



ارزیابی و تحلیل پایداری شیروانی های خاکی

امین ابراهیمی^{۱*}، سعید غفارپور جهرمی^۲، رضا محمودی لیرزردی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲- استادیار گروه علوم مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۳- مربی دانشگاه سما واحده ایذه

*aminebrahimi060@gmail.com

ارسال: اسفند ۹۶ پذیرش: اردیبهشت ۹۷

چکیده

تحلیل پایداری شیروانی یکی از مسائل پیچیده در علم مکانیک خاک است. امروزه با وجود پیشرفت مرزهای علم مهندسی عمران در میان پژوهشگران توانمند سراسر جهان، تحلیل پایداری شیروانی غیر قابل حل نمانده است. در این تحقیق ابتدا با در نظر گرفتن سطوح لغزش دایره ای و غیر دایره ای، روش های گوناگونی برای تحلیل پایداری شیروانی بیان می شود. سپس با توجه به اهمیت یافتن سطح لغزش بحرانی، روش های بهینه سازی مانند روش استعماری، بازپخت فلزات، کرم شبتاب مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این تحقیق بیش از ۱۰۰ مقاله معتبر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است و خروجی به زبان ساده بیان شده است. هدف از این تحقیق آشنایی با انواع روش های تحلیل شیروانی، نرم افزارهای مربوط و قابلیت های این نرم افزارها در تحلیل شیروانی ها، مطرح کردن تحلیل پایداری شیروانی با روش انتخاب شده، مقایسه و شناسایی عملکرد آنها در مراحل و حالت های مختلف و در نهایت بیان رویکرد محققین و جهت گیری آنها در تحلیل شیروانی خاکی، می باشد.

واژگان کلیدی: پایداری شیروانی، الگوریتم، سد خاکی، تحلیل سه بعدی.

۱- مقدمه

تحلیل پایداری شیروانی خاکی یکی از مسائل مهم و پیچیده علم مکانیک خاک است. به طور کلی روش های مورد استفاده در تحلیل پایداری شیب ها در یکی از دو گروه "روش های حدی مبتنی بر رفتار صلب خمیری" و "روش های عددی مبتنی بر رفتار ارتجاعی-خمیری" جای دارند. روش های حدی شامل روش خطوط مشخصه، روش تعادل حدی و روش آنالیز حدی هستند. روش های تحلیل عددی مانند روش اجزای محدود می باشد. روش تعادل محدود یکی از روش های قوی می باشد که با در نظر گرفتن مرز بالا و پایین صورت می گیرد. نخستین روش تعادل حدی توسط فلینوس [۱] مطرح شد. در روش مذکور از نیروی بین قطعات صرف نظر گردید و محاسبه مقدار ضریب اطمینان بر اساس تعادل لنگر حول مرکز سطح گسیختگی بدست آمد.

روش پیشاب اصلاح شده [۲] نیز با فرض سطح گسیختگی دایروی و تامین تعادل لنگر و نیرو قائم به محاسبه ضریب اطمینان پرداخت. روش لاو کارافه [۳] و جانبو اصلاح شده [۴] گروه مهندسی ارتش آمریکا [۵] با تامین معادلات تعادل، تعادل نیرو مقدار ضریب اطمینان را محاسبه کردند. روش اسپنسر [۶]، مورگنشترن- پرایس [۷] و سارما [۸] با در نظر گرفتن بعضی از فرضیات و تامین معادلات تعادل لنگر و نیرو، مقدار ضریب اطمینان را محاسبه نمودند. اساس روش تعادل حدی استفاده از سطح لغزش مشخص است و خروجی این روش همخانی زیادی به مشاهدات دارد. غالباً در این تحلیل ها، برای خاک های همگن از سطوح شکست دایره ای و برای خاکهای غیر همگن چند لایه از سطوح شکست دایره ای و غیر دایره ای استفاده می شود و سطوح توده ای بیانگر نقاط بحرانی است. از این جهت تحلیل پایداری شیروانی یک موضوع مهم و پیچیده به شمار می رود که امروزه با گسترش علم کامپیوتر و روش های محاسبات عددی، روش های زیادی برای تحلیل پایداری شیروانی مطرح شده است. پیکر [۹] برای اولین بار هندسه سطح لغزش را مطرح کرد، او از روش برنامه ریزی پویا و روش اسپنسر استفاده کرد. سلسیتینو ودانکن [۱۰] کاربرد روش متغیر های تناوبی را برای یافتن سطوح شکست بحرانی غیر دایره ای مطرح کردند.

نگوین [۱۱] الگوریتم سیمپلکس را برای یافتن ضریب اطمینان حداقل و سطح گسیختگی مربوط به آن تشریح کرد. آرای و تاگیو [۱۲] نیز با استفاده از روش گرادیان مزدوج و روش جانبو اقدام به حل این مسائل نمودند. گرکو [۱۳]، ملکاوای و همکارانش [۱۴] با استفاده از تکنیک مونت کارلو در پی حل سطح لغزش بحرانی برآمدند. بررسی سدهای خاکی و تحلیل پایداری شیروانی در مرحله پایان عملیات ساخت، بهره برداری و تراوش دائم، افت سریع مخزن و در حالت اعمال زلزله، دارای اهمیت بسیاری بالای می باشد. از این رو با تحلیل و پیش بینی رفتار سدها در مراحل ساخت و بهره برداری می توان ظرفیت بهره برداری از این سد را به حداکثر رساند [۱۵] موسوی [۱۶] با جمع آوری داده های مربوط به ۱۴۲ سد شکسته، با روش سه بعدی به تحلیل سد پرداختند. دارسنج [۱۷] به بررسی سد علویان در طول مراحل ساخت و اولین آنگیری توسط تحلیل های عددی و تکنیک تحلیل برگشتی پرداختند. هدف از این تحقیق آشنایی با انواع روش های تحلیل شیروانی، نرم افزار های مربوط و قابلیت های این نرم افزارها در تحلیل شیروانی ها، مطرح کردن تحلیل پایداری شیروانی با روش انتخاب شده، مقایسه و شناسایی عملکرد آن ها در مراحل و حالت های مختلف، در انتها نتیجه گیری، می باشد.

