نشریه علمی پژوهشی سد و نیروگاه برق آبی
سال سوم / شماره هشتم / بهار ۱۳۹۵

Journal of Dam and Hydroelectric PowerPlant
3rd Year / No. 8 / June 2016

ارزیابی تأثیر درجه اشباع خاک و استفاده از آنالیز ناماندگار در هنگام افت سریع مخزن بر دبی تراوش و ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی (مطالعه موردی: سد خاکی گولک)

مهدی کماسی*[۱]
محمدرضا گودرزی[۲]
حجت الله یاری زاده[۳]

چکیده

فرض اشباع کامل خاک در آنالیزهای تراوش و لحاظ نکردن بعد زمان در آنالیزهای پایداری سدهای خاکی در طول زمان افت سریع مخزن باعث ایجاد خطا در نتایج این آنالیزها می‌شوند. در این پژوهش سد خاکی گولک در سه حالت اشباع، نیمه اشباع با توابع خطی و غیرخطی نفوذپذیری، مدل‌سازی شده و نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که درصورتی‌که بدنه سد با فرض اشباع کامل مدل‌سازی شود علاوه بر تحت تأثیر قرار دادن نتایج آنالیز تراوش، این فرض باعث ایجاد خطای ۲۵ درصدی بر ضریب اطمینان سد خواهد شد. در ادامه این نتیجه حاصل شد که با استفاده از توابع غیرخطی برای نفوذپذیری و رطوبت حجمی و انتخاب پارامترهای لازم برای معادله ون ژنشتین از نتایج آزمایشگاهی می‌توان دقت نتایج آنالیزها را تا حدود ۱۳ درصد نسبت به استفاده از توابع خطی افزایش داد. در انجام آنالیز پایداری در هنگام افت سریع مخزن نیز با انجام آنالیزی ناماندگار، افت مخزن به‌صورت فرآیندی وابسته به زمان مدل‌سازی شد که نتایج به‌دست‌آمده در این حالت نیز نشان‌دهنده آن است که در صورت لحاظ نکردن زمان در آنالیز افت سریع مخزن خطای ایجادشده در ضریب اطمینان حدود ۴/۸ درصد است که این خطا با کاهش سرعت افت تا ۱۳ درصد افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

پایداری سد خاکی، افت سریع مخزن، آنالیز ناماندگار، نفوذپذیری غیرخطی و درجه اشباع.

۱*. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی(ره)، komasi@abru.ac.ir.
۲. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی(ره).
۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی(ره).

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۳/۰۸

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

مقدمه

احداث سد اعم از کوچک یا بزرگ و اعم از بتنی یا خاکی باید با اطمینان بسیار زیادی طراحی و اجرا گردد زیرا هزینه‌های اضافی که برای آنالیز و اجرای صحیح و دقت در کار صرف می‌شود درصد زیادی را شامل نمی‌شود درصورتی‌که وقوع حادثه و شکست سد، نه‌تنها سرمایه مالی آن را از بین می‌برد بلکه تلفات جانی زیادی را در بر دارد که قابل جبران نخواهد بود.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از دلایل شکست سدهای خاکی، شکست ناشی از زهاب به همراه شکست سازه‌ای بیش از ۵۰ درصد علل خرابی سدها را شامل می‌شوند (وفاییان، ۱۳۹۱). سد بله فورهه[1] در اس داک[2]، سد براش هالو[3] در کلمبیا و سد هومل کریک[4] در ایالت یوتا[5] ازجمله سدهایی هستند که در اثر بی‌دقتی در انجام آنالیز در طول مدت بهره‌برداری گسیخته شده‌اند (راوو[6]، ۱۹۹۱) و این موضوع اهمیت دقت در آنالیزهای مربوط به سدهای خاکی را نشان می‌دهد.

بیلستین[7] در سال ۱۹۹۹ از مدل آزمایشگاهی برای تخمین دبی، فشار آب حفره‌ای و خط فریاتیک استفاده کرد که امروزه این مدل‌های آزمایشگاهی به دلیل صرف وقت و هزینه زیاد، خیلی مورداستفاده قرار نمی‌گیرند. پس از مقایسه مدل‌های آزمایشگاهی با مدل‌های عددی، محققین دریافتند که نتایج حاصل از مدل‌های عددی تقریباً مشابه نتایج مدل‌های آزمایشگاهی است (کران[8]، ۲۰۰۴).

کراتوچویل[9] در سال ۲۰۰۴ به بررسی تراوش در سدهای خاکی در صورت تغییر سطح مخزن و بدون استفاده از آنالیز ناماندگار و با فرض ثابت بودن خط فریاتیک درون سد پرداخت و به این نتیجه رسید که ازجمله عوامل ناپایداری سدهای خاکی نیروهای تراوش در زمان وقوع سیلاب است. وی همچنین نشان داد که توزیع تنش‌های گرمایی نیز مانند نیروهای تراوش بر نتایج آنالیز سدهای خاکی مؤثراست (کراتوچویل،۲۰۰۴). آلجیری[10] در سال ۲۰۱۰ به بررسی رفتار سد خاکی در حالت اشباع و به‌صورت مدل دوبعدی به کمک نرم‌افزار انسیس[11] پرداخت و به این نتیجه رسید که تراوش پایین‌دست سد وابسته به تغییرات لایه‌های نفوذناپذیر در بالادست سد است و تغییر در پارامترهای نفوذپذیری در لایه‌های بالادست موقعیت نسبی خط فریاتیک در پایین‌دست سد را تحت تأثیر قرار می‌دهد (آلجیری، ۲۰۱۰). نورانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی تراوش در سد خاکی ستارخان به روش (MRTA[12]) پرداخت و با مقایسه نتایج حاصل با مشاهدات واقعی و مدل‌سازی به روش تفاضل محدود این نتیجه حاصل شد که این روش دارای نتایج قابل قبولی به‌ویژه برای حالت افت مخزن است (نورانی[13] و همکاران، ۲۰۱۴). کانچانا و پراسانا[14] (۲۰۱۵) به بررسی استفاده از مصالح ترکیبی در هسته سدهای خاکی و رفتار خط فریاتیک در پایین‌دست سد در اثر تغییر طول مؤثر زهکش افقی پرداختند و نتایج نشان داد که مصالح با نفوذناپذیری ذاتی شرایط اطمینان را فقط برای هسته ایجاد می‌کنند.

یک فرض کلی در اکثر روش‌های پایداری این است که در امتداد سطح لغزش فشار آب منفذی مثبت یا صفر است (بیشاپ[15] (۱۹۵۴)، مورگنسترن پرایس[16] (۱۹۶۵) و دانکن[17] (۱۹۹۶)). در واقعیت در طول زمان افت مخزن درجه اشباع در بدنه سد و در امتداد سطح لغزش به‌شدت متغیر است و حتی فشار منفذی می‌تواند منفی شود (گوت[18] و همکاران (۲۰۱۲)، بورجا و وایت[19] (۲۰۱۰)، بوسکارانرا و وایت[20] (۲۰۱۲)). لذا این فرض منجر به قضاوت نادرست در مورد تنش‌های مؤثر و مقاومت برشی خاک می‌شود و درنهایت ضریب اطمینان به‌درستی محاسبه نمی‌شود.

