

بررسی اثر هدایت هیدرولیکی خاک و شدت بارندگی بر پایداری شیبهای نامحدود

مهدی تلخابلو^۱، حجت احمدی^۲، سعید احمدی^{۳*}

۱- استادیار دانشگاه خوارزمی، دانشکده علوم زمین

۲- استادیار دانشگاه ارومیه، گروه مهندسی آب

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه آزاد واحد اهر

*Geo.ahmadi10@gmail.com

چکیده

پایداری شیبهای نامحدود تحت تاثیر پارامترهای مختلفی است که بر هر یک از این پارامترها عدم قطعیت حاکم است. یکی از این پارامترها بارندگی می باشد که پارامتری وابسته به زمان بوده و در شرایط مختلف به شکلهای متفاوت بر شیبهای طبیعی تاثیر گذار می باشد. در این تحقیق به منظور بررسی اثر بارندگی، یک شیب نامحدود تحت شدتهای مختلف بارندگی به صورت عددی مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج بررسی های صورت گرفته نشان داد که جهت ارزیابی پتانسیل لغزش یک شیب در اثر بارندگی لازم است که شدت بارندگی با هدایت هیدرولیکی خاک بستر مورد مقایسه قرار گیرد. بطوریکه در بارندگی های با شدت کمتر از هدایت هیدرولیکی، هر چقدر که شدت بارندگی به هدایت هیدرولیکی نزدیکتر باشد شیب سریعتر در خطر لغزش قرار خواهد گرفت. برای شدتهای بارندگی بزرگتر از هدایت هیدرولیکی تاثیر بارش در ناپایداری شیب، با افزایش شدت ناپایداری سریعتر اتفاق می افتد. مقایسه تاثیر بارندگی های با شدت نزدیک به هدایت هیدرولیکی نشان داد که تاثیر بارش با شدت کمتر و کوچکتر در ناپایداری شیب بیشتر است.

کلمات کلیدی: شیب نامحدود، پایداری، بارندگی، لغزش، هدایت هیدرولیکی

۱- مقدمه

همه ساله زمین لغزشها و ناپایداری شیبهای ناشی از بارندگی موجب صدمات جانی و مالی فراوان در نقاط مختلف جهان می گردد. برای همین منظور بحث مربوط به پایداری شیبها در مناطق دارای بارندگی و مدلسازی رفتار آن در حین بارندگی و تاثیرات نفوذ آب در دامنه ها از موضوعات مورد توجه محققان در سراسر جهان می باشد (White and Singham, 2012). با این وجود مساله پایداری شیب یک مساله استاتیکی نامعین می باشد (Johari and Javadi, 2012). در واقع مساله پایداری شیبها در دو حالت مختلف شامل شیبهای محدود و نامحدود قابل بحث و مطالعه می باشد. شیبهای نامحدود عموماً شیبهایی هستند که در طبیعت بواسطه قرار گرفتن سطح زمین تحت زوایای مختلف نسبت به افق ایجاد شده اند (Das, 1977). از دیدگاه مهندسی مساله پایداری شیب یک مسئله احتمالاتی بوده و عدم قطعیت بر نتایج تحلیل پایداری یک شیب محدود و یا نامحدود حاکم است (Farah et al., 2011). عدم قطعیت در تحلیل

پایداری در سه بخش مجزا قابل بررسی می باشد: عدم قطعیت در تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی بستر، عدم قطعیت در صحت مدل و عدم قطعیت پارامتری که شامل عدم اطمینان به کاربرد آن است که می تواند در ناپایداری یک شیب دخالت داشته باشد (Johari and Javadi, 2012) این اساس مطالعه پایداری شیب به دو شکل مستقل قابل بررسی است که یکی بر اساس محاسبه پایداری استاتیکی شرایط موجود بوده و دیگری بر اساس مطالعه تغییرات پارامترهای موثر بر پایداری است که در طول یک دوره زمانی ممکن است رخ دهد (Corominas and Moya, 2008).