۲- روش شناسی

روشهای تعادل حدی از جمله قدیمی ترین روشها در تعیین سطح لغزش بحرانی و کمینه ضریب اطمینان می باشد. اکثر روشهای محاسبه پایداری شیب بر اصول تعادل خمیری پایه گذاری شده اند، در این روش فرض بر این است که شکست در یک سطح گسیختگی معین رخ می دهد و لذا تنش برشی لازم برای حفظ تعادل با مقاومت برشی خاک مقایسه شده و ضریب اطمینان پایداری شیب محاسبه می گردد. این فرآیند برای چندین سطح مختلف انجام و سطحی که دارای اطمینان کمتری باشد به عنوان سطح گسیختگی احتمالی در نظر گرفته می شود. تحلیل پایداری شیروانی یک سد معمولاً با استفاده از روش های معمول تعادل حدی صورت می گیرد. برای محاسبه کمترین ضریب اطمینان در هر یک از سه حالت: انتهای سد، تراوش سد، افت سریع مخزن، سطوح لغزش دایره ای و غیر دایره ای متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. که این تحلیل ها شامل دوایر لغزشی که از فنداسیون سد عبور می نمایند نیز می شوند. در صورت امکان، نیرو های ناشی از زلزله نیز در محاسبات پایداری در نظر گرفته

می شوند. ضریب اطمینان پایداری یک سد خاکی کمیته است که حاشیه ایمنی سازه را در برابر گسیختگی برشی نشان می دهد. بنابراین مقاومت برشی بسیج شده را در فرمول ۱ می توان محاسبه کرد.

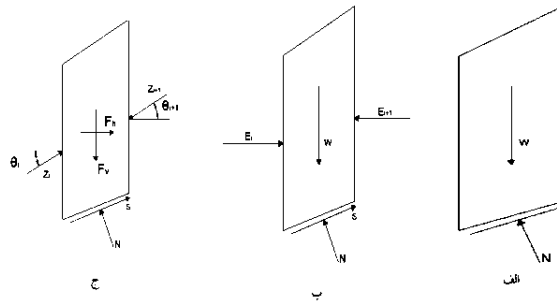
$$\tau = \frac{c'}{F} + \frac{(\sigma - u) \tan \Phi'}{F} \quad (1)$$

در روش های معمول تعادل حدی فرض بر این است که ضریب اطمینان یکسانی بر چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک اعمال شده و مقاومت برشی به طور یکنواخت در امتداد سطح گسیختگی احتمالی بسیج می شوند. تعیین مقداری مشخص برای ضریب اطمینان به طور کلی ممکن نیست زیرا ضریب اطمینان همواره تابع شرایط خاص حاکم بر سازه مورد نظر می باشد ولی مقادیر معمول ضرایب اطمینان مورد استفاده در محاسبات تحلیل پایداری سد ها در جدول ۱ آورده شده است.

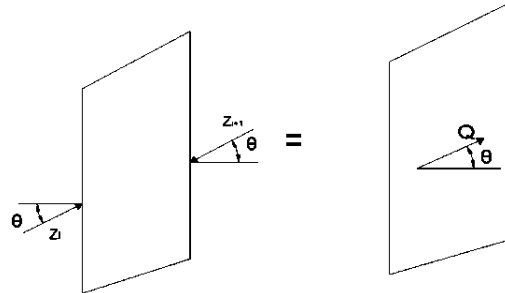
جدول ۱- مقادیر معمول ضریب اطمینان در تحلیل پایداری

ضریب اطمینان مورد نیاز	شرایط	شیروانی
۱/۴ تا ۱/۲	افت سریع تراز آب	بالادست
۱ تا ۱/۲	افت سریع تراز آب به همراه زلزله	بالادست
۱/۳ تا ۱/۱	پایان ساخت	بالادست
۱/۳ تا ۱/۱	پایان ساخت	پایین دست
۱/۷ تا ۱/۵	تراوش پایدار	پایین دست
۰/۵ تا ۱/۳	تراوش پایدار به همراه زلزله	پایین دست

