

تحلیل پایداری شیروانی پس از کاهش سطح آب در قوس رودخانه با بررسی کرنش و روش احتمالاتی مونت کارلو

امیر ملک پور^{۱*}، حامد نیکنام یوسفی^۲، مهدی اسمعیلی ورکی^۳

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۷/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۲۵

۱- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه گیلان

۳- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم کشاورزی، دانشگاه گیلان

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: amir_mlk@yahoo.com

چکیده

در بررسی پایداری دیواره شیب‌دار (شیروانی) رودخانه‌ها، عدم قطعیت پارامترهای مقاومت برشی خاک و تغییرات مکانی آنها بر دقت نتایج تأثیرگذار می‌باشند. امروزه تحلیل‌های احتمالاتی به عنوان روش‌های تکمیلی برای درک احتمال پایداری شیروانی بکار می‌روند. طی این تحقیق در قوس‌های رودخانه شلمان رود گیلان پس از مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی خاک، تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو انجام شد. بدین منظور فشار منفذی و کرنش در شرایط نشست غیرمماندگار به روش اجزای محدود مدل‌سازی گردیدند. سپس پایداری شیروانی با ترکیب روش مونت‌کارلو و روش‌های تعادل حدی ارزیابی و با نتایج تحقیقات دیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که در قوس ۲ (دارای بیش‌ترین انحنای فشار آب منفذی پس از کاهش سطح آب رودخانه با سرعت کمی مستهلک گردید. همچنین نتایج تحلیل کرنش نشان داد که در تراز پائین‌تر از سطح آب نرمال رودخانه در قوس‌های ملایم، تورم و در قوس‌های با انحنای زیاد، فشردگی ایجاد شد. در تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو با کاربرد رابطه قطعه‌ای معمولی، احتمال ناپایداری شیروانی در بازه زمانی بزرگ-تری نسبت به رابطه مورگنسترن-پرایس برآورد گردید. همچنین با کاهش سطح آب رودخانه تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان، تا ۹/۶ ساعت روند کاهش احتمال پایداری را نشان داد و در قوس با بیشترین انحنای (مقطع ۲) نیز نسبت به قوس با حداقل انحنای (مقطع ۴)، با گذشت زمان تغییرات بزرگ‌تر در موقعیت تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان مشاهده گردید.

واژه‌های کلیدی: پیچان‌رود، تحلیل احتمالاتی، تعادل حدی، روش اجزای محدود، مونت‌کارلو

Slope Stability Analysis after Decline of Water Level at the River Meander Considering Strain and Monte-Carlo Probabilistic Method

A Malekpour^{1*}, H Niknam Yousefi², M Esmaili Varaki³

Received: 2016-09-22

Accepted: 2017-12-16

¹- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

²- Graduated M.Sc. of Water Structures, Dept. of Water Engin., University of Guilan, Rasht, Iran

³- Assist. Prof., Dept. of Water Engin., College of Agricultural Sciences, University of Guilan, Rasht, Iran

* Corresponding Author, Email: amir_mlk@yahoo.com

Abstract

While investigating the stability of slopes at the rivers, uncertainty of soil shear strength parameters and their spatial variations affect the accuracy of results. Nowadays, probabilistic analyses are adopted to understand the probability of slope stability as the complementary methods. Throughout the current research on the meanders in Shalmanrood river of Guilan, the probabilistic analysis using Monte-Carlo method was carried out after field and laboratory studies on the soil. Accordingly, the pore pressure and strain under unsteady condition were modeled using finite element method. Then the slope stability was evaluated combining Monte-Carlo and limit equilibrium methods and compared with other researches' results. The results showed that at meandering section 2 (the highest curvature), pore water pressure was dissipated in low rate after decline of the water level at the river. Additionally, results of strain analysis demonstrated that at the water elevations lower than normal level, swelling and compression occurred in meanders with slight and high curvatures, respectively. The probabilistic analysis with Monte-Carlo method applying Ordinary Slice method approximated the probability of slope failure within a bigger time span, as compared to Morgenstern-Price method. Meanwhile by decrease of the water level in river, the probability density function (PDF) of the safety factor showed a descending trend within 9.6 hours. In meander with the maximum curvature (section 2), a bigger temporal variations were observed in the position of PDF of safety factor, as compared to the minimum curvature (section 4).

Keywords: Finite element method, Limit equilibrium, Meandering river, Monte-Carlo, Probabilistic analysis

مقدمه

نمودند و به خطای ۶ درصد در مقایسه با نتایج آزما-
یشگاهی دست یافتند. پیرستانی و همکاران (۱۳۹۱) با
بررسی الگوی سرعت جریان در مقاطع پیچانرود، نتیجه
گرفتند که هرچه شعاع انحنای مرکز قوس نسبت به عرض
جریان کمتر باشد، قدرت جریان ثانویه بیشتر می‌گردد.
تاکنون محققین مختلفی تحقیقات خود را در زمینه پایداری
شیروانی رودخانه‌ها انجام داده‌اند. ژانگ و ژانگ (۲۰۰۷)،
مدل کرنش سطحی ملایم را با تعمیم روش تحلیل پایداری
قطعه‌ای مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که
تحلیل پایداری شیروانی همگن در شرایط وجود کرنش

رودخانه‌های پیچانرودی (قوس در قوس) یکی از سیستم‌های پویای سطح زمین هستند. در محل قوس این رودخانه‌ها، عوامل مختلفی بر پایداری شیروانی خاکی موثر می‌باشند. از جمله این عوامل می‌توان به تغییرات سطح آب و اثر تغییرات اندازه حرکت (نیروهای هیدرودینامیک) ناشی از تغییر جهت بردارهای سرعت اشاره نمود. در این زمینه ظهیری و همکاران (۱۳۹۱) الگوی سرعت در مقاطع مرکب پیچانرود را به روش عددی بررسی

نرم‌شونده^۳ و مدل خاک سخت‌شونده^۴ و غیره (کوک و همکاران ۲۰۰۹). مدل *Cam-Clay* برای خاک‌های ریزدانه، مدل موهر-کولمب برای محدوده تنش‌های وارده کم تا زیاد و مدل الاستیک خطی برای خاک‌های عمدتاً درشت دانه با رفتار غیرپلاستیک که تنش‌های کوچک تا متوسط به آنها وارد می‌شوند مناسب می‌باشند که روابط آن به صورت زیر می‌باشد (روابط ۱، ۲ و ۳).

$$\varepsilon = \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad [1]$$

$$\mu = \frac{\varepsilon_{lateral}}{\varepsilon_{vertical}} \quad [2]$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad [3]$$

که $\bar{\sigma}$ ، E و ε به ترتیب تنش، مدول الاستیسیته و کرنش خاک می‌باشند. μ نسبت پواسون (نسبت کرنش جانبی به کرنش قائم خاک) و G مدول برشی خاک می‌باشد.

