



بررسی تاثیر سرعت تخلیه آب مخزن بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی همگن در شرایط افت سریع مخزن بر مبنای مکانیک خاک غیر اشباع

محمدرضا چربگو^۱، علی اخترپور^۲، محمود حسینی^۳، مصطفی زمانی^۴

۱- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

akhtarpour@um.ac.ir

خلاصه

در سدهای خاکی فرآیند تخلیه سریع موجب ایجاد شیب فشار بین بدنه‌ی سد و مخزن می‌گردد. این شیب فشار پس از تخلیه‌ی مخزن به دلیل تاخیر زمانی لازم جهت اتلاف اضافه فشار آب منفذی موجود در شیب بالادست ایجاد گردیده و آن را در معرض لغزش قرار می‌دهد. در این تحقیق، یک مدل سد خاکی همگن با در نظر گرفتن توابع مناسب غیر اشباع نگهداشت و نفوذپذیری خاک، در حالت غیرماندگار، تحلیل شده و تاثیر سرعت تخلیه‌ی آب بر پایداری شیروانی بالادست با در نظر گرفتن مقاومت اشباع و غیر اشباع مصالح تشکیل دهنده‌ی سد خاکی بررسی و نتایج مقایسه شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش سرعت تخلیه‌ی آب مخزن، ضریب اطمینان شیب بالادست را کاهش می‌دهد. همچنین، وجود زه کش در شیب بالادست باعث افزایش پایداری سد خاکی همگن می‌شود.

کلمات کلیدی: سد خاکی همگن، غیر اشباع، سرعت تخلیه آب، غیرماندگار، پایداری شیروانی بالادست

۱. مقدمه

سدهای خاکی از جمله مهمترین و پیچیده‌ترین سازه‌های مهندسی می‌باشند که هزینه‌ی بسیار زیادی صرف مطالعه و اجرای این نوع پروژه‌ها می‌شود، در نتیجه، مسائل مربوط به ایمنی آن‌ها ضمن ساخت و نیز در دوران بهره‌برداری از اهمیت خاصی برخوردار است [۱]. طبق آمار ICOLD (کمیسیون جهانی سدهای بزرگ) بیشتر از ۸۱٪ سدهای ساخته شده در جهان خاکی و سنگریزه‌ای هستند. مهمترین مزیت سدهای خاکی و سنگریزه‌ای، در کنار ویژگی‌هایی نظیر کمتر بودن هزینه‌ی اجرا و تکنولوژی ساده تر، قابلیت تطبیق نسبتاً زیاد با طیف وسیعی از شرایط متنوع ساختگاه‌های مختلف است، از این رو محدودیتی از منظر استحکام زمین، مانع احداث آن‌ها نمی‌شود. با این وجود بهره‌برداری از این نوع سدها نیز مستلزم در نظر گرفتن شرایط ویژه‌ای است که شاید مهمترین عامل در طراحی، بحث پایداری سدهای خاکی باشد. یک سد خاکی وقتی در حال تعادل یا پایدار است که در هر قسمت از سد، برآیند تنش‌های اعمال شده کوچکتر از مقاومت بسیج شده در آن قسمت باشد. پایداری سد خاکی یک مسئله نسبی است و برحسب تغییر نسبی مقادیر نیروهای مخرب و نیروهای مقاوم، درجات مختلفی از پایداری می‌تواند وجود داشته باشد. از این رو در طراحی سدهای خاکی میزان نسبی پایداری با معیاری به نام ضریب اطمینان سنجیده و هر چه این ضریب بالاتر باشد، منعکس کننده درجه پایداری بیشتری خواهد بود [۲]. در طی ده‌های اخیر محققین بسیاری به بررسی تاثیر عوامل مختلفی نظیر جنس مصالح بدنه‌ی سد، چسبندگی، اصطکاک، شیب بالادست، سرعت تخلیه‌ی آب پشت سد و غیره در پایداری و نشست سد خاکی پرداخته‌اند. در ادامه به مرور برخی از تحقیقات، متناسب با موضوع مقاله حاضر، خواهیم پرداخت.