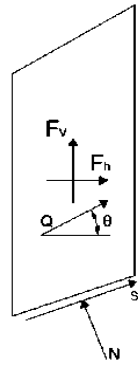
در اغلب روش های تعادل حدی، فقط اصول استاتیک به کار برده می شود بجز در تعدادی حالت های بسیار ساده، مسئله از نظر استاتیکی نامعین بوده و در نتیجه فرضیاتی برای معین نمودن مسئله و بدست آوردن ضریب اطمینان در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب بسته به فرضیات مورد استفاده روش های متعددی که ضرایب اطمینان متفاوتی را بدست می دهند ارائه شده است. این روش ها شامل: فلینوس [۱] بی شاب اصلاح شده [۲] لاو و کارافه [۳] جامبو اصلاح شده [۴] تعادل نیروها، گروه مهندسی ارتش آمریکا [۵] اسپنسر [۶] مورگن اشترا- پرایس [۷] و روش سارما [۸] می باشد. در روش فلینوس از نیروی جانبی بین قطعات صرف نظر می شود. در روش بیشاب اصلاح شده از مولفه مماسی بین قطعات صرف نظر شده. در روش های تعادل نیرو فقط شرایط تعادل نیرو تامین می گردد و از تعادل لنگر صرف نظر می شود. در این روش معادلات تعادل نیرو در دو جهت عمود بر هم برای تعیین ضریب اطمینان، نیرو های وارد بر کف هر قطعه و نیرو های بین قطعه ای مورد استفاده قرار میگیرد. به منظور معین کردن مسئله و یافتن ضریب اطمینان، شیب نیروی بین قطعات فرض شده است و بر اساس این فرض ضریب اطمینان محاسبه می شود. لاو و کارافه، جامبو اصلاح شده، گروه مهندسی ارتش آمریکا، شیب های مختلفی برای این نیرو ها در نظر گرفته اند. اشکال (۱- الف، ۱-ب، ۱-ج) دیاگرام آزاد نیرو های وارد بر یک قطعه در روش فلینوس، روش بیشاب اصلاح شده و تعادل نیرو ها را نشان می دهد. چندین روش مختلف قطعات وجود دارد که معادلات تعادل استاتیکی را به طور کامل تامین می کنند. هر کدام فرضیات مختلفی برای محاسبه ضریب اطمینان در تحلیل پایداری شیروانی دارند. از جمله این روش ها به روش اسپنسر، مورگن اشترا- پرایس و سارما می توان اشاره کرد. در روش اسپنسر فرض می شود که زاویه نیروی بین قطعات تمامی یکسان و برابر تا است. نیرو قطعات در روش اسپنسر و دیاگرام آزاد این نیروها در شکل (۲- الف و ۲-ب) به ترتیب بیان شده است.



شکل ۱- دیاگرام آزاد نیروها در روش الف (فلینوس، ب) بی شاب اصلاح شده، ج) تعادل نیروها

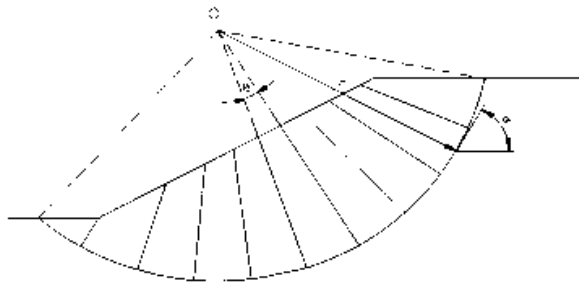


شکل ۲- الف - نیروهای بین قطعه ای در روش اسپنسر

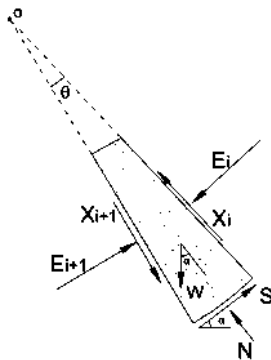


شکل ۲- ب - دیاگرام آزاد نیروها در روش اسپنسر

چنگ و ژو [۱۸] رابطه واحدی را برای محاسبه ی مقدار ضریب اطمینان دو بعدی با استفاده از روش تعادل حدی پیشنهاد دادند و به منظور محاسبه ی مقدار ضریب اطمینان از تقریب خطی گوس-نیوتن استفاده کردند. ژانگ مینگ هی [۱۹] ضریب اطمینان یک شیروانی مربوط به پروژه راه آهن را با استفاده از روش تعادل حدی و روش کاهش مقاومت برشی مقایسه کرد. روش تعادل حدی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است اما گاهی مواقع بخصوص در شرایط بحرانی مذکوره روش چندان مناسبی برای تحلیل پایداری شیروانی محسوب نمی شود. عزیززی و همکاران [۲۰] در تحقیق خود با در نظر گرفتن شکل قطعات بصورتی خاص، به تحلیل پایداری پرداخت. در این روش تمامی نیروهای وارد بر قطعات را در نظر گرفت و بدون هیچ گونه فرض ساده کننده ای روابط تعادل لنگر و نیرو را محاسبه کرد. و در ادامه با ارضا کردن معادلات تعادل، مقدار ضریب اطمینان را با دقت بیشتری محاسبه کرد، که مقادیر آن از دیگر روش های حدی بیشتر بود. شکل ۳ گوه لغزشی را نشان می دهد که در این روش در نظر گرفته شد. شکل قطعات به صورت قطاع است که موجب حذف شدن فرضیات متداول در روش تعادل حدی می گردد. همچنین دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک قطعه در شکل ۴ نمایش داده شد.



شکل ۳- سطح لغزش دایره ای که به قطعات شعاعی تقسیم شده



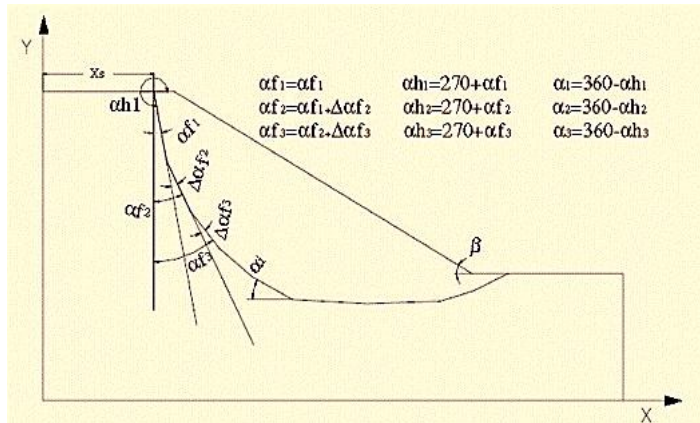
شکل ۴- دیاگرام آزاد نیرو های وارده بر یک قطعه