تحلیل احتمالاتی پایداری به روش مونت‌کارلو

روش مونت‌کارلو در بررسی پایداری شیروانی، بر مبنای استفاده از توزیع احتمالاتی متغیرهای ورودی به جای مقدار قطعی آنها در روابط تعیین ضریب اطمینان (برای مثال روابط تعادل حدی (رابطه ۴) همچون روش مورگنسترن-پرایس، اسپنسر، روش قطعه‌ای معمولی و غیره) استوار می‌باشد.

$$FS = \frac{\sum R}{\sum F} \quad [4]$$

که FS ، R و F به ترتیب ضریب اطمینان، نیروها یا گشتاورهای مقاوم و نیروها یا گشتاورهای مخرب می‌باشند. استفاده از توزیع احتمالاتی متغیرهای ورودی به جای مقدار قطعی آنها به محاسبه توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان منتهی می‌شود. پارامترهای ورودی در روابط ضریب اطمینان که ماهیت تصادفی دارند و می‌توان به صورت توزیع احتمالاتی وارد نمود معمولاً شامل پارامترهای فیزیکی همچون وزن مخصوص و پارامترهای

ملايم، تنها به پارامترهای مقاومت برشی وابسته نبوده و به میزان کرنش خاک نیز بستگی دارد. بورمن و همکاران (۲۰۱۵) عملکرد نسبی روش‌های تعادل حدی در پایداری شیروانی را در چند حالت مختلف (شامل تغییرات سطح آب و عدم تغییرات سطح آب) با یکدیگر مقایسه نمودند. با توجه به اهمیت تأثیر عدم قطعیت پارامترهای ژئوتکنیکی بر پایداری شیروانی، امروزه برخی از محققین با استفاده از تحلیل احتمالاتی و بررسی میزان کرنش پایداری شیروانی را تحلیل نموده‌اند (رهبر و محمودی اردکانی ۱۳۹۲، پارکر و همکاران ۲۰۰۸).

در تحقیق حاضر به بررسی تغییرات کرنش در شیروانی‌های واقع در قوس‌های رودخانه‌ی شلمان‌رود در شرایط نشت غیرماندگار پرداخته می‌شود. در این راستا، بررسی اثر تغییرات نیروی هیدرواستاتیک (ناشی از تغییرات سطح آب رودخانه) و نیروی هیدرودینامیک در

محل قوس (به دلیل تغییر اندازه حرکت ناشی از تغییر جهت جریان) و تأثیر آنها بر تغییرات کرنش شیروانی، هدف اولیه این تحقیق می‌باشد. هدف دیگر تحقیق، بررسی تأثیر تغییرات کرنش بر پایداری شیروانی با استفاده از ترکیب روش احتمالاتی و روش‌های مختلف تعادل حدی می‌باشد.

مدل رفتار تنش-کرنش در خاک

اغلب مهندسين ژئوتکنیک در انتخاب مدل رفتاری مناسب برای تحلیل تنش-کرنش در خاک با مشکل مواجه می‌باشند. مدل رفتاری خاک باید به گونه‌ای انتخاب شود که بهترین برآزش را بر داده‌های بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی داشته باشد. تعدادی از انواع مدل‌های رفتاری خاک عبارتند از مدل موهر-کولمب؛ مدل الاستیک خطی (قانون هوک)؛ مدل *Cam-Clay*، مدل خاک

³ Soil softening model

⁴ Soil hardening model

¹ Mohr-Coulomb model

² Linear elastic model (Hook's law)

مسأله بر موضوعاتی همچون تنش‌های وارد بر شیروانی، رفتار کرنشی و پایداری شیروانی تأثیرگذار باشد.



شکل ۱- نمایی از محدوده جغرافیایی مورد مطالعه در شهرستان لنگرود گیلان.

بدین منظور در تحقیق حاضر به بررسی تأثیر تغییر نیروی هیدرواستاتیک (ناشی از تغییرات سطح آب) و نیروی هیدرودینامیک (ناشی از تغییر جهت بردار سرعت و تغییر اندازه حرکت در محل قوس)، بر رفتار کرنشی شیروانی پرداخته شد. سپس تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی بر مبنای کرنش‌های برآورد شده انجام شد. برای انجام مطالعات چهار قوس این رودخانه با خصوصیات هندسی مختلف انتخاب گردیدند که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است.

مقاومت برشی همچون زاویه اصطکاک داخلی ϕ و چسبندگی c می‌باشند. توزیع احتمالاتی مورد قبول پارامترهای ژئوتکنیکی عمدتاً توزیع نرمال (رابطه ۵) یا توزیع لوگ-نرمال می‌باشد (وانگ و همکاران، ۲۰۱۵).

[۵]

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]}$$

که x, μ و σ بترتیب مقدار متغیر تصادفی، میانگین و انحراف معیار آن می‌باشند.

مواد و روش‌ها

رودخانه مورد مطالعه و خصوصیات خاک

رودخانه‌ی شلمان‌رود (سیکارود) در شرق شهرستان لنگرود در استان گیلان در محدوده عرض‌های جغرافیایی $36^{\circ} 54' 55''$ و $37^{\circ} 9' 57''$ شمالی و طول‌های جغرافیایی $49^{\circ} 55' 16''$ و $50^{\circ} 14'$ شرقی واقع شده است (شکل ۱). با توجه به تغییرات سطح آب در این رودخانه به هنگام سیلاب و پس از فروکش آن، انتظار می‌رود که این

جدول ۱- مختصات جغرافیایی و خصوصیات هندسی قوس‌های مورد مطالعه در رودخانه شلمان‌رود.

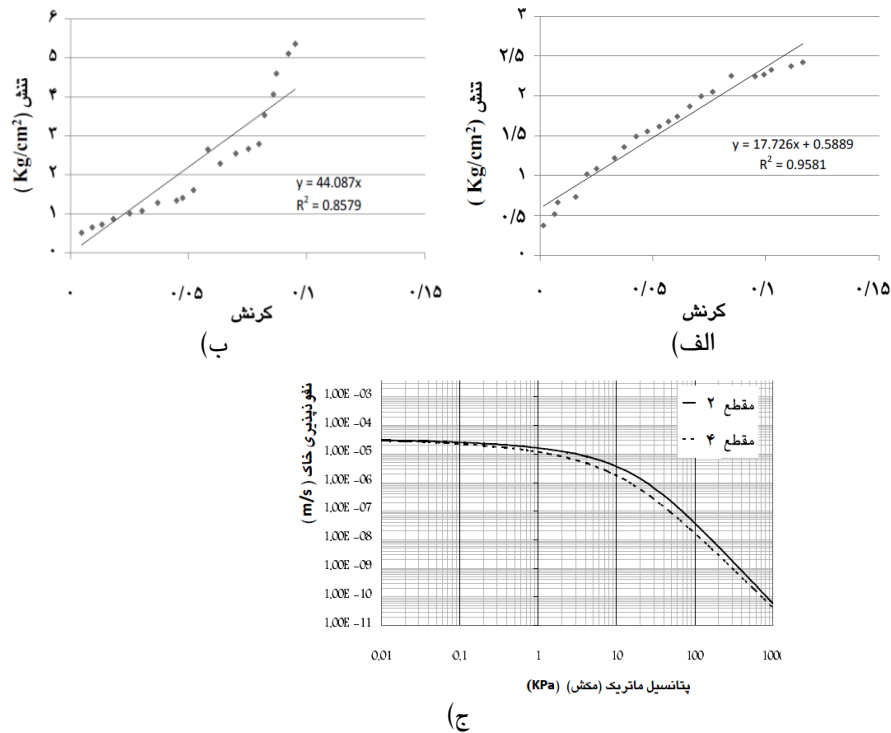
مقطع	مختصات جغرافیایی UTM	شعاع قوس (m)	زاویه مرکزی قوس (degree)
۱	۴۱۱۴۱۳۹	۹۱	۵۵
۲	۴۱۱۳۹۷۲	۷۴	۶۹
۳	۴۱۱۴۵۶۷	۱۲۳	۳۴
۴	۴۱۱۴۱۶۵	۲۹۳	۱۹