برخی از پارامترها نظیر هندسه شیب، نسبت به زمان ثابت بوده و فقط در محاسبه پایداری استاتیکی قابل بررسی است. با این حال پارامترهای دیگری نظیر فشار آب منفذی که نقش بسیار قابل توجه در پایداری شیب ایفا می کند در هر دو شکل آنالیزهای ذکر شده بایستی دخالت داده شود. این پارامتر با توجه به نوسانات سطح آب زیرزمینی و رطوبت خاک که هر دو می تواند متاثر از بارندگی باشد تغییر پیدا می کند. بسیاری از محققان نقش این پارامتر را با ترکیب مدل‌های هیدرولوژی در تحلیل پایداری بررسی کرده اند. نتایج چنین بررسی‌هایی نشان می دهد که بین لغزش، مدت بارش و شدت آن رابطه منطقی وجود دارد. (Caine, 1980) با جمع آوری داده‌های مختلف از زمین لغزشهای رخ داده در جهان با توجه به مدت و شدت بارندگی رابطه‌ی نمایی به شکل زیر ارائه کرد:

$$I = 14.82 D^{-0.39} \quad (1)$$

که در آن I شدت بارندگی بر حسب mm/hr و D مدت بارندگی بر حسب ساعت می باشد. با توجه به رابطه (۱) مقدار I در واقع حداقل شدت بارندگی است که در یک بارندگی با مدت D می تواند باعث ناپایداری شود. با این حال به دلایل مختلف و متعدد در نقاط مختلف این رابطه ممکن است صادق نباشد. در حقیقت برای هر شیبی با توجه به خصوصیات ویژه آن یک رابطه خاصی بین شدت-مدت بارندگی حاکم می باشد (Crozier, 2005). علاوه بر شرایط و خصوصیات شیب، مکانیسم لغزش نیز در پاسخ شیب به بارندگی نقش اساسی دارد (Corominas, 2000). شدتهای بارندگی شدید با دوره کم معمولاً باعث ایجاد لغزشهای کم عمق و سطحی می شوند. در حالیکه بارندگی های با شدت کم اما دوره زیاد باعث لغزشهای چرخشی و یا انتقالی می شود. علت این پدیده‌ها اشباع شدن سریع لایه های فوقانی در شدتهای سریع بارندگی و کاهش پتانسیل ماتریکس خاک در شدتهای کم با مدت زیاد می باشد (Johnson and Sitar, 1989 و Corominas and Moya, 2012). در حقیقت تاثیر بارندگی بر تغییرات فشار آب منفذی به عوامل مختلفی نظیر زاویه شیب، ضخامت لایه، پوشش گیاهی و خصوصیات بارندگی دارد (Larsen and Simon, 1993). همچنین این پدیده رابطه مستقیم با هدایت هیدرولیکی خاک بستر دارد بطوریکه در حالتی که هدایت هیدرولیکی بالاتر باشد، در اثر بارندگی فشار آب منفذی سریعتر توسعه پیدا کرده و پس از بارندگی نیز سریعتر ذایل می شود ولی برای لایه های با هدایت هیدرولیکی کم عکس این پدیده رخ می دهد.

به این ترتیب بین بارندگی و پایداری یا ناپایداری شیب عوامل مختلفی می توانند نقش داشته باشند با این حال در این مقاله تاثیر شدت - مدت بارندگی بر نحوه تغییرات فشار آب منفذی و به تبع آن پایداری شیب نامحدود با توجه به هدایت هیدرولیکی خاک مورد بررسی قرار گرفته است.