ازجمله فرض‌های ساده کننده در تحلیل سدهای خاکی می‌توان به فرض اشباع کامل خاک در آنالیزهای تراوش و همچنین لحاظ نکردن بعد زمان در آنالیزهای پایداری سد در طول فرآیند افت سریع مخزن اشاره نمود که این دو فرض ساده کننده نتایج تحلیل را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این

[1] Belle fourehe
[2] S. Dak
[3] Brush Hollow
[4] Homle Creek
[5] Youta
[6] Rowe
[7] Billestein
[8] Krahn
[9] Kratochvil
[10] Aljairry
[11] Ansys
[12] Multiple Reservoirs and Tubes Analog
[13] Nourani
[14] Kanchana & Prasanna
[15] Bishop
[16] Morgenstern-Price
[17] Dancan
[18] Godt
[19] Borja & White
[20] Buscarnera & Whittle

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

پژوهش به بررسی خطاهای ایجادشده در اثر این فرضیات پرداخته می‌شود.

انجام آنالیز با فرض اشباع کامل خاک، کمی دور از واقعیت است چراکه در بخش‌های نیمه اشباع خاک حفرات هوایی وجود دارند که نفوذپذیری خاک را کاهش می‌دهند. از طرفی فرض رابطه خطی بین نفوذپذیری و فشار مکش که در بعضی مواقع در تحلیل سدهای خاکی صورت گرفته نیز چندان به واقعیت نزدیک نیست چراکه این رابطه یک رابطه غیرخطی است و درنتیجه نتایج آنالیزهای پایداری که در مرحله بعد صورت می‌گیرد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش با مدل‌سازی سد خاکی گولک در سه حالت اشباع، نیمه اشباع با تابع خطی نفوذپذیری و نیمه اشباع با تابع غیرخطی برای نفوذپذیری به تحلیل سد پرداخته شده و نتایج و اختلافات این مدل‌ها بیان می‌شود. در قسمت تعیین تابع غیرخطی برای نفوذپذیری به کمک نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات پارامترهای موردنظر استخراج شده‌اند.

در انجام آنالیز پایداری در هنگام افت سریع مخزن نیز به‌منظور جلوگیری از وارد شدن شوک به مدل، با انجام آنالیز ناماندگار، افت مخزن به‌صورت فرآیندی وابسته به زمان مدل‌سازی می‌شود؛ زیرا لحاظ نکردن بعد زمان در آنالیز پایداری افت سریع مخزن فرضی ساده کننده است ولی در واقعیت افت مخزن فرآیندی است که در طول زمان رخ می‌دهد. در ادامه بررسی می‌شود که با انجام آنالیز ناماندگار دقت آنالیز پایداری چقدر افزایش می‌یابد. قابل ذکر است که در این پژوهش از زیر برنامه‌های Seep/w و Slope/w در بسته نرم‌افزاری Geo stutio 2007، استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

در این بخش به‌منظور درک مناسب از چگونگی تراوش آب در خاک اشباع و غیراشباع به بررسی تئوری تراوش در این محیط‌ها پرداخته می‌شود. در خاک‌های غیراشباع، پدیده تراوش اندکی پیچیده‌تر است که نیازمند درک درستی از رفتار آب‌وخاک است. این قسمت به ما کمک می‌کند که در تحلیل مسائل مربوط به تراوش به کمک نرم‌افزار پارامترهای مناسب انتخاب شود.

نفوذپذیری و نشت

هر توده خاکی از دانه‌های جامد با اندازه‌های مختلف و فضاهای خالی به‌هم‌پیوسته تشکیل شده است. فضاهای خالی به‌هم‌پیوسته در خاک این اجازه را می‌دهند که آب از یک نقطه با انرژی بیشتر به سمت نقطه دیگر با انرژی کمتر حرکت کند. خاصیتی از خاک که اجازه نشت مایعات از بین فضاهای خالی به‌هم‌پیوسته را می‌دهد، خاصیت نفوذپذیری نامیده می‌شود (قاسم‌زاده، ۱۳۸۹).

معادله دیفرانسیل تراوش ناماندگار

معادله دیفرانسیل برای تراوش در یک محیط غیر همگن و در شرایط نیمه اشباع به کمک قانون بقای جرم حاصل می‌شود. با فرض ثابت ماندن تنش کل در طول فرآیند تراوش ناماندگار معادله دیفرانسیل در حالت دوبعدی به‌صورت معادله (۱) بیان می‌شود (آبهیلاشا و بالان[1] (۲۰۰۴) و ژئو اسلوپ[2] (۲۰۱۲)):

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right) + Q = \mathrm{m}_w \gamma_w \left(\frac{\partial h}{\partial \mathrm{t}}\right) \qquad (۱)$$

که در آن k_x و k_y= به ترتیب ضریب نفوذپذیری در جهات x و y، h= هد کل، Q= دبی، m_w= شیب تابع ذخیره آب، γ_w= وزن مخصوص آب و t= زمان.

پیش‌بینی تابع نفوذپذیری در وضعیت اشباع و نیمه اشباع

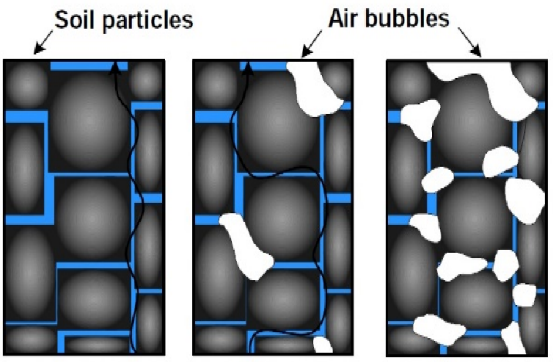
قابلیت خاک در انتقال آب در هر دو شرایط اشباع و غیراشباع به‌وسیله تابع هدایت هیدرولیکی بیان می‌شود. در یک خاک اشباع تمامی حفرات میان ذرات خاک به‌وسیله آب پرشده است. هنگامی‌که فشار هوا از مقدار معینی عبور نماید، هوا در داخل حفرات رفته و منافذ از هوا پر شده تبدیل به مجاری غیر هادی جریان می‌شود. درنتیجه، پیچ‌وخم مسیر جریان (همان‌گونه که در شکل (۱) به‌صورت شماتیک نشان داده شده است) افزایش می‌یابد. درنتیجه قابلیت و توانایی خاک در انتقال آب کاهش می‌یابد.

[1] Abhilasha & Balan

[2] Geo slope

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]



شکل (۱): نمایش حباب‌های هوا در ذرات خاک (ژئو اسلوپ، ۲۰۱۲)

با افزایش میزان آب در خاک ضریب نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. هنگامی‌که خاک اشباع می‌شود ضریب نفوذپذیری خاک به بیشینه خود می‌رسد؛ بنابراین نفوذپذیری در خاک غیراشباع با افزایش درجه اشباع افزایش می‌یابد و رابطه بین نفوذپذیری و درجه اشباع که رابطه‌ای مستقیم است رابطه‌ای غیرخطی است. با معرفی تابع رطوبت حجمی در نرم‌افزار Seep/w نرم‌افزار رابطه بین نفوذپذیری و درجه اشباع را محاسبه می‌کند.

ون ژنشتین [1] یک معادله شامل ۴ پارامتر را به‌عنوان یک روش حل بسته به‌منظور پیش‌بینی تابع رطوبت حجمی پیشنهاد کرد.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1+(\frac{\Psi}{a})^n]^m} \quad (۲)$$

که در آن θ_w= رطوبت حجمی آب، θ_r= رطوبت حجمی باقی‌مانده، θ_s= رطوبت اشباع، Ψ= فشار آب حفره‌ای منفی، a، m و n= پارامترهای برازش منحنی (قاسم‌زاده (۱۳۸۹) و ژئو اسلوپ (۲۰۱۲)) که مقادیر آن‌ها در این پژوهش بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده در مقالات مختلف انتخاب می‌شوند. علت استفاده از معادله ون‌ژنشتین کارهای آزمایشگاهی صورت گرفته در مقالات و مراجع معتبر و ارائه پارامترهای موردنیاز این معادله برای انواع مصالح مختلف در این مراجع بوده است.

