین تا سطح حالت حدی است که برابر است با اختلاف انحراف معیار تا تابع حدی که هرچه این فاصله بیشتر باشد، سازه ایمن تر خواهد بود [۱۴].

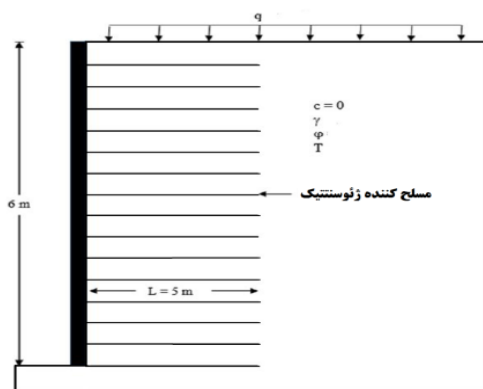
$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_Q}{\sqrt{(\sigma_R^2 + \sigma_Q^2)}} \quad (10)$$

۴- تابع حالت حدی پایداری داخلی و خارجی

با تعریف تابع حالت حدی در قابلیت اطمینان می توان محدوده بین خرابی و سلامتی را بیان کرد و در حقیقت نشان داد مرز بین عملکرد مطلوب و نامطلوب در شرایط خاص سازه چگونه است. این

جدول ۳. شاخص عملکرد مورد انتظار بر اساس شاخص قابلیت اطمینان [۱۷]
Table 3. Expected Performance Index Based on Reliability Index [17]

احتمال خرابی	شاخص قابلیت اطمینان (β)	عملکرد مورد انتظار
۰/۱۶	۱	خطرناک
۰/۰۷	۱/۵	نامناسب
۰/۰۲۳	۲	بد
۰/۰۰۶	۲/۵	کمتر از متوسط
۰/۰۰۱	۳	بیشتر از متوسط
۰/۰۰۰۰۳	۴	خوب
۰/۰۰۰۰۰۰۳	۵	عالی



شکل ۳. هندسه دیوار خاک مسلح
Fig. 3. Geometry of armed soil wall

$$P_f = P(R \leq Q) \quad (12)$$

۵- محاسبه احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان

محاسبه احتمال خرابی این امکان را فراهم می‌سازد که با توجه به شرایط محل و درجه اهمیت سازه قضاوت مهندسی مناسبی صورت گیرد. در حقیقت روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد، عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی را به مقادیر خروجی تابع انتقال می‌دهند و تأثیر عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی بر مقادیر خروجی اعمال خواهد شد. در جدول ۳ شاخص عملکردی مورد انتظار برای ارزیابی توسط مهندسین نیروی زمینی ارتش آمریکا^۱ با توجه به عملکرد سازه مورد نظر و میزان شاخص قابلیت اطمینان یا احتمال خرابی ارائه شده است [۱۸]. با توجه به این جدول، سازه‌ای ایمن خواهد بود که شاخص قابلیت اطمینان آن از مقدار ۳ بیشتر باشد. همانطور که قبلاً نیز بیان شد روش‌های آنالیز قابلیت اعتماد به‌طور کلی به سه دسته روش‌های تحلیلی، روش‌های اولین و دومین مرتبه قابلیت اطمینان و روش‌های شبیه‌سازی تقسیم می‌شوند که در این پژوهش از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان (FORM) و شبیه‌سازی مونت کارلو (MCS) استفاده شده است.

۶- معرفی مدل و متغیرهای تصادفی در ارزیابی پایداری دیوار خاک مسلح

در این تحقیق ابتدا ضمن معرفی متغیرهای تصادفی، پارامترهای آماری آنها شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب تغییرات و نوع تابع توزیع احتمال نیز معرفی شده و سپس شاخص قابلیت اطمینان

محاسبه خواهند شد. در ادامه به منظور بررسی تأثیر هر یک از این متغیرهای تصادفی، تحلیل و آنالیز حساسیت انجام می‌شود تا مشخص شود هر یک از متغیرهای تصادفی به چه میزانی بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی مؤثر هستند. به این منظور در مرحله اول باید توابع شرایط حدی یعنی مرز بین حالت سلامتی و خرابی بر اساس مودهای خرابی مشخص گردند که در این تحقیق پایداری خارجی با سه تابع حدی و پایداری داخلی با دو تابع شرایط حدی مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شده است. هندسه کلی دیوار مسلح در شکل ۳ و متغیرهای تصادفی در جدول ۴ آمده است. در این جدول ضریب تغییرات، میانگین و نوع توزیع متغیرها با توجه به تحقیقات محققان در منابع مختلف انتخاب شده است. بررسی‌های اولیه از پایداری داخلی و خارجی دیوار بیانگر کسب حداقل ضرایب اطمینان مطابق با دستورالعمل FHWA و نشریه شماره ۳۰۸ می‌باشد که

1 US Army Corps of Engineers

جدول ۴. داده‌های مورد استناد در این پژوهش
Table 4. Data used in this research

منغیر	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)	نوع توزیع	مرجع و منبع داده‌ها
ϕ (درجه)	۳۰-۴۵	۵-۲۰	نرمال- لوگ نرمال	۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۸
γ (kN/m^3)	۱۶-۱۸	۳-۱۰	نرمال	۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۸
Q (kN/m^2)	۱۲-۲۰	۰-۲۰	نرمال	۹ و ۱۱
δ (درجه)	۲۰-۲۳	۵-۲۰	نرمال- لوگ نرمال	۵، ۷، ۸، ۹، ۱۰
T (kN)	۴۵-۵۰	۰-۱۰	نرمال	۵، ۱۰، ۱۱، ۱۸
$\rho_{\phi\gamma}$		۰/۵ - ۰/۸		۵، ۱۹، ۲۰
L (m)		۵-۱۰		ثابت
H (m)		۶-۱۰		ثابت
<p>فرضیات تحقیق:</p> <ul style="list-style-type: none"> • فرض وجود همبستگی بین متغیرهای تصادفی (ρ) • ارتفاع دیوار برابر ۱۰-۶ متر • طول مسلح کننده و عرض دیوار بین ۱۰-۵ متر • خاک دانه‌ای بدون چسبندگی • خاکریز و خاک پی از یک نوع 				

افزایش تکرار محاسبات، دقت نتایج بیشتر می‌شود و این در حالی است که مهمترین قابلیت روش FORM کاهش تکرار محاسبات و کاهش هزینه است. در این تحقیق برای هرکدام از توابع حدی تعداد تکرار ابتدا از عدد ۱۰۰۰ شروع و سپس با افزایش تعداد تکرار تا زمانیکه شاخص قابلیت اطمینان به یک عدد ثابت میل کند، ادامه یافته است. لازم به ذکر است برای تابع حدی از همان تابع حدی روش FORM استفاده شده و در نهایت مقدار شاخص قابلیت اعتماد دو روش با هم مقایسه شده‌اند.