چندین نمونه خاک برداشت شد و مشخصات ژئوتکنیکی و خصوصیات نفوذپذیری متوسط خاک به ازای شرایط اشباع و غیراشباع در آزمایشگاه‌های آبیاری و مکانیک خاک دانشگاه گیلان تعیین گردیدند، که نتایج بدست آمده

که مقاطع دارای بیشترین و کمترین انحنا (بترتیب مقاطع ۲ و ۴) دارای زاویه شیب شیروانی بترتیب ۳۳ و ۳۱ درجه و ارتفاع شیروانی ۱۲/۲ و ۱۱/۴ متر می‌باشند. در محل هر یک از چهار قوس،

از نتایج آزمایش مقاومت برشی تکمحوری بر روی نمونه‌ها، حداقل و حداکثر ضریب همبستگی مدل رفتاری الاستیک خطی بترتیب برابر $0/۸۶$ و $0/۹۶$ بدست آمد که نشان‌دهنده برازش قابل قبول این مدل بر نمونه‌های خاک برداشت شده می‌باشد.

در شکل ۲ و جدول ۲ ارائه گردیده است. طبق نتایج بدست آمده نمونه‌های خاک، عمدتاً از نوع ماسه خوب دانه‌بندی شده (SW) و بدانه‌بندی شده (SP) بودند.



شکل ۲- الف) نمودار تغییرات تنش- کرنش در نمونه‌ای از خاک SP ب) نمودار تغییرات تنش- کرنش در نمونه‌ای از خاک SW ج) تابع نفوذپذیری خاک در حالت اشباع و غیراشباع (مکش)

جدول ۲- محدوده مقادیر خصوصیات نمونه‌های خاک برداشت شده در چهار قوس رودخانه شلمان‌رود.

مشخصه خاک	رطوبت خاک (%)	نفوذپذیری (cm sec^{-1})	وزن مخصوص خشک (gr cm^{-3})	چسبندگی (Kg cm^{-2})	زاویه اصطکاک داخلی (degree)
۱	$0/۱۸۶-0/۳۷۷$	$۲/۳۰۵ \times 10^{-۲}-۷/۳۸۲ \times 10^{-۲}$	$۱/۳۹-۲/۰۸$	$0/۰۱۶۷-0/۰۵۶$	$۳۲-۴۳$
۲	$0/۱۷۹-0/۲۴۳$	$۱/۶۰۶ \times 10^{-۲}-۳/۶۴۹ \times 10^{-۲}$	$۱/۵۴۸-۱/۹۱۳$	$0/۰۵۵۶-0/۰۹۱۷$	$۳۰-۴۸$
۳	$0/۲۲۶-0/۳۲۴$	$۸/۷۳ \times 10^{-۴}-۲/۹۴۷ \times 10^{-۳}$	$۱/۳۸۴-۲/۰۲۹$	$0/۰۴۴۵-0/۰۷۷۸$	$۲۱-۲۵$
۴	$0/۲۴۷-0/۳۲۳$	$۱/۸۴۱ \times 10^{-۲}-۲/۹۵۹ \times 10^{-۲}$	$۱/۴۲-۱/۸۴۶$	$0/۰۳۸۹-0/۱۲۵۱$	$۱۹-۴۶/۵$

ها در جدول ۳ و مقایسه با شکل ۲ مشخص می‌گردد که تنش‌های بکار رفته در محدوده کوچک‌ترین مقادیر نمودار رفتار تنش- کرنش خاک می‌باشند. بنابراین با توجه به برازش مناسب مدل رفتار خطی در محدوده تنش‌های وارده بر شیروانی، مدل الاستیک خطی در تحلیل عددی

همچنین نیروهای هیدرونیامیک ناشی از تغییر اندازه حرکت در محل قوس به صورت تنش نرمال، از نتایج تحقیق قبلی انجام شده در دانشگاه گیلان توسط اسمعیلی ورکی و همکاران (۱۳۹۱) استخراج گردید (جدول ۳). با توجه به مقادیر تنش-

اجزای محدود به منظور بررسی رفتار کرنشی شیروانی در محل قوس رودخانه انتخاب گردید.

جدول ۳- تنش‌های نرمال وارد بر شیروانی در قوس‌های مورد مطالعه (اسمعیلی ورکی و همکاران ۱۳۹۱).

مقطع	۱	۲	۳	۴
تنش نرمال (KPa)	۰/۰۷۸	۰/۰۹۶	۰/۰۴۹۷	۰/۰۲۸

تحلیل کرنش در شرایط نشت غیرماندگار

در تحقیق حاضر در زمان‌های مختلف (پیش از فصل بارندگی) سطح آب رودخانه اندازه‌گیری شد و مقدار متوسط آن تحت عنوان سطح آب نرمال در هر مقطع ثبت گردید. سپس برای انجام تحلیل نشت غیرماندگار از مدل اجزای محدود *SEEP/W* استفاده شد. با توجه به اینکه اغلب مقاطع این رودخانه در سیلاب با دوره بازگشت ۱۰ ساله به طور کامل پر از آب می‌شوند، در این تحقیق تغییرات سطح آب در شرایط فروکش سیلاب ۱۰ ساله (به عنوان تراز حداکثر) تا رسیدن به سطح آب نرمال (شرایط غیرسیلابی) به عنوان سناریوی تغییرات فشار هیدرواستاتیک در نظر گرفته شد و فشار آب منفذی مدل‌سازی گردید. همچنین تنش نرمال وارد بر شیروانی (ناشی از نیروهای هیدرودینامیک در اثر تغییر جهت جریان (تغییر مومنتم)) نیز به عنوان مولفه دیگر تنش، بر شیروانی اعمال گردید. بخش تحلیل کرنش در نرم‌افزار *SIGMA/W* به صورت تعیین تغییرات کرنش حجمی (درصد) و فاصله (متر) انجام شد. شرایط مرزی بکار رفته در تحقیق عبارتند از تغییرات نیروهای فشار هیدرواستاتیک ناشی از ارتفاع آب روی شیروانی، نیروی هیدرودینامیک ناشی از تغییر جهت بردار سرعت بر اساس تنش‌های نرمال وارده (اسمعیلی ورکی و همکاران ۱۳۹۱) و تنش نرمال ۱۰۰ کیلوپاسکال که حد بالای رفتار الاستیک خاک می‌باشد (شکل ۲).