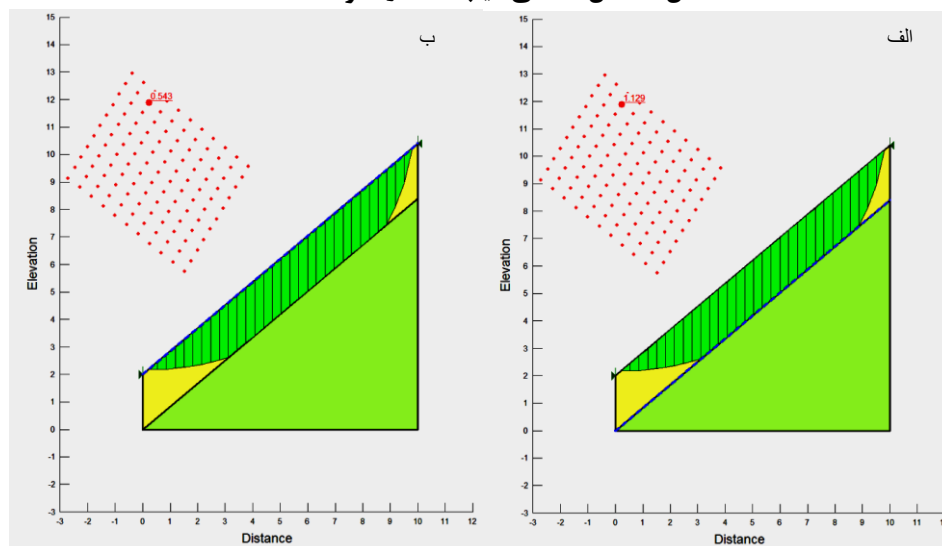
۲- مواد و روشها

۲-۱- مشخصات شیب

جهت بررسی تاثیر شدت بارندگی و مدت آب بر پایداری، هندسه ساده شده ای از یک شیب نامحدود مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱). این شیب با این فرض که در شرایط قبل از بارندگی در تعادل بوده و در صورت اشباع شدن ضریب اطمینان آن به کمتر از یک کاهش می یابد انتخاب شده است. برای این شیب فرض شده است که سطح آب زیرزمینی منطبق بر سطح سنگ بستر بوده و لایه خاک قبل از بارندگی در حالت کاملاً خشک قرار دارد. ضخامت لایه خاک موجود بر روی شیب برابر ۲ متر در نظر گرفته شده و زاویه قرار گیری شیب نسبت به افق ۴۰ درجه انتخاب شده است. بطوریکه در حالت بدون حضور فشار آب منفذی ضریب پایداری آن ۱/۳ و در حالت اشباع ضریب اطمینان به کمتر از یک کاهش پیدا می کند. شکل ۲ ضریب اطمینان پایداری شیب انتخابی را برای دو حالت خشک و اشباع نشان می دهد. خصوصیات خاک انتخاب شده در این تحقیق در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- شکل هندسی شیب نامحدود مورد مطالعه



شکل ۲- الف: دامنه کاملاً خشک و پایدار می باشد ($F_s = 1.129$), ب: دامنه کاملاً اشباع و ناپایدار می باشد ($F_s = 0.543$)

جدول ۱- مشخصات لایه خاک

واحد	مقدار	پارامتر
بدون بعد	۰/۳۵	پوکی (n)
kN/m ³	۱۷	وزن واحد حجم
m/s	۱۰ ^{-۵}	هدایت هیدرولیکی (k)
kN/m ²	۵	چسبندگی
درجه	۲۵	زاویه اصطکاک داخلی
m ² /kN	۰/۰۱	ضریب قابلیت فشرده‌گی حجمی

همچنین جهت مطالعه تاثیر شدت بارندگی، بارندگی‌های یکنواخت با شدتهای مختلف برای بررسی انتخاب شد و به منظور بررسی تاثیر هدایت هیدرولیکی بر پایداری شیب شدتهای بارندگی با توجه به هدایت هیدرولیکی خاک انتخاب شده، بزرگتر و کوچکتر از هدایت هیدرولیکی انتخاب گردید. در جدول ۲ بارندگی‌های شبیه سازی شده به همراه نسبت شدت بارندگی به هدایت هیدرولیکی خاک ارائه شده است. تمام بارندگی‌ها با زمان یکسان برابر ۲۴ ساعت در نظر گرفته شد.

جدول ۲- مشخصات بارش بکار رفته در مدل‌سازی پایداری شیب نا محدود

مدت بارش (ساعت)	بارندگی نسبی (I/k)	واحد	شدت بارندگی (I)
۲۴	۰/۲۷۷	mm/hr	۱۰
۲۴	۰/۴۱۶	mm/hr	۱۵
۲۴	۰/۵۵۵	mm/hr	۲۰
۲۴	۰/۸۳۳	mm/hr	۳۰
۲۴	۰/۹۷۲	mm/hr	۳۵
۲۴	۱/۱۱	mm/hr	۴۰
۲۴	۱/۳۸	mm/hr	۵۰
۲۴	۱/۶۷	mm/hr	۶۰
۲۴	۱/۹۴	mm/hr	۷۰

