

## 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\*<sup>۱</sup>

محمد رضا گودرزی<sup>۲</sup>

حجت الله یاری زاده<sup>۳</sup>

### 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 به دست آمده بیانگر آن است که در صورتی که 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 به صورت فرآیندی وابسته به زمان مدل‌سازی شد که نتایج به دست آمده در این حالت نیز نشان‌دهنده آن است که در صورت لحاظ نکردن زمان در آنالیز افت سریع مخزن خطای ایجاد شده 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.

\*<sup>۱</sup>. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره)، komasi@abru.ac.ir.

<sup>۲</sup>. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره).

<sup>۳</sup>. دانشجوی کارشناسی ارشد، سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه آیت‌الله‌العظمی بروجردی (ره).

## 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 در صورتی که وقوع حادثه و شکست سد، نه تنها سرمایه مالی آن را از بین می‌برد بلکه تلفات جانی زیادی را در بر دارد که قابل جبران نخواهد بود.

بر اساس نتایج به دست آمده 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 فوریه<sup>۱</sup> در اس داک<sup>۲</sup>، سد براش هالو<sup>۳</sup> در کلمبیا و سد هومل کریک<sup>۴</sup> در ایالت یوتا<sup>۵</sup> از جمله سدهایی هستند که در اثر بی‌دقتی در انجام آنالیز در طول مدت بهره‌برداری گسیخته شده‌اند (راوو<sup>۶</sup>، ۱۹۹۱) و این موضوع اهمیت دقت در آنالیزهای مربوط به سدهای خاکی را نشان می‌دهد.

بیلستین<sup>۷</sup> در سال ۱۹۹۹ از مدل آزمایشگاهی برای تخمین دبی، فشار آب حفره‌ای و خط فریاتیکی استفاده کرد که امروزه این مدل‌های آزمایشگاهی به دلیل صرف وقت و هزینه زیاد، خیلی مورد استفاده 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<sup>۸</sup>، ۲۰۰۴).

کراتوچویل<sup>۹</sup> 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 فریاتیکی درون سد پرداخت و به این نتیجه رسید که از جمله 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 مؤثر است (کراتوچویل، ۲۰۰۴). آلجیری<sup>۱۰</sup> در سال ۲۰۱۰ به بررسی رفتار

سد خاکی در حالت اشباع و به صورت مدل دوبعدی به کمک نرم‌افزار انسیس<sup>۱۱</sup> پرداخت و به این نتیجه رسید که تراوش پایین دست سد وابسته به تغییرات لایه‌های نفوذناپذیر در بالادست سد است و تغییر در پارامترهای نفوذپذیری در لایه‌های بالادست موقعیت نسبی خط فریاتیکی در پایین دست سد را تحت تأثیر قرار می‌دهد (آلجیری، ۲۰۱۰). نورانی و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی تراوش در سد خاکی ستارخان به روش (MRTA<sup>۱۲</sup>) 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 به ویژه برای حالت افت مخزن است (نورانی<sup>۱۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۴). کانچانا و پراسانا<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۵) به بررسی استفاده از مصالح ترکیبی در هسته سدهای خاکی و رفتار خط فریاتیکی در پایین دست 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<sup>۱۵</sup>، ۱۹۵۴)، مورگنسترن پرایس<sup>۱۶</sup> (۱۹۶۵) و دانکن<sup>۱۷</sup> (۱۹۹۶). در واقعیت در طول زمان افت مخزن درجه اشباع در بدنه سد و در امتداد سطح لغزش به شدت متغیر است و حتی فشار منفذی می‌تواند منفی شود (گوت<sup>۱۸</sup> و همکاران، ۲۰۱۲)، بورجا و وایت<sup>۱۹</sup> (۲۰۱۰)، بوسکارانرا و وایت<sup>۲۰</sup> (۲۰۱۲)). لذا این فرض منجر به قضاوت نادرست در مورد تنش‌های مؤثر و مقاومت برشی خاک می‌شود و در نهایت ضریب اطمینان به درستی محاسبه نمی‌شود.