ایشان با محاسبه تعادل لنگرها و نیروهای وارده بر قطعه و ارزیابی این حالت با حالات تعادل محدود و محاسبه ضریب اطمینان برای پنج نوع حالت نتیجه گرفت که کمترین ضریب اطمینان به روش جانبو و فلینوس تعلق داشت. در این تحقیق معادلات تعادل نیرو و گشتاور بدون هیچ گونه فرض ساده کننده ای بکار رفته و ارضا می شوند به همین خاطر ضرایب اطمینان بالاتری نسبت به روش های تعادل حدی داشت. باید توجه داشت که در بیشتر تحقیقات انجام شده، شکل سطح لغزش عمدتاً دایره ای فرض شده است. که این مطلب، فقط در خاک های همگن فرض مناسبی است ولی این فرض در خاک های چند لایه نتایج مناسبی را ارائه نمی دهد و لازم است شکل مناسبی برای سطح لغزش ایجاد شود. برای سطح لغزش غیره دایره ای باید از تعداد متغیرهای هندسی که بیش از سه متغیر دارند استفاده کرد. اخیراً روش های بهینه سازی اکتشافی توسط محققین بکار گرفته شده است. روش تغییرات به وسیله بیکر و گابر [۹] روش ساده شده نگیوان [۲۱]، روش متغیر متناوبه سلسلینو و دونکن [۱۰] و روش چن و شائو [۲۲] از جمله روش ها برای محاسبه سطح لغزش بحرانی می باشد. گرکو [۲۳] و ملکاوی [۲۴] دریافتند که استفاده از روش مونت کارلو برای محاسبه سطح لغزش بحرانی مناسب می باشد. چنگ [۲۶] از روش الگوریتم ماهی ها، ذولفقاری [۲۷] از الگوریتم ساده شده ژنتیک، کانگ و همکاران [۲۵] الگوریتم مصنوعی اجتماع زنبور، منژن و همکاران [۲۵] با استفاده از روش تعادل حدی، به تحلیل پایداری شیروانی پرداختند.

ناپیوستگی تابع هدف، عوامل خاک، شرایط زمین، نیروهای خارجی که می توانند در یک دامنه تغییرات عریض داشته باشند، تعداد متغیرهای شکل هندسی، بعضی از مشکلاتی هستند که نیاز به الگوریتم بهینه سازی مناسبی دارند. سنائی راد و کاشانی [۲۸] در تحقیق خود روشی را ارائه کردند، آنها با استفاده از سطح لغزش غیر دایره ای و محاسبه ضریب اطمینان به روش اسپنسر الگوریتم های فرا اکتشافی کرم شبتاب، سرد کردن فلزات و رقابت استعماری را به کار گرفته و سپس مورد ارزیابی و مقایسه

قرار داده اند. آنها ابتدا روش سطح لغزشی را طبق شکل ۵ انتخاب کردند (جزئیات شکل، رجوع به مقاله) و سپس سطح لغزش را با فرضیات اسپنسر (جزئیات محاسبه، رجوع به مقاله) مورد ارزیابی قرار دادند. فرمول شماره ۲ رابط ضریب اطمینان را طبق فرضیات این روش بیان می دارد.

$$F_f = \frac{\sum (c'_i + (P - u_i) \tan \phi'_i) \sec \alpha}{\sum (W - (X_R - X_L)) \tan \alpha} \quad (2)$$



شکل ۵- تولید سطح لغزش به روش ذولفقاری [۳۲]

سپس با ارائه هر یک از سه روش بهینه سازی، و ارزیابی آنها و عملکردشان در حل تعدادی موارد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج حاصل از بهینه سازی، الگوریتم رقابت استعماری بهترین عملکرد را در میان الگوریتم های مورد بحث از خود نشان داد. همچنین بدترین نتایج مربوط به الگوریتم کرم شتاب است. بنابراین، استفاده از الگوریتم بهسازی رقابت استعماری برای حل مسائل پایداری شیروانی در خاک های چند لایه در وضعیت بارگذاری استاتیکی توصیه می شود. این مطالب در جدول ۲ که نشان دهنده نتایج بهینه سازی یکی از موارد مطالعاتی تحقیق می باشد.

جدول ۲- نتایج بهینه سازی یکی از موارد مطالعاتی

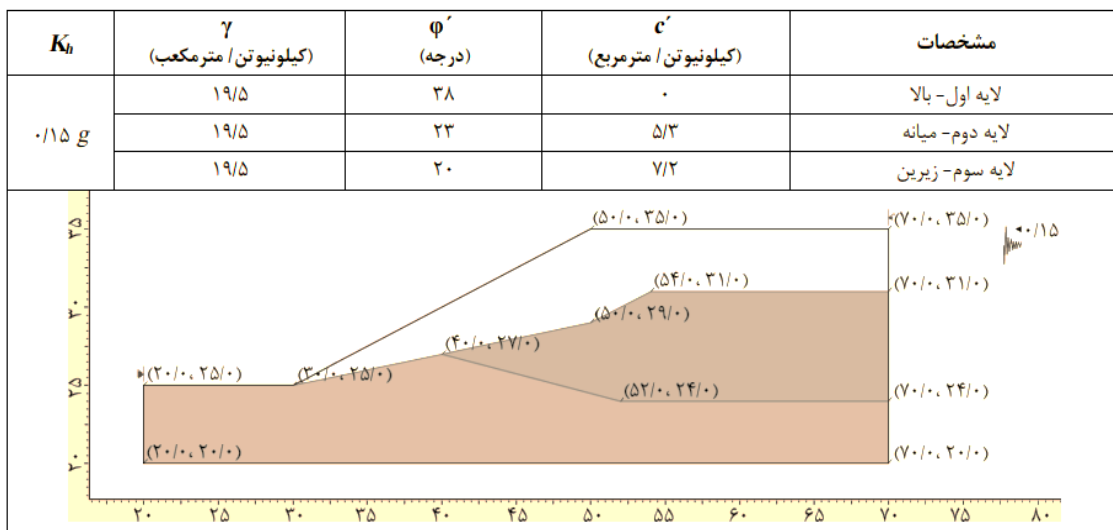
ICA	SA	FA	GA	الگوریتم
۱/۳۷۴۱	۱/۴۶۲۱	۲/۱۷۴۵	۱/۶۰۲۱	میانگین (F_s)
۱/۳۳۱۲	۱/۳۸۱۴	۱/۵۱۲۸	۱/۴۱۲۳	بهترین مقدار (F_s)
۰/۰۶۴۷	۰/۰۸۵۴	۰/۷۶۵۴	۱/۱۲۶۳	انحراف معیار (F_s)