همچنین در قوس‌های مورد مطالعه، بررسی تغییرات فشار آب منفذی و کرنش شیروانی در تراز ارتفاعی یک متر پایین‌تر از سطح آب نرمال رودخانه انجام شد. انتخاب تراز ۱ متر زیر تراز نرمال به این دلیل است که تغییرات کرنش به صورت تورم یا فشردگی در این محدوده بیش از نقاط دیگر بود. ضمناً در نواحی بالاتر از تراز نرمال به دلیل استهلاک سریع فشار آب منفذی شرایط مکش و پایداری بیشتر شیروانی برآورد گردید. در گام بعد، اثر هندسه قوس بر رفتار کرنشی به ازای نشت غیرماندگار در قوس شماره ۲ (دارای کم‌ترین شعاع قوس) و قوس شماره ۴ (دارای بیش‌ترین شعاع قوس) بررسی گردید. سپس روش‌های مختلف تعادل حدی شامل روش-های قطعه‌ای معمولی، جانبو، بیشاپ، اسپنسر و مورگنسترن-پرایس بکار گرفته شد و پایداری شیروانی به روش قطعی در شرایط نشت غیرماندگار بررسی گردید. کلیه این روش‌ها بر مبنای رابطه ۴ و تقسیم گوه لغزش به قطعات مختلف استوار است (فردلوند و کراهن ۱۹۷۷). با این وجود، این روابط دارای تفاوت‌هایی با یکدیگر می‌باشند. روش قطعه‌ای معمولی نیروهای بین قطعات را در نظر نمی‌گیرد. روش بیشاپ، بر مبنای تعادل گشتاورها استوار بوده و سطح لغزش را دایره‌ای در نظر می‌گیرد در حالیکه روش جانبو تعادل نیروها را در نظر می‌گیرد. اما روش-های اسپنسر و مورگنسترن-پرایس تعادل نیروها و گشتاورها را با هم در نظر می‌گیرند.

روش احتمالاتی مونت کارلو

با توجه به اینکه تحلیل نشت در شرایط غیرماندگار انجام می‌شود، در هر بازه زمانی می‌توان با کاربرد توزیع احتمالاتی پارامترهای مقاومت برشی در روابط ضریب اطمینان توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان مربوط به آن بازه زمانی را بدست آورد. روابط ضریب اطمینان مورد استفاده در تحلیل احتمالاتی شامل مورگنسترن-پرایس، اسپنسر، جانبو، بیشاپ و قطعه‌ای معمولی می‌باشند. از هر بازه زمانی مقدار بیشینه احتمال گسیختگی بدست آمده از توزیع‌های احتمالاتی یادداشت گردیده و به صورت نمودار تغییرات زمانی بیشینه احتمال گسیختگی ترسیم می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان بازه زمانی را که در آن احتمال

جدول ۴- انحراف استاندارد نرمال (گیبسون ۲۰۱۱).

انحراف استاندارد نرمال (d)	درصد اطمینان (P)
۱/۲۸	۸۰
۱/۴۴	۸۵
۱/۶۴	۹۰
۱/۹۶	۹۵
۲/۵۷	۹۹

نتایج و بحث

در این تحقیق، پس از تعیین پارامترهای فیزیکی و ژئوتکنیکی از طریق انجام مطالعه آزمایشگاهی، نتایج به صورت متغیرهای ورودی به مدل اجزای محدود وارد گردیدند و تحلیل غیرماندگار فشار آب منفذی، دبی نشست، کرنش و پایداری قطعی شیروانی انجام شد و در انتها نیز برای افزایش دقت مدل و اعمال اثر عدم قطعیت‌ها، روش تحلیل احتمالاتی مونت‌کارلو بکار گرفته شد که نتایج آنها در این بخش ارائه می‌گردد.

در بخش اول، تغییرات فشار آب منفذی در قوس-های ۲ و ۴ رودخانه‌ی شلمان‌رود، به ازای تغییر سطح آب رودخانه از تراز بیشینه تا تراز سطح آب نرمال انجام شد. در شکل ۳- الف در فاصله افقی ۱/۵ متر از مبدأ مختصات (۹/۵ متر از لبه شیروانی) و در تراز یک متر پائین‌تر از سطح آب نرمال رودخانه، فشار آب منفذی در شیروانی به ازای بازه‌ی زمانی ۱ تا ۱۲ ساعت همواره منفی و در فواصل نزدیک‌تر به شیروانی، فشار آب منفذی همواره مثبت می‌باشد. همچنین با گذشت زمان بین ۱ تا ۱۲ ساعت، فشار آب منفذی از ۳۲ کیلوپاسکال به ۱۹ کیلوپاسکال می‌رسد که کاهش ۴۰ درصدی را نشان می‌دهد.

در شکل ۳- ب در مقطع ۴ در تراز ۱ متر پائین‌تر از سطح آب نرمال، در ۴ ساعت اولیه در فاصله ۱ متر از مبدأ مختصات (۱۳ متر از لبه شیروانی) و در بازه زمانی ۷/۵ تا ۱۰ ساعت به ترتیب در فواصل ۲ تا ۶ متر از مبدأ مختصات، فشار آب منفذی مستهلک می‌شود. در نواحی نزدیک به شیروانی، فشار آب منفذی در بازه زمانی ۱ تا ۱۰ ساعت همواره مثبت و با گذشت ۱۰ ساعت از آغاز فروکش سیلاب ۷۶ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش فشار آب منفذی نشان دهنده‌ی افزایش تنش مؤثر و در نتیجه افزایش پایداری شیروانی پس از ۱۰ ساعت می‌باشد. با

گسیختگی زیاد است تعیین نمود. پس از آن زمان، با توجه به اثر مثبت استهلاک فشار آب منفذی بر افزایش تنش مؤثر در شیروانی، احتمال گسیختگی شیروانی کاهش می‌یابد.

