

تحلیل ضریب اطمینان پایداری شبیهای خاکی با استفاده از تئوری فازی

سیدمرتضی مرندی^۱، محمد حسین باقری پور^۲، حامد سرتیپی^۳

marandi@mailuk.ac.ir

چکیده

تعیین ضریب اطمینان پایداری شیروانیها به دلیل تعدد پارامترهای غیرقطعی، مشکل می‌باشد. راه‌حلهای مبتنی بر تئوری امکان فازی می‌تواند یک روش تحلیل سیستماتیک و منطقی را فراهم آورد. در این مقاله سعی شده است تا راه‌حل جدیدی برای تحلیل پایداری شیروانیها با ترکیب عدم قطعیت‌های فازی، ارائه گردد که پارامترهای غیرقطعی توسط سیستم فازی تشریح می‌شوند و از این طریق یک روش جهت مطالعه عدم قطعیت فازی در تحلیل ضریب اطمینان پایداری شیروانیها، ارائه شده است. همچنین در این مقاله از یک مثال عددی مربوط به یک شیب محدود استفاده شده است. راه‌حل ارائه شده، تعیین سطوحی از شیروانی را که دارای احتمال ریزش بیشتر از سطح ریزش بحرانی هستند را میسر می‌سازد.

واژه‌های کلیدی: پایداری شیب، ضریب اطمینان، منطق فازی

مقدمه

ناپایداری شیروانیها، خواه شیروانیهای طبیعی و خواه شیروانیهای ساخته دست بشر، بخش مهمی از ناپایداریها و خرابیها را در مهندسی عمران شامل می‌شوند. جهت حصول اطمینان بیشتر می‌بایست عدم قطعیت‌ها در طراحی و یا تخمین پایداری شیروانیها به درستی تعیین شوند. تعدد عدم قطعیت‌ها و اهمیت آنها در رابطه با تحلیل و طراحی شیروانیها نیز بر اهمیت آن می‌افزاید. تغییرات مواد زمینی (معدنی) با روشهای قطعی و قراردادی تحلیل پایداری شیبها قابل محاسبه نمی‌باشند و بنابراین تصمیمات معقولی برای انتخاب و تعیین چنین مواردی مانند مقاومت برشی، چگالی، فشار منفذی و ... می‌بایست اتخاذ نمود. تعیین ضریب اطمینان پایداری نیز نیازمند اطلاعات در خصوص این پارامترهای غیرقطعی می‌باشد. قبلاً تئوری احتمال ابزار کار با پارامترهای غیرقطعی بوده است. به همین دلیل همه عدم قطعیت‌ها برای درک مشخصه‌های تصادفی غیرقطعی فرض می‌شوند. لیکن عدم قطعیت‌ها تصادفی نیستند. خصوصاً عدم قطعیت‌هایی که بر پایه اطلاعات ناقص یا منابع نادرست به صورت غیرقطعی می‌باشند را نمی‌توان تصادفی دانست. بنابراین پارامترهای غیرقطعی نمی‌تواند به وسیله تئوری احتمال به صورت مناسب توجیه شوند و تئوری فازی بدین منظور مناسب‌تر می‌باشد.

در اغلب مواقع، منابع داده‌ها کاملاً محدود می‌باشند و نوع توزیع متغیرهای غیرقطعی نیز مشخص نیست. این وضعیت کاربرد روش تخمین کلاسیک را کاملاً با مشکل روبرو می‌کند. با توجه به چنین شرایطی که منابع اطلاعاتی محدود می‌باشد، منطقی به نظر می‌رسد که تخمین‌ها را بر پایه تئوری فازی استوار نمود. در ارزیابی پایداری شیروانیها، عدم قطعیت‌های قابل

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهیدباهنر کرمان

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه شهیدباهنر کرمان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران خاک و پی، دانشگاه شهیدباهنر کرمان

توجهی وجود دارند. حتی در خاکهای هموزن نیز با عدم قطعیت‌هایی مانند مقاومت برشی و ... مواجه می‌باشیم. تغییرات در مصالح شیروانیها و سایر عدم قطعیت‌های آمیخته شده با پایداری آن منجر به استفاده از روشهای امکان بر پایه مدل‌های ادراکی می‌گردد.