۸- بحث و تفسیر نتایج

در این پژوهش متغیرهای تصادفی در تحلیل قابلیت اطمینان ابتدا از مقادیر جدول ۵ استفاده شده است اما در ادامه با تغییر این مقادیر و بررسی تاثیر این تغییرات بر شاخص قابلیت اطمینان مورد تحقیق قرار گرفته است. محاسبات قابلیت اطمینان برای توابع شرایط حدی با نوشتن برنامه در نرم‌افزارهای متلب (Matlab) و RT برای در دو حالت "با همبستگی" و "بدون همبستگی" بین متغیرهای انجام گرفته که نتایج در جدول ۶ و جدول ۷ آمده است. این نتایج نشان می‌دهند که وابستگی وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی بسیار محسوس و تاثیرگذار است لذا در این بخش وابستگی آنها

در بخش ۲ تشریح شد. این داده‌ها با استناد به مقادیر و محدوده مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک و مسلح کننده مورد استفاده مهندسان در طراحی دیوارهای خاک مسلح انتخاب شده‌اند. بعنوان نمونه در اجرای خاک مسلح از خاک دانه‌ای مناسب و طبق دانه بندی مشخص استفاده می‌شود که محدوده زاویه اصطکاک داخلی آن بین ۳۰ تا ۴۵ درجه می‌باشد.

۷- صحت سنجی و اعتبار سنجی نتایج

به منظور ارزیابی دقت و صحت نتایج، از دو شیوه مختلف در این تحقیق استفاده شده است که شامل مقایسه با نتایج دیگر محققان (با داده‌های مشابه) و همچنین مقایسه نتایج با روش شبیه سازی مونت کارلو می‌باشد. در مرحله اول اطلاعات و داده‌های به دست آمده از این تحقیق با داده‌های مقالات مشابه از منابع معتبر مقایسه گردید (مرجع شماره ۷ تا ۹). این مقایسه نشان می‌دهد که درصد اختلاف و خطا کوچک و کمتر از ۵ درصد می‌باشد که تا حد زیادی دقت محاسبات را نشان می‌دهند.

در مرحله دوم اعتبارسنجی، نتایج حاصل از تحلیل FORM همراه با روش شبیه سازی مونت کارلو مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج مقایسه در جدول ۶ و ۷ آورده شده است. در روش مونت کارلو با

جدول ۵. نوع تابع توزیع احتمال و پارامترهای آماری در نظر گرفته شده برای متغیرهای تصادفی

Table 5. The type of probability distribution function and statistical parameters for random variables

متغیرها	میانگین	ضریب تغییرات (درصد)	نوع توزیع
ϕ	۳۰	۲۰	نرمال
γ	۱۶	۱۰	نرمال
q	۲۰	۱۵	نرمال
δ	۲۳	۱۰	نرمال
T	۵۰	۱۰	نرمال
L	۵ متر		
H	۶ متر		
$\rho_{\phi\gamma}$	۰/۸		

جدول ۶. شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی بدون توجه به همبستگی

Table 6. Reliability and probability index without correlation

	لغزش		واژگونی		ظرفیت باربری	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
FORM	2.29	0.0108	6.96	1.69×10^{-12}	2.39	0.0083
MCS	2.27	0.0115	6.95	1.71×10^{-12}	2.38	0.0085

جدول ۷. شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی با توجه به همبستگی

Table 7. Reliability and Failure Index with Correlation

	لغزش		واژگونی		ظرفیت باربری	
	β	P_f	β	P_f	β	P_f
FORM	2.21	0.013	6.16	3.45×10^{-10}	2.34	0.0094
MCS	2.19	0.014	6.17	3.32×10^{-10}	2.34	0.0095

۱۲ درصد و برای ظرفیت باربری ۲ درصد مشاهده می‌گردد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مود غالب خرابی در شرایط پایداری خارجی، لغزش دیوار می‌باشد. در بررسی پایداری داخلی دیوار خاک مسلح، بیرون کشیدگی و گسیختگی از نظر میزان مقاومت و طول عضو مسلح کننده مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نتایج حاصل با اعمال همبستگی و بدون توجه به همبستگی پارامترها مورد تحقیق قرار می‌گیرند که نتایج در جداول ۸ تا ۱۱ ارائه گردیده است. در بررسی پایداری داخلی

مورد تحقیق ($\rho_{\phi\gamma}$) قرار گرفت. بررسی نتایج در روش FORM و شبیه‌سازی مونت کارلو نشان می‌دهند که اختلاف بین آنها کمتر از یک درصد بوده و در حقیقت روش FORM می‌تواند بخوبی میزان شاخص قابلیت اطمینان را تعیین نماید.

مقایسه نتایج جدول ۶ و ۷ نشان می‌دهند که با اعمال همبستگی بین پارامترها، احتمال خرابی افزایش یافته و شاخص قابلیت اطمینان نیز کاهش می‌یابد. مقدار کاهش برای لغزش ۴ درصد و برای واژگونی

جدول ۸. شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی بیرون کشش مسلح کننده (بدون همبستگی بین متغیرها)
Table 8. Reliability Index and Failure of pullout (without correlation between variables)

لایه	L_e	H	FORM		MCS	
			β	P_f	β	P_f
1	3.27	0.5	3.85	5.74×10^{-5}	3.86	5.53×10^{-5}
2	3.27	1.5	3.85	5.74×10^{-5}	3.86	5.53×10^{-5}
3	3.27	2.5	3.85	5.74×10^{-5}	3.86	5.53×10^{-5}
4	3.55	3.5	3.93	4.24×10^{-5}	3.95	3.95×10^{-5}
5	4.13	4.5	4.05	2.50×10^{-5}	4.02	2.8×10^{-5}
6	4.71	5.5	4.15	1.637×10^{-5}	4.10	2×10^{-5}

جدول ۹. شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی بیرون کشش مسلح کننده (با همبستگی بین متغیرها)
Table 9. Reliability Index and Failure of pullout (With Correlation Between Variables)

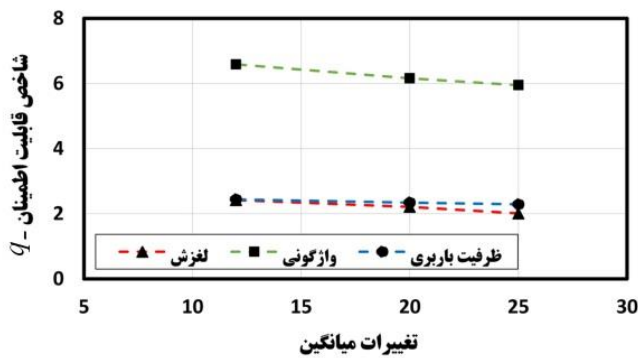
لایه	L_e	H	FORM		MCS	
			β	P_f	β	P_f
1	3.27	0.5	3.85	5.74×10^{-5}	3.86	5.53×10^{-5}
2	3.27	1.5	3.85	5.74×10^{-5}	3.86	5.53×10^{-5}
3	3.27	2.5	3.85	5.74×10^{-5}	3.86	5.53×10^{-5}
4	3.55	3.5	3.93	4.24×10^{-5}	3.95	3.95×10^{-5}
5	4.13	4.5	4.05	2.50×10^{-5}	4.02	2.8×10^{-5}
6	4.71	5.5	4.15	1.637×10^{-5}	4.10	2×10^{-5}

جدول ۱۰. شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی در گسیختگی مسلح کننده (بدون همبستگی بین متغیرها)
Table 10. Reliability and Failure Index of Tension (without correlation between variables)

لایه	L_e	H	FORM		MCS	
			β	P_f	β	P_f
1	3.27	0.5	2.49	0.006	2.49	0.006
2	3.27	1.5	2.41	0.007	2.41	0.007
3	3.27	2.5	2.36	0.009	2.36	0.009
4	3.55	3.5	2.31	0.0102	2.31	0.0102
5	4.13	4.5	2.28	0.011	2.28	0.011
6	4.71	5.5	2.25	0.012	2.25	0.012