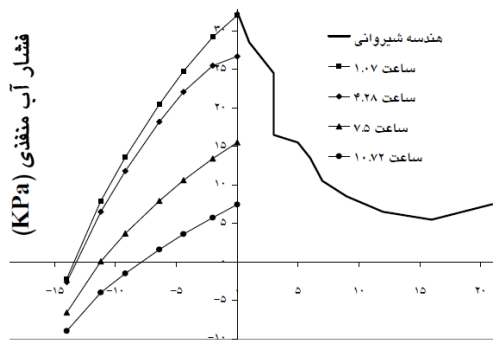
برای اختصاص داده‌های تصادفی لازم است ابتدا توزیع احتمالاتی مناسب به متغیرهای ورودی در رابطه ضریب اطمینان تخصیص داده شود. با توجه به نقش عمده پارامترهای مقاومت برشی شامل زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی خاک بر پایداری شیروانی، عدم قطعیت مقادیر آنها در بررسی پایداری شیروانی در قوس‌های رودخانه شلمان‌رود در نظر گرفته شد. وانگ و همکاران (۲۰۱۵) بیان نمودند که توزیع نرمال و لوگ‌نرمال بهترین توزیع‌های قابل برازش بر پارامترهای مقاومت برشی می‌باشند. بدین منظور در این تحقیق توزیع نرمال بر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی (بر اساس مقادیر جدول ۲) برازش داده شد. طبق پیشنهاد گیبسون (۲۰۱۱) حداقل تعداد ترکیب تصادفی پارامترهای مقاومت برشی در روش مونت‌کارلو از رابطه زیر بدست می‌آید (رابطه ۶).

$$n = \left(\frac{d}{\alpha}\right)^2 \left(\frac{1-p}{p}\right) \quad [6]$$

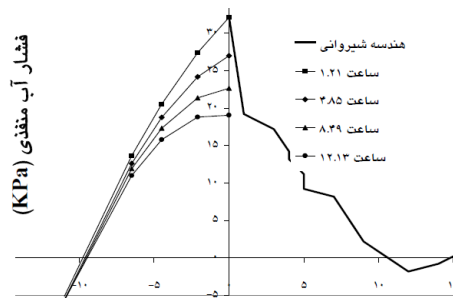
که در آن، n ، d ، p و α به ترتیب تعداد ترکیب تصادفی پارامترهای مقاومت برشی (تعداد موردنیاز شبیه‌سازی مونت‌کارلو)، انحراف استاندارد نرمال محاسبه شده از جدول ۴، درصد اطمینان و خطای قابل پذیرش می‌باشند. بر این اساس، تعداد ۲۰۰۰ ترکیب داده‌های تصادفی (تعداد ۲۰۰۰ شبیه‌سازی مونت‌کارلو) به عنوان ورودی برای هر یک از روش‌های تعادل حدی بکار رفت که در سطح احتمال پایداری ۹۵ درصد و خطای قابل پذیرش $\pm 1\%$ ، توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان تعیین گردید.

دبی نشست نسبت به زمان در شرایط نشست غیرماندگار مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۴ ارائه گردیده است.

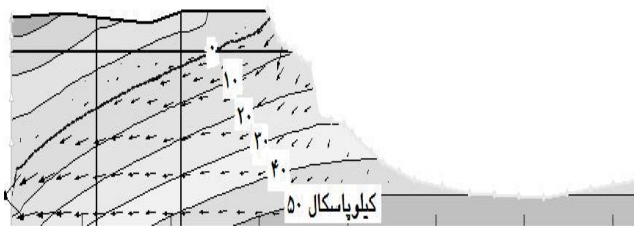
توجه به اینکه نفوذپذیری خاک در مقاطع ۲ و ۴ تقریباً نزدیک به یکدیگر می‌باشند، مشاهده می‌گردد که با کاهش سطح آب در مقطع ۴ (که دارای انحنای ملایم‌تر است) کاهش فشار آب منفذی با گذشت زمان سریع‌تر اتفاق می‌افتد. در مرحله بعد، تغییرات



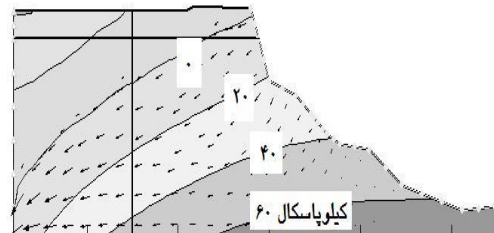
فاصله (متر)
(ب)



فاصله (متر)
(الف)

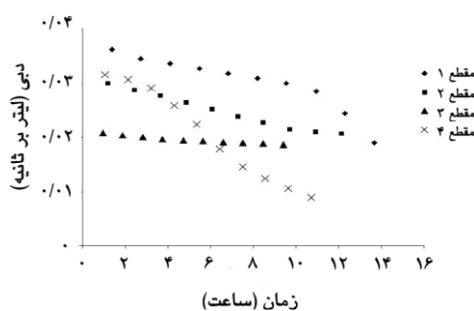


(د)



(ج)

شکل ۳- تغییرات زمانی فشار آب منفذی نسبت به فاصله یک متر پایین‌تر از تراز آب نرمال در رودخانه الف) در مقطع ۲ (ب) در مقطع ۴ (ج) خطوط هم‌فشار به ازای تراز سیلابی در مقطع ۲ (د) خطوط هم‌فشار به ازای تراز سیلابی در مقطع ۴.



شکل ۴- تغییرات زمانی دبی نشست در شیروانی قوس‌های مختلف.

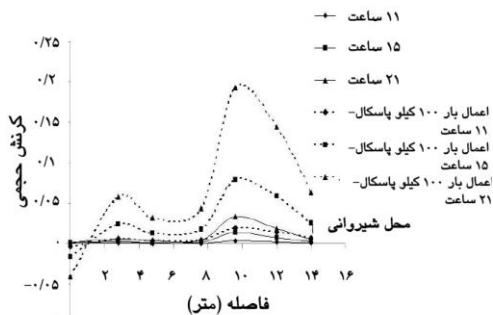
۰/۰۲۱ لیتر بر ثانیه و در همین فاصله زمانی در قوس چهارم ۰/۰۰۸ لیتر بر ثانیه می‌باشد که ۶۲ درصد کاهش را نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد در قوس چهارم که دارای انحنای ملایم‌تر نسبت به سایر قوس‌ها و نیروی هیدرودینامیک کوچکتر وارد بر دیواره می‌باشد، با گذشت زمان (پس از افت سطح آب) میزان نشست کاهش قابل توجهی می‌یابد. از این رو با گذشت ۱۱ ساعت، در قوس دوم دبی نشست

تحلیل کرنش در شرایط نشست غیر ماندگار

پس از تحلیل فشار آب منفذی و نشست، تحلیل کرنش ناشی از تغییرات تنش موثر در شیروانی انجام شد که نتایج مربوط به دو مقطع ۲ و ۴ در این بخش ارائه می‌گردد.