از جمله 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

<sup>11</sup> Ansys

<sup>12</sup> Multiple Reservoirs and Tubes Analog

<sup>13</sup> Nourani

<sup>14</sup> Kanchana & Prasanna

<sup>15</sup> Bishop

<sup>16</sup> Morgenstern-Price

<sup>17</sup> Dancan

<sup>18</sup> Godt

<sup>19</sup> Borja & White

<sup>20</sup> Buscarnera & Whittle

<sup>1</sup> Belle fourche

<sup>2</sup> S. Dak

<sup>3</sup> Brush Hollow

<sup>4</sup> Homle Creek

<sup>5</sup> Youta

<sup>6</sup> Rowe

<sup>7</sup> Billestein

<sup>8</sup> Krahn

<sup>9</sup> Kratochvil

<sup>10</sup> Aljairry

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 در نتیجه 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 به منظور جلوگیری از وارد شدن شوک به مدل، با انجام آنالیز ناماندگار، افت مخزن به صورت 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 studio 2007، استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

در این بخش به منظور 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 آب و خاک است. این قسمت به ما کمک می‌کند که در تحلیل مسائل مربوط به تراوش به کمک نرم‌افزار پارامترهای مناسب انتخاب شود.

## نفوذپذیری و نشست

هر توده خاکی از دانه‌های جامد با اندازه‌های مختلف و فضاهای خالی به هم پیوسته تشکیل شده است. فضاهای خالی به هم پیوسته 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 نشست مایعات از بین فضاهای خالی به هم پیوسته 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 دویبعدی به صورت معادله (۱) بیان می‌شود (آبهیلاشا و بالان<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) و ژئو اسلوب<sup>۲</sup> (۲۰۱۲):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (1)$$

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،  $\gamma_w$  = 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 به وسیله تابع هدایت هیدرولیکی بیان می‌شود. در یک خاک اشباع تمامی حفرات میان ذرات خاک به وسیله آب پر شده است. هنگامی که 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. در نتیجه، پیچ‌وخم مسیر جریان (همان‌گونه که در شکل (۱) به صورت شماتیک نشان داده شده است) افزایش می‌یابد. در نتیجه قابلیت و توانایی خاک در انتقال آب کاهش می‌یابد.

<sup>2</sup> Geo slope

<sup>1</sup> Abhilasha & Balan

تأثیر درجه اشباع خاک و استفاده از آنالیز ناماندگار بر ضریب اطمینان پایداری سدهای خاکی ..... ۱۵

شمالی در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه‌های البرز واقع شده است و از نظر تقسیمات کشوری به استان گیلان تعلق دارد. شکل (۲) موقعیت عمومی و راه‌های دسترسی به سد را نشان می‌دهد.

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 نظر گرفته شده است.

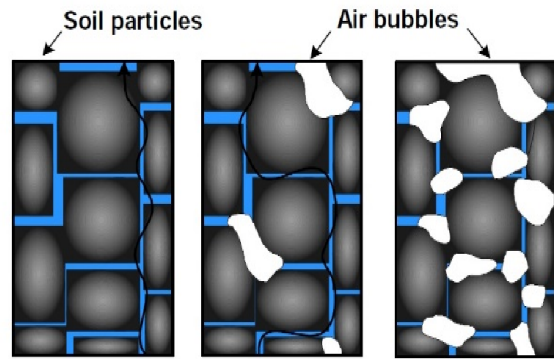


شکل (۲): موقعیت عمومی و راه‌های دسترسی سد (مهندسین مشاور کمنداب، ۱۳۸۹)

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

نوع مصالح	ضریب نفوذپذیری اشباع $K_x(\text{sat})$ (m/s)
هسته رسی	$2/5 \times 10^{-8}$
پوسته	$2/5 \times 10^{-6}$
فیلترها	$1 \times 10^{-7}$
زهکش‌ها	$1 \times 10^{-3}$
پی آبرفتی	$1 \times 10^{-4}$

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).



