

بررسی تأثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیر اشباع بر میزان تراوش و پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن در اثر تخلیه سریع مخزن

ثمر بهروزی‌نیا، حجت احمدی و نادر عباسی**

* نگارنده مسئول: کرج، بلوار شهید فهمیده، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ص. پ. ۸۴۵-۳۱۵۸۵، تلفن: ۰۲۶)۳۲۷۰۵۳۲۰، پیام‌نگار: nader_iaeri@yahoo.com
** به ترتیب: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد سازه‌های آبی، استادیار دانشگاه ارومیه؛ و دانشیار بخش تحقیقات آبیاری و زهکشی مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی
تاریخ دریافت: ۹۳/۵/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۸

چکیده

تحلیل تراوش از بدنه سدهای خاکی، علاوه بر تعیین مقدار هدر رفت آب، در تحلیل پایداری این سازه‌ها نیز نقش بسیار اساسی و با اهمیتی دارد. در این پژوهش، تأثیر خصوصیات هیدرولیکی مصالح و همچنین نسبت و شدت تخلیه آب در معیارها و پارامترهای طراحی سد، شامل موقعیت و شکل منحنی فریاتیگ، فشار آب حفره‌ای و پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن در وضعیت تخلیه سریع مخزن بررسی شده است. بدین منظور، تحلیل‌های تراوش و پایداری با نرم‌افزار Geostudio، زیر برنامه‌های seep/w و slope/w (به ترتیب مبتنی بر روش‌های المان محدود و تعادل حدی) با انتخاب جنس مصالح سد از پایگاه داده خاک‌های غیر اشباع انجام گردید. مدل‌سازی‌های مورد نظر در دو حالت پایدار و گذرا و با اعمال چهار شدت تخلیه متفاوت اجرا شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که به دلیل نبود اختلاف معنی‌دار در ضرایب اطمینان حاصل، اعمال ضریب نفوذپذیری ثابت یا متغیر تأثیری بر پایداری شیب پایین‌دست سد خاکی همگن در تحلیل وضعیت پایدار ندارد و در این حالت، منحنی فریاتیگ مستقل از ضریب نفوذپذیری عمل می‌کند. بررسی نتایج مدل عددی حاکی از تأثیر قابل توجه منحنی مشخصه رطوبتی و تغییرات شیب (m_w) این تابع در شدت تخلیه و پس از آن فشار آب حفره‌ای و مقاومت برشی ناشی از اعمال مکش توسط این منحنی است. به طوری که با کاهش آن و نزدیک شدن به حالت ثابت، روند ضرایب اطمینان و موقعیت حالات بحرانی نیز تغییر می‌کند. علاوه بر آن، در صورت به کارگیری رطوبت ثابت (اشباع) در وضعیت تخلیه سریع مخزن، حالت بحرانی رویه بالادست در شرایط مخزن نیمه پر و در شرایط تخلیه $\frac{1}{2}$ تراز آب مخزن اتفاق می‌افتد. با کاهش رطوبت ناحیه غیر اشباع و کمتر شدن قابلیت زهکشی خاک، ضرایب اطمینان حالت بحرانی در نزدیکی تخلیه کامل اتفاق می‌افتد و به طور کمی در شرایطی است که $\frac{2}{3}$ تراز آب مخزن تخلیه شده باشد.

واژه‌های کلیدی

پایداری شیب، تخلیه سریع، تراوش، سد خاکی، منحنی مشخصه رطوبتی

مقدمه

بالادست و سرانجام شکست سد می‌شود (Vafaeiyan, 2006). با افت سطح آزاد آب مخزن، اثر متعادل کننده فشار آب بیرونی در مقابل فشار آب منفذی از بین می‌رود و شیب بالادست نمی‌تواند پایداری خود را در مقابل فشار هیدرودینامیک ناشی

عمده‌ترین عامل شکست سدهای خاکی، تخریب هیدرولیکی است و از عوامل بروز این پدیده، تخلیه سریع است که بی‌توجهی به آن باعث لغزش شیب و ناپایداری شیب

از تخلیه سریع حفظ کند (Griffiths & Lane, 2000). تراوش از طریق افزایش فشار آب منفذی خاک، نیروهای گرادیان و جابه‌جایی ذرات، موجب ناپایداری شیب می‌گردد. افزایش فشار آب منفذی ممکن است مقاومت برشی خاک را کاهش دهد و نیروهای گرادیان تراوش موجب جابه‌جایی ذرات شوند (Chu-Agor *et al.*, 2008). نیان و همکاران (Nian *et al.*, 2011) به بررسی پایداری شیب همگن تحت پدیده افت آرام و سریع سطح آب پرداختند و علاوه بر تاکید به انجام تحلیل تراوش اشباع/ غیراشباع جهت یافتن بازخورد معقول در موارد عملی، پایداری شیب در معرض آب را با استفاده از روش المان محدود و تکنیک کاهش مقاومت بررسی کردند. عوامل تأثیرگذار در پایداری و موقعیت منحنی فریاتیکی، هدایت هیدرولیکی اشباع، نسبت تخلیه، شدت تخلیه و مکش ماتریک معرفی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌هایی با هدایت هیدرولیکی بالا، شدت تخلیه، تأثیر قابل توجهی بر فشار آب حفره‌ای و ضرایب اطمینان دارد. سولیوونگ و همکاران (Souliyavong *et al.*, 2012)، تأثیر عواملی مانند شدت تخلیه، زاویه تمایل شیب و خصوصیات مصالح تقسیم‌بندی شده را بر پایداری شیب بالادست سد خاکی غیرهمگن با هسته قائم رسی بررسی کردند. تأثیر عوامل فوق، تحت پدیده تخلیه سریع مخزن مطالعه و تحلیل‌های تراوش و پایداری لازم به ترتیب با نرم‌افزارهای $slope/w$ و $seep/w$ انجام شده است. برخی از نتایج، حاکی از این موضوع است که کاهش شدت تخلیه مخزن، افزایش ضرایب اطمینان شیب بالادست را به دنبال دارد. علاوه بر آن، به‌کارگیری مصالح با هدایت هیدرولیکی بالا، سبب پایدار شدن شیب بالادست در حین تخلیه می‌شود. پارونوزی و همکاران (Paronuzzi *et al.*, 2013)، زمین لغزش سال ۱۹۶۳ را برای بررسی تأثیر آگیری و تخلیه مخزن Vajont بر پایداری شیب Mt.Toc (یکی از دیواره‌های مخزن) توسط زیر برنامه‌های Geostudio تحلیل نمودند. هر دو تحلیل تراوش و پایداری انجام شده نشان می‌دهد که عامل اصلی

ناپایداری، تراوش سریع به داخل شیب است که کاهش ضرایب اطمینان را موجب شده است. نفوذپذیری و شدت تخلیه و آگیری مخزن در پایداری شیب مؤثر است. نفوذپذیری بالای مصالح نیز باعث افزایش پایداری شیب در حین تخلیه مخزن می‌شود. از طرف دیگر، با در نظر گرفتن نفوذپذیری بسیار پایین، در اثر کاهش سطح آب مخزن، ضرایب اطمینان کاهش می‌یابد. لوپز آکوستا و همکاران (Lopez-Acosta *et al.*, 2013) پایداری یک خاکریز همگن تحت پدیده افت سریع آب را با تحلیل تراوش گذرا در محیط اشباع/ غیراشباع با مدل عددی بررسی کردند. تحلیل‌های تراوش و پایداری به ترتیب به کمک برنامه‌های PLAXFLOW و PLAXIS انجام شده است. در انتها به تأثیر پارامترهایی نظیر موقعیت منحنی فریاتیکی، سرعت و مقدار افت آب و هدایت هیدرولیکی اشباع بر پایداری پرداخته شده است. برای نشان دادن اهمیت تحلیل تراوش گذرا و بررسی تأثیر فشار آب حفره‌ای بر پایداری، به سه حالت کلی پدیده تخلیه اشاره شده که عبارت‌اند از: تخلیه کامل آرام، تخلیه کامل سریع و تخلیه گذرا. تخلیه سریع دارای بیشترین مقدار فشار آب حفره‌ای است. فشار آب حفره‌ای خاکریز در حالت تخلیه آرام، کمترین مقدار را در بین دو حالت دیگر دارد. فشار آب حفره‌ای تخلیه گذرا حالتی بینابین دارد و به همین دلیل است که باید برای برآورد ضرایب اطمینان شیب بالادست از این حالت استفاده کرد تا بیش‌برآورد تخلیه آرام و کم‌برآورد تخلیه سریع را به همراه نداشته باشد. مهدوی و همکاران (Mahdavi *et al.*, 2010) روش‌های تعادل حدی در نرم‌افزار $slope/w$ را بررسی و اعلام کردند که تفاوت اصلی هر یک از این روش‌ها، در ارضا یا عدم ارضای تعادل نیروها و تعادل گشتاور آنها جهت پایداری هر قطعه از سطح لغزش خاکی است و در پایان توصیه کردند که روش‌هایی مانند مورگنسترن-پرایس و یا اسپنسر انتخاب شوند که هر دو تعادل گشتاور و نیروها را ارضا می‌کنند و اثر تمامی نیروهای وارد بر قطعه‌ها را در نظر می‌گیرند. مرادی و همکاران (Moradi *et al.*, 2011) به تحلیل پایداری شیب

بررسی تأثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیراشباع بر میزان...