۲-۲- معادلات حاکم

جهت تحلیل پایداری شیب لازم است که شرایط آب منفذی قبل از تحلیل به نحوی تعیین شود. در حالت مشابه تغییرات فشار آب منفذی بر اثر بارندگی لازم است معادله حاکم بر پدیده نشت و جریان آب در محیط متخلخل با اعمال شرایط مرزی حاکم حل شود. معادله حاکم بر نفوذ آب حاصل از بارش و جریان نشت در حالت دو بعدی به شکل زیر می باشد:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right] + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial(H-y)}{\partial t} \quad (2)$$

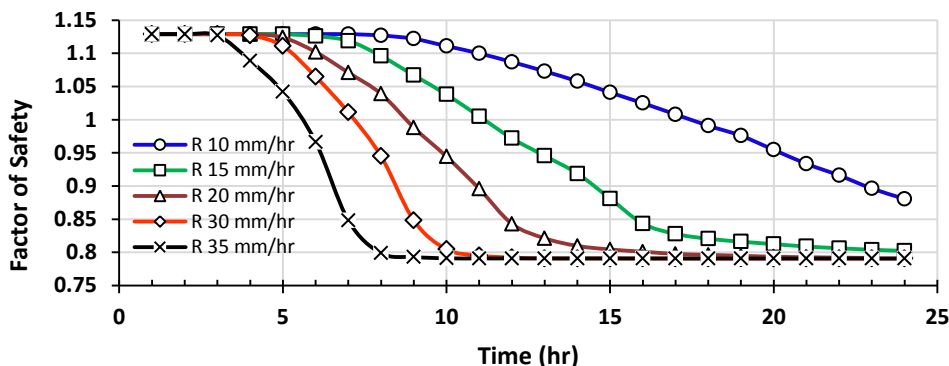
که k_x و k_y به ترتیب هدایت هیدرولیکی و در جهت افق و قائم بوده، H بار هیدرولیکی کل نسبت به سطح مبنا، Q مقدار جریان ورودی و یا خروجی به محیط، m_w ضریب قابلیت فشرده‌گی خاک، γ_w وزن واحد حجم خاک و y ارتفاع استاتیکی از سطح مبنا می

باشد. معادله حاضر با اعمال شرایط مرزی به روش اجزای محدود با بکارگیری ترکیبی از المانهای چهار گوش و مثلثی به حالت بی سازمان با استفاده از مدل GeoStudio 2007 تحلیل شد. شرایط مرزی هیدرولیکی با توجه به مسئله برای سطح شیب از نوع شار واحد (Unit Flux) برابر با شدت بارندگی و در عین حال همین سطح بعنوان سطح نشت احتمالی انتخاب گردید. مرز پایین شیب از نوع شار کل (Total Flux) برابر با صفر با پتانسیل سطح نشت احتمالی لحاظ گردید.

پس از اعمال شرایط مرزی و تحلیل نشت با استفاده از بخش Seep/W از مدل GeoStudio، تحلیل پایداری بر پایه تعادل حدی قطعه‌ای به روش مورگان اشترن و پرایس با بکارگیری بخش Slope/W از مدل GeoStudio انجام شد. در روش مورگان اشترن و پرایس ضریب اطمینان پایداری با استفاده از برقراری تعادل لنگرها و نیروهای وارد بر قطعات سطح لغزش به صورت نسبت مقاومت برشی متوسط خاک به مقاومت برشی متوسط بسیج شده تعیین می شود.