رخشنده‌رو و همکاران، نوسانات فشار آب حفره‌ای (در نقاط مختلف لوله‌ی پیرومتر) که برای یک دوره ۲۱ روزه افت سریع مخزن با کاهش ۲۳/۹ متری تراز آب روبرو است را پیش‌بینی کردند. دستاورد تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد که خط تراوش در بالادست سد با توجه به افت سریع، سطح مخزن را دنبال می‌کند. با این حال خط تراوش در بدنه سد به سرعت پایین نمی‌آید، در نتیجه یک شیب به سمت بالادست سد ایجاد می‌شود که پس از حدود ۱۱ روز

ممکن است پایداری شیب بالادست را تحت تاثیر قرار دهد [۳]. محرمی و همکاران به مطالعه عملکرد زه کش‌های افقی واقع در پوسته‌ی بالادست سدهای خاکی همگن در پایداری شیب بالادست در شرایط افت سریع مخزن پرداختند. بررسی‌های آن‌ها حکایت از آن داشت که وجود زه کش در بالادست باعث افت فشار آب حفره‌ای و افزایش پایداری شیب در برابر لغزش می‌شود. از طرفی، پایداری شیب بالادست در طول افت سریع مخزن، با افزایش تعداد زه کش‌های افقی افزایش می‌یابد [۴]. بهروزی‌نیا و همکاران به بررسی تاثیر پارامترهای مختلفی نظیر؛ ضریب نفوذپذیری مصالح سد و سرعت تخلیه و آبیگری در تحلیل نشت و پایداری سدهای خاکی همگن پرداختند. برای این منظور جنس مصالح سد از پایگاه داده UNSODA گزینش و با استفاده از نرم افزار GeoStudio آنالیزهای نشت و پایداری لازم انجام گردید. مطالعه آن‌ها نشان داد که، برخلاف خط آزاد جریان در سد همگن در حالت تخلیه سریع مخزن که کاملاً تابع ضریب نفوذپذیری و سرعت تخلیه است، منحنی فریاتیگ تراوش پایدار در سدهای همگن مستقل از ضریب نفوذپذیری می‌باشد. به طوری که تاثیر کاهنده کاهش نفوذپذیری در پایداری شیب بالادست به مراتب بیشتر از تاثیر سرعت تخلیه است. از طرفی، با افزایش ضریب نفوذپذیری از حالت غیر اشباع تا حالت اشباع، سرعت افت و صعود آب در بدنه افزایش می‌یابد که در نهایت منجر به افزایش ضریب اطمینان پایداری شیب بالادست در حالت تخلیه سریع مخزن و نیز کاهش ضریب اطمینان شیب پایین دست در حالت آبیگری می‌شود [۵]. تحقیقات سعید و ایراندوست، نشان داد که در شرایطی که ضروری است آب موجود در مدت زمان نسبتاً کوتاهی به سرعت پایین آورده شود، با توجه به فشار آب منفذی موجود در هسته و نیز حذف نیروی مقاوم ناشی از وجود آب مخزن بر روی شیب بالادست، ممکن است پایداری این شیروانی در حالت بحرانی قرار گیرد [۶]. مطالعه فرهادی و معجزی، پیرامون تأثیر ساخت یک زه کش در بالادست سد که با مقایسه دو مدل آنالیز شده با افزار نرم ABAQUS، یکی با زه کش افقی در بالادست و دیگری بدون آن، نشان داد که در مورد سدهایی که مصالح پوسته آنها نفوذپذیری کمی دارد، استفاده از زه کش افقی در پوسته بالادست می‌تواند ضریب اطمینان پایداری سد را افزایش دهد [۷]. بهروزی‌نیا و همکاران، به بررسی تاثیر خصوصیات هیدرولیکی مصالح و همچنین نسبت و شدت تخلیه‌ی آب در معیارها و پارامترهای طراحی سد نظیر موقعیت و شکل منحنی فریاتیگ، فشار آب حفره‌ای و پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن در وضعیت تخلیه سریع مخزن پرداختند. مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که با کاهش رطوبت ناحیه غیر اشباع و کمتر شدن قابلیت زه کشی خاک، ضرایب اطمینان حالت بحرانی در نزدیکی تخلیه‌ی کامل اتفاق می‌افتد و به طور کمی در شرایطی است که ۶۷ درصد تراز آب مخزن تخلیه شده باشد [۸]. ترن، به بررسی شرایط تخلیه‌ی سریع مخزن داتوتینگ در دو حالت قبل و بعد از وقوع آن با استفاده از روش‌های تعادل حدی و اجزای محدود پرداخت و تغییر رفتار تنش- کرنش، فشار منفذی، ساز و کار شکست و ضریب اطمینان را مورد بررسی قرار داد و مشاهده کرد که پایداری شیب بالادست سد بوضوح در طول تخلیه‌ی سریع مخزن کاهش می‌یابد [۹]. در این مقاله به بررسی تاثیر سرعت تخلیه آب مخزن بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی همگن در شرایط افت سریع مخزن بر مبنای مکانیک خاک غیر اشباع پرداخته شده است. همچنین اثر وجود زه کش در شیروانی بالادست بر ضریب اطمینان سد خاکی همگن بررسی شده است.