$(\sigma - u_a)$ و $(u_a - u_w)$ هستند که در آنها $\sigma =$ تنش کل؛ $u_a =$ فشار هوای منفذی؛ و $u_w =$ فشار آب منفذی هستند. براساس مفروضات نرم‌افزار seep/w تغییر میزان حجمی آب تنها وابسته به تغییرات در متغیر تنش $(u_a - u_w)$ است و با ثابت ماندن u_a میزان تغییرات حجمی آب تنها تابعی از تغییرات فشار آب حفره‌ای است (Krahn, 2004). تغییر در مقدار آب حجمی θ با تغییر در مقدار فشار آب حفره‌ای مطابق رابطه زیر مرتبط است (Fredlund & Rahardjo, 1993):

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

که در آن،

$m_w =$ شیب تغییرات رطوبت حجمی نسبت به تغییرات فشار آب منفذی است. مقدار انرژی کل جریان طبق معادله برنولی و با توجه به سرعت پایین حرکت آب، همانند رابطه زیر است (Childs & Collis-George, 1950).

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

که در آن،

$Y =$ ارتفاع استاتیکی؛ و $\gamma_w =$ وزن مخصوص آب است. با ترکیب روابط ۲ و ۳ و جایگذاری آن در رابطه ۱ و با توجه به اینکه ارتفاع استاتیکی هر نقطه مقدار ثابتی دارد، در نتیجه مشتق آن نسبت به زمان، صفر و رابطه ۱ که معادله حقیقی تراوش می‌باشد به شرح زیر خواهد بود (Krahn, 2004).

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

روابط حاکم بر تحلیل پایداری و نرم‌افزار SLOPE/W

تحلیل استاتیکی در این تحقیق، بر مبنای اعمال مکش ماتریک انجام شده است. در تحلیل پایداری به روش تعادل حدی به کمک slope/w، تنها دو روش برای اعمال مکش

بالادست سد خاکی در اثر تخلیه سریع مخزن به روش تعادل حدی و مقاومت حدی پرداختند. برخی از نتایج بررسی‌های این محققان خاکی از استفاده از روش تعادل حدی به عنوان روشی مطمئن به علت سادگی و کم‌هزینه بودن و نیز کاهش ضرایب اطمینان شیب بالادست در اثر کاهش ضریب نفوذپذیری هسته است.

با عنایت به آنچه گفته شد، مشاهده می‌شود که در تحقیقات و مطالعات قبلی، تأثیر میزان مکش خاک و منحنی مشخصه رطوبتی در تعیین و انتخاب ضرایب هیدرودینامیکی خاک در تحلیل تراوش و پایداری سدها مورد توجه قرار نگرفته است. در حالی که به‌کارگیری خصوصیات هیدرولیکی ثابت برای خاک غیر اشباع می‌تواند منجر به نتایج غیر واقعی شود. در این پژوهش، تأثیر نفوذپذیری و منحنی مشخصه رطوبتی در کنار عواملی مانند نسبت و شدت تخلیه در موقعیت و شکل منحنی فریاتیك، فشار آب حفره‌ای و پایداری شیب سد خاکی همگن در وضعیت تخلیه سریع مخزن بررسی و تحلیل شده است.

مواد و روش‌ها

روابط حاکم بر تحلیل تراوش و نرم‌افزار SEEP/W

رابطه حاکم بر جریان آب در محیط متخلخل و تراوش در حالت دو بعدی به شکل زیر است (Fredlund & Rahardjo, 1993):

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

که در آن،

$H =$ بار آبی کل؛ $\theta =$ مقدار آب حجمی؛ $t =$ زمان، K_x و $K_y =$ ضریب هدایت هیدرولیکی به ترتیب در جهت x و y هستند. تغییر در میزان حجمی آب وابسته به تغییرات تنش و پارامترهای خاک است. تنش برای شرایط اشباع و غیراشباع با دو متغیر حالت نشان داده می‌شود. این متغیرها شامل

کاهش؛ و θ_w = مقدار رطوبت در مکش‌های مختلف است. ضرایب اطمینان در تحلیل پایداری به روش تعادل حدی مطابق توصیه مهدوی و همکاران (Mahdavi et al., 2010) براساس روش مورگنسترن (Morgenstern, 1963) به‌دست آمده است. چراکه به دلیل در نظر گرفتن اثر همزمان تمامی نیروها، معمولاً ضرایب اطمینان پایین‌تری را نتیجه داده و دارای درصد خطای کمتری نسبت به سایر روش‌ها است.

جنس مصالح

خصوصیات مصالح در نظر گرفته شده به عنوان جنس بدنه سد همگن براساس پایگاه داده خاک‌های غیراشباع^۱ (UNSODA) انتخاب شد که بدین منظور نمونه خاک با کد ۲۳۶۰ از این پایگاه داده به عنوان یک خاک رسی با نفوذپذیری کم انتخاب و در مدل‌سازی از آن استفاده شد. خصوصیات فیزیکی، متوسط پارامترهای مقاومت برشی و همچنین منحنی دانه‌بندی مصالح، به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ و شکل ۱ ارائه شده است.

ماتریک در مقاومت برشی خاک غیراشباع و تخمین ضرایب اطمینان وجود دارد که یکی از آنها تعیین زاویه اصطکاک مکش (ϕ_b) مصالح است که به علت ثابت در نظر گرفتن آن در عمق توسط نرم‌افزار، دقت بالایی ندارد. دومین روش، تعریف منحنی رطوبتی مصالح برای تخمین مکش مورد انتظار از این منحنی است که بسیار دقیق‌تر از روش قبلی عمل می‌کند (Krahn, 2004). بنابراین در این تحقیق طبق رابطه ۵ (Vanapalli et al., 1996)، از منحنی رطوبتی مصالح در محاسبه مقاومت برشی خاک غیراشباع و در نهایت تخمین ضرایب اطمینان استفاده شده است.

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

که در آن،

c' و ϕ' = به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مؤثر؛
 θ_b = مقدار رطوبت حالت اشباع؛ θ_w = مقدار رطوبت غیرقابل

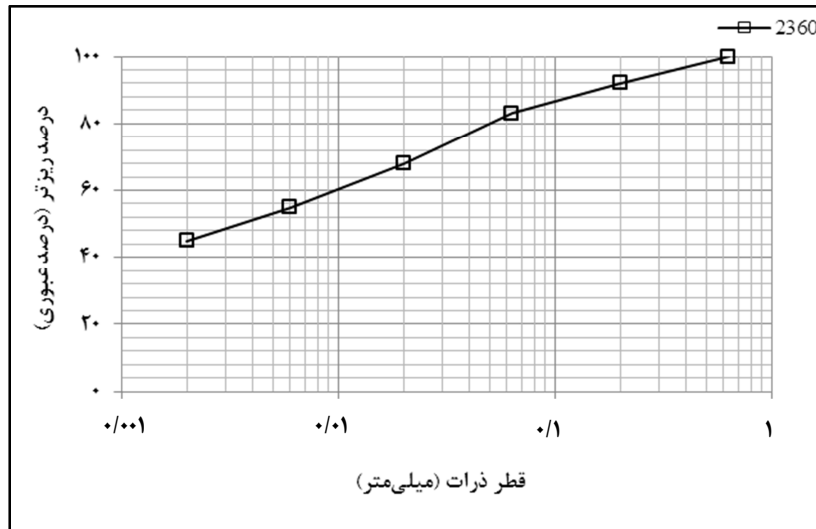
جدول ۱- مشخصات نمونه انتخاب شده (Anon, 1996)

شماره نمونه	بافت خاک	وزن مخصوص خشک خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	وزن مخصوص دانه‌های جامد خاک (گرم بر سانتی‌متر مکعب)	مقدار آب حجمی حالت اشباع	هدایت هیدرولیکی حالت اشباع (سانتی‌متر بر روز)
۲۳۶۰	رسی	۱/۷۳	۲/۵۷۳	۰/۴۹۲	۵

جدول ۲- متوسط پارامترهای مقاومت برشی (Anon, 1980)

نوع خاک	رطوبت بهینه (درصد)	چسبندگی در حالت متراکم شده (C_0) (کیلو نیوتن بر مترمربع)	چسبندگی در حالت اشباع (C_{sat}) (کیلو نیوتن بر مترمربع)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
خاک چسبنده رسی	۱۷/۳	۹۱	۱۴	۲۸

بررسی تأثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیراشباع بر میزان...