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

با افزایش میزان آب در خاک ضریب نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که 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<sup>۱</sup> یک معادله شامل ۴ پارامتر را به‌عنوان یک روش حل بسته به‌منظور پیش‌بینی تابع رطوبت حجمی پیشنهاد کرد.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{\psi}{a}\right)^n\right]^m} \quad (2)$$

که در آن  $\theta_w$  = رطوبت حجمی آب،  $\theta_r$  = رطوبت حجمی باقی‌مانده،  $\theta_s$  = رطوبت اشباع،  $\Psi$  = 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 ون ژنشتین 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 مورد مطالعه در این پژوهش سد خاکی گولک است که حوزه آبریز مربوط به آن در شمال ایران در محدوده‌ای بین  $49^{\circ} 45'$  تا  $50^{\circ} 06'$  طول شرقی و  $36^{\circ} 37'$  تا  $36^{\circ} 53'$  عرض

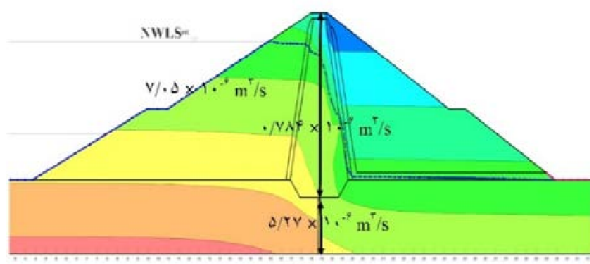
<sup>1</sup> Van Genuchten



جدول (۳): پارامترهای معادله ون ژنشتین (ژنگ<sup>۳</sup> ۲۰۱۲) و یانگ و یو<sup>۴</sup> (۲۰۱۳)

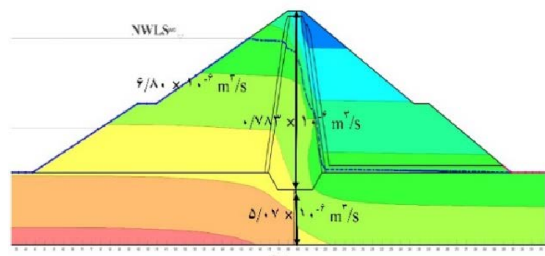
m	n	a(Kpa)	پارامتر
			نوع مصالح
۰/۸۳	۶	۱۵	مصالح ریزدانه هسته (رس)
۰/۳۹	۱/۶۵	۲	مصالح درشت‌دانه پوسته

از طرف دیگر، در مدل SUN-S با وارد کردن نوع خاک (شن، ماسه، رس و...) نرم‌افزار تابع رطوبت حجمی و همچنین تابع نفوذپذیری را تخمین می‌زند. در واقع تفاوت این مدل با مدل SUN-L این است که در مدل SUN-S نیازی به وارد کردن پارامترهای معادله ون ژنشتین نیست و فقط با انتخاب نوع مصالح، نرم‌افزار تابع رطوبت حجمی و در نهایت 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  $7/0.5 \times 10^{-6}$ ،  $0.7/0.4 \times 10^{-6}$  و  $5/27 \times 10^{-6}$  مترمکعب بر ثانیه است.



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

### 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 اشاره شده در قسمت قبل بسنده شده است؛ در صورتی که در واقعیت این رابطه یک رابطه خطی نیست. در این پژوهش به منظور 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 به صورت 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 در واقع 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-S<sup>۱</sup> و SUN-L<sup>۲</sup> 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، به صورت جدول (۳) به دست آمده‌اند. در مقالات ارائه شده توسط ژنگ در سال ۲۰۱۲ و یانگ و یو در سال ۲۰۱۳ آزمایش‌هایی بر روی خاک با دانه‌بندی‌های مختلف انجام شده و در نهایت پارامترهای معادله ون ژنشتین استخراج شده است که با توجه به دانه‌بندی قسمت‌های مختلف سد مورد مطالعه از این پارامترها استفاده شده است. قابل ذکر است که نتایج ارائه شده در این مقالات به یکدیگر نزدیک بوده و در صورت وجود اختلاف جزئی، پارامتر موردنظر به صورت میانگین دو مقدار ارائه شده است. برای فیلترها و زهکش‌ها نیز از مدل خطی اشاره شده در قسمت قبل استفاده شده است.