معرفی مطالعه موردی

سد موردمطالعه در این پژوهش سد خاکی گولک است که حوزه آبریز مربوط به آن در شمال ایران در محدوده‌ای بین ′۴۵ °۴۹ تا ′۰۶ °۵۰ طول شرقی و ′۳۷ °۳۶ تا ′۵۳ °۳۶ عرض شمالی در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز واقع شده است و ازنظر تقسیمات کشوری به استان گیلان تعلق دارد. شکل (۲) موقعیت عمومی و راه‌های دسترسی به سد را نشان می دهد.

در این پژوهش برای آنالیزهای تراوش ماندگار و ناماندگار از برنامه Seep/w و برای تحلیل پایداری از برنامه Slope/w استفاده شده است که پارامترهای ورودی نرم‌افزار در جداول (۱) و (۲) و شکل (۳) آورده شده است. با توجه به گزارش ارائه‌شده توسط مهندسین مشاور نسبت نفوذپذیری افقی به قائم K_x/K_y برابر ۴ در نظرگرفته شده است.



شکل (۲): موقعیت عمومی و راه‌های دسترسی سد (مهندسین مشاور کمنداب، ۱۳۸۹)

جدول (۱): مقادیر نفوذپذیری اشباع برای قسمت‌های مختلف سد (مهندسین مشاور کمنداب، ۱۳۸۹)

نوع مصالح	ضریب نفوذپذیری اشباع $K_x(sat)$ (m/s)
هسته رسی	$۲/۵\times۱۰^{-۸}$
پوسته	$۲/۵\times۱۰^{-۶}$
فیلترها	۱×۱۰^{-۷}
زهکش‌ها	۱×۱۰^{-۳}
پی آبرفتی	۱×۱۰^{-۴}

احجام قسمت‌های مختلف سد عبارت‌اند از: پوسته (درشت دانه) ۷۰۰۰۰۰ مترمکعب، فیلتر و زهکش ۵۰۰۰۰ مترمکعب و هسته رسی ۱۰۰۰۰۰ مترمکعب (مهندسین مشاور کمنداب، ۱۳۸۹).

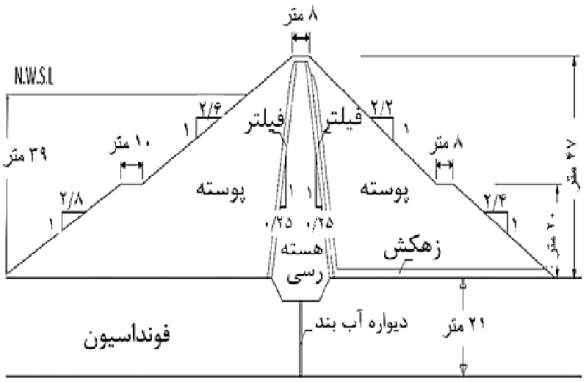
[1] Van Genuchten

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

جدول(۲): پارامترهای ژئوتکنیکی بدنه سد (مهندسین مشاور کمنداب، ۱۳۸۹)

مصالح		چسبندگی C (kN/m^۲)	زاویه اصطکاک Φ (درجه)	وزن مخصوص مرطوب (kN/m^۳)	وزن مخصوص اشباع (kN/m^۳)
هسته رسی	UU	۷۵	۴	۱۹	۲۰
	CU	۵۵	۲۱		
	CD	۳۵	۲۹		
پوسته		۳	۴۶	۲۱	۲۲/۵
فیلتر و زهکش		۰	۳۹	۲۰	۲۱
پی آبرفتی رودخانه‌ای		۷	۳۳	۲۰	۲۱

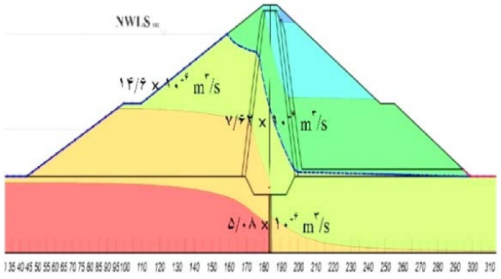


شکل (۳): مقطع عرضی سد گولک (مهندسین مشاور کمنداب، ۱۳۸۹)

مدل‌سازی و نتایج

آنالیز تراوش با فرض اشباع کامل خاک

در این قسمت سد خاکی موردمطالعه با فرض اشباع بودن کامل خاک تحت عنوان مدلی با نام SO[1] توسط نرم‌افزار Seep/w مورد تحلیل قرارگرفته و نتایج دبی عبوری از مقاطع مختلف سد در شکل (۴) ارائه شده است.



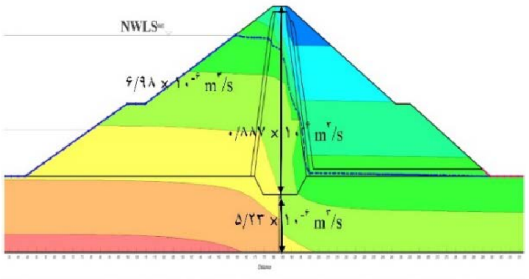
شکل (۴): نمایش مقادیر دبی عبوری از مقاطع سد و پی در مدل so

همان‌طور که در شکل (۴) مشخص است دبی عبوری از مقاطع ابتدایی، وسط سد و پی به ترتیب برابر ۱۴/۶×۱۰$^{-۶}$، ۷/۶۲×۱۰$^{-۶}$ و ۵/۰۸×۱۰$^{-۶}$ مترمکعب بر ثانیه است. در ادامه این مقادیر با حالت‌های مختلف نیمه اشباع فرض کردن خاک مقایسه خواهند شد.

آنالیز تراوش با فرض نیمه اشباع بودن خاک با استفاده از تابع خطی

در این بخش آنالیز در حالت نیمه اشباع، تحت عنوان مدلی با نام SUL[2] با استفاده از یک رابطه خطی بین فشار آب حفره‌ای و مقدار نفوذپذیری انجام شده است. رابطه بین نفوذپذیری و فشار آب حفره‌ای به این صورت است که در فشار P=۰kp نفوذپذیری برابر K_{sat} و در فشار P=-۱۰۰kp مقدار نفوذپذیری برابر K_{sat}/۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. درواقع در این حالت نفوذپذیری در بازه ۰ تا ۱۰۰- کیلو پاسکال به‌صورت خطی تغییر می‌کند و برای مقادیر فشار حفره‌ای بیشتر از صفر به‌صورت ثابت و با مقدار K_{sat} در نظر گرفته می‌شود (ژئو اسلوپ، ۲۰۱۲).

قابل‌ذکر است که در نسخه جدید برنامه Seep/w مقدار فشار منفی به‌صورت مکش وارد نرم‌افزار می‌شود، درواقع مکش ۱۰۰kp همان P=-۱۰۰kp است. دبی عبوری از مقاطع مختلف سد در این حالت در شکل (۵) ارائه شده است.



شکل (۵): نمایش مقادیر دبی عبوری از مقاطع سد و پی در مدل SUL

همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است دبی عبوری از مقاطع ابتدایی، وسط سد و پی در مدل SUL به ترتیب برابر ۶/۹۸×۱۰$^{-۶}$، ۰/۸۸۷×۱۰$^{-۶}$ و ۵/۲۳×۱۰$^{-۶}$ مترمکعب بر ثانیه است.