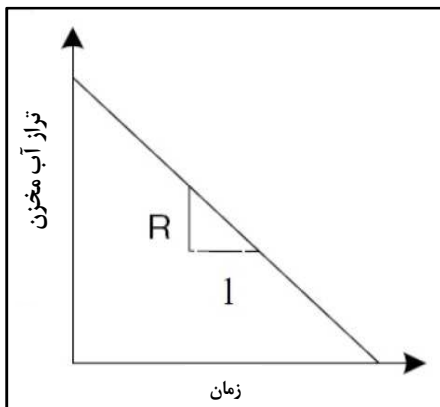


شکل ۱- منحنی دانه‌بندی نمونه انتخابی

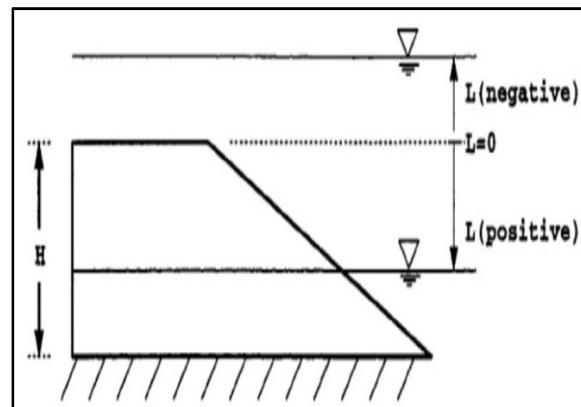
L ، مقدار افت سطح آب مخزن در اثر تخلیه و H تراز سطح آب نرمال در مخزن است (Griffiths & Lane, 2000). همچنین مطابق شکل ۳، منظور از شدت تخلیه، افت تراز آب مخزن نسبت به زمان است که با R نشان داده می‌شود و واحد آن سانتی‌متر در روز یا متر در روز است (Berilgen, 2007). سازمان عمران آمریکا (Anon, 1987)، شدت تخلیه بحرانی را معادل 0.5 فوت (۱۵ سانتی‌متر) در روز پیشنهاد کرده است. برای بررسی اثر شدت تخلیه در تمامی تحلیل‌ها، از چهار شدت 0.15 ، 0.5 ، 1 و 2 متر در روز استفاده شد.

تعیین پارامترهای مورد بررسی در تحلیل تراوش و پایداری تخلیه سریع مخزن

تخلیه سریع زمانی رخ می‌دهد که سطح آب در مجاورت شیب چنان سریع افت کند که خاک داخل شیب زمان کافی برای زهکشی نداشته باشد و سطح فریاتیکی داخل شیب نتواند به‌طور متناسب از سطح نهایی آب مخزن تبعیت کند و برای مدتی در جای اولیه خود باقی بماند (Griffiths & Lane, 2000). از مهم‌ترین عوامل مؤثر در پدیده تخلیه سریع، نسبت تخلیه^۱ و شدت تخلیه^۲ است. نسبت تخلیه به‌صورت L/H بیان می‌شود که مطابق شکل ۲،



شکل ۳- شدت تخلیه (Berilgen, 2007)



شکل ۲- نسبت تخلیه (Griffiths & Lane, 2000)

مدل‌سازی از آن استفاده شد. علاوه بر انتخاب توابع نفوذپذیری فوق، استفاده از تابع خطی^۶ (K_{LE}) طبق توصیه^۱ نرم‌افزار و نیز به‌کارگیری تابع ثابت (K_{sat}): برابر هدایت هیدرولیکی اشباع و مستقل از مکش ماتریک) و تابع حاصل از داده‌های واقعی (K_{UNSODA})، به‌طور کلی سبب اعمال پنج نوع تابع هدایت هیدرولیکی در تمامی تحلیل‌ها شده است. نمونه‌ای از خصوصیات هیدرولیکی مصالح، جهت استفاده در مدل‌سازی به شرح جدول ۳ است. توابع رطوبتی مشخص شده در جدول زیر، علاوه بر تحلیل پایداری، در تحلیل تراوش حالت گذرا^۷ (تخلیه سریع مخزن) نیز استفاده شده است.

منحنی مشخصه رطوبتی^۱ با استفاده از چهار روش موجود در نرم‌افزار seep/w تخمین زده شد. علاوه بر آنها، براساس داده‌های واقعی UNSODA، در مجموع پنج نوع منحنی مشخصه رطوبتی به‌دست آمد. همچنین، توابع نفوذپذیری براساس سه روش موجود در نرم‌افزار seep/w و با پیش‌فرض منحنی مشخصه‌های فوق برآورد شد. پارامترهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا^۲ (RMSE) و شاخص ناش - ساتکلایف^۳ (NSE) برای تعیین منحنی با بهترین تخمین نسبت به داده‌های واقعی^۴ (K_{BE}) و ضعیف‌ترین تخمین نسبت به داده‌های واقعی^۵ (K_{WE}) محاسبه و مطابق جدول ۳ در

جدول ۳- توابع هدایت هیدرولیکی و رطوبتی خاک چسبنده جهت استفاده در مدل‌سازی

علائم	توابع رطوبتی	توابع هدایت هیدرولیکی
$K_{BE} (\theta_{BE})$	θ_{BE}	K_{BE}
$K_{WE} (\theta_{WE})$	θ_{WE}	K_{WE}
$K_{LE} (\theta_{BE})$	θ_{BE}	K_{LE}
$K_{LE} (\theta_{LE})$	θ_{LE}	K_{LE}
$K_{LE} (\theta_{sat})$	θ_{sat}	K_{LE}
$K_{UNSODA} (\theta_{NSODA})$	θ_{NSODA}	K_{UNSODA}
$K_{LE} (\theta_{sat})$	θ_{sat}	K_{sat}

اساس، ابعاد بهینه محاسبه شد. داده‌های لازم برای تعیین ابعاد بهینه مقطع سد خاکی همگن عبارت است از: ارتفاع سد (H)، عرض تاج سد (b)، ارتفاع آب بالادست سد (h)، چسبندگی مؤثر و زاویه اصطکاک داخلی مصالح، حداکثر دانسیته خشک و ضریب نفوذپذیری مصالح. داده‌های مورد نیاز مطابق توصیه‌های سازمان عمران آمریکا و به شرح زیر تعیین شدند:

- ارتفاع سد خاکی، با توجه به حد نهایی سدهای خاکی کوتاه برابر ۲۰ متر در نظر گرفته شد (Anon, 1987).

- عرض تاج سد براساس توصیه سازمان عمران آمریکا برای سدهای خاکی کوتاه تا ارتفاع ۲۰ متر، مطابق رابطه ۶ است (Anon, 1987).

طراحی ابعاد بهینه مقطع سد همگن

در این تحقیق، ابعاد هندسی بهینه، بر مبنای الگوریتم ژنتیک ارائه شده توسط منتصری و همکاران (Montaseri et al., 2010) واقع بر پی نفوذناپذیر محاسبه شده است که با معیارهای طراحی موجود تقریباً مطابق است و در مقایسه با روش پیشنهادی سازمان عمران آمریکا، ابعاد کوچکتری را برای بدنه پیشنهاد می‌کند ولی نسبت به مقادیر پیشنهادی توسط شرارد نتایج مشابهی دارد. الگوریتم فوق، برای طراحی ابعاد بهینه سد خاکی غیرهمگن ارائه شده است. لذا در این تحقیق به منظور تعیین ابعاد بهینه سد خاکی همگن، جنس مصالح هسته و پوسته یکسان انتخاب و بر این

1- Soil Water Characteristic Curve

3- Nash-Sutcliffe

5- Worst Estimation in Relation to UNSODA

7- Transient State Seepage Analyse

2- Root Mean Square Error

4- Best Estimation in relation to UNSODA

6- Linear Estimation: in zero matric suction, $K=K_{sat}$ and in matric suction = -100kpa, $K=K_{sat}/100$

بررسی تأثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیراشباع بر میزان...

۲- محاسبه مقادیر متغیرهای طراحی بی بعد بهینه و توابع هدف و قیود طراحی با استفاده از جدول ۴.

برای سهولت دستیابی به نتایج، از بی‌بعد سازی استفاده شده است. بنابراین x_1 ، بردار متغیر طراحی است که برای بی‌بعد کردن استفاده می‌شود. $f_1 =$ حجم مصالح خاکی بی‌بعد در واحد طول سد؛ $f_2 =$ دبی تراوش بی‌بعد در واحد طول سد؛ $f =$ ضریب اطمینان پایداری در قید پایداری؛ و $i =$ گرادیان هیدرولیکی در قید گرادیان هیدرولیکی است.

۳- محاسبه متغیر طراحی محاسباتی مقطع سد: که مطابق رابطه ۸ است.

$$X_1 = x_1.H \quad (8)$$

که در آن، $X_1 =$ عرض سد و برابر ۱۰۰ متر محاسبه شد.

$$b = \frac{H}{5} + 3 \quad (6)$$

که در آن،

H و b به ترتیب ارتفاع و عرض تاج سد است که طبق رابطه فوق، γ متر برآورد شد.

- ارتفاع آب بالادست با احتساب دو متر عمق آزاد، ۱۸ متر محاسبه شد.

مراحل کار برای تعیین ابعاد هندسی بهینه (Montaseri et al., 2010) عبارت است از:

۱- محاسبه پارامتر بدون بعد \hat{c} :

$$\hat{c} = C' / \gamma H \quad (7)$$

که در آن،

$C' =$ چسبندگی مؤثر مصالح پوسته؛ و $\gamma =$ وزن مخصوص خشک پوسته است.