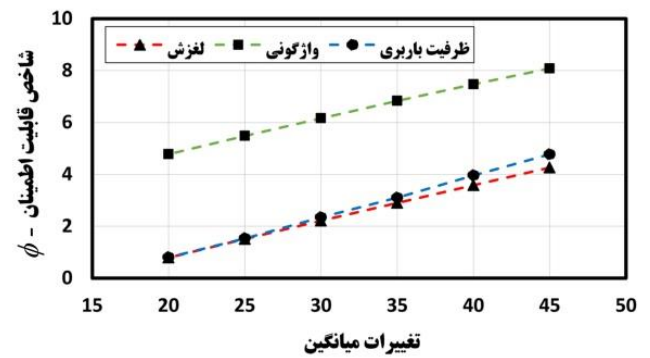
جدول ۱۱. شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی در گسیختگی مسلح کننده (با همبستگی بین متغیرها)
Table 11. Reliability and Failure Index of Tension (with correlation between variables)

لایه	L_e	H	FORM		MCS	
			β	P_f	β	P_f
1	3.27	0.5	2.49	0.006	2.49	0.006
2	3.27	1.5	2.41	0.007	2.41	0.007
3	3.27	2.5	2.36	0.009	2.36	0.009
4	3.55	3.5	2.31	0.0102	2.31	0.0102
5	4.13	4.5	2.28	0.011	2.28	0.011
6	4.71	5.5	2.25	0.012	2.25	0.012



شکل ۵. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین سربار

Fig. 5. Index changes relative to the mean changes in the average of loading



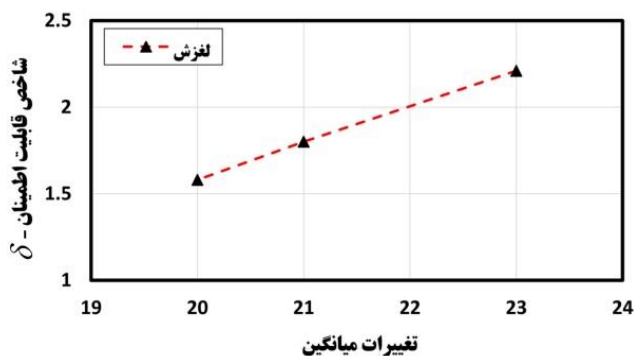
شکل ۴. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین زاویه اصطکاک داخلی

Fig. 4. Indicator changes to mean internal friction angle variations

۸-۱- بررسی تغییرات میانگین در پایداری خارجی

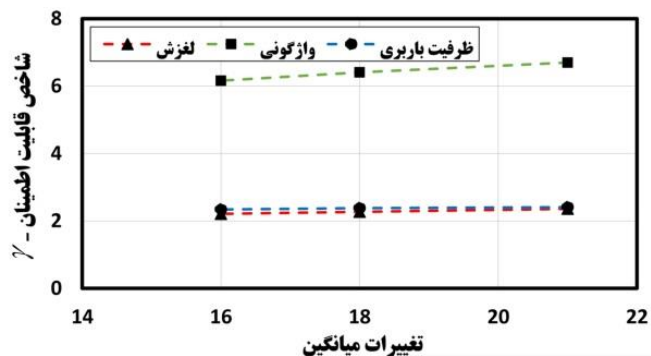
به منظور بررسی تاثیر پارامترهای مختلف آماری بر شاخص قابلیت اطمینان، در این تحقیق تأثیر تغییرات میانگین بر پایداری داخلی و خارجی مورد بررسی قرار گرفت تا بتوان با تحلیل پارامتری، تاثیر این پارامتر آماری را شناسایی کرد. شکل ۴ و ۵ نتایج بدست آمده از تحلیل را نشان می‌دهند که بیانگر تاثیر سربار و زاویه اصطکاک داخلی بر شاخص قابلیت اطمینان در پایداری خارجی دیوار می‌باشد. بعلاوه نتایج نشان می‌دهند که با افزایش مقادیر میانگین سربار، پایداری خارجی و شاخص قابلیت اطمینان در لغزش ۱۷ درصد، واژگونی ۱۰ درصد و ظرفیت باربری ۶ درصد کاهش پیدا می‌کنند. با افزایش میانگین سربار، احتمال خرابی افزایش یافته بطوریکه تاثیر آن بر لغزش و واژگونی نیز بیشتر می‌گردد. همچنین نتایج بیانگر تاثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی بر شاخص قابلیت اطمینان با یک

دیوارهای خاک مسلح، ۶ لایه ژئوتکستایل به فواصل قائم یک متر در نظر گرفته شده که طول L_e هر لایه می‌تواند متفاوت باشد. با توجه به نتایج جداول ۸ تا ۱۱ مشاهده می‌گردد که در ژئوتکستایل مستقر در لایه‌های پایین‌تر با توجه به افزایش ارتفاع و سربار خاک، مقاومت افزایش و احتمال بیرون کشیدگی کمتر می‌شود لذا احتمال خرابی نیز کاهش خواهد یافت. بعلاوه این نتایج نشان می‌دهند که برای دو تابع حدی پایداری داخلی، همبستگی بین پارامترها تأثیر ناچیزی بر شاخص قابلیت اطمینان دارند. همچنین بررسی نتایج تابع حدی گسیختگی مسلح‌کننده در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان می‌دهند که در ژئوتکستایل‌های مستقر در لایه‌های بالاتر، شاخص قابلیت اطمینان افزایش و احتمال خرابی کاهش پیدا می‌کند و بعبارتی دیگر گسیختگی مسلح‌کننده به دلیلی کاهش نیروی کششی، احتمال کمتری دارد.