<sup>3</sup> Zeng

<sup>4</sup> Yang & You

<sup>1</sup> Saturated-unsaturated with none-linear function calculated by laboratory results

<sup>2</sup> Saturated-unsaturated with none-linear function calculated by seep software

بر اساس نمودار شکل (۸) دبی عبوری از مقطع ابتدایی در بالادست سد در مدل SO برابر  $۱۰^{-۶} \times ۱۴/۶۶$  مترمکعب بر ثانیه است؛ در صورتی که این مقدار در مدل SUL برابر  $۱۰^{-۶} \times ۶/۹۸$  مترمکعب بر ثانیه است و این به این معنی است که در صورتی که سد خاکی با فرض ساده کننده اشباع کامل خاک مدل سازی شود، دبی عبوری از این مقطع سد در حدود ۱۱۰ درصد بیشتر از مقدار واقعی تر دبی یعنی نسبت به حالت مدل سازی خاک به صورت نیمه اشباع و با تابع خطی نفوذپذیری به دست می آید.

اوج اختلاف در دبی عبوری از مقطع وسط هسته است؛ جایی که اگر خاک به صورت اشباع کامل مدل سازی شود این مقدار حدود ۹ برابر بیشتر از حالت نیمه اشباع به دست می آید و این اختلافها به قدری زیاد است که نمی توان از آنها چشم پوشی کرد. جدول (۴) نیز بیان کننده ی همین امر است. در قسمت های بعدی نیز به بررسی تأثیر این اختلافها بر مقدار ضریب اطمینان پرداخته می شود.

پس از اینکه 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-S و SUN-L برای بالا بردن هرچه بیشتر دقت، آنالیز با استفاده از توابع غیرخطی انجام شد و در ادامه نتایج یکی از این مدل ها با مدل خطی مقایسه می شود. قابل ذکر است که چون نتایج دو مدل SUN-S و SUN-L بسیار شبیه به هم است فقط در مورد یکی از آنها بحث می شود.

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

دبی عبوری از مقاطع ابتدایی، وسط سد و پی در مدل SUN-S نیز به ترتیب برابر  $۱۰^{-۶} \times ۶/۸۰$ ،  $۱۰^{-۶} \times ۰/۷۸۳$  و  $۱۰^{-۶} \times ۵/۰۷$  مترمکعب بر ثانیه به دست آمد که این نتایج در شکل (۷) ارائه شده است. همان طور که در ادامه نیز اشاره خواهد شد نتایج دو مدل SUN-S و SUN-L به خصوص در مقدار دبی عبوری از مقطع میانی سد، بسیار نزدیک به هم است.

#### مقایسه و بحث در مورد نتایج مدل های آنالیز شده

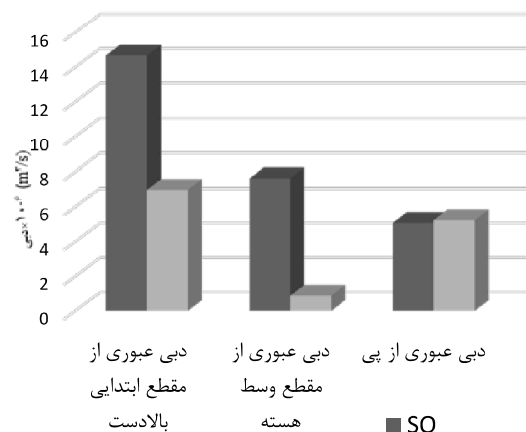
در بخش های قبل چهار مدل مختلف توسط نرم افزار ساخته شد و نتایج و خروجی های هر مدل نیز ارائه شد. در این قسمت به منظور بیان اهمیت آنالیز تراوش در حالت نیمه اشباع مدل های مختلف با یکدیگر مقایسه شده و نتایج و اختلاف در خروجی های مدل ها بیان شده است.

مقادیر دبی عبوری از مقاطع مختلف سد در دو مدل SO (مدل سازی با فرض اشباع کامل خاک) و SUL

جدول (۴): مقایسه مقادیر دبی ( $m^3/s \times 10^{-6}$ ) در دو مدل SO و SUL

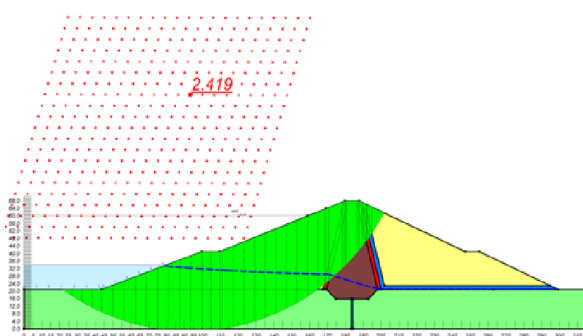
اختلاف	SUL	SO	مدل
۷/۶۸	۶/۹۸	۱۴/۶۶	مقطع ابتدایی سد در بالادست
۶/۷۳۳	۰/۸۸۷	۷/۶۲	مقطع وسط هسته
۰/۱۵	۵/۲۳	۵/۰۸	وسط پی

در حالت نیمه اشباع با تابع خطی) در نمودار شکل (۸) با هم مقایسه شده است.