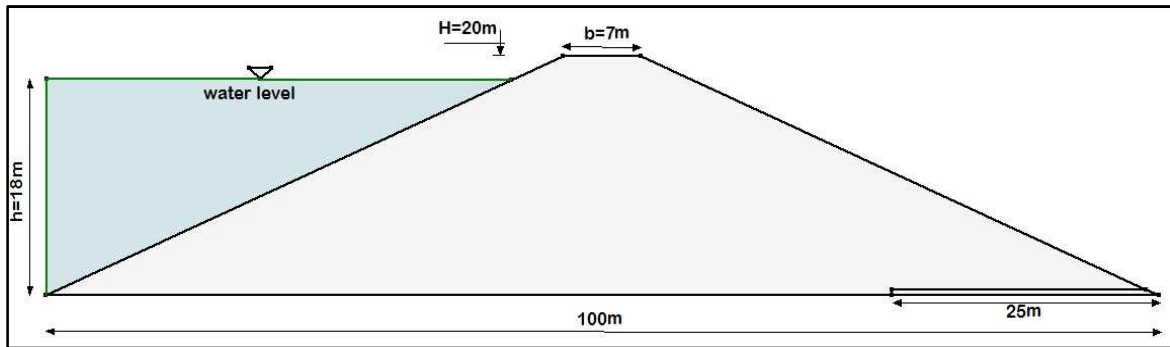
جدول ۴- جدول درونبایی جهت محاسبه متغیرها

\hat{c}	x_1	x_2	x_3	f_1	f_2	f	I
۰/۰۲	۴/۹۹	۰/۵۰۴	۰/۲۳	-۲/۲۵	۰/۹۱۸	۱/۶۳	۰/۶۸۵
۰/۰۳	۴/۹۹	۰/۵۰۳	۰/۲۳	-۲/۲۸	۰/۹۱۸	۱/۶۹	۰/۶۸۵
۰/۰۴	۴/۹۹	۰/۵۰۴	۰/۲۳	-۲/۲۸	۰/۹۱۸	۱/۷۳	۰/۶۷۸
۰/۰۵	۴/۹۹	۰/۵۰۳	۰/۲۳	-۲/۳۳	۰/۹۱۸	۱/۸۲	۰/۶۷۷
۰/۰۶	۴/۹۹	۰/۵۰۶	۰/۲۳	-۲/۳۵	۰/۹۱۷	۱/۸۸	۰/۶۷۳
۰/۰۷	۴/۹۹	۰/۵۰۸	۰/۲۳	-۲/۳۶	۰/۹۱۶	۱/۹۴	۰/۶۷۰

گرفته شده مطابق شکل ۴ است.

فرض‌های اولیه برای بررسی پایداری و تعیین ضریب اطمینان شیب بالادست سد خاکی که در معرض افت سریع سطح آب قرار دارد عبارت‌اند از: سطح شیب‌دار از نوع شیب ساده متشکل از مصالح همگن، مستقر روی لایه‌ای صلب و غیر قابل نفوذ در پاشنه شیب، دارای خاک تشکیل دهنده با پارامترهای C و ϕ که مقدار هر دو در عمق، ثابت و دارای زاویه $\beta = 23$ درجه با افق است.

طول بهینه زهکش افقی در سدهای خاکی همگن کوتاه، در محدوده طولی برابر با ارتفاع سد و ۲۵ درصد بیش از آن است (Alinezhad & Zomorodian, 2010). در نتیجه، طول انتخابی برای زهکش ۲۴ متر است که جهت اعمال آن در تحلیل‌ها، عرضی برای آن در نظر گرفته نشد و به صورت شرایط مرزی با بار آبی فشار صفر وارد تحلیل گردید. مقطع بهینه طراحی شده توسط منتصری و همکاران (Montaseri et al., 2010) به همراه زهکش افقی در نظر



شکل ۴- مقطع بهینه سد خاکی همگن

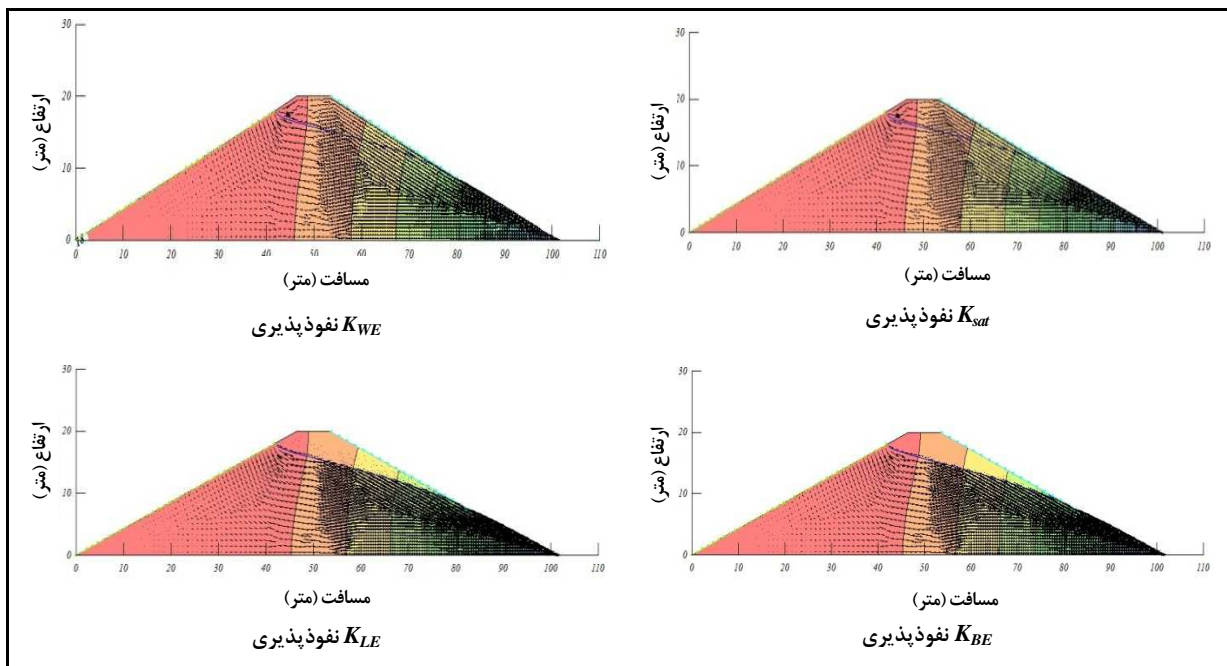
نتایج و بحث

وضعیت مخزن پر یا زه ثابت

تحلیل تراوش دائم سد خاکی همگن بدون در نظر گرفتن زهکش افقی

نتایج تحلیل‌های تراوش پایدار سد خاکی همگن با لحاظ کردن چهار نوع نفوذپذیری شامل: نفوذپذیری ثابت، نفوذپذیری با توابع K_{WE} ، K_{BE} و K_{LE} مطابق شکل ۵ است. تحلیل تراوش، حاکی از این موضوع است که در حالت به کارگیری ضریب نفوذپذیری ثابت و K_{WE} ، بخش قابل توجهی

از جریان عبوری از قسمت بالای سطح فریاتیک است در حالی که در حالت به کارگیری توابع نفوذپذیری K_{LE} ، K_{BE} و داده‌های واقعی، جریان ناچیزی از بالای سطح فریاتیک عبور می‌کند که به دلیل غیراشباع بودن مصالح بالای سطح فریاتیک، نتیجه حاصل منطقی است. این شرایط باعث می‌شود که جریان عبوری متمرکز بر قسمت اشباع و زیر سطح ایستابی بوده و در نتیجه ضخامت آن کاهش یابد و دبی محاسبه شده در این شرایط نسبت به حالت استفاده از هدایت هیدرولیکی ثابت، طبق جدول ۵ کمتر باشد.



شکل ۵- تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت به کارگیری انواع توابع نفوذپذیری

جدول ۵- مقدار جریان عبوری از بدنه سد همگن در حالت تراوش دائم به همراه مقدار جریان عبوری از بخش غیراشباع و اشباع (بالا و زیر خط فریاتیکی)

هدایت هیدرولیکی	جریان اشباع (مترمکعب در روز)	جریان غیراشباع (مترمکعب در روز)	جریان کل (مترمکعب در روز)	درصد جریان اشباع	درصد جریان غیراشباع
K_{BE}	۰/۱۳۷	۰/۰۰۵	۰/۱۴۲	۹۶/۴۷	۳/۵۳
K_{UNSODA}	۰/۱۳۷	۰/۰۰۹	۰/۱۴۶	۹۳/۸۳	۶/۱۷
K_{LE}	۰/۱۳۷	۰/۰۰۶	۰/۱۴۳	۹۵/۸۰	۴/۲
K_{WE}	۰/۱۲۵	۰/۰۳۴	۰/۱۵۹	۷۸/۶۱	۲۱/۳۹
K_{sat}	۰/۱۲۲	۰/۰۳۷	۰/۱۵۹	۷۶/۷۳	۲۳/۲۷

پایین دست را در طول بیشتری قطع می‌کند.