شکل ۷. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین اصطکاک کف

Fig. 7. Index changes relative to the mean changes in friction of base



شکل ۶. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین وزن مخصوص

Fig. 6. Index changes relative to the mean changes in specific weight

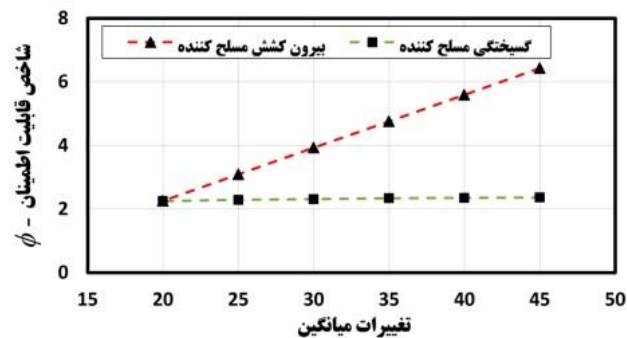
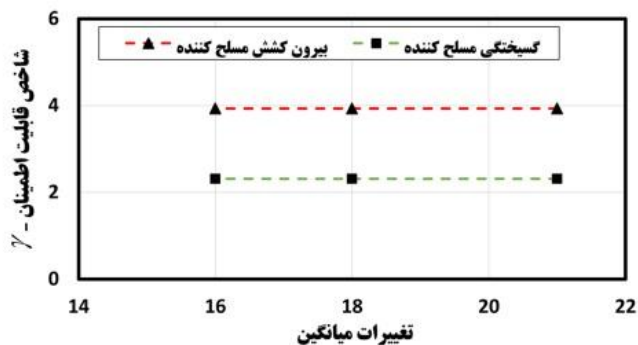
در عمق ۲ متری از سطح خاکریز انتخاب و اثر متغیرهای تصادفی مورد بررسی قرار می‌گیرند. پایداری داخلی مسلح کننده تحت تاثیر متغیرهای مختلف یعنی سربار، وزن مخصوص خاک، زاویه اصطکاک داخلی، اصطکاک کف و همچنین مقاومت کششی مسلح کننده می‌باشند که تمامی آنها بعنوان متغیرهای تصادفی انتخاب و میزان تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به تغییرات میانگین آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه این بررسی در اشکال ۸ الی ۱۰ نشان داده شده است. شکل ۸ بیانگر تاثیر محسوس زاویه اصطکاک داخلی بر روی شاخص قابلیت اطمینان و پایداری داخلی می‌باشد بطوریکه با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، شاخص قابلیت اطمینان در مود بیرون کشش بسیار محسوس و به میزان ۶۴ درصد و در مود گسیختگی بسیار ناچیز و به میزان ۵ درصد افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر پایداری خارجی نیز کاملاً ملموس و زیاد بوده است. همچنین شکل ۹ نشان می‌دهد که تغییرات میانگین وزن مخصوص (γ) روی شاخص قابلیت اطمینان نیز تغییرات اندکی دارد که این تغییرات اندک نشان می‌دهد با افزایش وزن مخصوص، مقدار شاخص قابلیت اطمینان در هر دو حالت بیرون کشش و گسیختگی افزایش اندکی پیدا می‌کند. لازم به ذکر است این محاسبات برای عمق مشخصی از مسلح کننده انجام شده است. همان‌طور که از نتایج شکل ۱۰ مشاهده می‌شود تغییرات میانگین سربار (q) روی شاخص قابلیت اطمینان تغییرات بسیار اندکی دارد و این تغییرات اندک نشان می‌دهند که با افزایش میانگین سربار وارده، مقدار شاخص قابلیت اطمینان در هر دو حالت بیرون کشش و

شیب مثبت و خطی می‌باشد. این افزایش در لغزش معادل ۸۱ درصد، واژگونی ۴۰ درصد و ظرفیت باربری ۸۳ درصد هستند. از این نتایج قابل استنباط است که افزایش زاویه اصطکاک داخلی باعث افزایش پایداری خارجی و افزایش چشمگیر شاخص قابلیت اطمینان می‌گردد عبارتی نشان از حساسیت بالای شاخص قابلیت اطمینان و پایداری خارجی دیوار به زاویه اصطکاک داخلی خاک دارد.

شکل ۶ بیانگر نتایج بدست آمده برای بررسی تاثیر وزن مخصوص خاک بر پایداری خارجی دیوار و شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد. وزن مخصوص خاک در این مطالعه دارای تغییرات از ۱۶ تا ۲۱ کیلونیوتن بر مترمکعب می‌باشد و نتایج نشان می‌دهند که با افزایش وزن مخصوص، شاخص قابلیت اطمینان در پایداری خارجی دیوار نیز افزایش پیدا می‌کند بطوریکه این افزایش بر واژگونی محسوس تر است. اصطکاک کف دیوار (δ) تنها در پایداری لغزش تأثیرگذار است و تغییرات میانگین این متغیر بر لغزش مورد بررسی قرار گرفته که نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده است. شیب مثبت و افزایش این متغیر در مقایسه با دیگر متغیرها بیانگر این واقعیت است که این پارامتر بعد از زاویه اصطکاک داخلی، بیشترین اثر را بر شاخص قابلیت اطمینان در پایداری لغزش دیوار دارد.

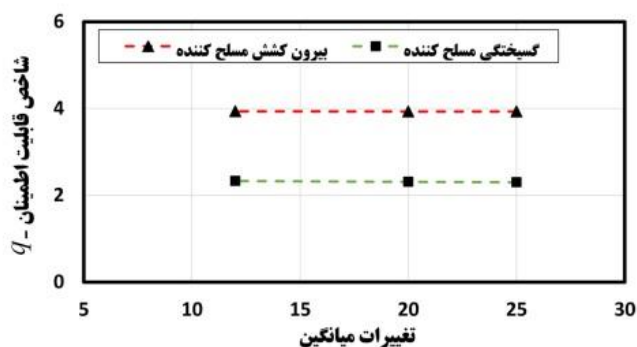
۲-۸- بررسی تغییرات میانگین در پایداری داخلی

تحلیل پارامتری پایداری داخلی خاک مسلح یعنی گسیختگی و بیرون کشیدگی مسلح کننده نیز در این پژوهش در حالت استاتیکی مورد تحقیق قرار گرفته است. بدین منظور یک لایه از مسلح کننده



شکل ۹. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین وزن مخصوص
Fig. 9. Index changes relative to the mean changes in Specific Weight

شکل ۸. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین زاویه اصطکاک داخلی
Fig. 8. Index changes relative to the mean changes in internal friction angle variations



شکل ۱۰. تغییرات شاخص به تغییرات میانگین سربار
Fig. 10. Index changes relative to the mean changes of loading

جدول ۱۲. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به تغییرات نوع مسلح کننده در تابع حدی گسیختگی
Table 12. Changes in reliability index relative to changes of Geogrid type

نوع مسلح کننده	$T (kN/m)$	V	β	P_f	شماره لایه
SWG40	40	0.4	2.31	0.0102	4
SWG50	50	0.5	2.32	0.009	4

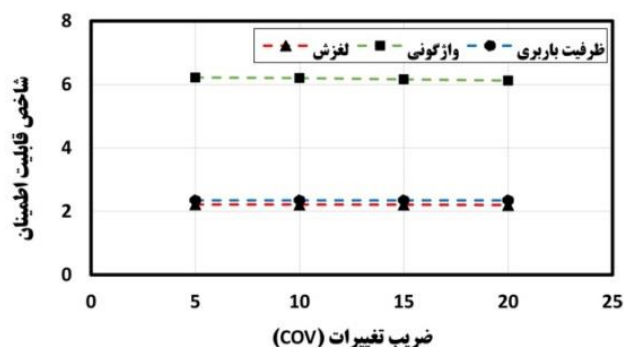
دارای مقاومت کششی متفاوت ۴۰ kN/m و ۵۰ kN/m می‌باشند که با نام تجاری SWG۴۰ و SWG۵۰ شناخته می‌شوند [۱۰]. جدول ۱۲ نتایج بدست آمده برای این دو نوع مسلح کننده را نشان می‌دهد که با کاهش مقاومت و همچنین سطح موثر مسلح کننده، احتمال خرابی افزایش و قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد.

۸-۴ بررسی ضریب تغییرات (COV) در پایداری خارجی
در مهندسی ژئوتکنیک همواره عدم قطعیت در پارامترها

گسیختگی کاهش پیدا می‌کند.