چنانچه به دلیل عدم دقت، ابهام یا نامشخص بودن، نوع خاصی از عدم قطعیت به وقوع بپیوندد، در این صورت متغیر فازی است و می‌تواند به صورت یک تابع عضویت نشان داده شود. هدف اصلی در این مقاله نیز استفاده از عدم قطعیت فازی در تحلیل ضریب اطمینان پایداری شیروانیها می‌باشد.

در این مقاله یک راه‌حل جدید که روش تخمین فازی (FPEM)^۱ نام دارد، جهت تخمین ضریب اطمینان یک شیب خاکی محدود معرفی شده است. این راه‌حل درجه عضویت مقادیر با هر پارامتر ورودی نامعلوم در مدل تحلیل را تعیین می‌کند. FPEM، جهت تعیین مقادیر ویژه و واریانس ضریب اطمینان نیز به کار می‌رود.

آنالیز امکان ضریب اطمینان

امروزه مشخص شده است که روشهای احتمالاتی به تنهایی برای ارزیابی ضریب اطمینان که با مجموعه اطلاعات غیردقیق سر و کار دارد، مناسب نمی‌باشد. در چنین روشهایی استفاده از تئوری امکان مبتنی بر تئوری فازی یک راه‌حل قوی برای حل اینگونه مسائل فراهم می‌کند. ضریب اطمینان (FS)^۲، تابعی است از چند متغیر غیرقطعی و ثابت. به عنوان مثال:

$$FS=f(c, \varphi, \gamma, u, H, \alpha, \dots) \quad (1)$$

که در آن c ضریب چسبندگی، φ زاویه اصطکاک داخلی، γ وزن واحد حجم، u فشار آب منفذی، H ارتفاع شیب و α زاویه شیب می‌باشد. گسیختگی شیروانی زمانی رخ می‌دهد که FS مقداری کوچکتر یا مساوی واحد گردد. بنابراین اگر F بیانگر گسیختگی باشد، داریم:

$$F = [F_s \leq 1] \quad (2)$$

اگر $f(FS_i)$ تابع چگالی احتمال (PDF)^۳ ضریب اطمینان FS_i در طول سطح گسیختگی S_i باشد، در اینصورت امکان فازی گسیختگی شیروانی در طول S_i با هر FS و یک درجه عضویت یا درجه امکان در مجموعه A به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P[F|S_i] = \int_{-\infty}^1 \alpha_A(FS_i) dp(FS_i) \quad (3)$$

که در آن $\alpha_A(FS_i)$ توزیع احتمالی برای FS_i و $dp(FS_i)=f(FS_i)d(FS_i)$ و $P[F|S_i]$ شرایط امکان فازی گسیختگی داده شده که بعداً در سطح S_i رخ خواهد داد، می‌باشد.

برای هر N سطح گسیختگی ممکن با احتمال تصادفی $P[S_i]$ ، $i=1,2,\dots,N$ از تئوری کلی احتمال، امکان گسیختگی فازی P_{ff} شیروانی به صورت زیر می‌باشد:

$$P_{ff} = P[F] = \sum_{i=1}^N P[F|S_i]P[S_i] \quad (4)$$

با $\sum_{i=1}^n [P[S_i]] = 1$ در میان سطوح گسیختگی، سطح گسیختگی بحرانی (سطحی که با کمترین مقدار ضریب اطمینان متناسب است)، معین می‌گردد که $FS=DS_{min}$. اگر این سطح با S_c نشان داده شود و امکان این رخداد به وسیله $P[S_c]$ مشخص شود، در این حالت رابطه (۴) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$P_{ff} = P[F|S_c]P[S_c] + \sum_{i=1}^N P[FS_i]P[S_i] \quad (5)$$

1- Fuzzy program estimated method

2- Factor of safety

3- Probability density function

سیستم احتمال گسیختگی به وسیله رابطه (۵) نشان داده می‌شود. مشخص است که درجه احتمال بالا، دلیل درجه امکان بالا نمی‌باشد هرچند اگر رخداد غیرمحمتمل باشد، غیرممکن نیز می‌باشد. بنابراین می‌توان گفت که روش احتمالاتی محدوده بالایی برای روش امکان می‌باشد.