تحلیل پایداری شیب پایین دست سد خاکی همگن در حالت تراوش دائم

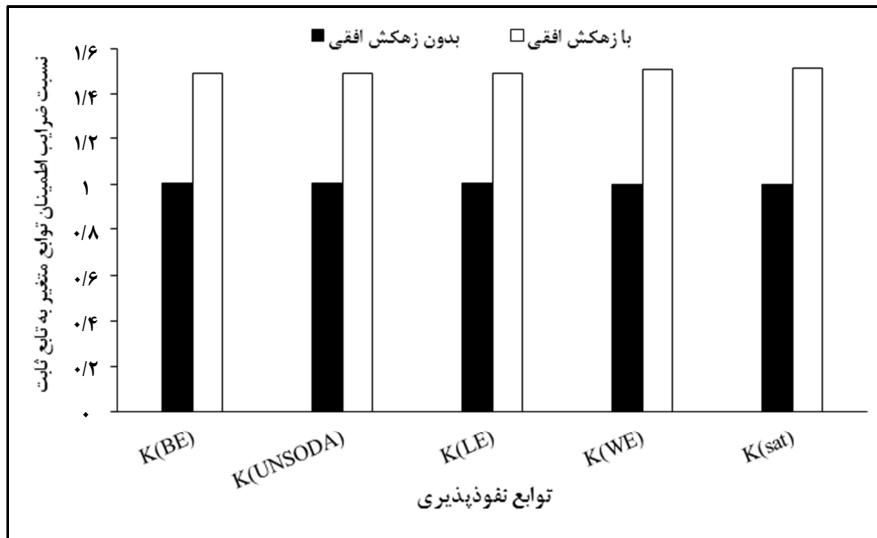
نسبت ضرایب اطمینان پایداری حالت تراوش دائم سد همگن با لحاظ کردن پنج نوع نفوذپذیری مذکور در جدول ۶ ارائه شده است. طبق تحلیل‌های پایداری، ضرایب اطمینان حاصل در نفوذپذیری‌های متفاوت، در صورت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی اختلاف معنی‌داری با یکدیگر ندارند. طبق انتظار، اعمال زهکش افقی باعث افزایش ضرایب اطمینان شیب پایین دست شده است که برای مقایسه بهتر با حالت بدون زهکش، نمودار ستونی مطابق شکل ۶ رسم شده است.

منحنی فریاتیکی و همین‌طور جریان عبوری از منطقه غیراشباع در حالت به‌کارگیری ضریب نفوذپذیری ثابت و متغیر از نوع K_{WE} مانند هم عمل می‌کنند و می‌توان این‌گونه تفسیر کرد که تعیین تابع نفوذپذیری درحالتی که کمترین تطبیق را با داده‌های واقعی و بیشترین نزدیکی را با تابع ثابت دارد، تأثیرگذار نخواهد بود و همانند نفوذپذیری ثابت رفتار می‌کند. از طرف دیگر، سه تابع K_{LE} ، K_{BW} و K_{UNSODA} نیز از نظر تأثیر بر شکل منحنی فریاتیکی، در حالت تراوش پایدار، مانند یکدیگر هستند.

در حالت به‌کارگیری ضریب نفوذپذیری ثابت و K_{WE} ، شیب منحنی و طول سطح تراوش کمتری نسبت به شرایط توابع نفوذپذیری K_{LE} ، K_{BW} و K_{UNSODA} به‌دست می‌آید و شیب

جدول ۶- ضرایب اطمینان شیب پایین دست سد خاکی همگن در تحلیل استاتیکی حالت تراوش دائم

هدایت هیدرولیکی	نسبت ضرایب اطمینان توابع متغیر به تابع ثابت در حالت اعمال زهکش	نسبت ضرایب اطمینان توابع متغیر به تابع ثابت در حالت بدون زهکش
K_{BE}	۱/۰۰۳	۱/۴۹
K_{UNSODA}	۱/۰۰۳	۱/۴۹
K_{LE}	۱/۰۰۳	۱/۴۹
K_{WE}	۱	۱/۵۰۸
K_{sat}	۱	۱/۵۱



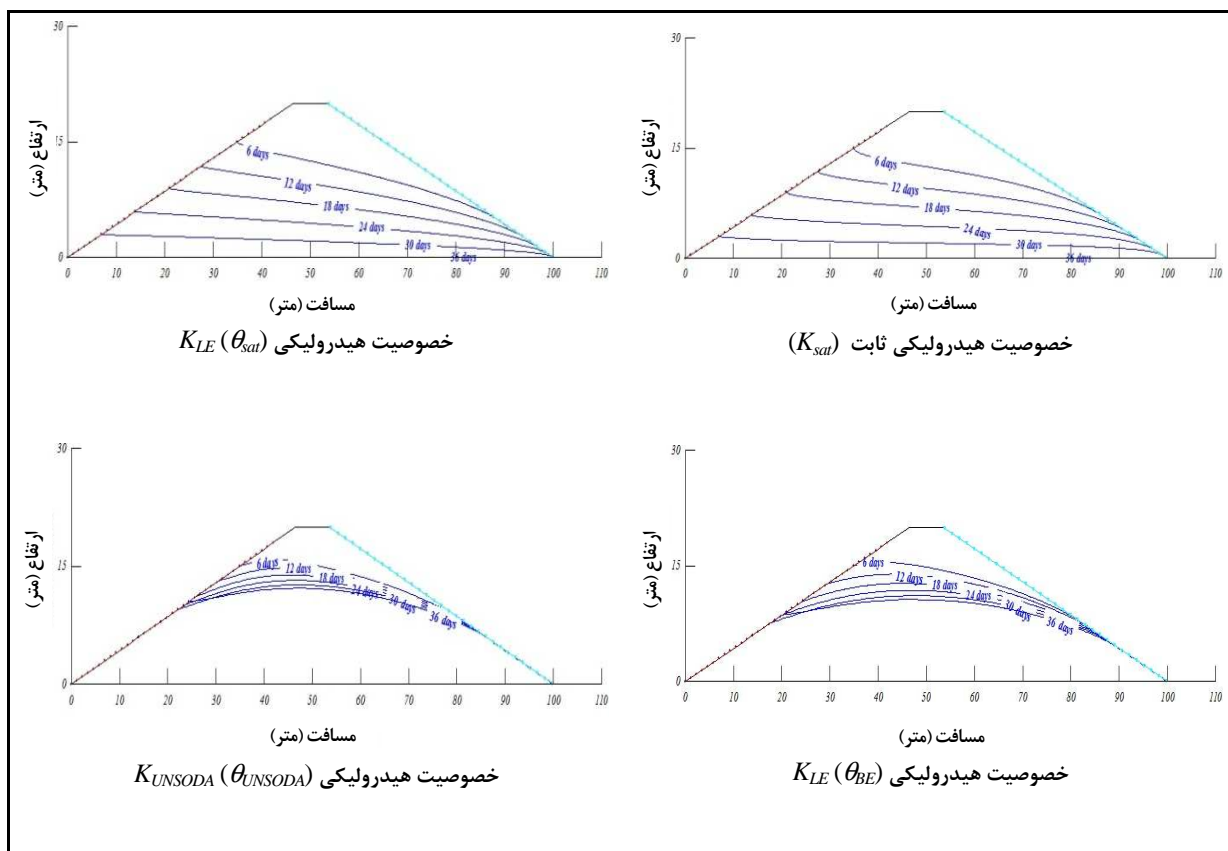
شکل ۶- مقایسه نسبت ضرایب اطمینان در دو حالت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی

کاملاً تابع منحنی رطوبتی مصالح و شدت تخلیه است. با در نظر گرفتن شدت تخلیه ثابت و منحنی رطوبتی‌های متفاوت، مشاهده شد که با افزایش مقدار رطوبت ذخیره شده در ناحیه غیراشباع خاک و به عبارت دیگر مرطوب شدن آن، سرعت افت آب در بدنه افزایش می‌یابد. سولیواوونگ و همکاران (Souliyavong *et al.*, 2012) و لویز آکوستا و همکاران (Lopez-Acosta *et al.*, 2013) علاوه بر شدت تخلیه، تنها به بررسی تأثیر نفوذپذیری اشباع خاک در سرعت افت آب پرداختند. به طوری که با افزایش آن، سرعت افت آب در بدنه افزایش یافت.