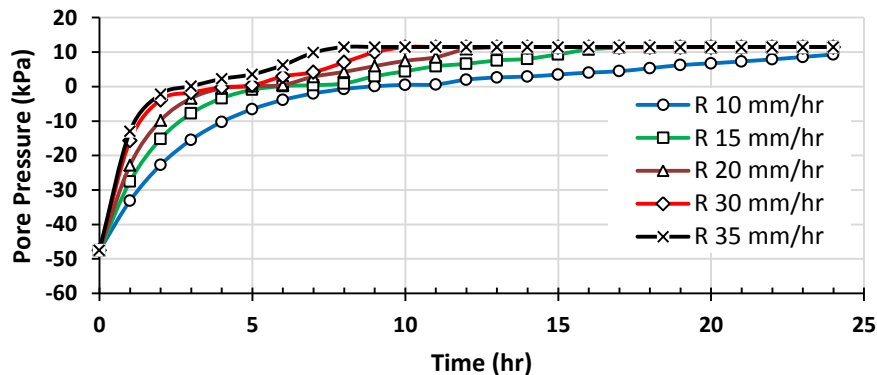
۳- بحث و تحلیل نتایج

به منظور بررسی و مشاهده تاثیر شدت های بارندگی کمتر از هدایت هیدرولیکی خاک، نتایج مربوط به آنالیزهای پایداری این دسته از بارندگی ها جداگانه ارائه شده است. شکل ۳ نمودار تغییرات ضریب اطمینان پایداری را نسبت به زمان نشان می دهد. همانطوریکه از شکل مشخص است با افزایش زمان بارندگی از مقدار ضریب اطمینان پایداری کاسته می شود تا اینکه این ضریب پس از مدتی به کمتر از یک کاهش پیدا می کند. مقایسه شدتهای مختلف بارندگی در این شکل نشان می دهد که با افزایش شدت بارندگی زمان رسیدن ضریب اطمینان پایداری به کمتر از یک زودتر اتفاق می افتد. همچنین روند کاهش ضریب اطمینان نسبت به زمان در بارندگی های شدید سریعتر است. این مسئله به دلیل اشباع شدن سریعتر لایه خاک و به تبع آن افزایش فشار آب منفذی اتفاق می افتد.



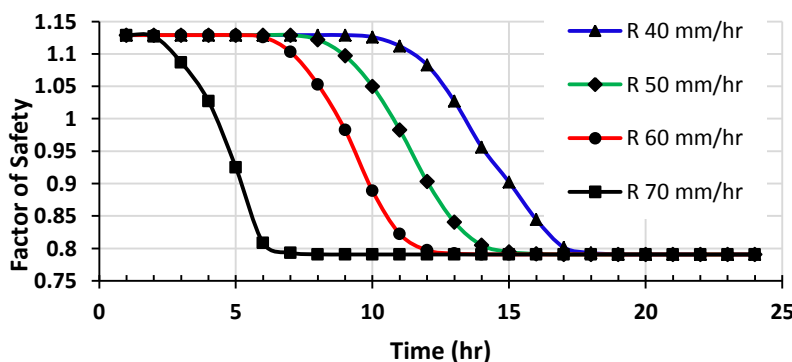
شکل ۳- تغییرات ضریب اطمینان پایداری نسبت به زمان در بارندگی های با شدت کمتر از هدایت هیدرولیکی خاک

شکل ۴ تغییرات فشار آب منفذی را نسبت به زمان در بخش میانی شیب در محل بین لایه خاک و سنگ بستر نشان می دهد. همانطوریکه از این شکل مشخص است با افزایش شدت بارندگی سرعت افزایش فشار آب منفذی سریعتر اتفاق می افتد.



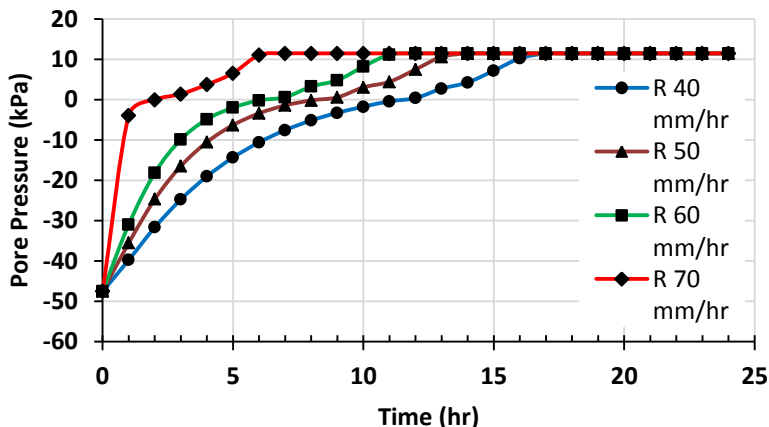
شکل ۴- تغییرات فشار آب منفذی در بارندگی های مختلف در زیر لایه خاک

همچنین بررسی و مقایسه مختلف بارندگی های شدیدتر از هدایت هیدرولیکی خاک بر روند تغییرات ضریب اطمینان پایداری نشان از روندی مشابه با بارندگی های کمتر از هدایت هیدرولیکی خاک دارد. شکل ۵ این نتایج را نشان می دهد. همانطوریکه از این شکل مشخص است، افزایش شدت بارندگی باعث ناپایدار شدن سریعتر شیب می شود.