روش تخمین فازی

سابقه

تئوری امکان ابزار نیرومندی جهت به کار بردن و استفاده از پارامترهای غیرقطعی می‌باشد. چنانچه مشکل تابع توزیع و پارامترهای دخیل مناسب باشد، ویژگیهای اصلی متغیرهای تصادفی می‌بایست به طور کامل توصیف گردد. در عمل ممکن است شکل تابع توزیع مشخص نباشد؛ در نتیجه توصیف تقریب متغیر تصادفی لازم است. برای این منظور پارامترهای غیرقطعی می‌بایست مانند یک فاصله (به عنوان مثال) با تخمین محدوده بالاتر و پایین‌تر، تشریح گردد. عدم قطعیت دخیل در پارامترها می‌بایست توسط مجموعه فازی توصیف گردد.

در این مطالعه، از اعداد فازی دوزنقه‌ای جهت نشان دادن پارامترهای غیرقطعی استفاده شده است. اعداد فازی دوزنقه‌ای با مقادیر a و b و c و d تعریف شده است.

راه حل

فرض شود که M پارامتر غیرقطعی چندگانه $X=[X_1, X_2, \dots, X_M]$ یک بردار میانه $E(x)=[E(x_1), E(x_2), \dots, E(x_M)]^T$ با D که یک ماتریس قطری $M \times M$ متغیرهای پارامترهای غیرقطعی باشند. در اینجا پارامترهای غیرقطعی توسط مقادیر میانگین آنها و انحراف معیار مشخص شده‌اند.

قدم بعدی ایجاد مجموعه فازی برای هر پارامتر غیرقطعی دخیل در تحلیل می‌باشد. ایجاد مجموعه فازی به دو مورد بستگی دارد. تعریف یک مجموعه مرجع مناسب و تعیین یک تابع تعلق مناسب. برای متغیر فازی x دوزنقه‌ای، مقادیر a و b و c و d نشان داده شده است. تمامی پارامترهای اعداد فازی می‌بایست عضو مجموعه مرجع مرتبط باشد. مقادیر پارامترهای دوزنقه‌ای عبارتند از:

$$a=E[X]-K_1\sigma[X] \quad c=E[X]+K_2\sigma[X]$$

$$a=E[X]-K_1\sigma[X] \quad d=E[X]+K_1\sigma[X]$$

که K_1 و K_2 مقادیر $0/5$ تا 3 ، بسته به داده‌های در دسترس و دقت نتایج خواسته شده، می‌باشند.

برای مسائل چند متغیره که M پارامتر غیرقطعی دارند، روش پیشنهادی نقاط خود را برای ارزیابی تابع بر پایه مفهوم برش a اعداد فازی انتخاب می‌کند. نقاط برای محاسبه تابع در فضای پارامتریک به صورت زیر بدست می‌آیند.

$$X_{\alpha i}^+ = c + V_{\alpha i} \quad (6)$$

$$X_{\alpha i}^- = b + V_{\alpha i} \quad (7)$$

که

b و c : مقادیر پارامترهای اعداد فازی برای $\alpha=1$ می‌باشند.

$V_{\alpha i}$: مقداری که جهت بدست آوردن پارامتر مرتبط با نقطه متناظر با مقدار تعلق، اضافه یا کم می‌شود.

$X_{\alpha i}^-$ و $X_{\alpha i}^+$: بردارهای مختصات M پارامتر غیرقطعی

α : مقدار سطح جهت به دست آوردن محدوده مقادیر غیرقطعی

در تمامی $2N$ نقطه بردار مختصات ها برای مثال یک N برای $+$ (محدوده مقادیر بالا) و N بعدی برای (محدوده مقادیر پایین) نشان داده شده است. بنابراین برای هر پارامتر غیرقطعی دو نقطه در هر برش انتخاب می شود که N عدد برش α مرتبط می باشد. برای $0 < \alpha < 1$ مقدار $[X_{\alpha i}^+]$ و $[X_{\alpha i}^-]$ ، MX_1 می باشد. برای تابع $w=g(x)$ ارزیابی تابع می تواند به صورت زیر محاسبه گردد. جمع مقادیر تابع در هر سطح α مرتبط بیانگر همبستگی بین متغیرها، به صورت زیر محاسبه می شود.

$$W_{\alpha i}^r = P + g^r(x_{\alpha i}^+) + P - g^r(x_{\alpha i}^-); \quad i = 1, 2, \dots, N \quad r = 1, 2 \quad (8)$$