وضعیت تخلیه سریع مخزن

تحلیل تراوش سد خاکی همگن در حالت تخلیه سریع مخزن بدون در نظر گرفتن زهکش افقی

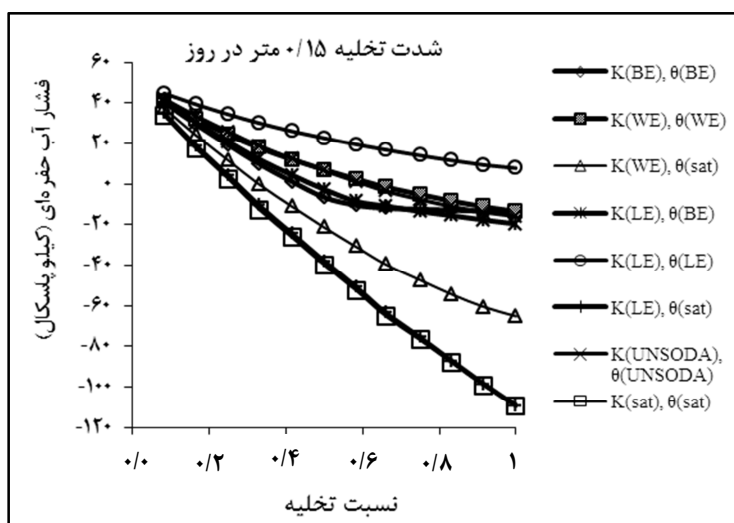
تحلیل تراوش سد خاکی همگن با اعمال چهار شدت تخلیه مذکور و هشت حالت خصوصیات هیدرولیکی در نظر گرفته شده $K_{LE}(\theta_{LE})$, $K_{LE}(\theta_{BE})$, $K_{LE}(\theta_{sat})$, $K_{sat}(\theta_{sat})$, $K_{WE}(\theta_{WE})$ و $K_{UNSODA}(\theta_{UNSODA})$ در حالت بدون زهکش افقی در پنجه انجام گردید. برخی از نتایج تحلیل‌های تراوش در شکل ۷ نشان داده شده است. با بررسی نتایج حاصل، مشاهده شد که خط آزاد جریان،



شکل ۷- تحلیل تراوش سد خاکی همگن با اعمال خصوصیات هیدرولیکی متفاوت و با شدت تخلیه ۰/۵ متر در روز

کاهش دهد و نیروهای گرادیان تراوش موجب جابه‌جایی ذرات شوند. بنا بر توضیحات فوق، در شدت تخلیه و گام زمانی مشخص، آهنگ پایین افتادن سطح فریاتیك و یا به عبارت دیگر سرعت زهکشی برای حالاتی که دارای منحنی مشخصه ثابت و یا اشباع (θ_{sat}) است، سریع‌تر خواهد بود یعنی زودتر تخلیه می‌شود. از طرف دیگر، سطح فریاتیك مربوط به مصالح خشک‌تر، در بالاترین موقعیت قرار دارد و بدین معنی است که دیرتر تخلیه می‌شود.

در شکل ۸ تغییرات فشار آب منفذی در نقطه‌ای معین واقع در شیب بالادست، نسبت به حالات مختلف اعمال توابع رطوبتی و هدایت هیدرولیکی تحت سرعت یکسان در وضعیت پایین افتادن سطح آب، نشان داده شده است. با افزایش رطوبت حالات اعمالی، فشار آب منفذی زودتر پخش و زایل می‌شود که نتیجه آن افزایش سرعت زهکشی بدنه در این شرایط است. طبق نظر چوآگور و همکاران (Chu-Agor *et al.*, 2008) افزایش فشار آب منفذی ممکن است مقاومت برشی خاک را



شکل ۸- فشار آب منفذی یک نقطه از شیب بالادست در شدت تخلیه ۰/۱۵ متر در روز

مطابق شکل ۹، در همه تحلیل‌ها، ضریب اطمینان ابتدا با افزایش نسبت تخلیه، کاهش و بعد از اینکه به کمترین مقدار خود رسید با بیشتر شدن نسبت تخلیه، افزایش می‌یابد. با افت سطح آزاد آب مخزن، اثر متعادل کننده فشار آب بیرونی در مقابل فشار منفذی از بین می‌رود و شیب بالادست نمی‌تواند پایداری خود را در مقابل فشار هیدرودینامیک ناشی از تخلیه سریع حفظ کند. روند کاهش-افزایشی فوق در مطالعات مرادی و همکاران (Moradi *et al.*, 2011) نیز به‌دست آمده است. روند نمودارهای ارائه شده توسط مورگنسترن (Morgenstern, 1963)، برای تعیین ضرایب اطمینان شیب‌هایی که در معرض افت ناگهانی سطح آب قرار دارند به‌صورت پیوسته کاهش است که علت آن عدم پخش فشار آب منفذی در حین تخلیه است. همچنین براساس نتایج تحقیقات پارونوزی و همکاران (Paronuzzi *et al.*, 2013) با در نظر گرفتن نفوذپذیری بسیار پایین و شدت تخلیه بالا، ضرایب اطمینان شیب بالادست در روند تخلیه کاهش می‌یابد.

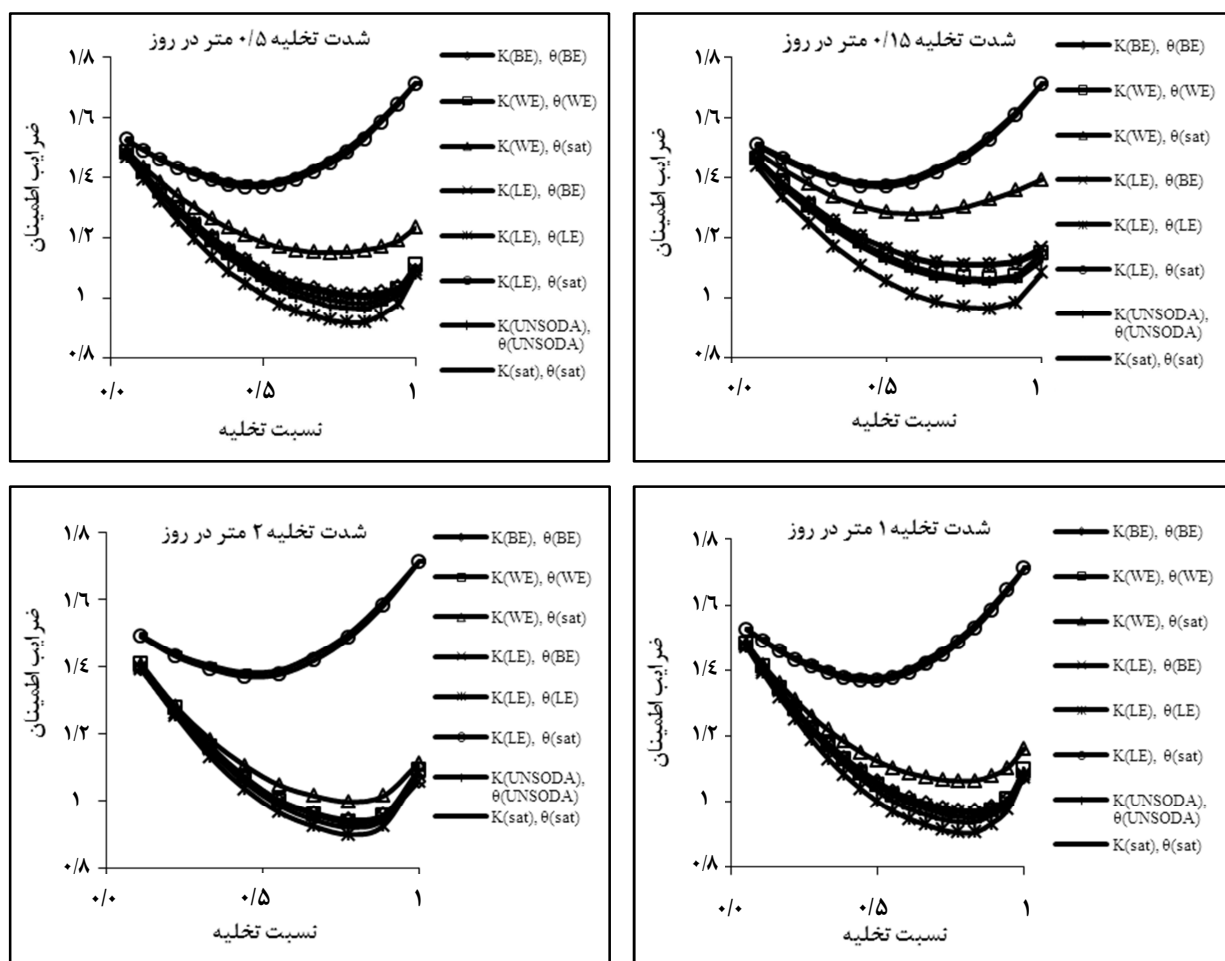
تحلیل پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن در حالت تخلیه سریع مخزن

تحلیل پایداری سد خاکی همگن با اعمال هشت حالت خصوصیات هیدرولیکی و چهار سرعت تخلیه ۰/۱۵، ۰/۵، ۱ و ۲ متر در روز انجام گردید که بر این اساس به ترتیب مخزن طی مدت ۱۲۰، ۳۶، ۱۸ و ۹ روز تخلیه شده است. تعداد نسبت‌های تخلیه در نظر گرفته شده برای شدت‌های فوق، جهت نشان دادن بهتر روندها به ترتیب ۱۲، ۱۸، ۱۸ و ۹ مقدار است.