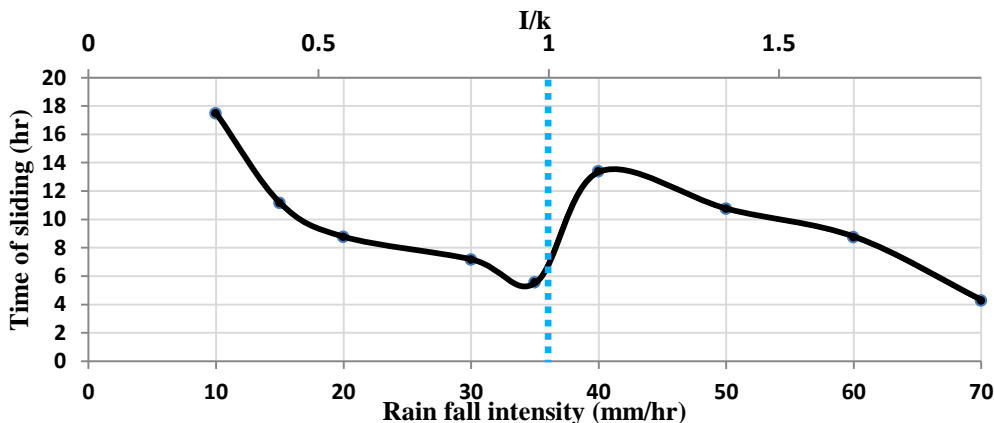
شکل ۵- تغییرات ضریب اطمینان پایداری نسبت به زمان در شدتهای بارندگی بزرگتر از هدایت هیدرولیکی خاک

بررسی و مقایسه روند تغییرات فشار آب منفذی در زیر لایه خاک نسبت به زمان در بارندگی های مختلف نشان می دهد که افزایش شدت بارندگی، افزایش سریعتر فشار آب حفره ای را در پی دارد. شکل ۶ این موضوع را نشان می دهد.



شکل ۶- تغییرات فشار آب منفذی در زیر سطح لغزش بحرانی در بارشهای شدید تر از هدایت هیدرولیکی

هر چند که بنظر می رسد که رفتار ضریب اطمینان پایداری نسبت به زمان و شدت بارندگی در هر دو حالت شدت بارش بزرگتر و کوچکتر از هدایت هیدرولیکی روند مشابهی دارند اما مقایسه دو شکل ۵ و ۴ نشان میدهد که رفتار خاصی بین شدتهای کمتر و بیشتر از هدایت هیدرولیکی وجود دارد بطوریکه مقایسه بارندگی های نسبی و زمان رسیدن به ناپایداری شیب نشان می دهد که برای بارندگی های کمتر از هدایت هیدرولیکی با نزدیک شدن این شدت به هدایت هیدرولیکی زمان رسیدن به ناپایداری به شدت کاهش می یابد با این حال با افزایش شدت بارندگی از مقدار هدایت هیدرولیکی بطور غیر منتظره زمان رسیدن به لغزش افزایش می یابد. شکل ۷ این تغییرات را نشان می دهد. با توجه به نتایج حاصله مقدار هدایت هیدرولیکی می تواند بعنوان یک شاخص و مبنایی در برآورد پتانسیل لغزش شیبهای طبیعی نسبت به شدتهای مختلف بارندگی مورد استفاده قرار گیرد بطوریکه فقط شدت بارندگی نمی تواند به تنهایی بعنوان معیار لغزش شیب در اثر بارش باشد. در واقع در شدتهای بارندگی کمتر از هدایت هیدرولیکی فشار آب منفذی از بخشهای زیرین لایه خاک به سمت بالا توسعه پیدا می کند و با افزایش شدت بارندگی تا حد هدایت هیدرولیکی این پدیده تشدید می گردد در حالیکه در شدتهای بارندگی بزرگتر از هدایت هیدرولیکی، با وجود توسعه و افزایش سطح ایستایی از پایین به بالا به دلیل افزایش وزن مخصوص لایه های سطحی بر اثر اشباع شدن پایداری شیب نسبت به حالت بارندگی با شدت کمتر از هدایت هیدرولیکی بیشتر می گردد. این پدیده در شرایط خاص ممکن است با توسعه جبهه جریان از بالا به پایین و توسعه لایه اشباع از بالا به سمت پایین و یا به عبارت دیگر جریان رو به پایین اشباع همراه باشد که در این صورت طبق قوانین مکانیک خاک باعث افزایش تنش موثر خواهد بود و در این شرایط پایداری شیب تا زمانی که ناحیه های اشباع توسعه یافته از بالا و پایین به هم برسند با افزایش ضریب اطمینان پایداری همراه خواهد بود. البته بایستی تاثیر سایر پارامترها نظیر ضخامت لایه در بررسی این پدیده مد نظر قرار گیرد.