که P_+ و P_- فاکتورهای وزن می باشند که توسط رابطه زیر محاسبه می شوند:

$$P_{\pm} = 1 \pm \sum_{i=1}^{M-1} \left[\sum_{j=i+1}^M \frac{P_{ij}}{\sqrt{\prod_{j=i+1}^M \left[1 + \left(\frac{B(1)_i}{2} \right)^2 \right]}} \right] \quad (9)$$

که در آن P_{ij} ضریب همبستگی بین متغیرهای فازی X_i و X_j و $\beta(1)_i$ ضریب غیر اریب متغیر فازی X_i می باشد. تأثیر ضریب همبستگی، تأثیر در تغییر فاکتورهای وزن می باشد. زمان r ام تابع به صورت زیر محاسبه می شود:

$$E(W^r) = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i W_{\alpha i}^r}{N} \quad (10)$$

مقدار α_i می بایست بیشتر از صفر باشد. بنا به تعریف، $\alpha = D$ بیانگر مجموعه مرجع X می باشد. از معادله 10 ، مقدار مورد انتظار و انحراف معیار تابع متغیر، قابل بدست آوردن می باشد. برای مثال اگر تابع متغیر، ضریب اطمینان باشد، می تواند به صورت $E[FS]$ و $\sigma[FS]$ باشد.

متدولوژی

جهت تعیین ضریب اطمینان از روش ساده شده پیشاب استفاده شده است. هر چند هر روش دیگر نیز می تواند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد.

هدف اصلی استفاده از مجموعه فازی جهت تشریح پارامترهای غیرقطعی خاک به صورت اعداد فازی به صورت دسته ای از فواصل سطح α می باشد. با جاگذاری اعداد فازی با فواصل، آنالیز غیرقطعی به یک سری آنالیزهای فاصله ای، کاهش می یابد. زمانیکه داده های موجود برای تخمین مناسب پایداری، یکنواخت باشد، اعداد فازی دوزنقه ای جهت نشان دادن عدم قطعیت ها به کار می رود. تغییرات فشار آب منفذی به صورت r_u در آنالیز پایداری وارد شده است.

توابع تعلق با استفاده از TrFNS برای هر پنج متغیر غیر قطعی $r_u, \phi'_2, C'_2, \phi'_1, C'_1$ به کار برده می شود. موارد ذکر شده عبارتند از:

مورد A: $K_1=1.00, K_2=0.50$

مورد B: $K_1=1.50, K_2=0.50$

مورد C: $K_1=1.5, K_2=1.00$

هر یک از این موارد برای متغیرهای غیرقطعی مرتبط، آنالیز شده است. پارامترهای TrFNS برای هر یک از موارد فوق بدست آورده شده است. در تحلیل انجام شده غیر اریبی برابر صفر فرض شده و آنالیز ضریب اطمینان فازی شیروانی با استفاده از FPEM محاسبه شده است.

روش ساده شده بیشاب

در این مطالعه از روش ساده شده بیشاب جهت تعیین ضریب اطمینان یک شیروانی محدود استفاده شده است. همچنین فرض بر این است که سطح لغزش به صورت دایره‌ای است مگر آنکه موارد ژئوتکنیکی سطح لغزش غیر دایره‌ای را تحمیل نماید.