نتایج تحلیل استاتیکی شیب بالادست در مقادیر تخلیه متفاوت مخزن، به دو صورت کلی نشان داده شده است، یکی شدت تخلیه ثابت و خصوصیات هیدرولیکی متغیر و دیگری شدت تخلیه متغیر و خصوصیات هیدرولیکی ثابت.

الف) شدت تخلیه ثابت و خصوصیات هیدرولیکی متغیر

نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیب بالادست در شرایط شدت تخلیه ثابت و خصوصیات هیدرولیکی متغیر مطابق شکل ۹ ارائه شده است.



شکل ۹- ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل نسبت تخلیه با اعمال شدت تخلیه و خصوصیات هیدرولیکی متفاوت

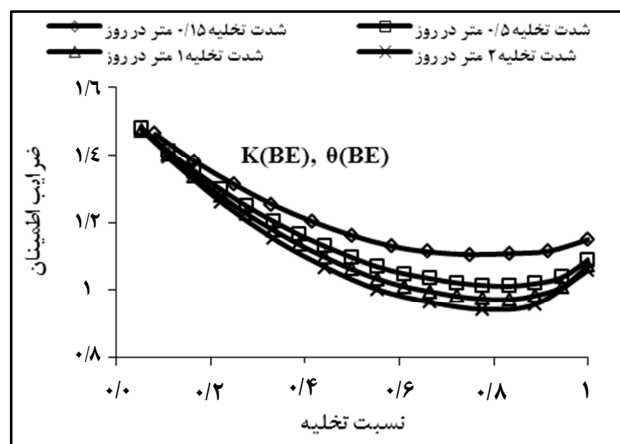
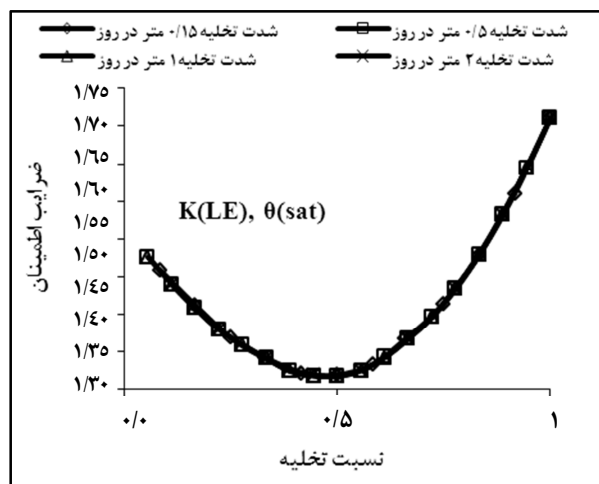
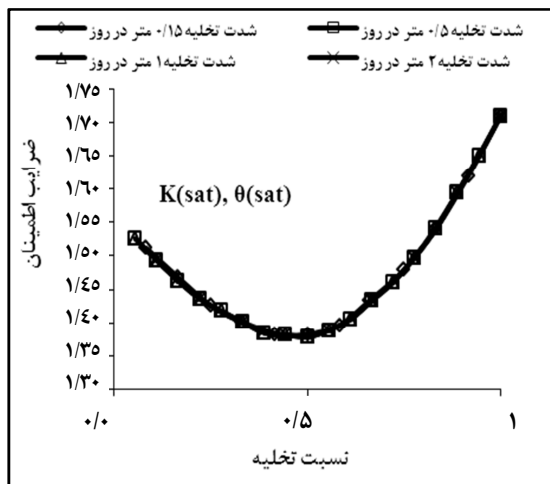
به عبارت دیگر، با احتساب حالات مرطوب‌تر، شرایط بحرانی تقریباً در وضعیت نیمه‌پر اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر، با کاهش رطوبت ناحیه غیراشباع و کمتر شدن قابلیت زهکشی خاک، قوس نمودارها که نشانگر ضرایب اطمینان حالت بحرانی است به سمت راست و تخلیه کامل مخزن حرکت می‌کند. به عبارت دیگر، با خشک‌تر شدن مصالح، روند کاهش-افزایشی به روند کاهش‌ی نزدیک می‌شود. طبق نتایج بررسی‌های لوپز آکوستا و همکاران (Lopez-Acosta *et al.*, 2013) روند کاهش ضرایب اطمینان مختص شرایطی است که مصالح زهکشی نمی‌شوند و منحنی فریاتیک در سطح اولیه خودش باقی می‌ماند که این شرایط را می‌توان در خاک‌هایی با نفوذپذیری بسیار پایین و شدت تخلیه زیاد مشاهده کرد.

همان‌طور که از نتایج تحلیل‌ها مشخص است، تعیین خصوصیات هیدرولیکی بخش غیراشباع، تأثیر مهمی در ضرایب اطمینان شیب بالادست در هنگام افت سریع مخزن دارد.

با توجه به نمودارهای فوق، با کاهش رطوبت ذخیره شده در ناحیه غیراشباع، و به عبارت دیگر خشک‌تر در نظر گرفتن مصالح بدنه، ضریب اطمینان شیب بالادست کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که با به‌کارگیری توابع نفوذپذیری $K_{BE}(\theta_{BE})$ ، $K_{LE}(\theta_{LE})$ و $K_{WE}(\theta_{WE})$ ، $K_{UNSODA}(\theta_{UNSODA})$ ، کمترین ضریب اطمینان و حالت بحرانی در نزدیکی تخلیه کامل اتفاق می‌افتد و هنگام استفاده از توابع نفوذپذیری $K_{LE}(\theta_{sat})$ و $K_{sat}(\theta_{sat})$ ، شیب بالادست زودتر از توابع فوق به حالت بحرانی می‌رسد.

در نتیجه در این وضعیت، تأثیر تعیین رطوبت ثابت (اشباع) در بخش غیراشباع در پایداری شیب بالادست سد خاکی همگن بیشتر از تأثیر شدت تخلیه است. از طرف دیگر، با به کارگیری منحنی رطوبتی در بخش غیراشباع، با افزایش شدت تخلیه مخزن، ضریب اطمینان کاهش می‌یابد. مطالعات سولیوونگ و همکاران (Souliyavong *et al.*, 2012) و نیان و همکاران (Nian *et al.*, 2011) نیز بیانگر این نتیجه بوده است.

ب) شدت تخلیه متغیر و خصوصیات هیدرولیکی ثابت
 نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیب بالادست در شرایط شدت تخلیه متغیر و خصوصیات هیدرولیکی ثابت مطابق شکل ۱۰ ارائه شده است.
 مطابق شکل ۱۰، اعمال شدت‌های تخلیه متفاوت تأثیری بر ضرایب اطمینان مصالح با رطوبت ثابت (اشباع) در ناحیه غیراشباع ندارد. به عبارت دیگر، ضرایب اطمینان شیب بالادست در این حالت ثابت می‌ماند و تغییر نمی‌کند.



شکل ۱۰- ضرایب اطمینان تحلیل استاتیکی در مقابل نسبت تخلیه با اعمال چهار نوع شدت تخلیه متفاوت

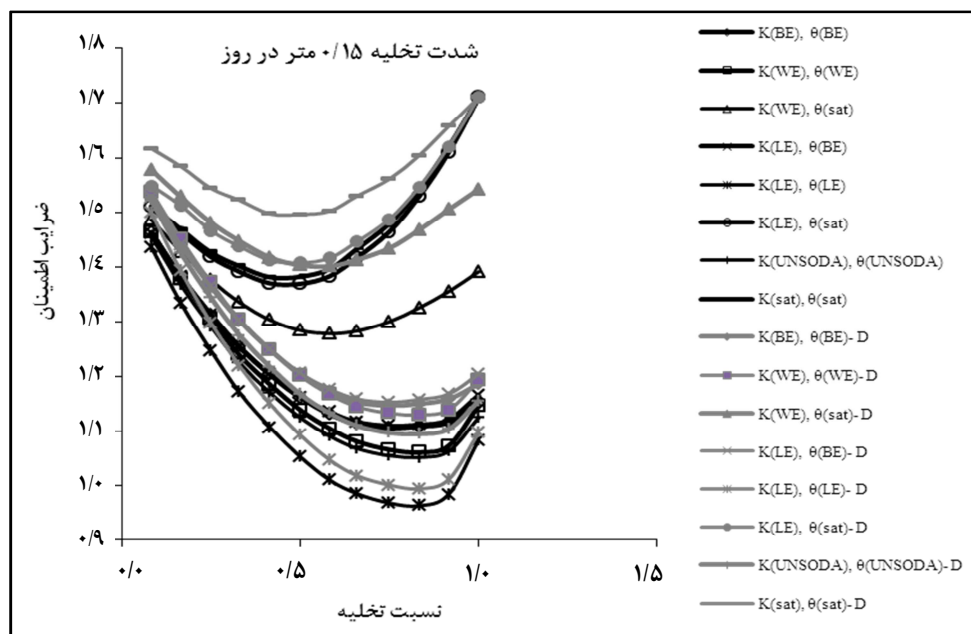
زهکش افقی است که توابع با پسوند (D)، به معنای نتایج تحلیل‌ها در صورت اعمال زهکش هستند. تمامی نتایج و نکات اشاره شده در حالت اعمال

شکل ۱۱، مقایسه‌ای از روند ضرایب اطمینان شیب بالادست در سرعت تخلیه ۰/۱۵ متر بر روز در وضعیت تخلیه سریع مخزن، در دو حالت اعمال و عدم اعمال

بررسی تأثیر ویژگی‌های هیدرودینامیکی غیراشباع بر میزان...