۲. مشخصات مدل عددی

جهت مدل‌سازی تاثیر سرعت تخلیه آب مخزن بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی همگن در شرایط افت سریع مخزن، بر اساس مفاهیم مکانیک خاک غیر اشباع، از بسته‌های $SEEP/W$ و $SLOP/W$ نرم افزار GeoStudio 2012 استفاده شده است. مدل‌سازی جریان گذرا به منظور تخلیه آب مخزن با کمک تحلیل $transient$ تحلیل $SEEP$ انجام شده و شرایط هیدرولیکی حاکم بر مساله در نرم‌افزار تعریف شده است. فردلان و رهاجو (Fredlund & Rahardjo) رابطه حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل دو بعدی به صورت زیر معرفی کردند [۱۰]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{dH}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{dH}{dy} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

که در آن H ، بار آبی کل، θ مقدار آبی حجمی، t زمان و K_x و K_y ضریب هدایت هیدرولیکی به ترتیب در جهات x و y هستند. تغییرات تنش و پارامترهای خاک، عوامل تغییر در میزان حجمی آب هستند. بر مبنای مفاهیم مکانیک خاک غیر اشباع، تنش برای شرایط اشباع و غیر اشباع با دو متغیر حالت نشان داده می‌شود. این دو متغیر حالت شامل تنش نرمال $(\sigma - u_a)$ و مکش بافتی $(u_a - u_w)$ می‌شوند، که در آن σ تنش کل، u_a فشار هوای منفذی و u_w فشار آب منفذی است. تغییر میزان حجمی آب، با توجه مفروضات بسته تحلیلی $SEEP/W$ ، تنها تابع تغییرات مکش بافتی است به نحوی که با ثابت ماندن u_a ، بر اساس تحقیقات کراهان، تنها به تغییرات فشار آب حفره‌ای وابسته است [۱۱]. فردلان و رهاجو نشان دادند که ارتباط بین u_w و θ از طریق رابطه‌ی زیر برقرار می‌شود [۱۰]:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w \quad (2)$$

در رابطه‌ی اخیر، m_w شیب تغییرات رطوبت حجمی نسبت به تغییرات فشار آب منفذی است. بر اساس رابطه برنولی مقدار هد کل برابر است با:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + y \quad (3)$$

که در رابطه اخیر، y ارتفاع استاتیکی نسبت به سطح مبنای مشخص و ثابت است و γ_w وزن مخصوص آب است. بر اساس تحقیقات کاراهان، با ترکیب دو رابطه‌ی (۲) و (۳) و مشتق‌گیری نسبت به زمان به رابطه بنیادی تراوش خواهیم رسید [۱۱]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{dH}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{dH}{dy} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial x} \quad (4)$$

در پژوهش حاضر مشخصات هندسی سدخاکی مدل شده بر روی پی‌های نفوذپذیر و سنگی ثابت فرض شده است. جدول ۱ مشخصات هندسی سدخاکی را نشان می‌دهد.