[1] Saturated only
[2] Saturated-unsaturated with linear function

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

آنالیز تراوش با فرض نیمه اشباع بودن خاک با استفاده از تابع غیرخطی

معمولاً آنالیزهای تراوش صورت گرفته در سدهای خاکی با فرض اشباع کامل خاک صورت گرفته است و یا نهایتاً در انجام آنالیز در حالت نیمه اشباع به همان رابطه خطی ضریب نفوذپذیری اشاره‌شده در قسمت قبل بسنده شده است؛ درصورتی‌که در واقعیت این رابطه یک رابطه خطی نیست. در این پژوهش به‌منظور ایجاد نوآوری در آنالیزها و بالا بردن دقت در آنالیزهای پایداری که در ادامه صورت می‌گیرد، به بررسی تراوش با فرض تابع نفوذپذیری و فشار آب حفره‌ای به‌صورت یک رابطه غیرخطی پرداخته شده است.

همان‌طور که اشاره شد در خاک غیراشباع حجم آب ذخیره شده در میان حفرات (رطوبت حجمی)، با توجه به مکش در میان حفرات و منافذ تغییر می‌کند و درواقع مقدار مکش همان تفاوت میان فشار هوا و فشار آب است. با معرفی رطوبت حجمی در نرم‌افزار Seep/w نرم‌افزار رابطه بین نفوذپذیری و فشار مکش را به دست می‌آورد.

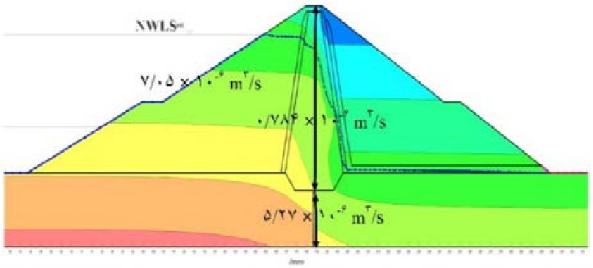
در این قسمت دو مدل تحت نام‌های SUN-L[1] و SUN-S[2] با خصوصیاتی که در ادامه بیان خواهد شد، توسط نرم‌افزار Seep/w مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در مدل SUN-L پارامترهای موردنیاز برای معادله ون ژنشتین، با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود در مقالات که برای انواع خاک ارائه شده است، به‌صورت جدول (۳) به دست آمده‌اند. در مقالات ارائه‌شده توسط ژنگ در سال ۲۰۱۲ و یانگ و یو در سال ۲۰۱۳ آزمایش‌هایی بر روی خاک با دانه‌بندی‌های مختلف انجام شده و درنهایت پارامترهای معادله ون‌ژنشتین استخراج شده است که با توجه به دانه‌بندی قسمت‌های مختلف سد موردمطالعه از این پارامترها استفاده شده است. قابل ذکراست که نتایج ارائه‌شده در این مقالات به یکدیگر نزدیک بوده و در صورت وجود اخلاف جزئی، پارامتر موردنظر به‌صورت میانگین دو مقدار ارائه‌شده است. برای فیلترها و زهکش‌ها نیز از مدل خطی اشاره‌شده در قسمت قبل استفاده شده است.

جدول (۳): پارامترهای معادله ون ژنشتین (ژنگ[3] (۲۰۱۲) و یانگ و یو[4] (۲۰۱۳))

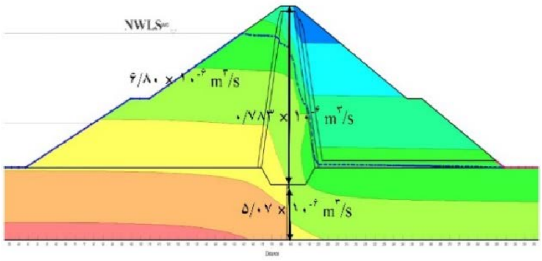
پارامتر / نوع مصالح	a(Kpa)	n	m
مصالح ریزدانه هسته (رس)	۱۵	۶	۰/۸۳
مصالح درشت‌دانه پوسته	۲	۱/۶۵	۰/۳۹

از طرف دیگر، در مدل SUN-S با واردکردن نوع خاک (شن، ماسه، رس و...) نرم‌افزار تابع رطوبت حجمی و همچنین تابع نفوذپذیری را تخمین میزند. درواقع تفاوت این مدل با مدل SUN-L این است که در مدل SUN-S نیازی به وارد کردن پارامترهای معادله ون‌ژنشتین نیست و فقط با انتخاب نوع مصالح، نرم‌افزار تابع رطوبت حجمی و درنهایت تابع نفوذپذیری را تخمین می‌زند. در ادامه نتایج حاصل از دو مدل در ادامه آورده شده است. مقادیر دبی عبوری از مقاطع مختلف سد برای مدل SUN-L در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): مقادیر دبی عبوری از مقاطع سد و پی در مدل SUN-L

همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است، دبی عبوری از مقاطع ابتدایی، وسط سد و پی در مدل SUN-L به ترتیب برابر ۷/۰۵×۱۰⁻⁶، ۰/۷۸۴×۱۰⁻⁶ و ۵/۲۷×۱۰⁻⁶ مترمکعب بر ثانیه است.



شکل (۷): مقادیر دبی عبوری از مقاطع سد و پی در مدل SUN-S

[1] Saturated-unsaturated with none-linear function calculated by laboratory results
[2] Saturated-unsaturated with none-linear function calculated by seep software
[3] Zeng
[4] Yang & You

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

دبی عبوری از مقاطع ابتدایی، وسط سد و پی در مدل SUN-S نیز به ترتیب برابر $۶/۸۰\times۱۰^{-۶}$، $۰/۷۸۳\times۱۰^{-۶}$ و $۵/۰۷\times۱۰^{-۶}$ مترمکعب بر ثانیه به دست آمد که این نتایج در شکل (۷) ارائه شده است. همان‌طور که در ادامه نیز اشاره خواهد شد نتایج دو مدل SUN-L و SUN-S به‌خصوص در مقدار دبی عبوری از مقطع میانی سد، بسیار نزدیک به هم است.

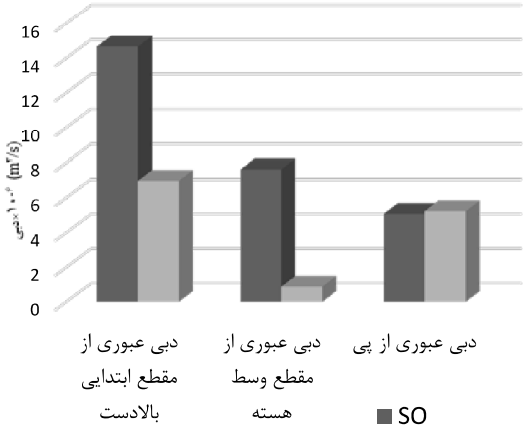
مقایسه و بحث در مورد نتایج مدل‌های آنالیز شده

در بخش‌های قبل چهار مدل مختلف توسط نرم‌افزار ساخته شد و نتایج و خروجی‌های هر مدل نیز ارائه شد. در این قسمت به‌منظور بیان اهمیت آنالیز تراوش در حالت نیمه اشباع مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و نتایج و اختلاف در خروجی‌های مدل‌ها بیان شده است.

مقادیر دبی عبوری از مقاطع مختلف سد در دو مدل SO (مدل‌سازی با فرض اشباع کامل خاک) و SUL (مدل‌سازی در حالت نیمه اشباع با تابع خطی) در نمودار شکل (۸) باهم مقایسه شده است.