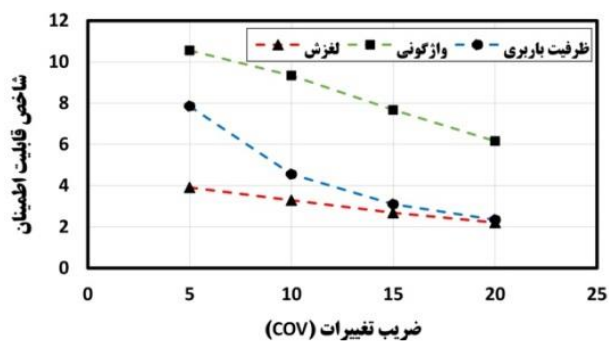
۳-۸ بررسی تغییرات نوع مسلح کننده

در بررسی پایداری داخلی دیوار خاک مسلح، نوع و مشخصات مکانیکی مسلح کننده نیز می‌تواند تأثیر بسزایی در پایداری و احتمال خرابی داشته باشد. در این پژوهش در جهت بررسی تأثیر این عامل، دو نوع مسلح کننده متفاوت از نظر مشخصات مکانیکی (مقاومت کششی ژئوتکستایل) مورد ارزیابی قرار گرفت. این دو نوع مسلح کننده



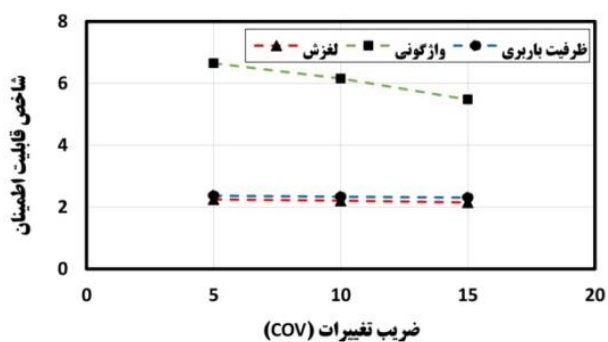
شکل ۱۲. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای وزن مخصوص خاک

Fig. 12. Reliability Index Changes to the Coefficient of Change (COV) for the specific gravity of the soil



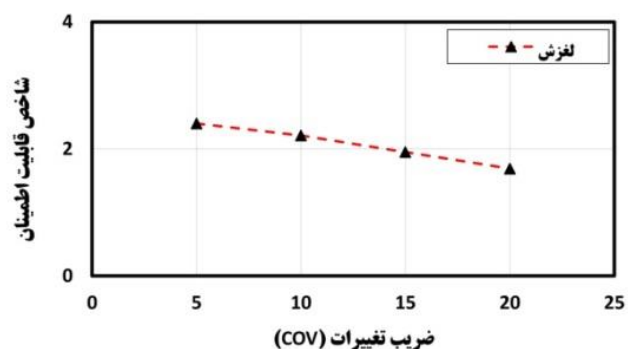
شکل ۱۱. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای زاویه اصطکاک داخلی

Fig. 11. Changes in reliability index to the effect of coefficient of variation (COV) for the internal friction angle



شکل ۱۴. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای سربار

Fig. 14. Changes in reliability index to the effect of the coefficient of variation (COV) for loading



شکل ۱۳. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای اصطکاک کف

Fig. 13. Changes in reliability index to the effect of coefficient of variation (COV) for friction of base

زاویه اصطکاک داخلی تاثیر زیادی در شاخص قابلیت اطمینان در تابع شرایط حدی واژگونی دیوار دارد بطوریکه با افزایش آن، شاخص قابلیت اطمینان از مقدار ۱۰ به ۶ کاهش می‌یابد. این مقدار برای ظرفیت باربری، کاهش حدود ۳۰ درصدی دارد. نتایج ارایه شده در شکل ۱۲ بیانگر تاثیر ضریب تغییرات وزن مخصوص خاک بر تابع شرایط حدی پایداری دیوار خاک مسلح می‌باشد. همچنین نتایج برای اصطکاک کف دیوار نیز در شکل ۱۳ ارایه شده است که روندی کاهشی را نشان می‌دهند. اما همانطور که از شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد ضریب تغییرات سربار تاثیر محسوسی بر شاخص قابلیت اطمینان ندارد.

و اطلاعات مختلف وجود دارد. هر چه میزان عدم قطعیت و عدم شناخت ما از متغیر تصادفی بیشتر باشد میزان ضریب تغییرات آن نیز بیشتر خواهد بود لذا در این بخش از تحقیق تغییرات شاخص قابلیت اطمینان نسبت به ضریب تغییرات مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که نتایج در شکل‌های ۱۱ الی ۱۴ برای پایداری خارجی دیوار خاک مسلح در برابر لغزش، واژگونی و ظرفیت باربری نشان داده شده است.

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشاهده می‌گردد ضریب تغییرات (COV) برای زاویه اصطکاک داخلی بیشترین تاثیر را بر لغزش دیوار دارد بطوریکه شاخص قابلیت اطمینان از $\frac{3}{9}$ به $\frac{2}{2}$ کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که ضریب تغییرات

۵-۸- بررسی ضریب تغییرات (COV) در پایداری داخلی

در ادامه تحقیق تاثیر عدم قطعیت ضریب تغییرات (COV) بر شاخص قابلیت اطمینان پایداری داخلی دیوار یعنی گسیختگی و بیرون کشیدگی مسلح کننده بررسی که نتایج آن در شکل‌های ۱۵ الی ۱۸ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهند که ضریب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی بر شاخص قابلیت اطمینان بیرون کشش تاثیر بسیار محسوسی دارد و باعث کاهش آن می‌شود. همچنین این نتایج حاکی از تاثیر اندک دیگر پارامترها بر شاخص قابلیت اطمینان در پایداری داخلی می‌باشد.

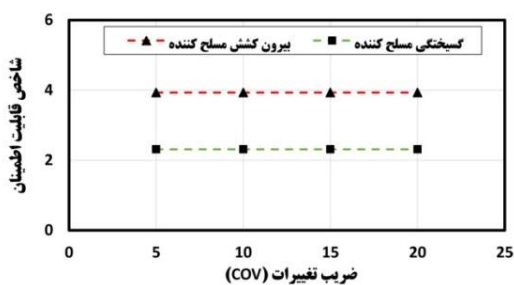
۶-۸- بررسی تاثیر نوع تابع توزیع احتمال

همانطور که در جدول ۴ نشان داده شده است برخی از متغیرهای تصادفی اشاره شده در این تحقیق می‌توانند دارای دو نوع تابع

توزیع احتمالی مختلف یعنی "نرمال" یا "لوگ نرمال" باشند. نتایج بخش‌های قبلی این مقاله بر اساس تابع توزیع احتمال نرمال بوده است که در این قسمت به بررسی نتایج با فرض توزیع لوگ نرمال برای متغیرهای تصادفی مختلف پرداخته می‌شود. جدول ۱۳ نتایج تغییر در نوع تابع توزیع احتمال را نشان می‌دهد که به وضوح بیانگر تاثیر آن بر میزان شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد. بطور نمونه تغییر نوع تابع احتمال بر تابع شرایط حدی واژگونی که احتمال خرابی پایداری نیز دارد، تاثیرگذار است. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهند که پارامتر اصطکاک داخلی خاک، بیشترین تاثیر را بر شاخص قابلیت اطمینان نسبت به متغیرهای تصادفی دیگر دارد.