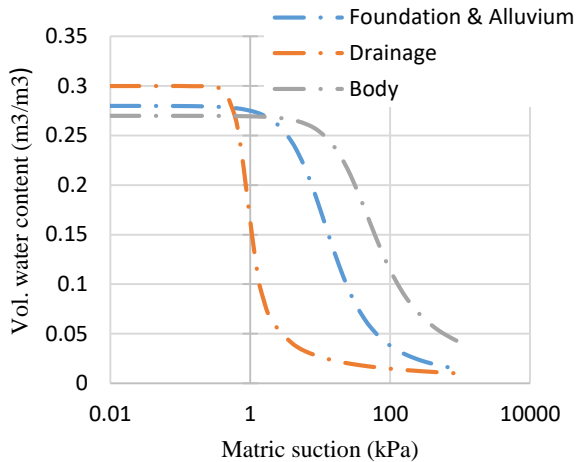
جدول ۱- مشخصات عمومی سد

مقدار عددی	مشخصات هندسی
۳۵	ارتفاع کل سد (m)
۳۲	ارتفاع تراز آب در مخزن (m)
1V : 3H	شیب پایین دست
1V : 4H	شیب بالادست
۹	ارتفاع پایین زه‌کش پایین دست (m)
۱	ضخامت زه‌کش‌ها (m)
۳	ارتفاع پرده‌ی آب‌بند از سطح زمین (m)
۱۲	عمق پرده‌ی آب‌بند از سطح زمین (m)
۴٫۲	عمق پی (m)
۲۰٫۸	ضخامت آبرفت (m)

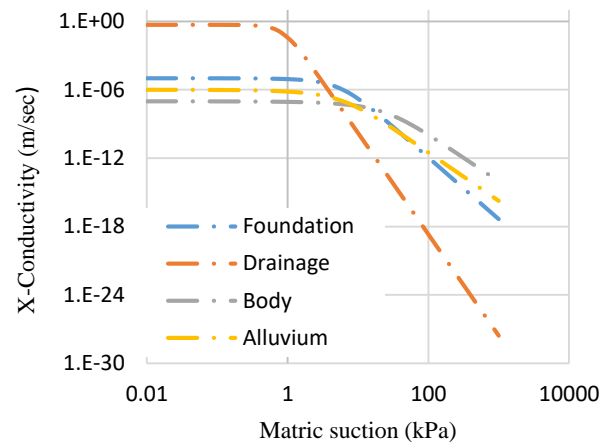
با توجه به وجود ناحیه اشباع در قسمت بالادست بدنه و ناحیه غیراشباع در قسمت پایین دست بدنه، مصالح بدنه‌ی سد، زه‌کش‌ها و آبرفت در حالت اشباع-غیراشباع (saturated/unsaturated) مدل‌سازی شده‌اند. در حالی که پرده‌ی آب‌بند و پی، بدلیل موقعیت هندسی، در شرایط اشباع تعریف شده‌اند. در جدول ۲ مشخصات مصالح سدخاکی ارائه شده است. شکل‌های ۱ و ۲ منحنی مشخصه آب-خاک و تابع هدایت هیدرولیکی برای مصالحی که به صورت اشباع-غیراشباع تعریف شده‌اند را نشان می‌دهند.

جدول ۲- مشخصات مصالح سدخاکی

رطوبت ماندگار $\left(\frac{m^3}{m^3}\right)$	رطوبت اشباع $\left(\frac{m^3}{m^3}\right)$	چسبندگی (kPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص اشباع (KN/m ²)	ضریب نفوذپذیری (m/s)	مشخصات سد
0.041	0.27	30	33	20.2	$2 * 10^{-9}$	بدنه
0.014	0.28	-	-	-	$1 * 10^{-6}$	آبرفت
0.01	0.3	1	36	20	0.5	زه‌کش
-	0.28	30	23	19.1	$1 * 10^{-5}$	پی
-	0.28	100	50	24	$1 * 10^{-5}$	پرده‌ی آب‌بند