جدول (۴): مقایسه مقادیر دبی ($m^3/s\times۱۰^{-۶}$) در دو مدل SO و SUL

مدل	SO	SUL	اختلاف
مقطع ابتدایی سد در بالادست	۱۴/۶۶	۶/۹۸	۷/۶۸
مقطع وسط هسته	۷/۶۲	۰/۸۸۷	۶/۷۳۳
وسط پی	۵/۰۸	۵/۲۳	۰/۱۵



شکل (۸): مقایسه دبی در دو مدلSO و SUL

بر اساس نمودار شکل (۸) دبی عبوری از مقطع ابتدایی در بالادست سد در مدل SO برابر $۱۴/۶۶\times۱۰^{-۶}$ مترمکعب بر ثانیه است؛ درصورتی‌که این مقدار در مدل SUL برابر $۶/۹۸\times۱۰^{-۶}$ مترمکعب بر ثانیه است و این به این معنی است که در صورتی‌که سد خاکی با فرض ساده کننده اشباع کامل خاک مدل‌سازی شود، دبی عبوری از این مقطع سد در حدود ۱۱۰ درصد بیشتر از مقدار واقعی‌تر دبی یعنی نسبت به حالت مدل سازی خاک به صورت نیمه اشباع و با تابع خطی نفوذپذیری به دست می‌آید.

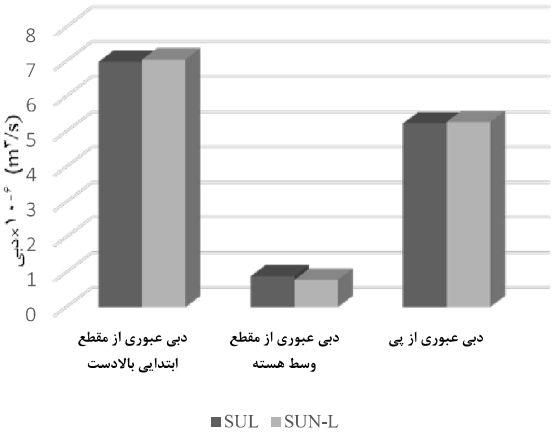
اوج اختلاف در دبی عبوری از مقطع وسط هسته است؛ جایی که اگر خاک به‌صورت اشباع کامل مدل‌سازی شود این مقدار حدود ۹ برابر بیشتر از حالت نیمه اشباع به دست می‌آید و این اختلاف‌ها به‌قدری زیاد است که نمی‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. جدول (۴) نیز بیان‌کننده‌ی همین امر است. در قسمت‌های بعدی نیز به بررسی تأثیر این اختلاف‌ها بر مقدار ضریب اطمینان پرداخته می‌شود.

پس‌ازاینکه با مقایسه دو مدل مختلف (یکی با فرض اشباع کامل خاک و دیگری نیمه اشباع فرض کردن خاک با تابع خطی نفوذپذیری)، اهمیت بالای آنالیز نیمه اشباع سدهای خاکی نشان داده شد. با ایجاد دو مدل SUN-L و SUN-S برای بالا بردن هرچه بیشتر دقت، آنالیز با استفاده از توابع غیرخطی انجام شد و در ادامه نتایج یکی از این مدل‌ها با مدل خطی مقایسه می‌شود. قابل‌ذکر است که چون نتایج دو مدل SUN-L و SUN-S بسیار شبیه به هم است فقط در مورد یکی از آن‌ها بحث می‌شود.

مقادیر دبی عبوری از مقاطع مختلف سد در دو مدل SUL (مدل‌سازی با فرض نیمه اشباع و تابع خطی نفوذپذیری) و SUN-L (مدل‌سازی در حالت نیمه اشباع با تابع غیرخطی) در نمودار شکل (۹) و جدول (۵) باهم مقایسه شده است.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]



شکل (۹): مقایسه دبی در دو مدل SUL و SUN-L

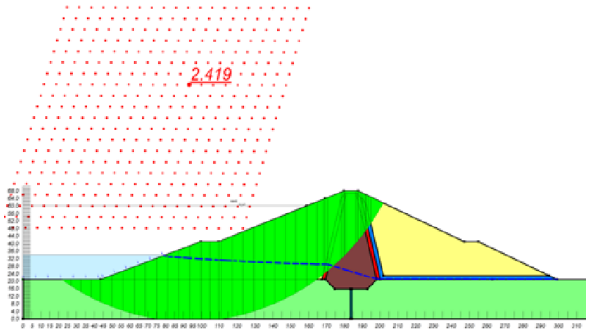
با توجه به نتایج حاصله از نمودار شکل (۹) و جدول (۵) می‌توان با انتخاب یک تابع غیرخطی برای نفوذپذیری، دقت محاسبات را تا حدودی بیشتر کرد؛ مثلا اختلاف ۰/۱۰۳ مربوط به دبی مقطع وسط هسته بدان معنا است که می‌توان با انتخاب یک تابع غیرخطی برای نفوذپذیری دقت آنالیزها را تا حدود ۱۳ درصد افزایش داد.

با توجه به اینکه بررسی و مقایسه خط فریاتیک موضوع اصلی این پژوهش نیست و در این پژوهش بیشتر به مقایسه دبی‌های عبوری از مقاطع مختلف سد پرداخته شده است، ولی به‌طورکلی با توجه به این‌که ضریب نفوذپذیری و خط فریاتیک در مدل‌های شکل‌های (۵) و (۶) وابسته به مقدار فشار آب حفره‌ای در نواحی مختلف سد است؛ بنابراین این امر موجب می‌شود که خط فریاتیک جریان، متفاوت با شکل (۴) که فقط از مقادیر نفوذپذیری اشباع استفاده شده است باشد.

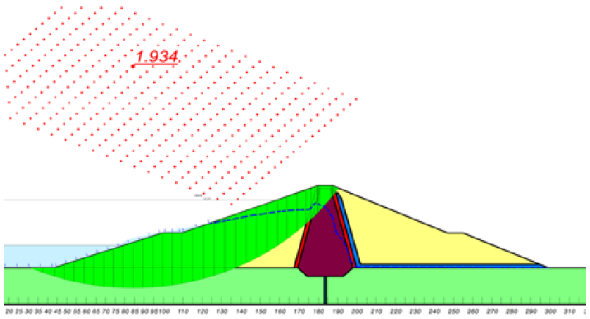
برای مثال در شکل‌های (۵) و (۶) خط فریاتیک در قسمت‌هایی از بدنه سد به‌صورت افقی تغییر می‌کند که در شکل (۴) این‌گونه نیست.

تأثیر مدل‌سازی با فرض اشباع کامل خاک بر ضریب اطمینان پایداری سد

در بخش‌های قبلی، تأثیر اشباع فرض کردن خاک بر نتایج آنالیزهای تراوش و میزان دبی‌های عبوری از مقاطع مختلف سد مورد بررسی قرار گرفت. حال در این قسمت به بررسی تأثیر این فرض بر ضریب اطمینان پرداخته می‌شود. برای این منظور آنالیز پایداری برای دو مدل SO (اشباع فرض کردن خاک) و SUN-L (نیمه اشباع فرض کردن خاک) در حالت افت مخزن انجام گرفته و ضرایب اطمینان حاصل از دو مدل باهم مقایسه می‌شود. در اینجا فرض می‌شود که مخزن با سرعت ۰/۷۵ متر در روز و از تراز ۳۹ متر به ۱۳ متر افت می‌کند. قابل ذکر است که در مدل‌سازی مدل‌های شکل‌های (۱۰) و (۱۱) از آنالیز ناماندگار در هنگام افت سریع مخزن استفاده شده است که این نحوه‌ی مدل‌سازی در قسمت‌های بعد توضیح داده شده است. مقایسه دو مدل در این قسمت به‌منظور نشان دادن اهمیت آنالیز سد در حالت نیمه اشباع انجام شده است. نتایج حاصل از دو مدل در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است.