در شیروانی واقع در مقطع ۲ (شکل ۵-الف)، در تراز ۱ متر پائین‌تر از سطح آب نرمال رودخانه و در مبدأ مختصات مشاهده می‌گردد که با گذشت زمان از ۱۳ ساعت تا ۲۴ ساعت کرنش حجمی در حال افزایش و مصالح خاکی در وضعیت تورم قرار دارند. در فاصله ۴/۵ متر از مبدأ مختصات مقدار کرنش به مقدار صفر می‌رسد و مصالح خاکی در تغییر وضعیت از متورم به فشرده قرار می‌گیرند. همچنین دو عامل تغییرات تنش هیدروستاتیک وارد بر شیروانی در محل قوس و گذشت زمان (پس از کاهش سطح آب در هنگام فروکش سیلاب) بر تغییرات کرنش حجمی خاک تأثیرگذار می‌باشند. در شکل ۵-ب به ازای تمام شرایط اعمال بار و در تمام بازه‌های زمانی از فاصله ۱ متر تا ۱۴ متر از مبدأ، کرنش حجمی همواره مقداری مثبت داشته و خاک در وضعیت تورم قرار دارد و در شرایط اعمال بار ۱۰۰ کیلوپاسکال میزان تورم خاک در هر بازه زمانی افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با کاهش سطح آب در قوس‌های ملایم کرنش حجمی مثبت (تورم) و قوس‌های با انحنای بزرگتر در نزدیکی شیروانی کرنش منفی (فشرده‌گی) مشاهده می‌گردد. تورم مشاهده شده در شکل ۵-ب می‌تواند ناشی از تغییر جهت سریع جریان نشست به سمت رودخانه (پس از فروکش سیلاب) و وقوع فعالیت تورمی (کرنش مثبت) باشد.



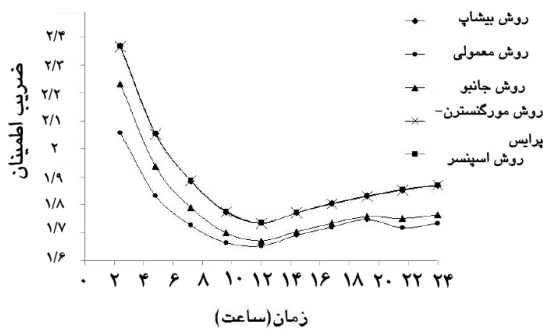
(ب)

شکل ۵- تغییرات کرنش حجمی نسبت به فاصله در تراز یک متر پائین‌تر از سطح آب نرمال رودخانه (الف) شیروانی مقطع ۲ (ب) شیروانی مقطع ۴.

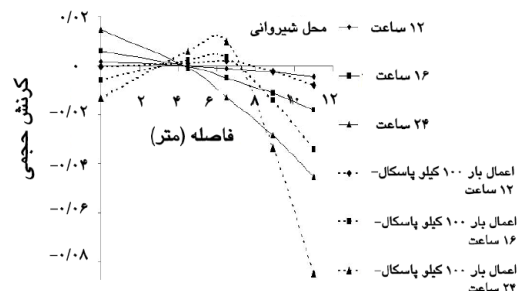
نتایج تحلیل قطعی پایداری شیروانی در قوس رودخانه

در این بخش نتایج تحلیل قطعی پایداری شیروانی با استفاده از روش‌های مختلف تعادل حدی در شرایط نشست غیرماندگار به صورت تغییرات ضریب اطمینان در بازه زمانی ۲۴ ساعت ارائه می‌گردد.

در بخش‌های الف و ب در شکل ۶ مشاهده می‌گردد که پس از افت سطح آب در بازه زمانی کمتر از ۱۰ ساعت کاهش ضریب اطمینان رخ می‌دهد که ناشی از بالا بودن میزان فشار آب منفذی در شیروانی پس از فروکش سیلاب می‌باشد. همچنین کمترین میزان ضریب اطمینان از روش‌های جانبی و قطعه‌ای معمولی به دست آمد. در مقطع ۴ که دارای قوس ملایم است، افزایش ضریب اطمینان پس از کاهش اولیه میزان آن در بازه زمانی کوتاه‌تری (۷/۲ ساعت) نسبت به مقاطع دیگر رخ داد.



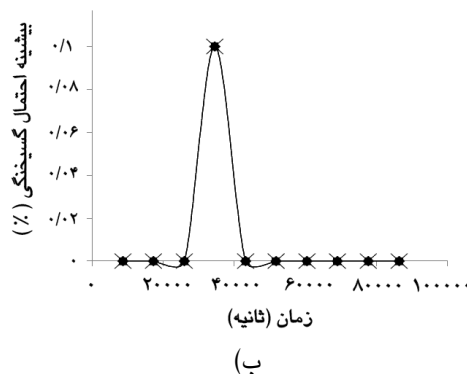
(الف)



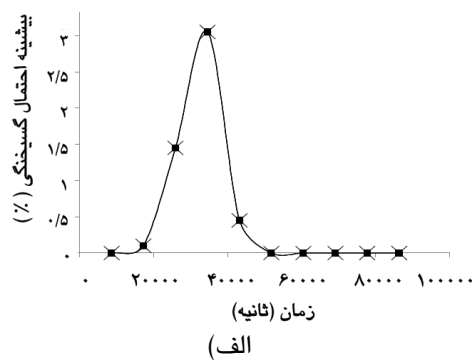
(الف)

پس از انجام تحلیل قطعی پایداری شیروانی با روش‌های تعادل حدی، به منظور تعیین قابلیت اطمینان به این نتایج، از روش احتمالاتی مونت‌کارلو استفاده گردید و در هر بازه زمانی پس از آغاز افت سطح آب، بیشینه احتمال گسیختگی (ضریب اطمینان کوچکتر از یک) تعیین گردید. بدین منظور تحلیل احتمالاتی مربوط به قوس دارای بیشترین انحنای و ملایم‌ترین قوس (بترتیب قوس‌های شماره ۲ و ۴) در این بخش ارائه می‌گردد. همچنین دو روش تعادل حدی مورگنسترن-پرایس و قطعه‌ای معمولی به عنوان تابع تقریب ضریب اطمینان در روش مونت‌کارلو استفاده گردیدند.

در شکل ۷- الف تغییرات بیشینه‌ی احتمال گسیختگی نسبت به زمان در قوس ۲ به ازای تابع تقریب قطعه‌ای معمولی نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشینه‌ی احتمال گسیختگی در زمان ۹/۶ ساعت رخ می‌دهد. پس از گذشت زمان مذکور، احتمال گسیختگی با کاهش مشهودی مواجه گردید به طوری که احتمال گسیختگی در بازه زمانی ۱۴/۴ ساعت تا ۲۴ ساعت برابر صفر برآورد گردید.



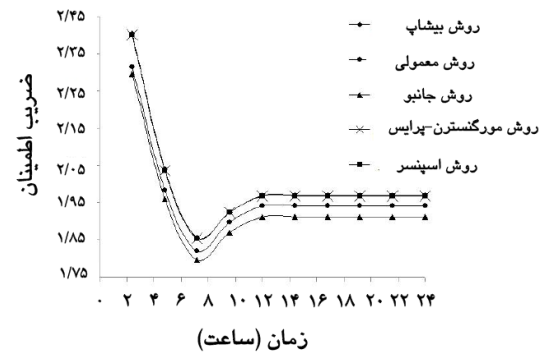
ب



الف

شکل ۷- بیشینه‌ی احتمال گسیختگی نسبت به زمان در مقطع ۲ الف) روش معمولی ب) روش مورگنسترن-پرایس.