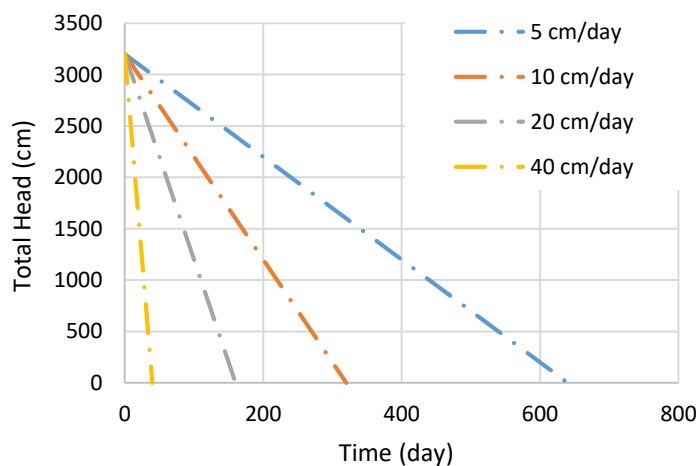


شکل ۱- منحنی مشخصه آب - خاک



شکل ۲- تابع هدایت هیدرولیکی

پس از تعریف و تخصیص پارامترهای هندسی و مکانیکی مدل سد خاکی با استفاده از زیر بخش $SEEP/W$ ، ابتدا کلیه مدل‌ها جهت تعیین خط ترواش در بالاترین تراز آب مخزن ($steady state$)، مورد آنالیز قرار گرفتند. سپس با استفاده از زیر بخش $SEEP/W$ ، و امکان تعریف تابع شدت تخلیه آب مخزن، کلیه مدل‌ها مورد تحلیل قرار گرفتند. شکل ۳ توابع شدت تخلیه‌ی اختصاص داده شده به آب مخزن، به منظور بررسی تاثیر سرعت تخلیه آب مخزن بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی همگن در شرایط افت سریع مخزن، را نشان می‌دهد.

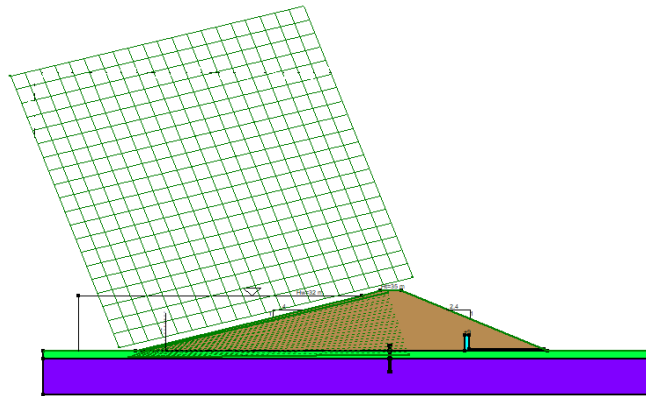


شکل ۳- توابع شدت تخلیه آب مخزن

در ادامه مدل ساخته شده در بسته‌ی نرم‌افزاری $SEEP$ به محیط $SLOP$ منتقل شد تا تحلیل پایداری سد خاکی همگن در شرایط مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. ضریب اطمینان بر اساس نظر مورگنسترن و سانگری ($Morgenstern \& Sangri$)، ضریبی است که پارامترهای مقاومت خاک می‌توانند کاهش یابند به صورتی که شیب در حالت تعادل حدی در طول سطح مفروض قرار گیرد. در تحلیل پایداری به روش تعادل حدی و با استفاده از بسته‌ی $SLOP/W$ ، به دو طریق می‌توان اثر مکش بافتی را در مقاومت خاک غیر اشباع در نظر گرفت. نخست: استفاده از یک مقدار ثابت برای زاویه اصطکاک مکش مصالح (ϕ_b) است که با توجه به فرض ثابت بودن در عمق لایه از دقت بالایی برخوردار نیست. دوم: تعریف منحنی مشخصه‌ی آب-خاک ($SWCC$) برای تخمین مکش بافتی مطلوب است که نسبت به روش قبلی به واقعیت نزدیک‌تر است [۱۱]. واناپالی و همکاران برای مقاومت برشی خاک غیر اشباع و در نتیجه تخمین ضریب اطمینان، با در نظرگیری منحنی مشخصه‌ی آب-خاک، رابطه‌ی زیر را پیشنهاد کردند [۱۲]:

$$s = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right] \tan \phi' \quad (5)$$

که در آن، c' و ϕ' به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی موثر، θ_s مقدار رطوبت متناظر با حالت اشباع، θ_r رطوبت باقی مانده و θ_w مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف است. در این مقاله، به منظور تعیین ضریب اطمینان سدخاکی بر اثر افت سریع مخزن از روش *Morgenstern - price* که مبتنی بر اعمال همزمان تعادل نیروها و گشتاورهاست استفاده شده است. مزیت استفاده از روش *Morgenstern - price* استفاده از توابع مختلف به منظور محاسبات تعادل پایداری شیروانی خاکی است. به عبارت دیگر نسبت نیروهای برشی به نیروهای نرمال برای قطعات، برخلاف سایر روش‌ها نظیر روش اسپنسر ثابت نبوده و از توابع مشخصی پیروی می‌کنند. همچنان که در شکل ۴ نشان داده شده است از روش شبکه‌ی لغزش (*grid and radius*) به منظور مشخص کردن سطح گسیختگی استفاده شده است.