شکل (۱۰): نمایش ضریب اطمینان در مدل SO در حالت افت مخزن



شکل (۱۱): نمایش ضریب اطمینان در مدل SUN-L در حالت افت مخزن

با توجه به شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ضریب اطمینان در مدل SO برابر ۲/۴۱ به دست می‌آید؛ درحالی‌که این مقدار در مدل SUN-L برابر ۱/۹۳ است. این به آن معنی است که درصورتی‌که سد خاکی با فرض اشباع کامل خاک مدل‌سازی شود، ضریب اطمینان در حالت افت مخزن حدود ۲۵ درصد نسبت به زمانی که به‌صورت نیمه اشباع مدل‌سازی شود اختلاف خواهد داشت و این اختلاف زیاد اهمیت دقت در آنالیزهای تراوش را برای تحلیل دقیق‌تر پایداری سد نشان می‌دهد. درنهایت می‌توان گفت، علت این اختلاف در مقادیر ضریب اطمینان این است که خاک در حالت نیمه اشباع دارای

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]
[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

نفوذپذیری کمتری نسبت به حالت اشباع کامل است و این باعث می‌شود که خط فریاتیک و فشار آب حفره‌ای درون سد با سرعت کمتری افت کند و بنابراین باعث ایجاد حالت بحرانی‌تری نسبت به حالت اشباع کامل خاک می‌شود.

بررسی تأثیر لحاظ نکردن زمان در آنالیز افت سریع مخزن

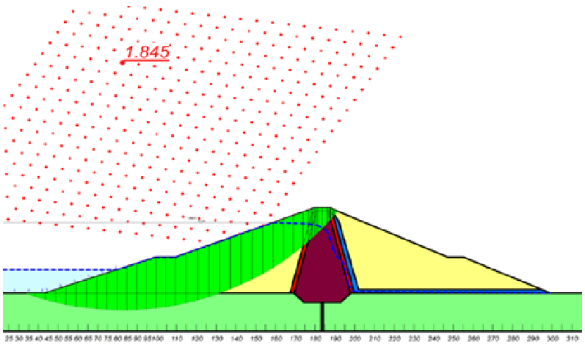
در طول افت سریع مخزن نیروی پایدارکننده آب در بالادست سد از بین می‌رود، درصورتی‌که فشار آب حفره‌ای درون سد برای مدتی باقی می‌ماند و این منجر به کاهش پایداری سد می‌شود. در تحلیل پایداری بدنه سدهای خاکی در حالت افت مخزن، معمولاً پدیده افت مخزن به‌صورت یک فرآیند که در طول زمان اتفاق می‌افتد مدل‌سازی نشده و فرض بر این بوده که افت مخزن در یک‌لحظه رخ می‌دهد. درصورتی‌که افت مخزن فرآیندی است که در طول زمان رخ می‌دهد. لحاظ نکردن زمان در آنالیز افت مخزن منجر می‌شود که نتایج حاصل اندکی دور از واقعیت باشد. همچنین در این نوع آنالیز خواص هیدرولیکی مصالح نیز بر نتایج آنالیز بی‌اثر است.

برای حل مشکل فوق در انجام آنالیز پایداری در هنگام افت مخزن به‌منظور جلوگیری از وارد شدن شوک به مدل، با انجام آنالیز ناماندگار که افت مخزن به‌صورت فرآیندی وابسته به زمان مدل‌سازی می‌شود و با انتخاب این مدل به‌عنوان شرایط مرزی در تحلیل پایداری بدنه سد در حالت افت مخزن ضریب اطمینان برای پایداری سد در این حالت حاصل می‌شود. در واقع ابتدا به کمک نرم‌افزار Seep/w آنالیز ناماندگار سد با معرفی شرایط اولیه به‌صورت توابع وابسته به زمان انجام می‌گیرد و با توجه به قابلیت جدید نرم‌افزار GeoStudio با هم‌زمان کردن آنالیز ناماندگار تراوش که در Seep/w انجام می‌گیرد با آنالیز پایداری در برنامه Slope/w، تحلیل پایداری سد در زمان‌های مختلف افت انجام می‌شود و این ترتیب ضرایب اطمینان در شرایطی واقعی‌تر به دست می‌آیند.

در ادامه این بخش به‌منظور بیان اهمیت انجام آنالیز وابسته به زمان در هنگام افت مخزن در یک سد خاکی دو مدل با شرایط: ۱ـ بدون در نظر گرفتن زمان و فرض افت مخزن در یک‌لحظه و ۲ـ مدل‌سازی افت به‌صورت فرآیندی وابسته به زمان با انجام آنالیز ناماندگار، توسط نرم‌افزار ایجاد و نتایج هردو مدل با یکدیگر مقایسه خواهد شد. قابل‌ذکر است که افت مخزن از تراز ۶۰ متر تا ۳۴ متر صورت گرفته است.

بررسی پایداری بدون در نظر گرفتن زمان و فرض افت آنی مخزن

برای مدل‌سازی افت مخزن در این نوع مدل‌سازی باید موقعیت خط فریاتیک توسط کاربر از تراز اولیه به تراز افت شده انتقال یابد که در اینجا از ۶۰ متر به ۳۴ متر است. البته موقعیت خط فریاتیک درون سد بدون تغییر می‌ماند و فقط تراز آب خارج از سد تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱۲) مشخص است ضریب اطمینان در صورت وارد نکردن بعد زمان در طول فرآیند افت مخزن، ۱/۸۴ به دست می‌آید.



شکل (۱۲): ضریب اطمینان و موقعیت خط فریاتیک پس از افت و با فرض افت آنی مخزن

بررسی پایداری با لحاظ کردن زمان و انجام آنالیز ناماندگار

روش دقیق‌تر آنالیز تخلیه مخزن به این صورت است که از نتایج آنالیز ناماندگار تراوش انجام‌شده در برنامه Seep/w استفاده شود. در این روش برخلاف روش قبلی از مقادیر دقیق فشار آب حفره‌ای در طول فرآیند افت مخزن استفاده می‌شود. مزیت دیگر این روش آن است که در این روش می‌توان ضرایب اطمینان را در زمان‌های مختلف افت محاسبه کرد. در اینجا فرض می‌شود که مخزن با سرعت ۰/۷۵ متر در روز و از تراز ۳۹ متر به ۱۳ متر افت می‌کند.

پس از انجام آنالیز ناماندگار تراوش در برنامه Seep/w و ارتباط آن به آنالیز پایداری که در برنامه Slope/w انجام می‌شود، ضریب اطمینان به دست می‌آید. شکل (۱۰) که در واقع همان نتایج مدل SUN-L ارائه‌شده در قسمت‌های قبلی است، مقدار ضریب اطمینان و همچنین موقعیت خط فریاتیک در حالت لحاظ کردن زمان و استفاده از آنالیز ناماندگار را نشان می‌دهد که مقدار ضریب اطمینان در این وضعیت برابر ۱/۹۳

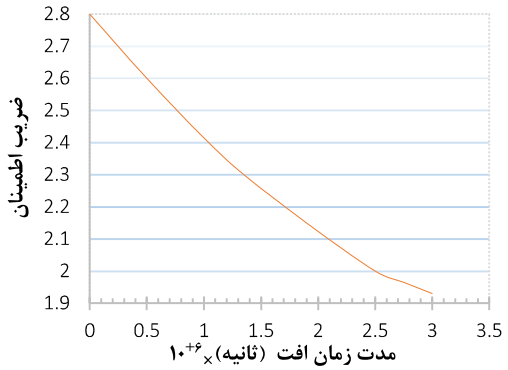
[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

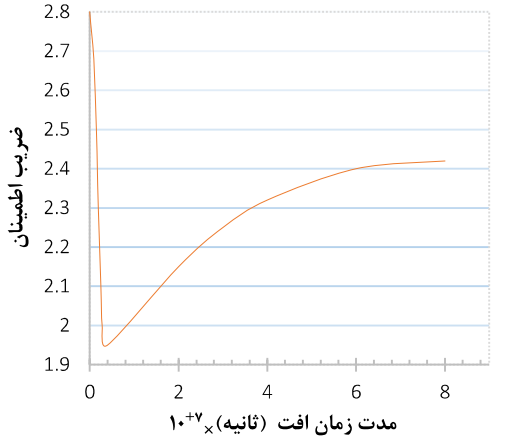
است. شایان ذکر است که در آنالیز تراوش صورت گرفته در این حالت از مدل غیرخطی SUN-L استفاده شده است.