با بررسی شکل ۷- ب، می‌توان تفاوت کاربرد روش مورگنسترن-پرایس به عنوان تابع تقریب روش مونت‌کارلو را با روش قطعه‌ای معمولی مشاهده نمود. نتایج شکل‌های ۷- الف و ۷- ب نشان می‌دهد که بیشینه احتمال گسیختگی در روش معمولی بیش از روش مورگنسترن-پرایس است. همچنین در روش قطعه‌ای معمولی، در بازه

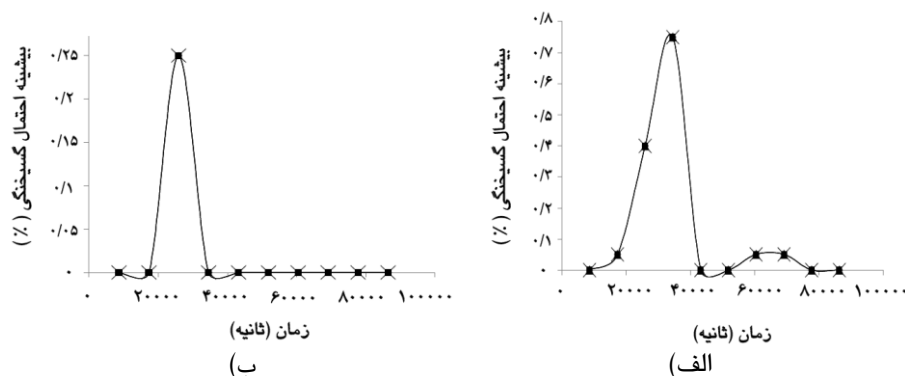


ب

شکل ۶- تغییرات زمانی ضریب اطمینان با رویکرد قطعی الف) در مقطع ۲ ب) در مقطع ۴.

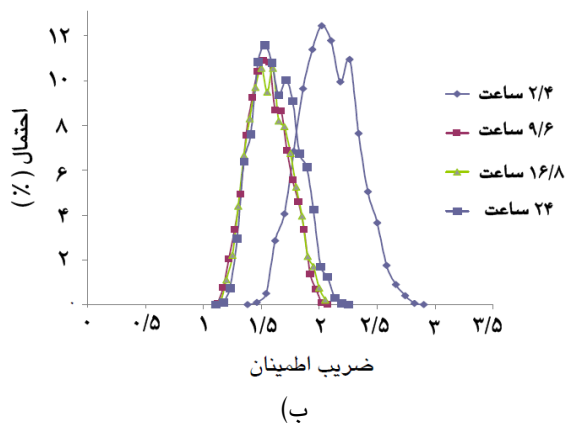
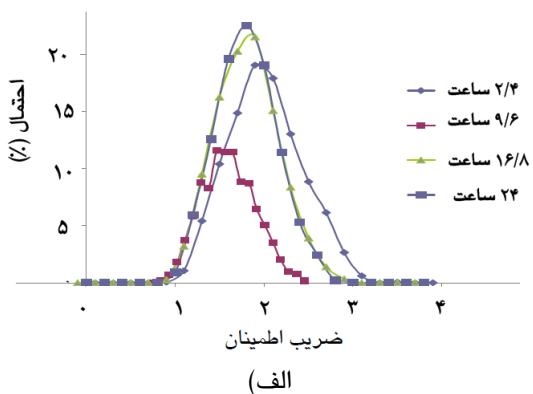
این مسأله نشان‌دهنده اثر کاهش فشارهای هیدرودینامیک بر استهلاک سریع‌تر فشار آب منفذی موجود در شیروانی می‌باشد. در این شرایط افزایش ضریب اطمینان نیز پس از گذشت زمان کوتاه‌تری از فروکش سیلاب (۷/۲ ساعت) رخ می‌دهد.

نتایج تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو

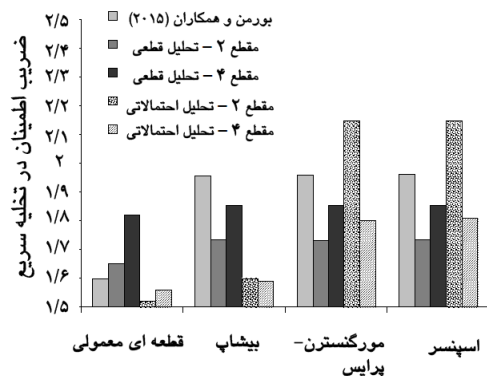


شکل ۸- بیشینه‌ی احتمال گسیختگی نسبت به زمان در مقطع ۴ الف) روش معمولی ب) روش مورگنسترن-پرایس.

توزیع احتمال (چگالی احتمال) ضریب اطمینان به سمت چپ متمایل می‌شود که نشان از کاهش اولیه ضریب اطمینان با گذشت زمان دارد. همچنین نکته جالب در مقایسه شکل‌های ۹- الف و ۹- ب این است که در آغاز افت سطح آب در دو مقطع ۲ و ۴ منحنی توزیع احتمال ضریب اطمینان تقریباً مشابه بوده اما با گذشت زمان پس از افت سطح آب در مقطع ۲ که دارای قوس با انحنای بیشتری می‌باشد، میزان تمایل منحنی‌ها به سمت چپ بیشتر می‌شود که نشان‌دهنده احتمال وقوع ضرایب اطمینان کوچک-تر نسبت به مقطع ۴ می‌باشد.



اما از نظر بزرگی، عدد بیشینه احتمال گسیختگی در مقطع ۲ بزرگتر می‌باشد. در مقایسه شکل‌های ۸- الف و ب مشاهده می‌گردد که گسیختگی در روش قطعه‌ای معمولی نسبت به روش مورگنسترن-پرایس در بازه زمانی بزرگتری محتمل می‌باشد. همچنین در این حالت نیز عدد بیشینه احتمال گسیختگی توسط روش مونت‌کارلو با کاربرد تابع تقریب قطعه‌ای معمولی به دست آمد که بزرگ‌تر از عدد به دست آمده توسط تابع تقریب مورگنسترن-پرایس است. این شرایط موید این است که روش قطعه‌ای معمولی در مورد پیش‌بینی احتمال گسیختگی شبروانی نیز همانند تحلیل قطعی پایداری شبروانی نتایج محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌نماید. به طور کلی با مقایسه‌ی نمودار حاصل از روش مونت‌کارلو در شکل‌های ۷ و ۸ ملاحظه می‌شود که روش قطعه‌ای معمولی احتمال گسیختگی را در یک بازه‌ی زمانی ۸/۸ ساعته و روش مورگنسترن-پرایس در بازه‌ی زمانی ۵ ساعته پیش‌بینی می‌کند در حالی‌که در روش قطعی حداقل ضریب اطمینان در زمان‌های ۷/۲ و ۹/۶ ساعت به دست آمد. مقدار ضریب اطمینان به دست آمده در تحلیل قطعی بزرگ‌تر از یک به دست آمد و این بدان معنی است که با رویکرد قطعی شبروانی پایدار تشخیص داده شد. شکل ۹ توزیع احتمال ضریب اطمینان به روش مونت‌کارلو را با استفاده از تابع تقریب قطعه‌ای معمولی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با آغاز افت سطح آب، منحنی



شکل ۱۰- مقایسه عملکرد نسبی روش‌های تعادل حدی در تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی.