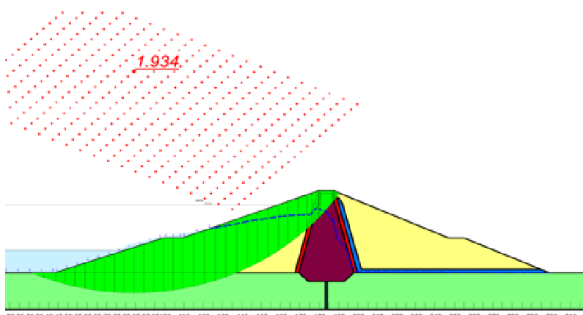


شکل (۸): مقایسه دبی در دو مدل SO و SUL

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 به منظور 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.

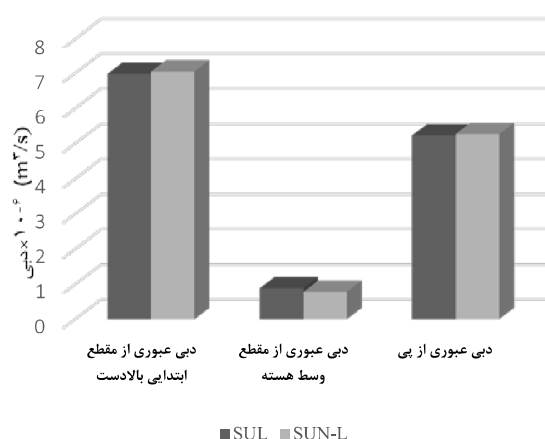


شکل (۱۰): نمایش ضریب اطمینان در مدل SO در حالت افت مخزن



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 در صورتی‌که سد خاکی با فرض اشباع کامل خاک مدل‌سازی شود، ضریب اطمینان در حالت افت مخزن حدود ۲۵ درصد نسبت به زمانی که به صورت نیمه اشباع مدل‌سازی شود اختلاف خواهد داشت و این اختلاف زیاد اهمیت دقت در آنالیزهای تراوش را برای تحلیل دقیق‌تر پایداری سد نشان می‌دهد. در نهایت می‌توان گفت، علت این اختلاف در مقادیر ضریب اطمینان این است که خاک در حالت نیمه اشباع دارای



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

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؛ مثلاً 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.

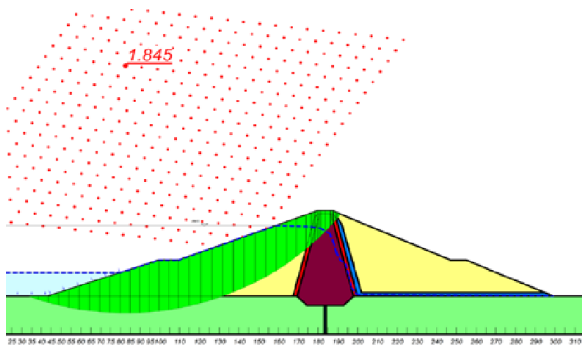
با توجه به اینکه بررسی و مقایسه خط فریاتیکی موضوع اصلی این پژوهش نیست و در این پژوهش بیشتر به مقایسه دبی‌های عبوری از مقاطع مختلف سد پرداخته شده است، ولی به طور کلی با توجه به این که ضریب نفوذپذیری و خط فریاتیکی در مدل‌های شکل‌های (۵) و (۶) وابسته به مقدار فشار آب حفره‌ای در نواحی مختلف سد است؛ بنابراین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

### بررسی پایداری بدون در نظر گرفتن زمان و فرض افت آبی مخزن

برای مدل سازی افت مخزن در این نوع مدل سازی 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 می ماند و فقط تراز آب خارج از سد تغییر می کند. همان طور که در شکل (۱۲) مشخص است ضریب اطمینان در صورت وارد نکردن بعد زمان در طول فرآیند افت مخزن،  $1/84$  به دست می آید.