واضح است که برخلاف حالت قبلی که خط فریاتیک درون سد در پایان افت بدون تغییر باقی مانده بود، در این نوع مدل‌سازی با گذر زمان خط فریاتیک نیز پایین می‌آید و این باعث کاهش فشار آب حفره‌ای در طی زمان و درنتیجه تغییر در مقدار ضریب اطمینان می‌شود. از دیگر مزیت‌های این نوع آنالیز این است که می‌توان ضریب اطمینان را در زمان‌های مختلف افت محاسبه کرد.

نمودارهای شکل (۱۳) و (۱۴) مقدار تغییر ضریب اطمینان تا پایان افت و نیز مدت زیادی پس از افت مخزن را نشان می‌دهند.



شکل (۱۳): مقدار تغییر ضریب اطمینان در طول زمان افت مخزن



شکل (۱۴): مقدار تغییر ضریب اطمینان در طول زمان افت مخزن و مدت طولانی پس از افت

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۳) مشخص است ضریب اطمینان با گذشت زمان کاهش می‌یابد و این مقدار از حدود ۲/۷ از آغاز فرآیند افت تا ۱/۹ در زمان پایان افت تغییر می‌کند. همچنین اگر آنالیزها برای مدت زیادی پس از پایان افت مخزن ادامه داده شوند، نمودار تغییرات ضریب اطمینان با گذشت زمان مانند نمودار شکل (۱۴) خواهد بود. با توجه به این نمودار ضریب اطمینان تا زمانی که افت مخزن در جریان است روندی نزولی دارد ولی پس از پایان یافتن افت مخزن، به‌تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه پس از مدت نسبتاً طولانی به مقدار ثابتی می‌رسد. علت این اتفاق این است که پس از پایان افت، مدت‌زمانی طول می‌کشد تا خط فریاتیک درون سد به پایین‌ترین سطح خود برسد و مقدار فشار آب حفره‌ای نیز ثابت شود و درنتیجه آنالیز از حالت ناماندگار به ماندگار تبدیل شده و ضریب اطمینان ثابت شود.

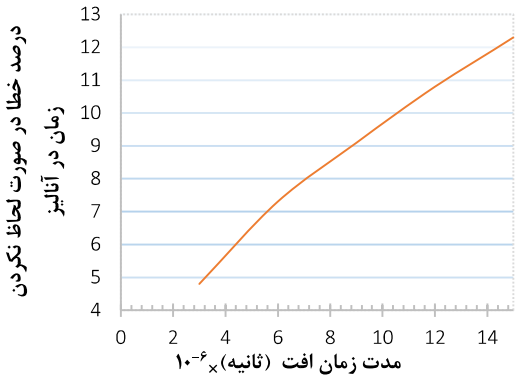
به‌طورکلی و با توجه به نتایج شکل‌های (۱۱) و (۱۲) درصورتی که پدیده افت مخزن به‌صورت یک فرآیند وابسته به زمان مدل‌سازی نشود، ضریب اطمینان با خطای حدود ۴/۸ درصد نسبت به حالت واقعی‌تر یعنی زمانی که افت مخزن با کمک آنالیز ناماندگار انجام می‌گیرد به دست می‌آید؛ اما نکته حائز اهمیت این است که این اختلاف با مدت‌زمان افت مخزن چه رابطه‌ای دارد و یا به عبارت دیگر، سرعت افت مخزن چگونه بر میزان این اختلاف تأثیر می‌گذارد.

برای پاسخ به این سؤالات، آنالیز با سرعت‌های مختلف برای افت مخزن صورت گرفته و نتایج به‌صورت نمودار شکل (۱۵) ارائه شده است.

همان‌طور که در نمودار شکل (۱۵) مشخص است با کاهش سرعت افت درصد خطای مدل‌سازی بدون لحاظ کردن زمان افزایش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در صورتی که پدیده افت مخزن به‌صورت فرآیند وابسته به زمان مدل‌سازی نشود، هرچه مخزن با سرعت کمتری افت کند خطای ایجادشده در مقدار ضریب اطمینان بیشتر می‌شود و تا حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که چون در آنالیز بدون لحاظ کردن زمان، خط فریاتیک درون سد بدون تغییر می‌ماند و از طرفی دیگر و با توجه به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد در حین افت خط فریاتیک با گذشت زمان پایین می‌آید و بنابراین هرچه مدت‌زمان افت بیشتر باشد، موقعیت خط فریاتیک بیشتر تغییر می‌کند و اختلاف آن با وضعیت ثابت فرض شده در آنالیز بیشتر می‌شود و درنتیجه مقدار ضریب اطمینان افزایش یافته و درصد خطای این‌گونه مدل‌سازی بیشتر می‌شود.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]



شکل (۱۵): درصد خطای مدل‌سازی بدون درنظر گرفتن بعد زمان در آنالیزها در مدت زمان‌های مختلف افت مخزن

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر خطاهای ایجاد شده در اثر برخی از فرض‌های ساده کننده در تحلیل سدهای خاکی مانند فرض اشباع کامل خاک و همچنین لحاظ نکردن زمان در آنالیز پایداری در طول فرآیند افت سریع مخزن پرداخته شد.

در بخش آنالیزهای تراوش چهار مدل با شرایط اشباع کامل خاک، نیمه اشباع با تابع نفوذپذیری خطی، نیمه اشباع با تابع غیرخطی نفوذپذیری و پارامترهای حاصل از نتایج آزمایشگاهی برای معادله ون‌ژنشتین و نیمه اشباع با تابع غیرخطی نفوذپذیری و تخمین تابع توسط نرم‌افزار و بر اساس نوع مصالح ایجاد شد و نتایج حاصل از آن‌ها با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به نتایج حاصل، درصورتی‌که سد خاکی با فرض ساده کننده اشباع کامل خاک مدل‌سازی شود، دبی عبوری از مقطع ابتدایی سد در حدود ۱۱۰ درصد بیشتر از مقدار واقعی‌تر دبی یعنی نسبت به حالت مدل‌سازی خاک به‌صورت نیمه اشباع و با تابع خطی نفوذپذیری به دست می‌آید. همچنین اگر خاک به‌صورت اشباع کامل مدل‌سازی شود مقدار دبی عبوری از مقطع وسط سد حدود ۹ برابر بیشتر از حالت نیمه اشباع به دست می‌آید و این اختلاف‌ها به‌قدری زیاد است که نمی‌توان از آن‌ها چشم‌پوشی کرد. در ادامه نشان داده شد که می‌توان با انتخاب یک تابع غیرخطی برای نفوذپذیری، دقت محاسبات را تا حدودی بیشتر کرد؛ مثلاً اختلاف ۰/۱۰۳ مربوط به دبی مقطع وسط هسته به این معنی است که با انتخاب تابع غیرخطی برای نفوذپذیری دقت آنالیزها تا حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد. در ادامه به بررسی تأثیر مدل‌سازی با فرض اشباع کامل خاک بر ضریب اطمینان پایداری سد پرداخته شد و این نتیجه حاصل شد که درصورتی‌که سد خاکی با فرض اشباع کامل خاک مدل‌سازی شود، ضریب اطمینان در حالت افت مخزن حدود ۲۵ درصد نسبت به زمانی که به‌صورت نیمه اشباع مدل‌سازی شود اختلاف خواهد داشت و این اختلاف زیاد اهمیت دقت در آنالیزهای تراوش را برای تحلیل دقیق‌تر پایداری سد نشان می‌دهد.