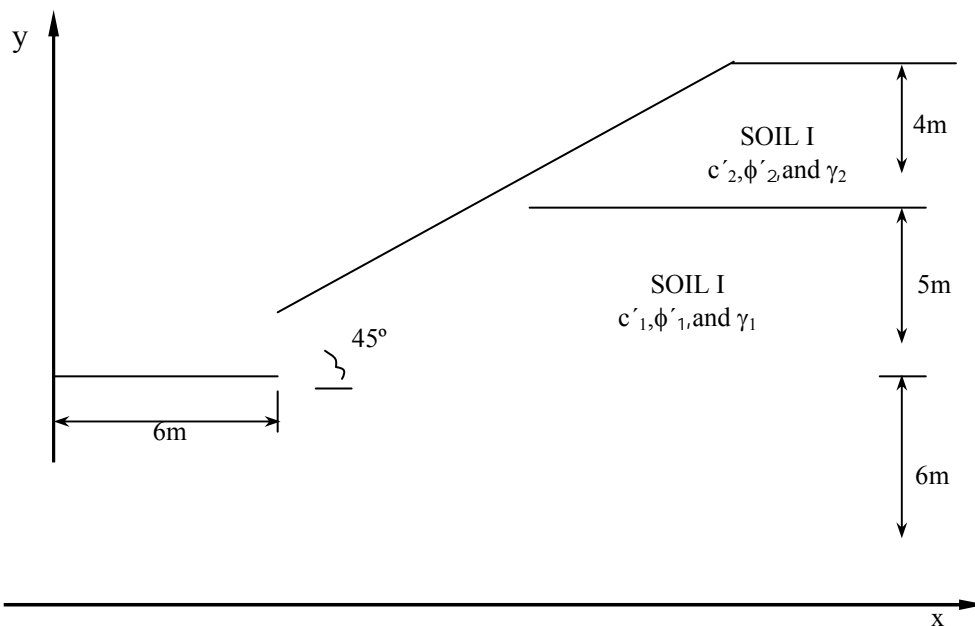
مطالعه پارامتری

مثال عددی

مقطع عرضی یک شیب با فرض دو لایه که لایه زیرین به روی یک لایه سنگ سخت می‌باشد، مفروض است (شکل ۱). مشخصات خاک برای هر لایه در جدول ۱ داده شده است. تأثیر فشار آب حفره‌ای به صورت نسبت فشار آب منفذی (r_{II}) در نظر گرفته شده است. مقدار میانگین نسبت فشار آب منفذی $0/3$ با ضریب تغییرپذیری $V(r_{II})=0/49$ می‌باشد. اغلب مقادیر منطقی انحراف معیارها از مرجع [۸] اخذ شده است. این مسأله توسط نرم‌افزار کامپیوتری STABIL آنالیز شده است. که با استفاده از روش ساده شده بیشاب مقدار FS را محاسبه می‌نماید.

جدول ۱- اطلاعات خاک جهت استفاده در مثال عددی

انحراف معیار (%)	میانگین	پارامترهای خاک	لایه خاک
۲۰	۱۵/۰۰	C'_1 (KN/m ²)	لایه I
۱۰	۳۴/۰۰	ϕ'_1 (°)	
۲	۲۰/۰۰	γ'_1 (KN/m ³)	
۳۰	۲۰/۰۰	C'_2 (KN/m ²)	لایه II
۱۲	۲۶/۰۰	ϕ'_2 (°)	
۳	۱۸/۲۰	γ'_2 (KN/m ³)	



شکل ۱- مقطع عرضی شیب جهت استفاده در مثال عددی

آنالیز پایداری

روش FPEM در مقطع نشان داده شده فوق، جهت تخمین ضریب اطمینان پایداری شیب برای مثال عددی به کار برده شده است. عدم قطعیت‌ها در پارامترهای متفاوت $C'_1, \varphi'_1, C'_2, \varphi'_2$ و نسبت فشار آب منفذی r_{ii} در تحلیل فرض شده‌اند. انحراف معیار γ بسیار کوچک می‌باشد (جدول ۱)، بنابراین از سهم تغییرات آن بر روی FS، صرف نظر شده است. ضریب اطمینان میانگین شیب (CFS)^۱، $1/252$ می‌باشد. پارامترهای ژئومتریک مرتبط با دایره لغزش برای مقادیر میانگین متغیرها عبارتند از: شعاع دایره لغزش $R=11/689m$ ، مختصات $x: 5/600m$ ، مختصات $y: 17/760m$.

هنگامیکه $r_{ii}=0/10$ باشد، در آنصورت $CFS=1/683$ ، $R=15/788m$ ، مختصات $x: 3/000m$ و مختصات $y: 21/500m$ می‌باشد. این نشان می‌دهد که FS نسبت به تغییرات فشار آب منفذی حساس می‌باشد.