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

### بررسی پایداری با لحاظ کردن زمان و انجام آنالیز ناماندگار

روش دقیق تر آنالیز تخلیه مخزن به این صورت است که از نتایج آنالیز ناماندگار تراوش انجام شده در برنامه Seep/w استفاده شود. در این روش برخلاف روش قبلی از مقادیر دقیق فشار آب حفره ای در طول فرآیند افت مخزن استفاده می شود. مزیت دیگر این روش آن است که در این روش می توان ضرایب اطمینان را در زمان های مختلف افت محاسبه کرد. در اینجا فرض می شود که مخزن با سرعت  $0/75$  متر در روز و از تراز ۳۹ متر به ۱۳ متر افت می کند.

پس از انجام آنالیز ناماندگار تراوش در برنامه Seep/w و ارتباط آن به آنالیز پایداری که در برنامه Slope/w انجام می شود، ضریب اطمینان به دست می آید. شکل (۱۰) که در واقع همان نتایج مدل SUN-L ارائه شده در قسمت های قبلی است، مقدار ضریب اطمینان و همچنین موقعیت خط فریاتیک در حالت لحاظ کردن زمان و استفاده از آنالیز ناماندگار را نشان می دهد که مقدار ضریب اطمینان در این وضعیت برابر  $1/93$

نفوذپذیری کمتری نسبت به حالت اشباع کامل است و این باعث می شود که خط فریاتیک و فشار آب حفره ای درون سد با سرعت کمتری افت کند و بنابراین باعث ایجاد حالت بحرانی تری نسبت به حالت اشباع کامل خاک می شود.

### بررسی تأثیر لحاظ نکردن زمان در آنالیز افت سریع مخزن

در طول افت سریع مخزن نیروی پایدارکننده آب در بالادست سد از بین می رود، در صورتی که فشار آب حفره ای درون سد برای مدتی باقی می ماند و این منجر به کاهش پایداری سد می شود. در تحلیل پایداری بدنه سدهای خاکی در حالت افت مخزن، معمولاً پدیده افت مخزن به صورت یک فرآیند که در طول زمان اتفاق می افتد مدل سازی نشده و فرض بر این بوده که افت مخزن در یک لحظه رخ می دهد. در صورتی که افت مخزن فرآیندی است که در طول زمان رخ می دهد. لحاظ نکردن زمان در آنالیز افت مخزن منجر می شود که نتایج حاصل اندکی دور از واقعیت باشد. همچنین در این نوع آنالیز خواص هیدرولیکی مصالح نیز بر نتایج آنالیز بی اثر است.

برای حل مشکل فوق در انجام آنالیز پایداری در هنگام افت مخزن به منظور جلوگیری از وارد شدن شوک به مدل، با انجام آنالیز ناماندگار که افت مخزن به صورت فرآیندی وابسته به زمان مدل سازی می شود و با انتخاب این مدل به عنوان شرایط مرزی در تحلیل پایداری بدنه سد در حالت افت مخزن ضریب اطمینان برای پایداری سد در این حالت حاصل می شود. در واقع ابتدا به کمک نرم افزار Seep/w آنالیز ناماندگار سد با معرفی شرایط اولیه به صورت توابع وابسته به زمان انجام می گیرد و با توجه به قابلیت جدید نرم افزار GeoStudio با هم زمان کردن آنالیز ناماندگار تراوش که در Seep/w انجام می گیرد با آنالیز پایداری در برنامه Slope/w، تحلیل پایداری سد در زمان های مختلف افت انجام می شود و این ترتیب ضرایب اطمینان در شرایطی واقعی تر به دست می آید.

در ادامه این بخش به منظور بیان اهمیت انجام آنالیز وابسته به زمان در هنگام افت مخزن در یک سد خاکی دو مدل با شرایط: ۱- بدون در نظر گرفتن زمان و فرض افت مخزن در یک لحظه و ۲- مدل سازی افت به صورت فرآیندی وابسته به زمان با انجام آنالیز ناماندگار، توسط نرم افزار ایجاد و نتایج هر دو مدل با یکدیگر مقایسه خواهد شد. قابل ذکر است که افت مخزن از تراز ۶۰ متر تا ۳۴ متر صورت گرفته است.