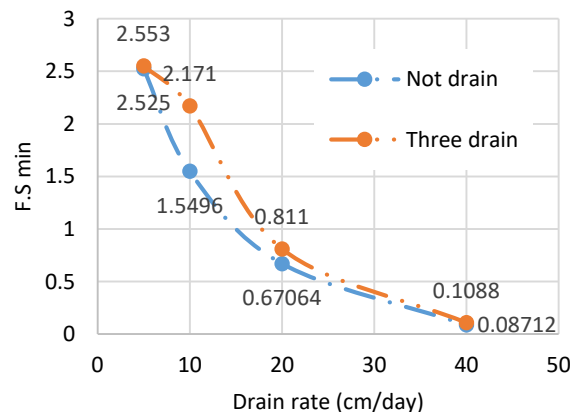
شکل ۴- شبکه و شعاع لغزش

۳. تحلیل و بررسی نتایج

در این بخش، اثر پارامترهای شدت تخلیه آب مخزن، وجود زه کش در بالادست و پارامترهای خاک غیراشباع بر تحلیل پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن بررسی شده است. در ادامه، حدود تغییرات هر یک از پارامترها و نتایج تحلیل‌های صورت گرفته ارائه شده است.

۳،۱- تأثیر سرعت تخلیه‌ی آب مخزن

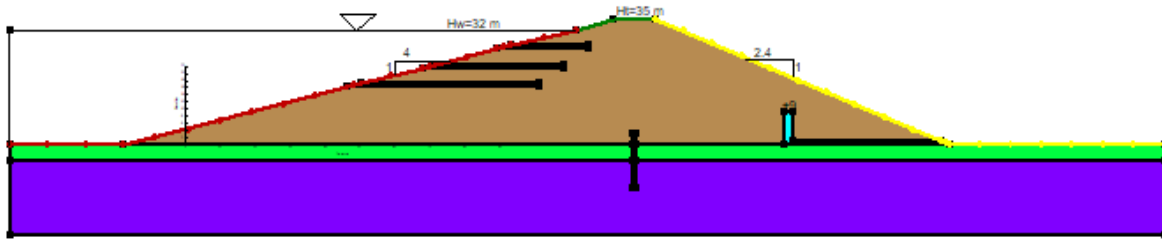
عمده‌ترین عامل شکست سدهای خاکی، تخریب هیدرولیکی می‌باشد و از جمله عواملی که باعث تخریب هیدرولیکی می‌شود، وقوع پدیده‌ی تخلیه‌ی سریع می‌باشد که عدم توجه به این پدیده باعث لغزش شیب و ناپایداری شیب بالادست و بالاخره شکست سد می‌شود [۱۳]. در شکل ۵، تأثیر سرعت تخلیه‌ی آب مخزن بر پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن، در دو حالت بدون زه کش و سه زه کش، نشان داده شده است. همچنان که در تصویر نشان داده شده است با افزایش سرعت تخلیه‌ی آب مخزن، ضریب اطمینان شیب بالادست سد خاکی همگن کاهش می‌یابد. همچنین، تأثیر وجود زه کش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالادست، با افزایش سرعت تخلیه‌ی آب از 5 cm/day تا 40 cm/day ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.



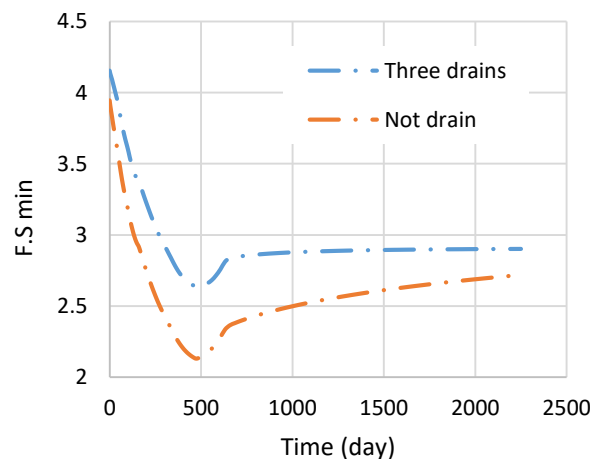
شکل ۵- تأثیر سرعت تخلیه‌ی آب مخزن بر ضریب اطمینان شیب بالادست