یکی دیگر از روش های که به دنبال یافتن سطح لغزش بحرانی می باشد، روش بهینه سازی اجتماع ذرات است که در سال ۱۹۹۵ بر اساس شبیه سازی رفتار اجتماعی پرندگان و برای بهینه یابی مسائل پیچیده غیر خطی توسط کندی و همکارانش [۲۹] همچنین ایبرهارت و شی [۳۰] ارائه گردید. این روش با قابلیت فرار از مینیمم های محلی و بر خلاف بسیاری از روشهای سنتی نیازی به مشتق گیری ندارد و می تواند برای توابع هدف با ماهیت تصادفی به کار برده شود. فرج اله عسکری و ابراهیم شجاعی در تحقیق خود برای تخمین سطوح شکست بحرانی شیروانی های خاکی از روش بهینه یابی الگوریتم استفاده کردند. آنها متالهای عددی

ذکر کرده و نتایج کار خود را با دیگر محققین مقایسه کردند. همچنین به مقایسه نتایج حاصل با خروجی برخی از نرم افزار های مطرح نیز پرداختند و نرم افزاری ایجاد شده در تحقیقشان را PSO/Slope نام گذاری کردند. در ادامه برای روشن تر شدن ساز و کار این روش مثال شماره ۲ موجود در تحقیق مذکوره بیان می شود.

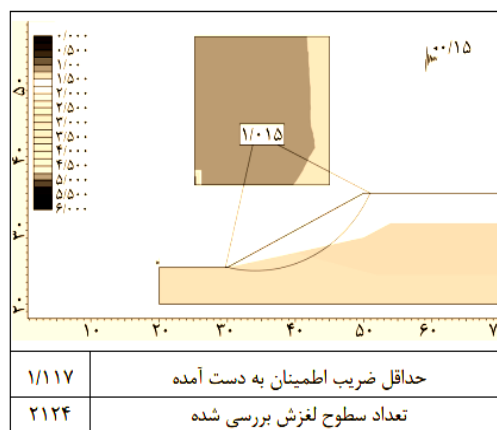
در سال ۱۹۸۸ انجمن ژئوتکنیک استرالیا متالهایی پایه برای کنترل نرم افزار های ژئوتکنیکی ارائه کرد [۳۱]. این مثال به خاطر اینکه به عنوان مرجعی مناسب برای کارهای عددی در اکثر مقالات استفاده می شود و همچنین به خاطر اینکه شامل بارگذاری لرزه ای، مورد توجه و تحلیل قرار می گیرد. هندسه کلی مثال و مشخصات خاک در جدول (۳) داده شده است. در این تحقیق جهت بررسی سطوح شکست غیردایره ای، خروجی های نرم افزار Slide در حالت بارگذاری لرزه ای و سطح شکست غیر دایره ای نیز به عنوان مرجع کنترل در نظر گرفته می شود. هم اکنون نتایج حاصل از تحلیل شکست دایره ای و غیر دایره ای به همراه هندسه سطح شکست، توسط Slide به ترتیب در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است.

جدول ۳- هندسه کلی مصالح و مشخصات مقاومتی خاک

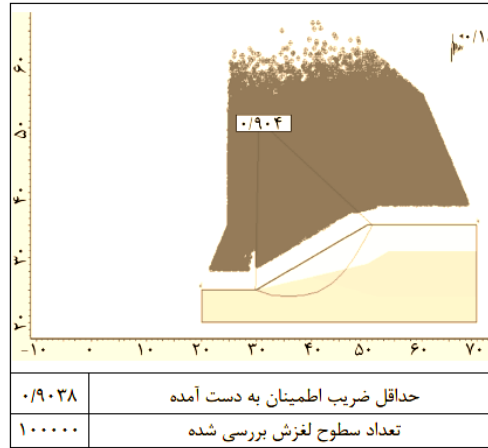


نتایج تحقیق حاضر با در نظر گرفتن سطح شکست دایره ای در جدول (۶) ارائه شده است. سطح شکست بحرانی دایره ای به دست آمده از تحقیق حاضر نیز در شکل (۶) مشخص می باشد. نتایج این تحقیق با در نظر گرفتن سطح شکست غیردایره ای در جدول (۷) و شکل (۷) ارائه شده است. و در نهایت در جدول (۸) نتایج این روش با ژریام و دونالد و slide مقایسه شد.