هریک از متغیرهای فازی در محدوده سطح α مناسب قبل از وارد کردن اطلاعات در نرم‌افزار STABIL، توزیع شده‌اند. در هر سطح α پارامترهای مقاومت $C'_1, \varphi'_1, C'_2, \varphi'_2$ و نسبت فشار منفذی r_{ii} ، فاصله‌بندی شده‌اند. فرض شده است که سایر اطلاعات مانند ژئومتری شیب، وزن واحد حجم و ... ثابت باشند. ابتدا در هر سطح α انتخاب شده یک فاصله برای هر ۵ پارامتر غیرقطعی، بدست آورده شده است. در آنالیز انجام شده، در نهایت ۹ سطح α در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال: $\alpha_1=0/15$ ، $\alpha_2=0/20$ و $\alpha_3=0/30$ ، $\alpha_4=0/40$ ، $\alpha_5=0/50$ ، $\alpha_6=0/60$ ، $\alpha_7=0/70$ ، $\alpha_8=0/80$ ، $\alpha_9=0/85$. مقادیر فاصله برای هر ۵ پارامتر غیرقطعی برای مورد B در جدول (۲) داده شده است. در هر سطح α ضریب اطمینان با استفاده از نرم‌افزار REQME محاسبه شده است. ضریب اطمینان و پارامترهای ژئومتریک دایره‌های لغزش برای مورد B برای هر ۹ مقدار برش α در جدول (۳) داده شده است. برای محاسبه FS، جز + و - بردار مختصات در تشریح FS به همراه سایر پارامترهای ثابت، به صورت جداگانه مورد ملاحظه قرار گرفته است. با این محدوده‌های بالاتر و پایین‌تر مقادیر ضریب اطمینان در هر سطح α (جدول ۳) مجموعه فازی FS، قابل ساخته شدن می‌باشد. برای آنالیز قطعی با استفاده از مجموعه‌های فازی، تفسیر نتایج FS مجموعه فازی به این صورت می‌باشد که برای اهداف کاربردی، هنگامیکه بخواهیم مقادیر ساده FS را از مجموعه فازی FS گزارش دهیم، سطح α کمتر از $0/5$ نمی‌بایست مدنظر قرار گیرد. یک روش جهت استخراج یک مقدار ساده از مجموعه فازی FS حاصل، میانگین‌گیری از همه مقادیر محدوده پایین‌تر FS در محدوده $0/5 < \alpha < 1/0$ می‌باشد. روش دیگر برای استخراج یک مقدار ساده FS، انتخاب محدوده پایین‌تر مقادیر FS متناظر با $\alpha=0/70$ می‌باشد. [۴] که در آن میانگین وزنی مقادیر همه پارامترهای غیرقطعی نادرست خواهند بود.

جدول ۲- مقادیر فاصله سطح α برای پارامترهای غیرقطعی $r_u, \phi_2, C_2, \phi_1, C_1$ و α -Level

Uncertain parameters										α -Level
$r_u -$	$r_u +$	$\phi_2 -$	$\phi_2 +$	$C_2 -$	$C_2 +$	$\phi_1 -$	$\phi_1 +$	$C_1 -$	$C_1 +$	
۰/۱۳۲	۰/۴۶۸	۲۱/۶۳۲	۳۰/۳۶۸	۱۱/۶۰	۲۸/۴۰	۲۹/۲۴	۳۸/۷۹	۱۰/۸۰	۱۹/۲۰	۰/۱۰
۰/۱۴۴	۰/۴۵۶	۲۱/۹۴۴	۳۰/۰۵۶	۱۲/۲۰	۲۷/۸۰	۲۹/۶۸	۳۸/۴۲	۱۱/۱۰	۱۸/۹۰	۰/۲۰
۰/۱۵۶	۰/۴۴۴	۲۲/۲۵۶	۲۹/۷۴۴	۱۲/۸۰	۲۷/۲۰	۲۹/۹۲	۳۸/۰۸	۱۱/۴۰	۱۸/۶۰	۰/۳۰
۰/۱۶۸	۰/۴۳۲	۲۲/۵۶۸	۲۹/۴۳۲	۱۳/۴۰	۲۶/۶۰	۳۰/۲۶	۳۷/۷۴	۱۱/۷۰	۱۸/۳۰	۰/۴۰
۰/۱۸۰	۰/۴۲۰	۲۲/۸۸۰	۲۹/۱۲۰	۱۴/۰۰	۲۶/۰۰	۳۰/۶۰	۳۷/۴۰	۱۲/۰۰	۱۸/۰۰	۰/۵۰
۰/۱۹۲	۰/۴۰۸	۲۳/۱۹۲	۲۸/۸۰۸	۱۴/۶۰	۲۵/۴۰	۳۰/۹۴	۳۷/۰۶	۱۲/۳۰	۱۷/۷۰	۰/۶۰
۰/۲۰۴	۰/۳۹۶	۲۳/۵۰۴	۲۸/۴۹۶	۱۵/۲۰	۲۴/۸۰	۳۱/۲۸	۳۶/۷۲	۱۲/۶۰	۱۷/۴۰	۰/۷۰
۰/۲۱۶	۰/۳۸۴	۲۳/۸۱۶	۲۸/۱۸۴	۱۵/۸۰	۲۴/۲۰	۳۱/۶۲	۳۶/۳۸	۱۲/۹۰	۱۷/۱۰	۰/۸۰
۰/۲۲۲	۰/۳۷۸	۲۳/۹۷۲	۲۸/۰۲۸	۱۶/۱۰	۲۳/۹۰	۳۱/۷۹	۳۶/۲۱	۱۳/۰۵	۱۶/۹۵	۰/۸۵