۲،۲- اثر زه‌کش افقی بر ضریب اطمینان شیب بالادست

به منظور مقایسه اثر وجود زه‌کش افقی بر پایداری شیروانی بالادست در حالت تخلیه‌ی سریع مخزن، همچنان‌که در شکل ۶ نشان داده شده است، سه زه‌کش در شیب بالادست، با در نظرگیری خصوصیات مصالح زه‌کش که در جدول ۲ آورده شده است، جانمایی و طراحی شد. شکل ۷، ضریب اطمینان شیب بالادست در دو حالت بدون زه‌کش و وجود سه زه‌کش افقی، با در نظرگیری سرعت تخلیه‌ی ثابت 5 cm/day ، بر حسب زمان را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که وجود زه‌کش در بالادست حدوداً ۲۰ درصد ضریب اطمینان بحرانی را افزایش می‌دهد که این با نتایج تحقیق حسلتویی و سروران که مطالعه‌ای بر تأثیر زه‌کش در پایداری دیواره‌ی بالادست سدهای خاکی هنگام تخلیه سریع آب مخزن، در مطالعه موردی سد مخزنی ماشکید علیای سیستان و بلوچستان داشتند، همخوانی دارد [۱۴].



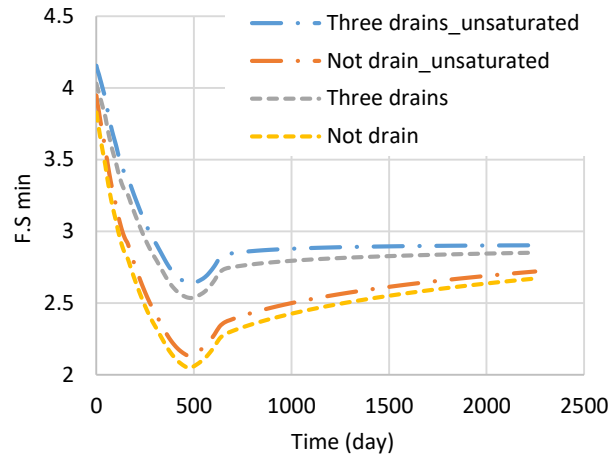
شکل ۶ - هندسه سد خاکی با سه زه‌کش افقی در بالادست



شکل ۷ - اثر زه‌کش بالادست بر ضریب اطمینان سد خاکی

۳،۳- اثر در نظرگیری مقاومت غیر اشباع

به طور کلی تعیین خصوصیات هیدرولیکی بخش غیر اشباع شامل منحنی مشخصه‌ی آب-خاک و تابع هدایت هیدرولیکی، تأثیر مهمی در ضریب اطمینان شیب بالادست در هنگام افت سریع مخزن دارد [۸]. شکل ۸ اثر در نظرگیری مقاومت غیر اشباع خاک، همچنان‌که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است، با اعمال سرعت تخلیه‌ی 5 cm/day و در مقایسه با حالتی که اضافه مقاومت ناشی از توده‌ی خاک غیر اشباع، صفر است ($\phi_b = 0$) را بر ضریب اطمینان شیب بالادست نشان می‌دهد. همچنان‌که در تصویر مشخص است اختلاف بسیار ناچیزی بین نتایج حاصل از مدل اشباع و غیر اشباع وجود دارد. دلیل این موضوع را می‌توان در موقعیت دواير لغزش جست‌وجو کرد. با توجه به اینکه عمده‌ی دواير لغزش در ناحیه‌ی اشباع قرار گرفته‌اند، در نظرگیری مقاومت غیر اشباع، اثر قابل توجه‌ای بر ضریب اطمینان شیب بالادست نخواهد داشت. علاوه‌ی بر آن حداقل ضریب اطمینان در زمان فرآیند تخلیه سریع مخزن بوجود می‌آید بنحوی که پس از تخلیه کامل، در حالی که ضریب اطمینان به شدت کاهش یافته است، با زائل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای، در ادامه، ضریب اطمینان ابتدا به میزان کمی افزایش و سپس به مجانب خود همگرا خواهد شد.