جدول ۴- نتایج شکست دایره ای این مثال با slide



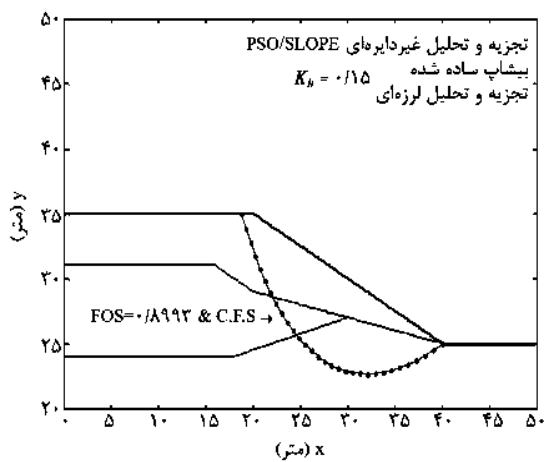
جدول ۵- نتایج تحلیل شکست غیره دایره ای این متال با slide



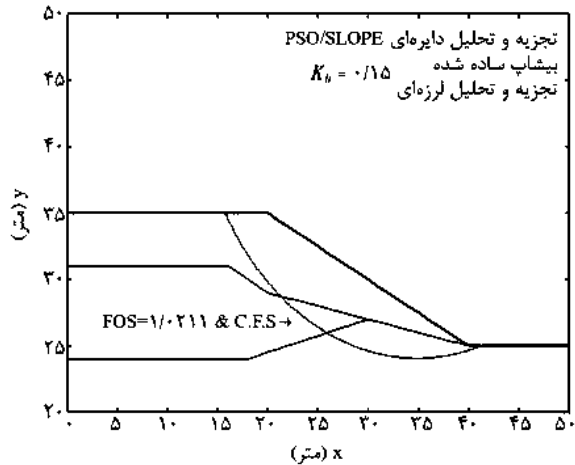
الگوریتم اجتماع ذرات به عنوان یک الگوریتم بهینه یاب فرا ابتکاری با توانایی فرار از مینیمم های محلی جهت تخمین کمترین ضریب اطمینان به کار بسته شد. نتایج حاصل از نرم افزار ارائه شده توسط این روش به نام PSO/Slope در مقایسه با نتایج برخی از نرم افزار های مطرح و همچنین نتایج کار سایر محققین نشان دهنده توانایی بالای الگوریتم اجتماع ذرات در بهینه سازی سطح لغزش بحرانی می باشد.

جدول ۶- مشخصات تحلیل PSO/Slope- شکست دایره ای این متال

تعداد تکرار	دامنه خطا	تعداد ذرات	تعداد قطعات	روش آنالیز
50	0.0001	30	30	بیشاپ ساده
تعداد سطوح لغزش تصادفی بررسی شده				مینیمم ضریب اطمینان
1500				1/0.211



شکل ۷- سطح شکست بحرانی غیردایره ای- تحلیل با PSO/Slope



شکل ۸- سطح شکست بحرانی دایره ای- تحلیل با PSO/Slope

جدول ۷- تحلیل PSO/Slope- شکست غیردایره‌ای این متال

تعداد تکرار	دامنه خطا	تعداد ذرات PSO	تعداد قطعات	روش آنالیز
۵۰	۰/۰۰۰۱	۳۰	۳۰	جانبو ساده اجتماع ذرات
تعداد سطوح لغزش تصادفی بررسی شده			مینیمم ضریب اطمینان	
۱۵۰۰			۰/۸۹۹۳	

جدول ۸- نتایج این روش با ژيام و دونالد و slide

PSO/Slope	Slide	ژيام و دونالد	مرجع نوع شکست
۱/۰۲۱۱	۱/۱۱۷	۱	دایره‌ای
۰/۸۹۹۳	۰/۹۰۳۸	۰/۹۹۵	غیردایره‌ای

۳- نرم افزار شناسی

نرم افزار Geo Studio از جمله برنامه های ژئوتکنیکی مبتنی بر اجزاء محدود بوده و از طریق آن می توان تحلیل هایی از قبیل تنش- کرنش، جریان، تراوش، پایداری شیروانی، تحلیل دینامیکی و همچنین شرایط افت سریع را بررسی کرد. این بسته نرم افزاری شامل نرم افزار های SIGMA/W برای تحلیل تنش- کرنش، SEEP/W برای تحلیل جریان تراوش، SLOPE/W برای پایداری شیروانی ها و ... می باشد. نرم افزار SEEP/W بر اساس رابط داری که عبور جریان آب از خاک را در دو حالت اشباع و غیر اشباع بیان می کند، فرمول بندی شده است. نرم افزار SEEP/W از معادلات زیر برای فرمول بندی تحلیل تراوش به صورت دوبعدی استفاده می کند [۳۲].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

در رابط فوق H بار آبی کل بر حسب متر، K_x نفوذپذیری در راستای محور x، K_y نفوذپذیری در راستای محور y $[m s^{-1}]$ ، Q فلاکس مرزی اعمال شده $[m s^{-1}]$ ، t زمان [s] و θ مقدار آب حجمی $[m^3]$ ، را نشان می دهد. تغییرات در مقدار آب حجمی به تغییر در حالت تنش و خصوصیات خاک بستگی دارد. حالت تنش برای هر دو شرایط اشباع و غیر اشباع با دو متغیر حالت می تواند تشریح شود، این متغیر ها در فرمول (۴) و (۵) بیان شده است.

$$(\sigma - u_a) \quad (4)$$

$$(u_a - u_w) \quad (5)$$

که در آن σ تنش کلی، u_a فشار هوای حفره ای u_w فشار آب حفره ای را توصیف می کند. ماجول SLOPE/W روش های پیشاب، جانبو، مورگان اشترن-پرایس، روش اول مهندسی ارتش امریکا، لاو و کارافیا و روش معمولی را برای ضریب اطمینان پایداری مورد استفاده قرار می دهد، لازم به ذکر است که این برنامه قادر است حداقل ضرایب اطمینان را برای سطوح لغزش دایروی و گوه ای محاسبه نماید [۳۳-۳۴].