برای نشان دادن تغییرپذیری کلی در مقادیر FS و برای تعیین FS مدنظر، می‌بایست عدد ممکن از مقادیر سطح α برای پارامترهای غیرقطعی، تعیین گردد. همه ۹ سطح α در محاسبه مقادیر مدنظر و انحراف معیار FS، مدنظر قرار گرفته است. مجموع مقادیر بالاتر و پایین‌تر FS در هر سطح α با استفاده از معادله (۸)، محاسبه شده است. مقادیر مدنظر FS (E[FS]) و انحراف معیار FS (σ [FS]) با استفاده از معادله (۱۰) تعیین شده است. E[FS] و σ [FS] با استفاده از روش مدنظر با در نظر گرفتن متغیرهای فازی غیرهمبسته در جدول (۴) داده شده است. تفاوت‌های مقادیر مورد انتظار و انحراف معیار، خیلی کوچک است. در این مطالعه در آنالیز قطعیت ضریب اطمینان چنانچه عدم قطعیت‌های پارامترها مؤثر، به صورت روشن منعکس نگردد، از اندیس ضریب اطمینان β بدین معنی که مقادیر با استفاده از روش MFSON محاسبه شده‌اند، استفاده شده است. با تقریب فرض شده است که FS با استفاده از روش MFSON برابر با مقداری است که توسط Lind و Hasofer ارائه شده است. اندیس‌های ضریب اطمینان و احتمال گسیختگی (P_{ff}) نیز در جدول (۴) داده شده‌اند. با افزایش مقادیر σ [FS] امکان گسیختگی نیز همانطوریکه در جدول (۴) نشان داده شده است، افزایش می‌یابد. مقادیر کل ضریب اطمینان برای هر سه مورد به ترتیب ۹۵/۵۸، ۹۴/۳۳ و ۹۱/۸۶ درصد می‌باشد. برای اغلب مسائل مهندسی ژئوتکنیک سیستم ضریب اطمینان کلی در محدوده ۹۰ تا ۹۹ درصد می‌باشد.

جدول ۳- ضریب اطمینان و پارامترهای ژئوتکنیک دواپر لغزش برای سطوح α مختلف

سطح α	ضریب اطمینان	مختصات X (m)	مختصات Y (m)	شعاع (m)
۰/۱۰	۱/۲۷۹	۶/۱۰۰	۱۸/۰۰	۱۱/۹۴۷
۰/۲۰	۱/۲۸۰	۵/۸۵۰	۱۸/۰۰۰	۱۱/۹۲۲
۰/۳۰	۱/۲۸۱	۵/۸۵۰	۱۸/۰۰۰	۱۱/۹۲۲

۱۵/۷۸۸	۱۱/۹۲۲	۲۱/۲۵۰	۱۸/۰۰۰	۳/۰۰۰	۵/۸۵۰	۱/۱۵۸	۱/۲۸۲	۰/۴۰
۱۵/۷۸۸	۱۱/۹۲۲	۲۱/۲۵۰	۱۸/۰۰۰	۳/۰۰۰	۵/۸۵۰	۱/۱۷۰	۱/۲۸۲	۰/۵۰
۱۱/۴۵۶	۱۱/۹۲۲	۱۷/۵۰۰	۱۸/۰۰۰	۳/۳۵۰	۵/۸۵۰	۱/۱۹۰	۱/۲۸۱	۰/۶۰
۱۱/۴۵۶	۱۱/۹۲۲	۱۷/۵۰۰	۱۸/۰۰۰	۳/۳۵۰	۵/۸۵۰	۱/۱۹۹	۱/۲۸۰	۰/۷۰
۱۱/۴۵۶	۱۱/۹۲۲	۱۷/۵۰۰	۱۸/۰۰۰	۳/۳۵۰	۵/۸۵۰	۱/۲۰۸	۱/۲۷۹	۰/۸۰
۱۱/۴۵۶	۱۱/۹۲۲	۱۷/۵۰۰	۱۸/۰۰۰	۳/۳۵۰	۵/۸۵۰	۱/۲۱۲	۱/۲۷۸	۰/۸۵