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، به تدریج 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 فریاتیکی درون سد به پایین‌ترین سطح خود برسد و مقدار فشار آب حفره‌ای نیز ثابت شود و در نتیجه آنالیز از حالت ناماندگار به ماندگار تبدیل شده و ضریب اطمینان ثابت شود.

به‌طور کلی و با توجه به نتایج شکل‌های (۱۱) و (۱۲) در صورتی 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.

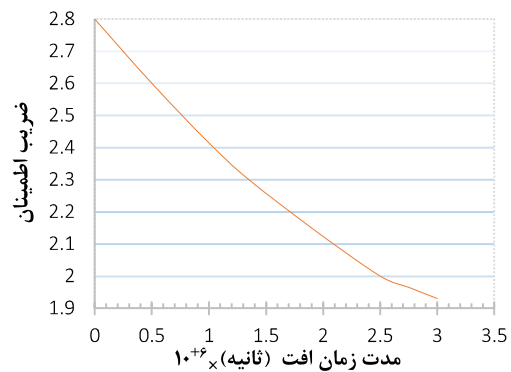
برای پاسخ به این سؤالات، آنالیز با سرعت‌های مختلف برای افت مخزن صورت گرفته و نتایج به‌صورت نمودار شکل (۱۵) ارائه شده است.

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 فریاتیکی درون سد بدون تغییر می‌ماند و از طرفی دیگر و با توجه به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد در حین افت خط فریاتیکی با گذشت زمان پایین می‌آید و بنابراین هرچه مدت‌زمان افت بیشتر باشد، موقعیت خط فریاتیکی بیشتر تغییر می‌کند و اختلاف آن با وضعیت ثابت فرض شده در آنالیز بیشتر می‌شود و در نتیجه مقدار ضریب اطمینان افزایش یافته و درصد خطای این‌گونه مدل‌سازی بیشتر می‌شود.

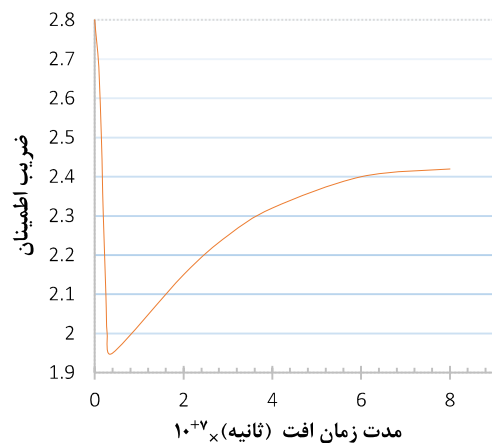
است. شایان ذکر است که در آنالیز تراوش صورت گرفته در این حالت از مدل غیرخطی SUN-L استفاده شده است.

واضح است که برخلاف حالت قبلی که خط فریاتیکی درون سد در پایان افت بدون تغییر باقی مانده بود، در این نوع مدل‌سازی با گذر زمان خط فریاتیکی نیز پایین می‌آید و این باعث کاهش فشار آب حفره‌ای در طی زمان و در نتیجه 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 مدت‌زمان 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 مدت‌زمانی زیادی پس از پایان افت مخزن ادامه داده شوند، نمودار تغییرات ضریب اطمینان با

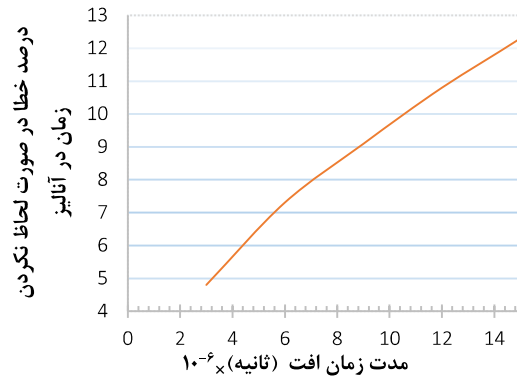
شود، ضریب اطمینان در حالت افت مخزن حدود ۲۵ درصد نسبت به زمانی که به صورت نیمه اشباع مدل سازی شود اختلاف خواهد داشت و این اختلاف زیاد اهمیت دقت در آنالیزهای تراوش را برای تحلیل دقیق تر پایداری سد نشان می دهد.