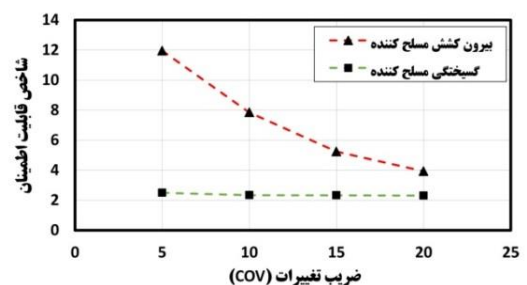
۷-۸- بررسی تغییرات همبستگی ϕ و γ

در این بخش از مقاله به بررسی میزان تاثیر تغییرات همبستگی



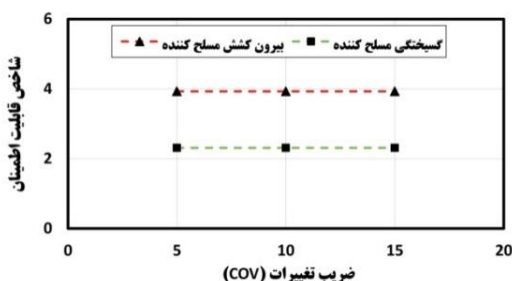
شکل ۱۶. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای وزن مخصوص

Fig. 16. Changes in reliability index to the effect of coefficient of variation (COV) for specific gravity



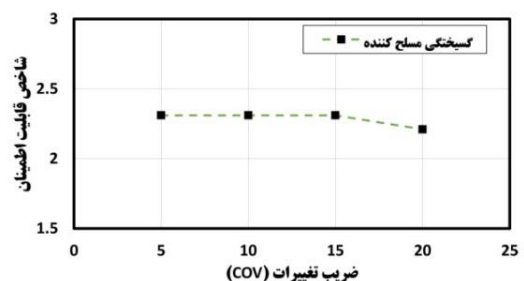
شکل ۱۵. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای زاویه اصطکاک داخلی

Fig. 15. Changes in reliability index to the effect of coefficient of variation (COV) for the internal friction angle



شکل ۱۸. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای سربار

Fig. 18. Change of reliability index to the effect of coefficient of variation (COV) on loading

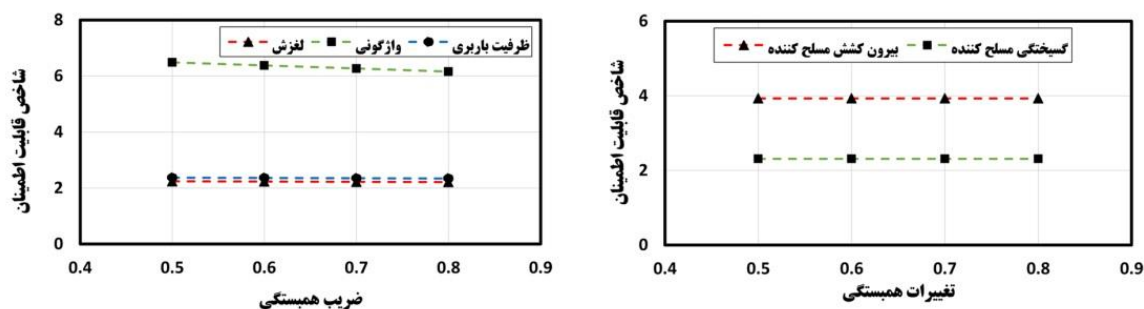


شکل ۱۷. تغییرات شاخص قابلیت اطمینان به اثر ضریب تغییرات (COV) برای مقاومت کششی مسلح کننده

Fig. 17. Changes of Reliability Index to the Coefficient of Change (COV) for tensile strength

جدول ۱۳. تغییرات نوع توزیع احتمال روی شاخص قابلیت اطمینان
Table 13. Changes in the probability distribution type on the reliability index

تابع شرایط حدی	ϕ	γ	q	δ	T	β با همبستگی	β بدون همبستگی
لغزش	نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	-	2.21	2.29
	لوگ نرمال	نرمال	نرمال	نرمال	-	2.48	2.58
	نرمال	نرمال	نرمال	لوگ نرمال	-	2.211	2.30
واژگونی	نرمال	نرمال	نرمال	-	-	6.16	6.96
	لوگ نرمال	نرمال	نرمال	-	-	9.42	10.89
ظرفیت باربری	نرمال	نرمال	نرمال	-	-	2.34	2.39
	لوگ نرمال	نرمال	نرمال	-	-	3.06	3.11
بیرون کشش لایه ۴	نرمال	نرمال	نرمال	-	-	3.93	3.93
	لوگ نرمال	نرمال	نرمال	-	-	6.68	6.68
گسیختگی لایه ۴	نرمال	نرمال	نرمال	-	نرمال	2.31	2.31
	لوگ نرمال	نرمال	نرمال	-	نرمال	2.33	2.34
	نرمال	نرمال	نرمال	-	لوگ نرمال	2.31	2.31



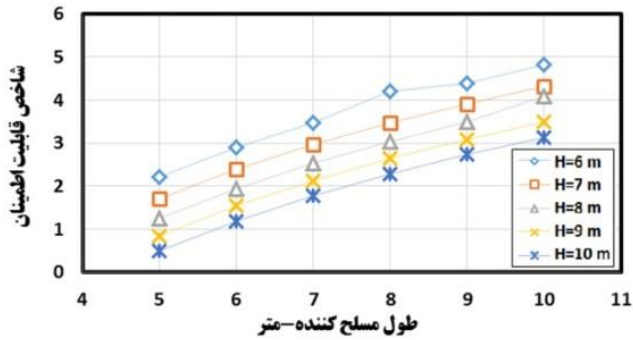
شکل ۱۹. بررسی تغییرات همبستگی بین ϕ و γ نسبت به شاخص قابلیت اطمینان
Fig. 19 Analysis of the correlation between ϕ and γ in relation to the reliability index

و همبستگی رابطه معکوس دارند. شکل ۱۹ همچنین نشان می‌دهد همبستگی بر پایداری داخلی تأثیر بسیار کمتری دارد یعنی تغییرات ناچیزی در شاخص قابلیت اطمینان حاصل می‌شود.

۸-۸- بررسی تغییرات ارتفاع دیوار و طول مسلح کننده

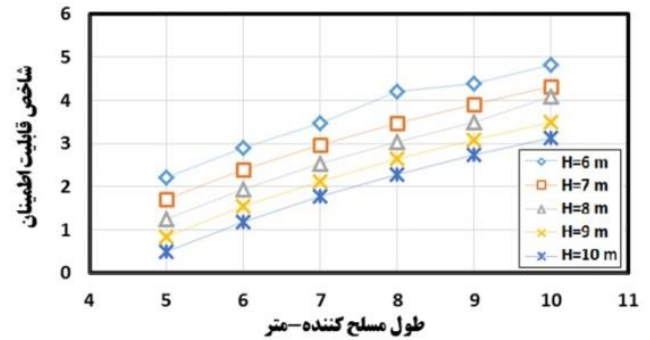
در این بخش تاثیر تغییرات پارامترهای ثابت یعنی ارتفاع دیوار و طول مسلح کننده (L و H) بر پایداری خارجی در شرایط استاتیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این نتایج در شکل ۲۰ الی ۲۲ آورده

ϕ و γ بر روی شاخص قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. در مراجع و منابع مختلف (جدول ۴) میزان همبستگی بین این دو پارامتر متفاوت بوده و مقادیر مختلفی بین ۰/۵ تا ۰/۸ پیشنهاد شده است لذا در این بخش تاثیر این مقادیر بر شاخص قابلیت اطمینان بررسی می‌شود. نتایج این تحلیل در شکل ۱۹ برای هر دو حالت پایداری خارجی و داخلی نشان داده شده است. نتایج این شکل بیان می‌کنند که در پایداری خارجی با افزایش ضریب همبستگی، شاخص قابلیت اطمینان کمی کاهش پیدا می‌کند عبارتی شاخص قابلیت اطمینان