زهکش افقی، مانند آنچه در دو بخش شدت تخلیه ثابت و نفوذپذیری متغیر و نیز شدت تخلیه متغیر و نفوذپذیری ثابت اشاره شد در این حالت نیز صادق است و مطابق انتظار، ضرایب اطمینان در صورت اعمال زهکش افقی، بیشتر از حالت عدم اعمال زهکش است. میزان تفاوت حاصل در بین ضرایب اطمینان دو حالت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی در دو تابع

ضرایب اطمینان در حالت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی در دو تابع



شکل ۱۱- مقایسه ضرایب اطمینان شیب بالادست در وضعیت تخلیه سریع در دو حالت اعمال و عدم اعمال زهکش افقی

و منحنی مشخصه رطوبتی در نظر گرفته شود، در وضعیت شدت تخلیه ثابت و خصوصیات هیدرولیکی متغیر، پارامتر غالب در تغییرات سرعت زهکشی، فشار آب حفره‌ای، ضرایب اطمینان و روند آنها، منحنی مشخصه رطوبتی است. - با به کارگیری رطوبت ثابت (اشباع)، حالت بحرانی رویه بالادست در شرایط مخزن نیمه پر و در شرایط تخلیه $\frac{1}{2}$ تراز آب مخزن اتفاق می‌افتد. با کاهش رطوبت ناحیه غیراشباع و کمتر شدن قابلیت زهکشی خاک، ضرایب اطمینان حالت

نتیجه‌گیری
براساس مجموعه نتایج حاصل از بررسی‌ها در این پژوهش، موارد زیر قابل استنتاج است:
- به دلیل نبود اختلاف معنی‌دار در ضرایب اطمینان حاصل، اعمال ضریب نفوذپذیری ثابت یا متغیر تأثیری بر پایداری شیب پایین دست سد خاکی همگن ندارد و می‌توان برای سهولت کار از تابع ثابت (K_{sat}) در تحلیل‌ها استفاده کرد.
- اگر اهم خصوصیات هیدرولیکی مصالح، هدایت هیدرولیکی

بحرانی در نزدیکی تخلیه کامل بروز می کند و به طور کمی در شرایطی است که $\frac{2}{3}$ تراز آب مخزن تخلیه شده باشد.

- استفاده از مصالحی با منحنی رطوبتی متغیر (غیراشباع)، پایداری شیب بالادست را در روند تخلیه مخزن تأمین نمی کند، در صورتی که با در نظر گرفتن مصالحی با رطوبت ثابت (اشباع)، در ضمن تخلیه سریع مخزن، شیب بالادست پایدار خواهد بود که این موضوع ضرورت تعیین منحنی رطوبتی بخش غیراشباع را مشخص می کند.

- حداقل مقدار ضریب اطمینان پایداری در شیب بالادست

سدخاکی همگن در وضعیت تخلیه سریع مخزن در صورت به کارگیری منحنی رطوبتی با حداکثر شدت تخلیه اتفاق می افتد که به عنوان عاملی محدودکننده است. به طوری که باید با لحاظ کردن این وضعیت، توجه بیشتری به کنترل پایداری شود.

- به طور کلی در بررسی پایداری شیب تحت اثر تخلیه سریع، در نظر گرفتن تخلیه کامل به عنوان یک حالت بحرانی، فرض درستی نیست. در نتیجه به دست آوردن بحرانی ترین حالت، نیازمند تحلیل در سرعت های تخلیه متفاوت است.

مراجع

- Alinezhad, H. and Zomorodian, S. M. A. 2010. Optimal horizontal and oblique drainage in homogeneous earth dam. Proceedings of the 5th National Congress on Civil Engineering. May. 4-6. Mashhad. Iran. (in Farsi)
- Anon. 1996. The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database. User Manual. Vol. 1. National Service Center for Environmental Publications (NSCEP). United State Environmental Protection Agency. Washington D. C.
- Anon. 1980. Earth Manual. 2nd Ed. United States Bureau of Reclamation (USBR). Department of Interior, Washington D. C.
- Anon. 1987. Design of Small Dams. United States Bureau of Reclamation (USBR). Department of Interior, Col., USA.
- Berilgen, M. M. 2007. Investigation of stability of slope under drawdown condition. Computers and Geotechnics, 81-91.
- Childs, E. C. and Collis-George, N. 1950. The permeability of porous materials. Proc. Royal Society. London. 201(1066): 392-405.
- Chu-Agor, M., Fox, G. A., Cancienne, R. M. and Wilson, G. V. 2008. Seepage caused tension failures and erosion undercutting of hillslopes. J. Hydrol. 359, 247-259.
- 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.
- Krahn, J. 2004. Seepage Modeling with seep/w. Geo-Slope International LTD. Calgary, Alberta, Canada.
- Lopez-Acosta, N. P., Fuente de la, H. A. and Auvinet, G. 2013. Safety of a protection levee under rapid drawdown conditions. Coupled analysis of transient seepage and stability. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. September 2-6. Paris. 3305-3308.

- Mahdavi, E., Ghorbanbeygi, S. and Sadatibaladehi, S. H. 2010. Evaluation of methods for determining the safety factors of slope stability in slope/w software. Proceedings of the 3rd National Congress on Urban Management and Construction Stability. May. 20. Arak. Iran. (in Farsi)
- Montaseri, M., Deiminiat, A. and Ghezelsoloo, A. A. 2010. Optimization of Clay Core Dimensions in Earth Dams Using Genetic Algorithm. Water. Soil Science (Agric. Sci.). 20(3): 73-86. (in Farsi)
- Moradi, G. H., Azadi, A. and Hoseinzadeh, Y. 2011. Investigation effective parameters on upstream slope stability of earth dam subjected to rapid drawdown. Proceedings of the 6th National Congress on Civil Engineering. Apr. 26-27.
- Morgenstern, N. 1963. Stability charts for earth slopes during rapid drawdown. Geotechnique. 13, 121-131.
- Nian, T., Jiang, J., Wan, Sh. and Luan, M. 2011. Strength reduction FE analysis of the stability of bank slopes subjected to transient unsaturated seepage. Electronic J. Geotech. Eng. 16, 165-177.
- Paronuzzi, P., Rigo, E. and Bolla, A. 2013. Influence of filling-drawdown cycles of the Vajont reservoir on Mt. Toc slope stability. Geomorphology. 191, 75-93.
- Souliyavong, T., Gallage, C., Egodawatta, P. and Maher, B. 2012. Factors affecting the stability analysis of earth dam slopes subjected to reservoir drawdown. Proceedings of the 2nd International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment. Nov. 14-16. Kuala Lumpur. Malaysia.
- Vafaeiyan, M. 2006. Excute Information of Earth Dam. 2nd ED. Semnan. Iran. (in Farsi)
- 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.

Dynamic Properties of Seepage and Stability on Upstream Slope of an Unsaturated Homogeneous Earth Dam Subjected to Rapid Drawdown

S. Behrouzinia, H. Ahmadi and N. Abbasi*

* Corresponding author: Associate Professor, Agricultural Engineering Research Institute, P. O. Box: 31585-845, Karaj, Iran. Email: nader_jaeri@yahoo.com

Received: 9 August 2014, Accepted: 7 February 2015

Analysis of seepage from an earth dam helps determine water loss and is very important for analysis of the stability of these structures. The present study examined the effect of material hydraulic properties and drawdown rate and ratio on the position and form of the phreatic line, pore water pressure and the stability of the shoulder of a homogeneous earth dam. For this purpose, the materials used in the homogeneous earth dam were selected from the unsaturated soil hydraulic database. Seepage and stability analysis were performed using the Geostudio sub-programs of seep/w and slope/w (based on the finite element and limit equilibrium methods, respectively). Seepage and stability analysis were performed in steady and transient states by applying four different drawdown rates. The results showed that the lack of significant differences in safety factors means that application of constant or function conductivity does not affect downstream slope stability of a homogeneous earth dam and the phreatic line was independent of conductivity. Results from the numerical model shows the noticeable impact of the soil water characteristic curve and slope (m_w) on the rate of drainage and subsequent pore water pressure and shear strength. The safety factors and critical states changed as the degree of saturation decreased or increased. With rapid drawdown of the reservoir at constant volumetric water content, the state of the upstream shoulder became critical when the drawdown ratio (L/H) reached about 0.5. As the water content of the unsaturated zone and the capacity of drainage decreased, stability reached the minimum FOS at a reservoir water level of about 2/3 of the total drawdown height.

Keywords: Earth Dam, Rapid Drawdown, Seepage, Slope Stability, Soil Water Characteristic Curve