شکل ۷- تاثیر شدت بارش و بارندگی نسبی و هدایت هیدرولیکی بر زمان لغزش یک شیب نامحدود

۴- نتیجه گیری

- با توجه به نتایج حاصل از انجام آنالیزهای مختلف ارائه شده، نتیجه گیری های کلی از تحقیق حاضر به شرح زیر قابل بیان است:
- ۱- ضریب هدایت هیدرولیکی خاک بستر شبیها نقش عمده ای در توسعه فشار آب منفذی در اثر بارندگی دارد بطوریکه بارندگی می تواند شیب را به حالت ناپایدار در آورد.
 - ۲- بارندگی با توجه به تغییراتی که بر مقدار رطوبت خاک و فشار آب منفذی دارد، می تواند با توجه به اینکه ناحیه اشباع را از پایین به سمت بالا یا برعکس ایجاد می کند، بر مقدار تنش موثر در خاک تاثیر داشته و ممکن است برای مدت خاص باعث بالا رفتن نسبی ضریب اطمینان پایداری شود.
 - ۳- روند تاثیر بارندگی بر تغییرات ضریب اطمینان پایداری با توجه به نسبت شدت بارندگی به هدایت هیدرولیکی قابل توصیف است. بطوریکه در بارندگی های با شدت کمتر از هدایت هیدرولیکی هر چه مقدار شدت به هدایت هیدرولیکی نزدیکتر باشد زمان تاثیر بارش بر ناپایداری کمتر خواهد بود. در حالیکه برای شرایطی که شدت بارندگی بیشتر از هدایت هیدرولیکی باشد، هر چه این شدت بیشتر از هدایت هیدرولیکی باشد، ضریب اطمینان سریعتر به حد بحرانی نزدیکتر خواهد شد.

۵- منابع

۱- احمدی، س. ۱۳۹۲، بررسی پایداری شیبهای نامحدود در لایه های غیر همگن با مدل GeoStudio، پایان نامه کارشناسی ارشد گروه زمین شناسی

مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر.

- 2- Caine, N., 1980. The rain fall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler 62 A, pp. 23-27
- 3- Corominas, J., 2000. Landslide and climate. 8th International symposium on landslides. Cardiff, Wales, UK. 33
- 4- Corominas, J. and Moya, J. 2008. A review of assessing landslide frequency for hazard zoning purposes. Engineering Geology. 102, pp. 193-213



-
- 5- Crozier, M.J., 2005. Multiple occurrence regional landslide events New Zealand: hazard management issues. *Landslides* 2, 247-256
 - 6- Das, B. M., 1977. Principles of geotechnical engineering. The University of Texas
 - 7- Farah, K., Ltifia, M., and Hassis, H. 2011. Reliability analysis of slope stability using stochastic finite element method. *Procedia Engineering*. 10, pp. 1402-1407
 - 8- Johari, A. and Javadi, A.A., 2012. Reliability assessment of infinite slope stability using the jointly distributed random variables method. *Sciencia Iranica*. 19 (3), pp. 423-429
 - 9- Johnson, K. A., Sitar, N., 1989. Hydrologic condition leading to debris flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal* 27, pp. 789-801
 - 10- Larsen, M.C., Simon, A., 1993. A rainfall intensity-duration threshold for landslides in a humid tropical environment, Puerto Rico, *Geografiska Annaler* 75, pp. 13-23
 - 11- White, A. J., and Singham, I. D., 2012. Slope stability assessment using stochastic rainfall simulation. *Procedia Computer Science* ,9, pp. 699-706