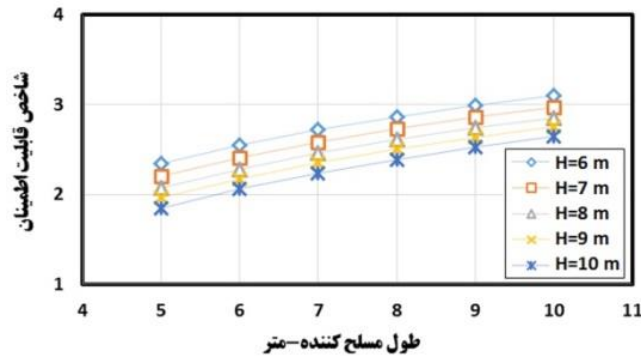
شکل ۲۱. تغییرات ارتفاع دیوار و طول مسلح کننده بر شاخص قابلیت اطمینان پایداری واژگونی

Fig. 21. Changes in wall height and geogrid length on reversibility stability index



شکل ۲۰. تغییرات ارتفاع دیوار و طول مسلح کننده بر شاخص قابلیت اطمینان پایداری لغزش

Fig. 20. Changes in wall height and reinforcement length on slip stability index



شکل ۲۲. تغییرات ارتفاع دیوار و طول مسلح کننده بر شاخص قابلیت اطمینان پایداری ظرفیت باربری
Fig. 22. Changes in wall height and geogrid length on reliability index of load bearing capacity

۹- آنالیز حساسیت

آنالیز حساسیت به مفهوم بررسی تغییرپذیری شاخص قابلیت اطمینان نسبت به آن متغیر و پارامترهای آماری همانند میانگین و انحراف معیار است. اهمیت آنالیز حساسیت یعنی رتبه‌بندی متغیرهای تصادفی می‌باشد بطوریکه متغیرهای تصادفی با اهمیت بالاتر داری تغییرات بیشتری خواهند بود. همچنین متغیرهای با اهمیت کمتر را می‌توان از تحلیل احتمالاتی حذف کرد. در تحلیل قابلیت اطمینان، آنالیز حساسیت مختلفی قابل انجام است که در ادامه آنها معرفی می‌شوند.

اولین آنالیز حساسیت با E_1 قابل بیان است که بیانگر تأثیر متغیر تصادفی بر تابع شرایط حدی بدون در نظر گرفتن همبستگی بوده و با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

شده‌اند. ارزیابی این نتایج نشان می‌دهد در شرایط طول ثابت برای مسلح کننده، با افزایش ارتفاع دیوار شاخص قابلیت اطمینان کاهش و احتمال خرابی افزایش پیدا می‌کند. همچنین در شرایط ارتفاع دیوار ثابت، با افزایش طول مسلح کننده شاخص قابلیت اطمینان افزایش و احتمال خرابی کاهش پیدا می‌کند. همانطور که در جدول ۳ اشاره شد شاخص عملکرد مورد انتظار بر اساس میزان شاخص قابلیت اطمینان باید در حدود ۳ باشد تا عملکردی بیش از متوسط را انتظار داشته باشیم لذا می‌توان مقادیر H و L مناسبی را شناسایی کرد که این شاخص قابلیت اطمینان را ارائه دهد. بعنوان نمونه پایداری در برابر لغزش برای دیواری با ارتفاع ۸ متر و طول مسلح کننده ۸ متر، شاخص قابلیت اطمینان برابر با ۳ را نتیجه می‌دهد و به همین ترتیب می‌توان برای واژگونی و ظرفیت باربری نیز مقادیر مناسبی را انتخاب کرد.

جدول ۱۴. آنالیز حساسیت متغیرهای تصادفی
Table 14. Sensitivity analysis of random variables

پایداری خارجی		ϕ	γ	q	δ	T
لغزش	E_1	-0.883	-0.036	0.074	-0.46	
	E_2	-0.871	-0.063	0.077	-0.48	
	E_3	0.835	0.060	-0.074	0.46	
	E_4	-1.63	-0.097	-0.012	-0.46	
واژگونی	E_1	-0.981	-0.1313	0.136		
	E_2	-0.952	-0.258	0.160		
	E_3	0.80	0.218	-0.136		
	E_4	-4.88	-1.16	-0.114		
ظرفیت باربری	E_1	-0.999	-0.012	0.027		
	E_2	-0.999	-0.021	0.028		
	E_3	0.98	0.021	-0.027		
	E_4	-1.63	-0.028	-0.001		
بیرون کشش لايه ۴	E_1	-1	-1.13×10^{-7}	1.01×10^{-7}		
	E_2	-1	-1.88×10^{-7}	1.01×10^{-7}		
	E_3	0.999	1.88×10^{-7}	-1.01×10^{-7}		
	E_4	-3.93	-5.93×10^{-7}	2.29×10^{-11}		
گسیختگی لایه ۴	E_1	-0.999	-8×10^{-5}	7.15×10^{-5}		-0.00018
	E_2	-0.999	-0.00013	7.15×10^{-5}		-0.00018
	E_3	0.999	0.0013	-7.15×10^{-5}		0.00018
	E_4	-0.046	-4.9×10^{-6}	2.38×10^{-10}		-1.5×10^{-9}

تابع عملکرد و متغیرهای تصادفی می‌باشد. علامت مثبت به این معنی است که متغیر تصادفی مربوطه از جنس بار بوده و علامت منفی به معنی این است که متغیر تصادفی از جنس مقاومت است. همچنین به نحوی دیگر می‌توان گفت که ضریب حساسیت مثبت به معنی کاهش شاخص قابلیت اطمینان با افزایش متغیر تصادفی بوده و ضریب حساسیت منفی به معنی افزایش شاخص قابلیت اطمینان با افزایش متغیر تصادفی است.

سومین عامل حساسیت با E_4 بیان می‌شود که بیانگر تأثیر میزان تغییرات میانگین متغیر تصادفی بر شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد و با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$E_3 = \frac{\partial \beta}{\partial \mu_x} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta \mu_x} \quad (20)$$

$$E_1 = \frac{-\frac{\partial g}{\partial Z}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial Z}\right)^2}} \quad (18)$$

دومین آنالیز حساسیت که با متغیر E_4 بیان می‌شود بیانگر تأثیر متغیر تصادفی بر تابع شرایط حدی با در نظر گرفتن همبستگی و بیانگر سهم نسبی هر متغیر تصادفی بر احتمال خرابی بوده که با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E_2 = \frac{-\frac{\partial g}{\partial Z}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \frac{\partial g}{\partial Z_i} \frac{\partial g}{\partial Z_j} \rho_{ij}}} \quad (19)$$

این دو پارامتر بیانگر سهم متغیر تصادفی بر شاخص قابلیت اعتماد یا احتمال خرابی بوده و علامت آنها نشان‌دهنده رابطه بین

اهمیت زیادی بر تغییر شاخص قابلیت اطمینان داشته باشد. در این پژوهش مشاهده گردید که در پایداری خارجی با افزایش همبستگی بین متغیرهای تصادفی، شاخص قابلیت اطمینان کاهش پیدا می‌کند و نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد بطوریکه میزان کاهش در لغزش حدود ۴ درصد، واژگونی ۱۲ درصد و ظرفیت باربری ۲ درصد محاسبه شد. ممکن است ضریب همبستگی تأثیر ناچیزی در شاخص قابلیت اطمینان داشته باشد که در این تحقیق این موضوع در توابع شرایط حدی پایداری داخلی مشاهده گردید.