به‌منظور بیان اهمیت انجام آنالیز وابسته به زمان در هنگام افت مخزن در یک سد خاکی دو مدل با شرایط: ۱ـ بدون در نظر گرفتن زمان و فرض افت مخزن در یک‌لحظه و ۲ـ مدل‌سازی افت به‌صورت فرآیندی وابسته به زمان با انجام آنالیز ناماندگار، توسط نرم‌افزار ایجاد و نتایج هردو مدل با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که درصورتی که پدیده افت مخزن به‌صورت یک فرآیند وابسته به زمان مدل‌سازی نشود، ضریب اطمینان با خطای حدود ۴/۸ درصد نسبت به حالت واقعی‌تر یعنی زمانی که افت مخزن با کمک آنالیز ناماندگار انجام می‌گیرد به دست می‌آید و هرچه مخزن با سرعت کمتری افت کند این خطای ایجادشده در مقدار ضریب اطمینان بیشتر شده و تا حدود ۱۳ درصد افزایش می‌یابد. با توجه به نمودار شکل (۱۳) ضریب اطمینان با گذشت زمان کاهش می‌یابد و این مقدار از حدود ۲/۷ از آغاز فرآیند افت تا ۱/۹ در زمان پایان افت تغییر می‌کند و اگر آنالیزها برای مدت زیادی پس از پایان افت مخزن ادامه داده شوند (شکل (۱۴))، ضریب اطمینان تا زمانی که افت مخزن در جریان است روندی نزولی دارد ولی پس از پایان یافتن افت مخزن، به‌تدریج افزایش می‌یابد تا اینکه پس از مدت نسبتاً طولانی به مقدار ثابتی می‌رسد. قابل ذکر است که نتایج این کار پژوهشی در چهارچوب مطالعه موردی انجام شده اعتبار دارد و با تغییر ارتفاع سد، معماری داخلی بدنه سد و خواص مصالح آن امکان تغییر وجود دارد.

مراجع

۱- قاسم‌زاده، ح. (۱۳۸۹). "تراوش در خاک‌های اشباع و غیراشباع". تهران: انتشارات دانشگاه خواجه نصیر طوسی.

۲- مهندسان مشاور کمند آب. (۱۳۸۹). "گزارش سیمای طرح مرحله اول سد مخزنی گولک."

۳- وفاییان، م. (۱۳۹۱). "سدهای خاکی". اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان.

4- Abhilasha, M. and Balan, T. (2014). "Numerical analysis of seepage in embankment

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

12- Krahn, J. (2004). "Stability modeling with Slope/W." canada: First edition, University Of Alberta, cargary.

13- Kanchana, H. J. and Prasanna, H. S. (2015). "Adequacy of seepage analysis in core section of the earthen dam with different mix proportions." *Aquatic procedia*. 4(1), 868-875.

14- Kratochvil, J. (2004). "Numerical modeling of non stationary free surface flow in embankmet dams." *Brono University of technology*. 1(1), 1-15.

15- Morgenstern, N. R. and Price, V. E. (1965). "The analysis of the stability of general slip surface." *Geotechnique*. 15(4), 289–290.

16- Nourani, V., Aminfar, M. H., Alami, M. T., Sharghi, E. and Singh, V. "Unsteady 2-D seepage simulation using physical analog, case of Sattarkhan embankment dam." *Journal of hydrology*. 19(1), 177-189.

17- Rowe, P. W. (1991). "A Reassessment of Causes of Carsington Embankment Failure." *Géotechnique.* 41(3), 395-421.

18- Yang, X. and You, X. (2013). "Estimating Parameters of Van Genuchten Model for Soil Water Retention Curve by Intelligent Algorithms." *Applied Mathematics & Information Sciences*. 7(5), 1977–1983.

19- Zeng, Ch., wang, Q. and zhang, F. (2012). "Evaluation of hydraulic parameters obtained by different measurement methods for heterogeneous gravel soil." *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences journal*. 23(5), 585–596.

dams." *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 25(25), 13-23.

5- Aljairry, H. (2010). "2-D flow analysis through zoned earth dam using finite element approach." *Engineering and Technology Journal*. 28(21), 21-36.

6- Bishop, A. W. (1954). "The use of pore-pressure coefficients in practice." *Geotechnique*. 4(4), 148–152.

7- Borja, R. I. and White, J. A. (2010). "Continuum deformation and stability analyses of a steep hillside slope under rainfall infiltration. "*Acta Geotechtechnica journal*. 5(1), 1–14.

8- Buscarnera, G. and Whittle, A. (2012). "Constitutive modelling approach for evaluating the triggering of flow slides." *Canadian Geotechnical journal*. 49(5), 499–511.

9- Duncan, J. M. (1996). "State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes." *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering journal*. 7(7), 577–596.

10- Geo slope. (2012). "An engineering methodology of seepage modeling with Seep/W." Canada: Geo-Slope International, Ltd, Calgary.

11- Godt, J. W., Sener, B. and Lu, N. (2012). "Stability of infinite slope under infiltration conditions." *Water Resources Research journal*. 48(1), 1-15.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

Investigation of the Effect of Soil Saturation Degree and Using Transient Analyze During Rapid Drawdown on Seepage Flow and Safety Factor of Earth Fill Dams, Case Study: Gulak dam

Mehdi Komasi [1*]
Mohammadreza Godarzi [2]
Hojjatollah Yarizadeh [3]

Abstract

Assuming saturated soil only in seepage analysis and disregarding time in stability analysis of earth fill dams during rapid drawdown, may cause errors in results. In this research, Gulak earth fill dam has been studied and modeled in three different situations, i.e. saturated, saturated-unsaturated with linear and nonlinear functions. The results have shown that modeling the dam in saturated situation, not only effects on seepage results, but also causes about 25 percent error on safety factor of the dam. Moreover, it has been achieved that by using nonlinear functions for permeability and volume of water content and choosing required parameters for Van Genuchten equation from laboratory results, accuracy of analyses increases about 13 present than using a linear function. Also in stability analysis during rapid drawdown, by using a transient analyze, drawdown of the reservoir was modeled as a process depending on time and results have shown that disregarding the time in rapid drawdown of reservoir analysis, may cause about 4.8 percent error and this error would increase to 13 percent by reducing drawdown rate.

Keywords

Earth dam stability, Rapid drawdown, Transient analysis, Nonlinear permeability function, Degree of saturation.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

[DOR: 20.1001.1.23225882.1395.3.8.1.9]

1* Assistant professor of Ayatollah Borujerdi University, Iran, komasi@abru.ac.ir.
2 Assistant professor of Ayatollah Borujerdi University, Iran.
3 Master of civil Engineering, water and hydraulic structures, ayatollah Borujerdi University, Iran.
Received: 2015/12/19 Accepted: 2016/05/28