به منظور بیان اهمیت انجام آنالیز وابسته به زمان در هنگام افت مخزن در یک سد خاکی دو مدل با شرایط: ۱- بدون در نظر گرفتن زمان و فرض افت مخزن در یک لحظه و ۲- مدل سازی افت به صورت فرآیندی وابسته به زمان با انجام آنالیز ناماندار، توسط نرم افزار ایجاد و نتایج هر دو مدل با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که در صورتی که پدیده افت مخزن به صورت یک فرآیند وابسته به زمان مدل سازی نشود، ضریب اطمینان با خطای حدود ۴/۸ درصد نسبت به حالت واقعی تر یعنی زمانی که افت مخزن با کمک آنالیز ناماندار انجام می گیرد به دست می آید و هرچه مخزن با سرعت کمتری افت کند این خطای ایجاد شده در مقدار ضریب اطمینان بیشتر شده و تا حدود ۱۳ درصد افزایش می یابد. با توجه به نمودار شکل (۱۳) ضریب اطمینان با گذشت زمان کاهش می یابد و این مقدار از حدود ۲/۷ از آغاز فرآیند افت تا ۱/۹ در زمان پایان افت تغییر می کند 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، به تدریج افزایش می یابد تا اینکه پس از مدت نسبتاً طولانی به مقدار ثابتی می رسد. 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- قاسم زاده، ح. (۱۳۸۹). "تراوش در خاک های اشباع و غیر اشباع". تهران: انتشارات دانشگاه خواجه نصیر طوسی.
- ۲- مهندسان مشاور کمند آب. (۱۳۸۹). "گزارش سیمای طرح مرحله اول سد مخزنی گولک".
- ۳- وفا بیان، م. (۱۳۹۱). "سدهای خاکی". اصفهان: انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی اصفهان.

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



شکل (۱۵): درصد خطای مدل سازی بدون در نظر گرفتن بعد زمان در آنالیزها در مدت زمان های مختلف افت مخزن

### نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تأثیر خطاهای ایجاد شده در اثر برخی از فرض های 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 ون ژنشتین و نیمه اشباع با تابع غیرخطی نفوذپذیری و تخمین تابع توسط نرم افزار و بر اساس نوع مصالح ایجاد شد و نتایج حاصل از آن ها با یکدیگر مقایسه شد. با توجه به نتایج حاصل، در صورتی که سد خاکی با فرض ساده کننده اشباع کامل خاک مدل سازی شود، دبی عبوری از مقطع ابتدایی سد در حدود ۱۱۰ درصد بیشتر از مقدار واقعی تر دبی یعنی نسبت به حالت مدل سازی خاک به صورت نیمه اشباع و با تابع خطی نفوذپذیری به دست می آید. همچنین اگر خاک به صورت اشباع کامل مدل سازی شود مقدار دبی عبوری از مقطع وسط سد حدود ۹ برابر بیشتر از حالت نیمه اشباع به دست می آید و این اختلافها به قدری زیاد است که نمی توان از آن ها چشم پوشی کرد. در ادامه نشان داده شد که می توان 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 می یابد. در ادامه به بررسی تأثیر مدل سازی با فرض اشباع کامل خاک بر ضریب اطمینان پایداری سد پرداخته شد و این نتیجه حاصل شد که در صورتی که سد خاکی با فرض اشباع کامل خاک مدل سازی

- 12- Krahn, J. (2004). "Stability modeling with Slope/W." Canada: First edition, University Of Alberta, Calgary.
- 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 embankment 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 Geotechnica 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.

## 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 <sup>1\*</sup>  
Mohammadreza Godarzi <sup>2</sup>  
Hojjatollah Yarizadeh <sup>3</sup>

### 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 percent 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.

---

<sup>1\*</sup> Assistant professor of Ayatollah Borujerdi University, Iran, komasi@abru.ac.ir.

<sup>2</sup> Assistant professor of Ayatollah Borujerdi University, Iran.

<sup>3</sup> Master of civil Engineering, water and hydraulic structures, ayatollah Borujerdi University, Iran.

Received: 2015/12/19

Accepted: 2016/05/28