- تحلیل حساسیت نشان داد که اولین و دومین متغیر مؤثر بر لغزش به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و اصطکاک کف و همچنین بر واژگونی به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و سربار می‌باشند. تحلیل حساسیت همچنین نشان داد در گسیختگی و بیرون کشیدگی مسلح کننده، زاویه اصطکاک داخلی مؤثرترین متغیر تصادفی است که بیشترین اثرگذاری و حساسیت را بر قابلیت اطمینان دارد. این نتیجه نشان می‌دهد باید تخمین زاویه اصطکاک داخلی با حساسیت و دقت بالا برآورد شود.
- تغییرات میانگین متغیرهای تصادفی نشان داد که با افزایش سربار وارده، شاخص قابلیت اطمینان کاهش می‌یابد اما در سایر متغیرهای تصادفی با افزایش میانگین، شاخص قابلیت اطمینان افزایش و احتمال خرابی کاهش می‌یابد.
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد نوع تابع توزیع احتمال می‌تواند بر میزان شاخص قابلیت اطمینان تأثیرگذار باشد. نوع تابع توزیع بر واژگونی که دارای احتمال خرابی پایینی می‌باشد دارای بیشترین تأثیر است. همچنین بطور کلی در بررسی حالت‌های مختلف خرابی، با تغییر نوع تابع توزیع، زاویه اصطکاک داخلی بر پایداری دیوار تأثیر زیادی دارد و می‌تواند میزان شاخص قابلیت اطمینان را تحت تأثیر قرار دهد.
- نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات ضریب تغییرات زاویه اصطکاک داخلی نسبت به دیگر متغیرهای تصادفی بیشترین تأثیر را در میزان شاخص قابلیت اطمینان دارد بطوریکه با افزایش ضریب تغییرات، شاخص قابلیت اطمینان نیز کاهش پیدا می‌کند.
- با توجه به بررسی تغییرات ارتفاع دیوار و طول مسلح کننده

همچنین عامل حساسیت E_p بیانگر تأثیر انحراف معیار متغیر بر شاخص قابلیت اطمینان و احتمال خرابی بوده که با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$E_4 = \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_x} = \frac{\beta_2 - \beta_1}{\Delta \sigma_x} \quad (21)$$

این عامل علامتش همیشه منفی است که بیان می‌کند هرچه انحراف معیار بیشتر باشد توزیع پهن‌تر شده و احتمال خرابی نیز بیشتر می‌شود. نتایج تحلیل حساسیت متغیرهای تصادفی در جدول ۱۴ آمده است. نتایج نشان می‌دهند که ضریب اصطکاک داخلی بیشترین تأثیر و حساسیت را نسبت به دیگر متغیرها تصادفی داشته و ارزیابی دقیقتر این پارامتر می‌تواند در بالا بردن میزان دقت شاخص قابلیت اطمینان تأثیر گذار باشد. این نتایج نشان می‌دهند در لغزش، زاویه اصطکاک داخلی و سپس اصطکاک کف بیشترین حساسیت را در بین متغیرهای تصادفی دارند. همچنین در واژگونی، زاویه اصطکاک داخلی بیشترین حساسیت را در بین متغیرهای تصادفی دارند و سربار و وزن مخصوص خاک تقریباً حساسیت مساوی بر واژگونی دارند. در کنترل ظرفیت باربری نیز زاویه اصطکاک داخلی مؤثرترین متغیر تصادفی می‌باشد. همچنین نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهند که در پایداری داخلی، زاویه اصطکاک داخلی به‌تنهایی مؤثرترین متغیر بوده که حتی می‌تواند در کنترل بیرون کشش و گسیختگی مسلح کننده، متغیرهای تصادفی دیگر را به صورت ثابت در نظر گرفت.

۱۰- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله تحلیل قابلیت اعتماد پایداری داخلی و خارجی دیوار خاک مسلح در شرایط استاتیکی به روش مرتبه اول انجام گرفت و اعتبارسنجی داده‌های به روش شبیه‌سازی مونت کارلو نیز انجام گردید. این نتایج حاصل از بررسی هندسه خاص با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مصالح در نظر گرفته شده می‌باشد که اهم نتایج این تحقیق را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- مود خرابی غالب در پایداری خارجی، لغزش و در پایداری داخلی گسیختگی مسلح کننده می‌باشد و بیشترین احتمال خرابی را نسبت به بقیه مدهای خرابی دارند که لازم است در طراحی خاک مسلح با قوت مورد بررسی قرار گیرند.
- اثر ضریب همبستگی بین متغیرهای تصادفی مختلف می‌تواند

- resistance factor design approach, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 60(1) (2013) 8-21.
- [9] D.V. Griffiths, Fenton, G. A., *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*, (2007).
- [10] N.Z. Chen Jingyu, Case Study on the Typical Failure Modes and Reliability of Reinforced-Earth Retaining Wall, *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 21(1) (2016) 305-317.
- [11] M. Powers, *Reliability Analysis of Geosynthetic Reinforced Soil Walls*, (2017).
- [12] P.E. M. Myint Lwin, S.E., *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*, U.S. Department of Transportation, (2010).
- [13] J.N. 308, *Retaining wall design guide* (In Parsian), (2005).
- [14] S.M.a.G.B. M., *Structural Trust Theory* (In Parsian, (2014).
- [15] A.M. Hasofer, and Lind, N. C., *Exact and Invariant Second-Moment Code Format*, *Journal of the Engineering Mechanics Division ASCE*, 100(1) (1974) 111-121.
- [16] G.L.S.B. B. Munwar Basha *Optimum Design for External Seismic Stability of Geosynthetic Reinforced Soil Walls: Reliability Based*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6) (2007) 95-109.
- [17] A.S.N.a.K.R. C., *Reliability of Structures*, (2012).
- [18] K.K.Pa.J. Ch., *Risk and Reliability in Geotechnical Engineering*, (2017).
- مشاهده می‌شود که شاخص قابلیت اطمینان با ثابت ماندن طول مسلح کننده با افزایش ارتفاع دیوار کاهش پیدا می‌کند و بطور معکوس با ثابت ماندن ارتفاع دیوار با افزایش طول مسلح کننده افزایش پیدا می‌کند.
- ### منابع و مراجع
- [1] C. Jones, J. , *Earth reinforcement and soil structures*, (1985).
- [2] M.K. (1999), *Investigating the stability of geosynthetic walls* (In Parsian), (1999).
- [3] D. Tobutt, Monte Carlo simulation methods for slope stability, *Computers & Geosciences*, 8(2) (1982) 199-208.
- [4] A.T. Genske DD, *Reliability analysis of reinforced earth retaining structures subjected to earthquake loading*, *Soils and Foundations*, 31(4) (1991) 48-60.
- [5] K.M.a.D.K. Byung S. C., *A Study on Reliability Analysis for Reinforced Earth Retaining Walls*, *GeoAsia Proceeding Conference*, (1998) 248-254.
- [6] B.C. Chalermyanont T, *Reliability-based design for internal stability of mechanically stabilized earth walls*, *Geotech Geoenviron En*, 130(2) (2004) 163-173.
- [7] D.G. Sayed S, *Reliability analysis of reinforced soil walls under static and seismic forces*, *Geosynthetics International*, 15(4) (2008) 246-257.
- [8] G.L.S.B. B. Munwar Basha *Reliability-based load and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

N. Shabakhty, S. Ghaffarpour Jahromi, R. Ahmadi, *Reliability analysis for static stability of reinforced soil*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(10) (2021) 2451-2470.

DOI: 10.22060/ceej.2019.16349.6197