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تحلیل‌های نشت و کرنش به روش اجزای محدود و سپس تحلیل پایداری شیروانی به روش تعادل حدی در محل قوس‌های رودخانه شلمان رود گیلان در شرایط غیرماندگار (ناشی از فروکش سیلاب) انجام شد. سپس برای تعیین قابلیت اطمینان به نتایج از روش احتمالاتی مونت‌کارلو استفاده گردید. نتایج تحلیل فشار آب منفذی در محل قوس نشان داد که در قوس ۲ که دارای انحنای بیشتر می‌باشد با گذشت زمان و کاهش سطح آب، فشار آب منفذی با سرعت بیشتر از قوس ۴ (دارای انحنای کمتر) مستهلک می‌شود. همچنین با گذشت زمان ۱۱ ساعت از آغاز افت سطح آب، در مقطع ۲ دبی ۰/۰۲۱ لیتر بر ثانیه و در مقطع ۴ دبی ۰/۰۰۸ لیتر بر ثانیه بدست آمد که نشان‌دهنده تأثیر وجود قوس با انحنای بیشتر بر افزایش میزان نشت به داخل شیروانی می‌باشد. نتایج تحلیل کرنش نشان داد که در تراز پائین‌تر از سطح آب نرمال در قوس ملایم تورم و در قوس با انحنای زیاد فشردگی وجود خواهد داشت. در تحلیل احتمالاتی پایداری شیروانی به روش مونت‌کارلو تابع تقریب روش تعادل حدی قطعه‌ای معمولی احتمال ناپایداری را در بازه زمانی بزرگ‌تری تقریب زد در حالیکه تابع تقریب روش مورگنسترن-پرایس این بازه را کوچک‌تر برآورد نمود. همچنین با گذشت زمان از آغاز فروکش سیلاب، تابع چگالی احتمال روش مونت‌کارلو ابتدا کاهش احتمال پایداری (تمایل منحنی به سمت چپ) و سپس با کاهش فشار آب منفذی و افزایش پایداری به سمت راست متمایل گردید اما در قوس با انحنای بیشتر (مقطع ۲) میزان انحراف تابع چگالی احتمال با گذشت زمان بیشتر برآورد گردید.

شکل ۹- تابع چگالی احتمال ضریب اطمینان به روش قطعه‌ای معمولی الف) در مقطع ۴ ب) در مقطع ۲.

در انتها برای مقایسه عملکرد نسبی روش‌های تعادل حدی در تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی (در هنگام فروکش سیلاب)، حداقل ضریب اطمینان تعدادی از روش‌های تحلیل قطعی با نتایج تحقیق بورمن و همکاران (۲۰۱۵) و نتایج تحلیل احتمالاتی به روش مونت‌کارلو (با کاربرد توابع تقریب قطعه‌ای معمولی و مورگنسترن-پرایس) مقایسه گردید (شکل ۱۰).

بورمن و همکاران (۲۰۱۵) مقایسه روش‌های تعادل حدی را در یک شیروانی همگن در شرایط عدم وجود قوس انجام دادند. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در تحلیل‌های قطعی و احتمالاتی (مونت‌کارلو) کمترین ضریب اطمینان با کاربرد تابع تقریب قطعه‌ای معمولی به دست می‌آید. اما مقدار ضریب اطمینان دارای بیشترین احتمال وقوع (با کاربرد روش قطعه‌ای معمولی) کمتر از مقدار آن در تحلیل قطعی می‌باشد. همچنین برخلاف روش‌های قطعه‌ای معمولی و بیشاب، با کاربرد روش‌های مورگنسترن-پرایس و اسپنسر در روش احتمالاتی مونت‌کارلو ضریب اطمینان محتمل بزرگتر از میزان حاصل از روش‌های قطعی می‌باشد که نشان از محافظه‌کارانه بودن نتایج حاصل از روش‌های قطعی می‌باشد. همچنین روند افزایشی ضریب اطمینان حاصل از کاربرد روش‌های اسپنسر و مورگنسترن-پرایس در حالت وجود قوس مشابه نتایج در حالت عدم وجود قوس (بورمن و همکاران ۲۰۱۵) می‌باشد.

منابع مورد استفاده

- Burman A, Acharya SP, Sahay RR and Maity D, 2015. A comparative study of slope stability analysis using traditional limit equilibrium method and finite element method. *Asian Journal of Civil Engineering* 16 (4): 467-492.
- Esmaili Varaki M, Zamani A and Kazemi Rad M, 1391. Numerical simulation of different alternatives of river modification in meandering rivers. Pp. 164-173. *Proceedings of the Eleventh Iranian Hydraulic Conference*. 6-8 November, Urmia, Iran.
- Fredlund DG and Krahn J, 1977. Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian Geotechnical Journal* 14 (3): 429-439.
- Gibson W, 2011. Probabilistic methods for slope analysis and design. *Australian Geomechanics* 46 (3):1-12.
- Kok ST and Kim HB, Noorzaie J, Jaafar MS and Gue SS, 2009. A review of basic soil constitutive models for geotechnical application. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 14:1-18.
- Parker C, Simon AR, Thorne R, 2008. The effects of variability in bank material properties on riverbank stability: Goodwin Creek, Mississippi. *Geomorphology* 101:533-543.
- Pirestani MR, Sadatmoosavi Anari SA and Salehi Neishaboori SA, 1391. Numerical simulation of flow pattern on development amount of meandering river. *Journal of Water Resources Engineering* 5(12):1-18.
- Rahbar D and Mahboobi Ardakani A, 1392. Evaluation of slope stability using discrete deformation analysis DDA method. Pp. 18-26. *Proceedings of the Seventeenth National Civil Engineering Conference*. 7-8 May, Zahedan, Iran.
- Wang Y, Zhao T and Cao Z, 2015. Site specific probability distribution of geotechnical properties. *Computers and Geotechnics* 70: 159-168.
- Zahiri A, Amini R and Kordi H., 1391. Numerical simulation of velocity lateral distribution in meandering compound channels. *Journal of Water and Soil Conservation* 19(3): 201-218.
- Zhang G and Zhang JM, 2007. Simplified method of stability evaluation for strain-softening slopes. *Journal of Mechanics Research Communication* 34(5-6): 444-450.