نرم افزار Plaxis برای تحلیل دو بعدی تغییر شکل، پایداری و تحلیل های دینامیکی در مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. این نرم افزار یک برنامه اجزا محدود است که از روش غیر صریح برای مدل سازی عددی استفاده می کند. برنامه های اجزا محدود نرم افزار اغلب ماتریس اجزا را ترکیب کرده و یک ماتریس سختی کل می سازد. به عبارتی حوزه تعریف تابع از تعداد متناهی المان با تعداد ثابتی گره تشکیل شده است. تغییر مکان های گره ای هر المان با استفاده از تابع شکل که جابجایی های گره ای را به هم مرتبط می کند تخمین زده می شود. معادلات دیفرانسیل با مشتقات نسبی اولیه با مجموعه معادلات جبری جایگزین می شوند و به این ترتیب ماتریس سختی کل شکل می گیرد. با حل دستگاه معادلات جابه جایی نقاط در آن تعیین می شود و به کمک آن ها می توان تنش ها و کرنش ها هر المان را به دست آورد. در نرم افزار Plaxis برای محاسبه ضریب اطمینان از فرمول های (۶) و (۷) استفاده می شود.

$$SF = \frac{S_{\text{maximum available}}}{S_{\text{need for equilibrium}}} \quad (6)$$

$$SF = \frac{C + \sigma_n \tan \phi}{C_r + \sigma_n \tan \phi_r} \quad (7)$$

در این جا SF در رابط (۸) محاسبه می گردد.

$$\sum MSF = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_r} = \frac{c}{c_r} \quad (8)$$

که C چسبندگی، $\tan \phi$ زاویه اصطکاک مصالح، σ_n تنش نرمال، C_r و ϕ_r حداقل پارامترهای مقاومتی خاک است. عسکری در سال ۱۹۹۹ با توسعه و اصلاح روش میخالفسکی، پاسخ های وی را بهبود بخشید، نرم افزاری را به عنوان TRASS تهیه کرد [۳۶-۳۵]. این برنامه با روش تحلیل حدی مرز بالا و با استفاده از مکانیسم لغزشی متشکل از بلوک های صلب با حرکت انتقالی به تحلیل پایداری شیروانی در حالات مختلف می پردازد. این مکانیسم در عین حال که قادر است ناپایداری را با اثر بارهای قائم یا مایل مرکزی مدل کند در زمینه پی های تحت اثر بارهای خارج از مرکز محدودیت دارد. نرم افزار ANSYS نیز یکی از نرم افزار های موجود در زمینه اجزاء محدود می باشد. از این رو می توان نتایج آن را با یکی از نرم افزار های که قابلیت تحلیل پایداری سد ها را دارا می باشد، مقایسه نمود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله بیش از ۱۰۰ مقاله معتبر نشریه ها و کنفرانس های علمی ایران و جهان بررسی و مطالعه شد. به زبان ساده می توان در تحلیل پایداری شیروانی به این نتیجه رسید که عواملی نظیر لایه بندی خاک، وجود آب زیرزمینی، مقاومت برشی و مواردی دیگر از اهمیت بالایی در پایداری شیروانی برخوردارند. نوع سطح لغزش نیز از عوامل دیگری می باشد که می تواند روش تحلیل پایداری شیروانی را بر اساس آن تعیین کرد. سطح لغزش استوانه ای، صفحه ای و سطح لغزش واقعی به صورت اسپیرال لگاریتمی

در این مقاله شرح داده شده و مسئله قابل توجه در پایداری شیروانی های خاکی این است که روش های تحلیلی براساس سطح لغزش دایره ای در خاکهای غیر همگن، پاسخگو نمی باشد و باید از روشهایی دیگر پایداری این نوع از شیروانی ها مورد مطالعه قرار گیرد که روشهای بهینه سازی در تحلیل پایداری شیروانی ها مسئله مهمی می باشد که امروزه بیشتره محققین توجه خود را در تحلیل شیروانی های خاکی به این موضوع (یافتن سطح لغزش بحرانی) معطوف کرده اند.

۵- منابع

1. Fellenius, W, "Calculation of the stability of earth dams." In Transactions of the 2nd congress on large dams, Washington, DC, vol. 4., pp. 445- 463 (1936).
2. Bishop, AW, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. Institution of civil engineers, (1955).
3. Lowe, J, and Karafiath, L, "Stability of earth dams upon drawdown." In Proc. 1st. Pan American Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, México, vol. , pp. 537-552(1960).
4. Janbu, N, "Slope stability computations: In Embankment-dam Engineering. Textbook. Eds. RC Hirschfeld and SJ Poulos. JOHN WILEY AND SONS INC., PUB., NY, 1973, 40P." In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 12, no. 4, p. 67. Pergamon, (1975).
5. U.S. Army Corps of Engineers. "Stability of Earth and Rock-Fill Dams." U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. EM 1110-2-1902. (1970).
6. Spencer, E. "A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces." Geotechnique 17, no. 1: 11-26 (1967).
7. Morgenstern, NR, and V. Eo Price. "The analysis of the stability of general slip surfaces." Geotechnique 15, no. 1: 79-93 (1965).
8. Sarma, S K, "Stability analysis of embankments and slopes." Journal of the Geotechnical Engineering Division 105, no. 12: 1511-1524 (1979).
9. Nguyen, V. U; "Determination of Critical Slope Failure Surface", Geotech. Eng. ASCE, Vol. 111, pp.238-50, 1985.
10. Celestino, T. B.; and Duncan, J. M.; "Simplified Search for Non-Circular Slip Surface", Proceeding 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, pp. 391-4, 1981.
11. Nguyen, V.U. (1985). Determination of critical slope failure surfaces, J. Geotech. Eng., ASCE, 111, 238-250.
12. Arai, K. and Tagyo, K. (1985). Determination of noncircular slip surfaces giving the minimum factor of safety in slope stability analysis, Soils and Foundations, 21, 43-51.
13. Greco, V.R. (1996). Efficient Monte Carlo technique for locating critical slip surface, J. Geotech. Eng., ASCE, 122, 517-525.
14. Malkawi, A.I.H., Hassan, W.F., and Sarma, S.K (2001). Global search method for locating general slip surface using Monte Carlo techniques, J. Geotech. Geoenviron. Eng., 127, 688-698.