جدول ۴- نتایج تحلیل مساله

p_{ff}	β	$\sigma[FS]$	$E[FS]$	k_2	k_1
۰/۰۴۴۲	۱/۶۹۹	۰/۱۳۵	۱/۲۳۰	۰/۵۰	۱/۰۰
۰/۰۵۶۷	۱/۵۸۵	۰/۱۳۹	۱/۲۲۰	۰/۵۰	۱/۵۰
۰/۰۸۱۴	۱/۳۹۴	۰/۱۴۴	۱/۲۰۱	۱/۰۰	۱/۵۰

نتیجه گیری

در این مقاله تعریف بهتر و سازگارتر مقادیر ضریب اطمینان پایداری شیروانیها، به وسیله روش امکان بر پایه تئوری مجموعه‌های فازی صورت پذیرفته است. با استفاده از روش ساده شده بیشاب نیز به عنوان مدل مناسب که عدم قطعیتها به عنوان متغیر ورودی به صورت متغیرهای فازی می‌باشند، ضریب اطمینان پایداری شیب بدست آورده شده است. در روش پیشنهادی جهت بیان متغیرهایی که به صورت روشن قابل تعریف نیستند، از همراه نمودن یک درجه عضویت برای آن متغیر، استفاده شده است. روش شرح داده شده، مهندسین ژئوتکنیک را قادر به بدست آوردن تأثیر پارامترهای غیرقطعی بر روی محاسبه پایداری شیب به روش سیستماتیک می‌کند. همچنین در این مقاله مثالی جهت ارائه بهتر روش پیشنهادی آورده شده است. امکان گسیختگی فازی اطلاعات بیشتری نسبت به یک مقدار FS ثابت و ساده بدست می‌دهد. این روش در طراحی‌ها برای کاستن هزینه و بالاتر بودن دقت مفید می‌باشد. اگرچه نتایج این روش بیانگر نتایج مطلوبی می‌باشد، لیکن مطالعات موردی می‌بایست برای تأیید بیشتر این روش مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از این روش می‌توان برای کنترل سایر روشهای حل شیروانی‌ها استفاده کرد.

منابع و مراجع

- [1] Dodagoudar, G.R., Venkatachalam, G., "Reliability Analysis of Slopes Using Fuzzy Set Theory", (2000), Computers and Geotechnic.
- [2] Baker, R., Probability Estimation and Information Principles, Structural Safety, 1990;97-116.
- [3] Zimmermann, H.J., "Fuzzy set theory and its applications", Boston: Kluwer Academic Publishers, (1991).
- [4] Dodagoudar, G.R., "Reliability Risk and Decision Applied to Landslides", PhD Progress report, Department of Civil Engineering I.I.T. Bombay, Mumbai, (1998).
- [5] Cremona, C., Gao, Y., "The possibilistic reliability theory, theoretical aspects applications", Structural Safety, (1997).

- [6] Juang, C.H., Elton, D.J., "A practical approach to uncertainty modeling in geotechnical engineering", In Proceedings, Uncertainty in the geologic environment: from theory to practice, Geotechnical Special Publication No. 58. ASCE, 1996, p. 1269-83.
- [7] Juang, C.H., Jhi, Y.Y., Lee, D.H., "Stability analysis of existing slopes considering uncertainty", Engineering Geology 1998;49:111-22.
- [8] Harr, M.E., "Accounting for variability (reliability)", In: Chen WF, editor, The civil engineering handbook. Boca Raton: CRC Press, 1995. p.683-704.
- [9] Huang, Y.H., "Stability analysis of earth slopes", New York: Van Nostrand Reinhold Co, 1983.
- [10] Wolff, T.F., "Analysis and design of embankment dam slopes: a probabilistic approach", PhD thesis, Purdue University, Lafayette, IN, 1985.
- [11] Whitman, R.V., "Evaluating calculated risk in geotechnical engineering", Geotechnical Engineering, ASCE 1984;110:145-88.