شکل ۸ - تغییرات ضریب اطمینان شیب بالادست با در نظر گیری اثر مقاومت غیر اشباع (ϕ_D)

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تاثیر سرعت تخلیه آب مخزن و همچنین وجود زه کش بالادست بر پایداری شیروانی بالادست سد خاکی همگن در شرایط افت سریع مخزن بر مبنای مکانیک خاک غیر اشباع و با استفاده از نرم‌افزار GeoStudio پرداخته شد. بر اساس مجموع نتایج حاصل از بررسی‌ها در این پژوهش موارد زیر قابل استنتاج است:

۱. افزایش سرعت تخلیه‌ی آب مخزن، بوضوح ضریب اطمینان شیب بالادست سد خاکی همگن را کاهش می‌دهد.
۲. وجود زه کش در شیب بالادست باعث افزایش پایداری سد خاکی خواهد شد.
۳. تاثیر وجود زه کش‌های افقی بر پایداری شیروانی بالادست، مادامی که سرعت تخلیه‌ی آب از 5 cm/day تا 40 cm/day افزایش می‌یابد، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.
۴. با تعبیه‌ی زه کش‌های افقی برای شیب بالادست، مادامی که سرعت تخلیه آب مخزن 5 cm/day در نظر گرفته شود، ضریب اطمینان سد خاکی حدود ۲۰ درصد افزایش می‌یابد.
۵. در شرایط تخلیه‌ی سریع آب مخزن، حداقل ضریب اطمینان در طول فرآیند تخلیه آب بوجود می‌آید بنحوی که پس از تخلیه کامل و در حالی که شیروانی بالادست سد خاکی همگن حداقل ضریب اطمینان خود را تجربه کرده است، با زائل شده اضافه فشار آب حفره‌ای مقدار ضریب اطمینان در ابتدا مقدار کمی افزایش و در نهایت به مجانب خود همگرا خواهد شد.

۵. مراجع

1. Australian National Committee on Large Dams, (1983), "Guidelines for Dam Instrumentation and Monitoring System", ANCOLD.
۲. جسمانی، مهرباب و رودی، غ، (۱۳۸۷)، مکانیک خاک، انتشارات بین‌المللی گاج
3. Rakhshanderoo, G. R. and Pourtouserkani, A. (2013). "Predicting Doroodzan Dam Hydraulic Behavior During Rapid Drawdown." Transactions of Civil Engineering, Vol. 37, No. C2,301-310.
4. Moharrami, A., Hassanzadeh, Y., Salmasi, S., Moradi, G. and Moharrami, G. (2014). "Performance of the horizontal drains in upstream shell of earth dams on the upstream slope stability during rapid drawdown conditions". Arab J Geosci 7:1957-1964.



۵. بهروزی‌نیا، ث. (۱۳۹۲)، " بررسی پارامترهای موثر در تحلیل نشست و پایداری سدهای خاکی همگن،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه ارومیه، ارومیه
۶. سعید، ف. و ایراندوست، م. (۱۳۸۹)، " بررسی اثر زه‌کش‌های افقی در پوسته‌ی سدهای خاکی بر تراوش و تحلیل پایداری با استفاده از نرم‌افزار Geostudio،" نجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد
۷. فرهادی، علی و معجزی، محسن. (۱۳۸۹)، "آتالیز پایداری شیروانیهای خاکی مسلح با روشهای اجزای محدود و تعادل حدی،" چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران
۸. عباسی، ن. (۱۳۹۳)، " بررسی تاثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیر اشباع بر میزان تراوش و پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن در اثر تخلیه سریع مخزن،" مجله‌ی تحقیقات مهندسی کشاورزی، جلد ۱۶، صفحه ۳۶-۱۹
9. Tran X.tho, (2004): "stability problems of an earth fill dam in rapid drawdown condition", Bratislava, Slovak republic.
10. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993). "Soil Mechanics for Unsaturated Soils". John Wiley & Sons Inc. New York. Griffiths, D. V. and Lane, P. A. 2000. Assessment of stability of slopes under drawdown condition. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 126(5): 443-450
11. Krahn, J. 2004. Seepage Modeling with seep/w. Geo-Slope International LTD. Calgary, Alberta, Canada.
12. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. Canadian Geotech. J. 33(3): 379-392.
۱۳. وفائیان، م.، (۱۳۸۵) اطلاعات اجرایی در مورد سدهای خاکی، " عاب دوم، انتشارات ارکان
۱۴. حسنلوئی، م. (۱۳۹۴)، " تاثیر زه‌کش در پایداری دیواره‌ی بالادست " خاکی هنگام تخلیه‌ی سریع آب مخزن، مطالعه موردی: سد مخزنی ماشکید علیای سیستان و بلوچستان،" دومین کنفرانس ملی خاک و مهندسی پی