۱۵. غروری، م، محمدی، م، ۱۳۸۸. بررسی ضرورت مدل سازی لایه ای در تحلیل استاتیکی سد خاکی. دومین همایش ملی سد سازی دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان، ۱۰ اسفند، زنجان.
۱۶. حیدری، ط، ۱۳۸۲. مقایسه رفتار دینامیکی سد های خاکی در حالت دو بعدی و سه بعدی. دانشگاه علم و صنعت، برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب گروه عمران، ۲۱۵ صفحه.
۱۷. دارسنج، س، ۱۳۸۸. تحلیل و بررسی رفتار سد خاکی در حین اولین آبیگری- مطالعه موردی سد علویان، دانشگاه تبریز، برای دریافت کارشناسی ارشد مهندسی عمران-آب گروه عمران، ۲۱۵ صفحه.
18. Cheng, Y M, and Zhu, L J, "Unified formulation for two dimensional slope stability analysis and limitations in factor of safety determination." *Soils and foundations* 44, no. 6: 121-127 (2004).
19. Guo, Tong, and Zhongming He. "Comparison of Factor of Safety of a Roadway Slope Based on the Limit Equilibrium Method and Shear Strength Reduction Method." *Slope Stability and Earth Retaining Walls*. ASCE, 2011.
20. Hajiazizi, M., and Tavana, H, "Determining three-dimensional non-spherical critical slip surface in earth slopes using an optimization method." *Engineering Geology* 153: 114-124. (2013).
21. Nguyen, V. U; "Determination of Critical Slope Failure Surface", *Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 111, pp. 238-50, 1985.
22. Chen, Z.; and Shao, C; "Evaluation of Minimum Factor of Safety in Slope Stability Analysis", *Can Geotech*, Vol. 25, No. 4, pp. 735-48, 1983.
23. Greco, V. R.; "Efficient Monte Carlo Technique for Locating Critical Slip Surface", *Geotech Eng. ASCE*, Vol. 122, pp. 512-25, 1996.
24. Malkawi, A. I. H.; Hassan, W. F.; and Sarma, S. K.; "Global Search Method for Locating General Slip Surface Using Monte Carlo Technique", *Geotech Geoenviron Eng.*, Vol. 127, pp. 688-98, 2001.
25. Bolton, H. P. J.; Heymann, G.; and Groenwold, A.; "Global Search for Critical Failure Surface in Slope Stability Analysis", *Eng. Optimize*, Vol. 35, pp. 51-65, 2003.
26. Cheng, Y. M.; Liang, L.; Chi, S. C.; and Wei W. B.; "Determination of Critical Slip Surface Using Artificial Fish Swarm Algorithm", *Geotech Geoenviron Eng. ASCE*, Vol. 134, pp. 244-51, 2008.
27. Zolfaghari, A. R.; Heath, A. C.; and McCombie, P. F.; "Simple Genetic Algorithm Search for Critical NonCircular Failure Surface in Slope Stability Analysis" *Comput. Geotech*, Vol. 32, pp. 139-52, 2005. (2016): 207-216.
28. Sanai Rad, and Kashani. "Optimization of the stability of the gullies by assuming a non-linear slip surface using colonial competition optimization algorithms, fire extinguishing cream and metal annealing." *Amir Kabir Civil Engineering Magazine* 48.2.
29. Kang, F.; Li, J.; and Ma, Z.; "An Artificial Bee Colony Algorithm for Locating the Critical Slip Surface in Slope Stability Analysis", *Engineering Optimization*, 2013.
30. Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2000). Comparing inertia weights and construction factors in particle swarm optimization, *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 1, 84- 88.

31. Eberhart, R.C. and Shi, Y. (2001). Particle swarm optimization developments, applications and resources, Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation, 1, 81-86.
32. Giam, P.S.K. and Donald, I.B. (1989). Example problems for testing soil slope stability programs, Civil Engineering Research Report No. 8/1989, Monash University, ISBN 0867469218, ISSN 01556282.
33. Moharrami A, Hassanzadeh Y, Salmasi F, Moradi Gh, Moharrami Gh, 2014. Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions. Arabian Journal of Geoscience 7:1957-1964.
34. Sherard, J.L., R.J. Woodward, S.F. Gizienski and W.A. Clevenger. 1963. Earth-Rock dams engineering problems of design and construction. John Wiley and Sons, Inc., New York, 725pp.
35. Askari, F. (1999). Three-Dimensional Analysis of Homogeneous and Nonhomogeneous Slopes in Static and Dynamic Mode Using Upper Bound Theorem of Limit Analysis, Ph.D. Dissertation Thesis (In Persian) University of Tehran, Iran.
36. Farzaneh, O. and Askari, F. (2003). "Three-dimensional analysis of nonhomogeneous slopes." ASCE, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 129, No. 2, P.P. 137-145.